

## TIG kaynak parametrelerinin AISI 316L paslanmaz çeliğinin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkisi

### The effects of TIG welding parameters on the microstructure and mechanical properties of AISI 316L stainless steel

Ali YÜRÜK<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Düzce Borsa İstanbul Mesleki Teknik Anadolu Lisesi, Düzce, Türkiye.  
aliyuruk@hotmail.com

Geliş Tarihi/Received: 30.01.2022  
Kabul Tarihi/Accepted: 19.03.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 17.03.2022

doi: 10.5505/pajes.2022.43825  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada yüksek korozyon direnci nedeni ile nükleer güç santrallerinde yaygın bir şekilde kullanılan AISI 316L östenitik paslanmaz çelik, TIG kaynak yöntemi ile farklı kaynak akımlarında ve kaynak hızlarında, ilave tel kullanılmadan birleştirilmiştir. Daha sonra üretilen kaynaklı birleştirmelerin ısı girdileri hesaplanarak, numunelere makro ve mikroyapı çalışmaları, sertlik, çekme ve eğme testleri uygulanmıştır. Mikroyapı çalışmaları sonucunda kaynak metalinin östenit+çatısal ferrit ya da delta ferritten oluşan bir mikroyapıya sahip olduğu görülmüştür. Sertlik deneyleri sonucunda kaynak akımının artması ile sertliğin düştüğü gözlenirken kaynak hızının artması ile de sertliğin yükseldiği belirlenmiştir. Çekme deneyleri sonuçları ise sertlik ölçümleri ile benzerlik göstererek kaynak akımının artması ile çekme dayanımı düşerken kaynak hızının artması ile çekme dayanımı artmıştır. Yapılan 180° eğme testlerinde ise ne kep eğmelerinde ne de kök eğmelerinde herhangi bir yıtılma ya da çatlamaya rastlanmamıştır.

**Anahtar kelimeler:** TIG kaynağı, AISI 316L paslanmaz çelik, Mikroyapı, Mekanik özellikler.

#### Abstract

In this study, AISI 316L austenitic stainless steel, which is widely used in nuclear power plants due to its high corrosion resistance, is joined by TIG welding method at different welding currents and welding speeds without using additional wire. Then, the heat inputs of the produced welded joints were calculated and macro and microstructure studies, hardness, tensile and bending tests were applied to the samples. As a result of the microstructure studies, it has been observed that the weld metal has a microstructure consisting of austenite + Skeletal ferrite or delta ferrite. As a result of the hardness tests, it was observed that the hardness decreased with the increase of the welding current, and the hardness increased with the increase of the welding speed. As a result of the tensile tests, similar to the hardness measurements, the tensile strength decreased with the increase of the welding current, while the tensile strength increased with the increase in the welding speed. No tearing or cracking was observed in either the cap twists or the root bends in the 180° bending tests.

**Keywords:** TIG Welding, AISI 316L Stainless steel microstructure, Mechanical properties.

## 1 Giriş

Paslanmaz çelikler yüksek korozyon dirençleri, iyi mekanik özellikleri nedeniyle endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptirler [1]. Paslanmaz çelik türleri içinde östenitik (300 serisi) paslanmaz çelikler yüksek kaynak kabiliyeti, iyi mekanik performans ve uygun maliyet özellikleri ile endüstride en çok tercih edilen paslanmaz çelik türüdür [2]. AISI 316L paslanmaz çelik, kimyasal bileşiminin ve yüzey merkezli kübik kristal yapısının sağladığı tokluk, süneklik, yüksek korozyon direnci, şekillendirilebilme özelliği, iyi kaynak kabiliyeti ve yüksek sıcaklık dayanımı özellikleri ile nükleer güç santralleri, ısı esanjörleri, basınçlı kaplar, petrol arıtma tesisleri vb. pek çok endüstriyel alanda 300 serisi paslanmaz çelikleri içinde en çok tercih edilendir [3]-[5].

Östenitik paslanmaz çeliklerin en önemli özelliği iyi kaynak kabiliyetine sahip olmalarıdır. Bu tür çeliklerin kaynağı, korozyon ve çatlak oluşum direnci nedeniyle önemlidir [6]. Ayrıca östenitik paslanmaz çelikler kaynaklı birleştirildiğinde, ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) kaynaklı birleştirmenin korozyon direncini bozan taneler arası Cr bakımından zengin karbürlerin oluşumu nedeniyle hassas bir davranış sergiler [7]. Bu nedenle AISI 316L paslanmaz çelikte tane sınırlarında meydana gelen karbür çökmesini azaltmak

amacı ile içeriğinde bulunan karbon miktarı azaltılmıştır [3], [7].

AISI 316L paslanmaz çelik iyi kaynak kabiliyeti sayesinde MIG, TIG, elektrik nokta direnç kaynağı, lazer kaynağı gibi birçok ergitme kaynak yöntemi ile birleştirilebildiği gibi sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme kaynağı gibi katı hal kaynak yöntemleri ile de birleştirilebilmektedir. Ancak günümüz şartlarında AISI 316L paslanmaz çeliklerin kaynağında en çok kullanılan yöntem TIG kaynak yöntemidir.

TIG kaynağı, arkin ergimeyen bir tungsten elektrot ile iş parçasında meydana geldiği, kaynak bölgesinin bir asal gaz ya da karışım gaz tarafından korunduğu bir kaynak yöntemidir [8],[9]. TIG kaynağında koruyucu gaz olarak argon, helyum ya da ikisinin karışımı kullanılır. Bu kaynak yöntemi ile ilave tel kullanılarak kaynak yapılabilir gibi ilave tel kullanmadan da kaynak yapılabilir [10]. TIG kaynağında kaynak sırasında ITAB'ın mikro yapısı ve çekme dayanımı, ana malzemeye ısı girdisini etkilemesi sebebiyle kaynak akımı tarafından kontrol edilmektedir [9].

TIG kaynağı, kaynak parametrelerinin kontrolünün iyi olması sebebiyle benzer ya da farklı metallerin kaynağında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [1],[6]. TIG kaynağı, düşük ısı girdisi, dar ITAB, sıçrama oluşumunun azlığı gibi özellikleri ile başta

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

düşük karbonlu çelikler olmak üzere nikel ve nikel-bakır alaşımlı çelikler, titanyum alaşımları, bakır alaşımları, alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları vb. daha birçok metalin kaynağında kullanılmaktadır [3],[6].

TIG kaynağı düşük ısı girdisi ve dar ITAB sayesinde kaynak sonrası iyi mekanik ve mikroyapı özellikleri sağlarken düşük penetrasyon derinliği ve düşük üretkenlik gibi dezavantajlara da sahip bir kaynak yöntemidir [11],[12].

Bu çalışmada, yüksek korozyon direnci ve iyi mekanik özellikleri ile nükleer güç santrallerinin yapı bileşenleri başta olmak üzere pek çok alanda kullanılan AISI 316L paslanmaz çelik, farklı kaynak parametreleri kullanılarak otomatik TIG kaynak yöntemi ile ilave tel kullanılmadan birleştirilmiştir. İlave tel kullanılmamasının amacı ise birleştirilen numunelerin mikroyapılarında çok fazla değişiklik meydana gelmesi istenmemesi ve ayrıca AISI 316L paslanmaz çeliğin havalandırma sistemleri gibi birçok alanda ilave tel kullanılmadan birleştirilmesidir. Üretilen kaynaklı birleştirmelere ısı girdisi çalışmalarının yanı sıra makro ve mikroyapı incelemeleri de yapılmıştır. Ayrıca mekanik özellikleri belirlemek amacıyla sertlik, çekme ve eğme testleri uygulanmıştır. Daha sonra elde edilen veriler literatüründe yorumlanmıştır.

### 1.1 Literatür taraması

Malhotra ve diğ. TIG ile yeniden ergitmenin AISI 316L kaplamanın korozyon performansı üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmada, TIG ile yeniden ergitme işleminin 316L kaplamalarda korozyon direnci özelliğini iyileştirdiğini rapor etmişlerdir [13]. Heiple ve Roper, çeliğe selenyumun eklendiği bölgelerde TIG kaynağı genişliği ve derinliğinin dramatik bir şekilde arttığını belirtmişlerdir [14]. Ahmed ve diğ. TIG ve lazer kaynağı ile AISI 316 paslanmaz çeliği birleştirmişler ve birleştirmelerin kalıntı gerilmelerini incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri bu çalışma sonucunda lazer kaynağı ile yapılan birleştirmelerin kalıntı gerilmelerinin büyüklüğünün TIG kaynağı ile üretilen birleştirmelere oranla %30-40 daha düşük olarak belirlediklerini ifade etmişlerdir [15]. Paulraj ve Garg, TIG kaynak parametrelerinin UNS S31803 ve UNS S32750 çeliklerinin mekanik özelliklerine etkilerini araştırdıkları çalışmada, ısı girdisinin artması ile tanelerin büyümesi ve daha az ferrit içeriği nedeniyle dayanımın düştüğünü ve ayrıca ısı girdisinin artmasının sertlikte düşmelere neden olduğunu bildirmişlerdir [16]. Kahraman ve diğ. farklı karışımda koruyucu gazlar kullanarak AISI 316L paslanmaz çeliği TIG kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada koruyucu gaz karışımına hidrojen ilave edilmesi ile ısı girdisinin arttığını bunun sonucunda da ITAB'ın genişlediğini belirtmişlerdir [17].

Demarque ve diğ. AISI 316L paslanmaz çeliği MIG yöntemi birleştirdikleri ve MIG yönteminde meydana gelen ısı döngüsünün kaynaklı birleştirmeler üzerine etkilerini inceledikleri çalışmada, ısı girdisinin artışı ile ergime bölgesinin alanının arttığını ve ITAB'daki ferrit oranının ve östenit tane boyutunun arttığını bildirmişlerdir [18]. Kumar ve Punia, TIG kaynak yöntemi ile AISI 316L paslanmaz çeliğini 2062 çeliği ile birleştirmişler ve ana metalde meydana gelen seyreltme nedeni ile kaynak bölgesinin sertliğinin yüksek çıktığını belirtmişlerdir [4]. Barrios ve diğ. AISI 430 ve AISI 316L paslanmaz çelikleri MIG yöntemi ile birleştirmişler ve birleştirmelerin mekanik özelliklerinde korozyonun etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda AISI 430 paslanmaz çelik taraftaki ısıdan etkilenen bölgenin daha yüksek korozyon hasarına maruz kaldığını ve çukurlaşma ve taneler arası korozyon gözlemlendiğini ve daldırma

süresinin artması ile hasarın arttığını rapor etmişlerdir [19]. Ragavendran ve Vasudevan, lazer ve lazer hibrit kaynak yöntemlerini kullanarak AISI 316L paslanmaz çelikleri kaynatmışlar ve kaynaklı birleştirmelerin kalıntı gerilmelerini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda uzunlamasına çekme kalıntı gerilmelerinin değerlerinin, hibrit lazer kaynağı için kalınlık yönünde lazer kaynaklı parçaya göre daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir [20]. Saha ve Pal, mikro plazma kaynak yöntemi ile birleştirdikleri AISI 316L paslanmaz çelik levhaların mikroyapılarını ve çalışma sertleşmesi davranışlarını inceledikleri çalışmada ergime bölgesinin ferrit-östenit matrisinin bulunmasından dolayı yüksek sertlik sergilediği söylerken ITAB'ın tane büyümesi sebebiyle daha düşük sertlik sergilediğini belirtmişlerdir [21]. Türkan ve Karakaş, TIG kaynağı ile birleştirilmiş AISI 316L paslanmaz çeliğinin, mekanik davranışlarına korozyonun etkilerini araştırdıkları çalışmada, tuz püskürtme süresine bağlı olarak numunelerin mekanik özelliklerinde herhangi bir değişiklik olmadığını rapor etmişlerdir [22]. Yılmaz ve Barlas, paslanmaz çeliklerin gazaltı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde koruyucu gazın etkilerini inceledikleri çalışmada MIG ve TIG kaynağında kullanılan argon gazının içerisine hidrojen gazının ilave edilmesinin, östenitik paslanmaz çeliklerin ergime miktarını ve verimliliğini yükselttiğini bildirmişlerdir [23].

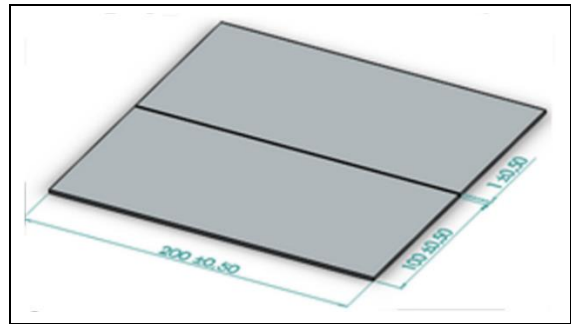
## 2 Deneysel çalışma

### 2.1 Malzeme

Bu çalışmada, AISI 316L paslanmaz çelik malzemeler 200x100x2 mm ölçülerinde giyotin makasta kesilerek ve üzerindeki kaynak yapmaya engel olabilecek yabancı maddeler fırçalanarak ve zımparalanarak temizlendikten sonra kaynağa hazır hale getirilmiştir. Tablo 1'de AISI 316L paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri verilmiştir.

### 2.2 Metot

Numuneler Şekil 1'deki gibi aralarında 1 mm kaynak boşluğu kalacak biçimde alın alına getirilerek Tablo 2'de verilen kaynak parametreleri kullanılarak otomatik TIG kaynak makinesinde birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi sırasında bakır altlıklar kullanılmıştır.



Şekil 1. Numune ölçüleri.

Figure 1. Dimension of samples.

Nükleer güç santrallerinde kullanılan yüksek korozyon direncine sahip AISI 316L paslanmaz çelik TIG otomatik kaynak yöntemi ile farklı kaynak akımı ve hızlarında birleştirilmiş ve daha sonra birleştirmelerin ısı girdisi hesaplamaları yapıldı, metalografik ve mekanik testlere tabi tutulmuşlardır. Metalografik test olarak makro ve mikro yapı çalışmaları gerçekleştirilirken, mekanik test olarak kaynaklı birleştirmelere sertlik, çekme ve eğme testleri uygulanmıştır.

Tablo 1. AISI 316 malzemenin kimyasal bileşimi ve bazı mekanik özellikleri.

Table 1. Chemical composition and some mechanical properties of AISI 316 material.

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Mo	Cu	Fe
AISI 316L (% Ağ)	0.025	0.39	0.88	0.033	0.001	17.05	10.05	0.059	2.03	0.38	Kalan
Mekanik Özellikler	Akma Dayanımı (MPa)			Çekme Dayanımı (MPa)			Uzama (%)		Mikrosertlik (HV)		
AISI 316L	270			650			57		145		

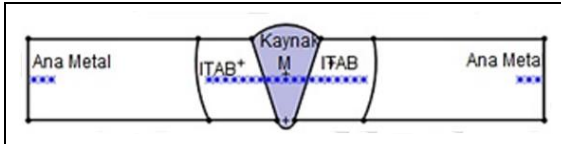
Tablo 2. Kaynak parametreleri.

Table 2. Welding parameters.

Parça Kodu	Kaynak Akımı (A)	Kaynak Hızı (mm/dk.)	Voltaj (V)	Isı Girdisi (J/mm)	Gaz	Gaz Debisi (l/dk.)	Altık
N1	110	250	19	301	%95 Argon %5		
N2	130		19	356	Hidrojen	6	Bakır
N3	150		19	410			
N4	110		19	279	%95 Argon %5		
N5	130	270	19	329	Hidrojen	6	Bakır
N6	150		19	380			

Üretilen kaynaklı birleştirmeden, kaynak yönüne dik olarak alınan kaynak kesiti örnekleri 220, 380, 600, 800, 1200 kum su zımparası ile parlatıldıktan sonra 3 br Gliserin, 2br HCl, 1br HNO<sub>3</sub> dağlama solüsyonu ile 60 sn dağlanmıştır. Dağlama işleminden sonra Metkon İverted Tip metal mikroskobu ile mikroyapı görüntüleri alınarak incelenmiştir.

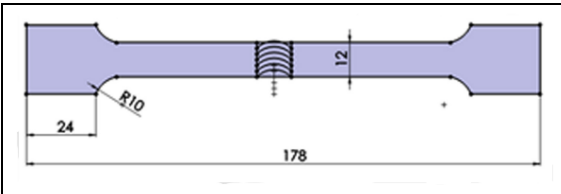
Sertlik ölçümleri için her kaynaklı numuneden kaynak yönüne dik olacak şekilde kaynak kesitinden örnekler çıkartılmış ve Şekil 2'de görüldüğü gibi kaynak metalinden, kaynak merkezinden bir noktadan ve her iki tarafa doğru 0.5'er mm aralıkla iki noktadan, ITAB'ın her iki tarafından da 0.5'er mm aralıkla yedişer noktadan ve ayrıca ana malzemelerden de üçer noktadan olmak üzere toplamda 25 noktadan sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçümü mikro vickers sertlik yöntemi ile 5 gr yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen verilerden yararlanılarak sertlik dağılım grafiği çizilmiştir.



Şekil 2. Sertlik ölçümü yapılan noktalar.

Figure 2. Hardness measurement points.

Çekme deneyi için numuneler Şekil 3'te verilen ölçülere göre su jetinde her kaynaklı birleştirmeden üçer adet olacak şekilde kestirilmiş ve daha sonra 100 kN kapasiteye sahip olan INSTRON marka çekme test cihazında 2 mm/dk. çekme hızında kopuncaya kadar çekilmiştir. Çekme deneyi sonrasında elde edilen veriler kullanılarak çekme uzama grafiği çizilerek yorumlanmıştır.



Şekil 3. Çekme deneyi numunesi ölçüleri.

Figure 3. Dimensions of the tensile test specimen.

Kaynaklı birleştirmelerin eğme kuvvetlerine karşı nasıl bir davranış sergileyeceğini belirlemek için 200x20x2 mm ölçülerinde ikişer adet olacak şekilde deney numuneleri

hazırlanmış ve eğme deneyi kep ve kök eğme olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmiştir.

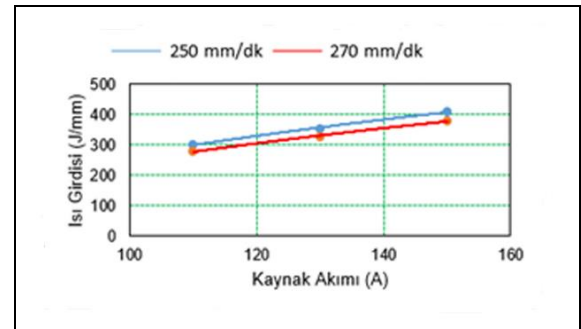
### 3 Sonuçlar ve tartışmalar

#### 3.1 Kaynak parametrelerinin ısı girdisi üzerine etkileri

Kaynak parametrelerinde yapılan değişikliğin ısı girdisi üzerine etkilerini belirlemek için ısı girdisi hesaplamaları yapılmış ve elde edilen veriler yardımı ile ısı girdisi grafiği çizilmiştir. Bu amaçla yapılan hesaplamalar sonucunda kaynak akımının ve hızının ısı girdisi üzerine etkilerini gösteren grafik Şekil 4'te verilmiştir. Kaynak sürecinde meydana gelen ısı girdisi formül 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$H = \frac{\eta * V * I}{v} \quad (Kj/mm) \quad (1)$$

- H = Isı girdisi (Kj/mm),  
 $\eta$  = Kaynak verimliliği,  
V = Kaynak gerilimi (V),  
I = Kaynak akımı (A),  
v = Kaynak Hızı (mm/dk.).



Şekil 4. Isı girdisi grafiği.

Figure 4. Heat input graph.

Isı girdisi kaynaklı birleştirmelerde mikroyapıyı ve dolayısıyla da mekanik özellikleri etkilemesi açısından önemli bir olgudur. Isı girdisinde meydana gelen değişiklikler mikroyapıda tanelerin boyutunu etkilemesi sebebiyle mekanik özelliklerin değişmesine neden olmaktadır. Kaynaklı birleştirmelerde ısı girdisinin artmasında ya da azalmasında kaynak parametreleri etkilidir. Bu nedenle yapılan hesaplamalar sonucunda çizilen Şekil 4'deki ısı girdisi grafiği incelendiğinde kaynak akımının

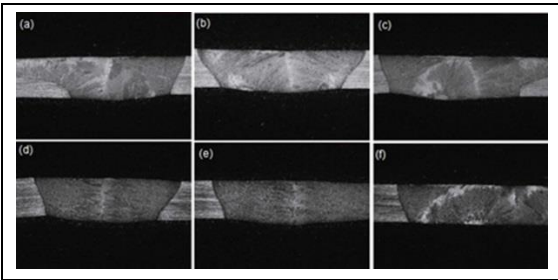


artması ile ısı girdisinin arttığı açıkça görülebilmektedir. 250 mm/dk. kaynak hızında kaynak akımının 110 A'den 130 A'e yükseltilmesi ile ısı girdisi yaklaşık olarak %18.3 artmıştır. Aynı şekilde kaynak akımı 130 A'den 150 A'e yükseltilmesi ile de ısı girdisinin %15.5 artışı görülmüştür. Benzer şekilde Hedayat ve Morteza, TIG kaynağı ve Nd YAG lazer kaynak yöntemleri ile AISI 304L ve AISI 316L paslanmaz çelikleri birleştirdikleri çalışmada TIG kaynağında kaynak akımının ve voltajının ısı girdisini artırdığını belirtmişlerdir [6]. Isı girdisinin artması soğuma süresini uzattığı için tanelerin büyümesine sebep olmaktadır. Bunun sonucunda ısı girdisi mekanik özelliklerin azalmasına neden olmaktadır.

Şekil 4'te dikkat edilmesi gereken ikinci nokta ise kaynak hızının artması ile ısı girdisinde meydana gelen düşümedir. Sabit 150 A kaynak akımında kaynak hızının 250 mm/dk.'dan 270 mm/dk.'ya çıkartılması ile ısı girdisi yaklaşık olarak %7,3 azalmıştır. Isı girdisinde meydana gelen bu azalma soğuma hızının artmasına sebep olduğu için mikroyapının tane boyutunun değişmesine neden olmaktadır. Bu da mekanik özelliklerin iyileşmesine sebep olmaktadır. Paulraj ve Garg, UNS S31803 ve UNS S32750 çeliklerini TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak parametrelerinin, numunelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada düşük ısı girdisinin yüksek soğuma hızı ürettiğini ve bunun sonucunda mikroyapının ince taneli bir yapıdan oluştuğu için dayanımı artırdığını ifade etmişlerdir [16].

### 3.2 Makroyapı çalışmaları

Kaynak parametrelerinin makroyapı üzerindeki etkilerini görebilmek amacıyla makroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen görüntüler Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'teki görüntüler incelendiğinde üretilen kaynaklı birleştirmelerin hiç birisinde kep ve kök bölgelerinde herhangi bir birleşme hatasına rastlanmamıştır.



Şekil 5. Farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen numunelerin makroyapıları. (a): N1, (b): N2, (c): N3, (d): N4, (e): N5, f) N6.

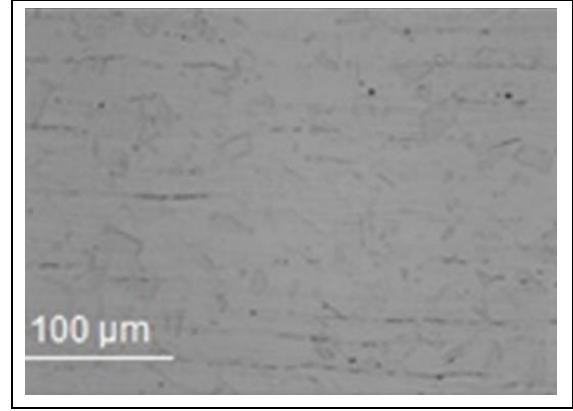
Figure 5. Macrostructures of samples joined at different welding parameters. (a): N1, (b): N2, (c): N3, (d): N4, (e): N5, (f): N6.

Aynı şekilde Kumar ve diğ. AISI 316 paslanmaz çelik ile inconel 625 çeliğini TIG kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada ana metallere tam nüfuz eden uygun bir kaynak dikişi elde ettiklerini bildirmişlerdir [24].

### 3.3 Mikroyapı çalışmaları

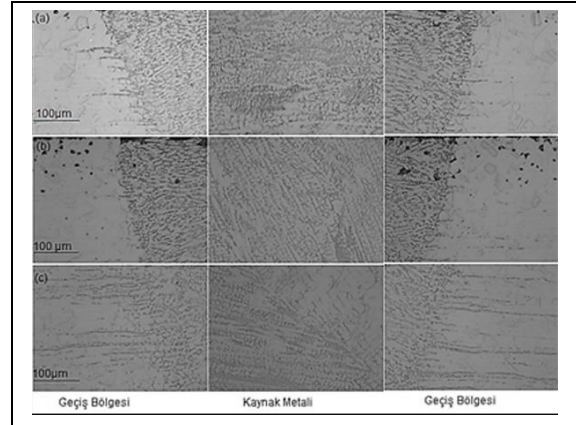
Kaynak parametrelerinin ve dolayısıyla ısı girdisinin mikroyapı üzerinde etkilerini incelemek amacıyla mikroyapı çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda ana malzemenin mikroyapısı Şekil 6'da,

250 mm/dk. kaynak hızında üretilen kaynaklı birleştirmelerin mikroyapıları Şekil 7'de ve 270 mm/dk. kaynak hızında üretilen kaynaklı birleştirmelerin mikroyapıları Şekil 8'de verilmiştir.



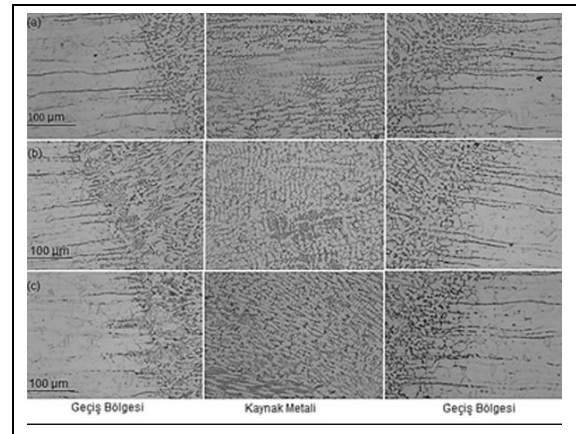
Şekil 6. Ana metal.

Figure 6. Base metal.



Şekil 7. 250 mm/dk. kaynak hızında birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntüleri. (a): N1, (b): N2, c) N3.

Figure 7. Samples joined at 250 mm/min welding speed. (a): N1, (b): N2, (c): N3.



Şekil 8. 270 mm/dk. kaynak hızında birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntüleri. (a): N4, (b): N5.

Figure 8. Samples joined at a welding speed of 270 mm/min. (a): N4, (b): N5, (c): N6.

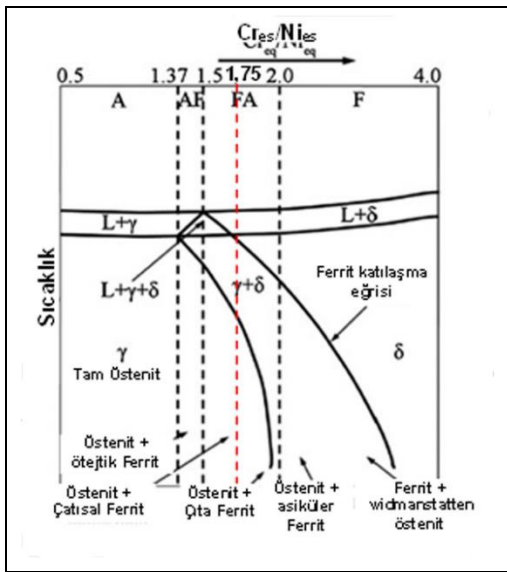
Şekil 6'daki ana metalin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, mikroyapının eş eksenli östenit tanelerinden meydana geldiği görülmektedir. Köse ve diğ. CO<sub>2</sub> lazer kaynağı ile AISI 316L paslanmaz çeliğini birleştirdikleri çalışmada ana malzemenin eş eksenli östenit tanelerinden meydana geldiğini bildirmişlerdir [25].

Şekil 7 ve 8 incelendiğinde kaynak metalinin dentritikler, δ ferrit ve östenit fazlarından oluştuğu görülmektedir. Moteshakker ve diğ. TIG kaynağı AISI 316L ve AISI 2205 çeliği ile birleştirdikleri çalışmada kaynak metalinin mikroyapısının dentritikler, δ ferrit ve östenit fazlarından meydana geldiğini bildirmişlerdir [1]. Bu durumun ortaya çıkmasında en önemli etken katılaşma şeklidir. Bilindiği gibi östenitik paslanmaz çeliklerin katılaşma modunu etkileyen kimyasal bileşimi içinde bulunan Cr ve Ni eşdeğerlikleridir. Yueqiao ve diğ. AISI 316L paslanmaz çeliğini TIG kaynak yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada östenitik paslanmaz çeliklerin katılaşma modunun Cr ve Ni eşdeğerliklerinin oranına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [26]. Cr ve Ni eşdeğerlikleri formül 2 ve 3 kullanılarak hesaplanıp Schaeffler diyagramında yerlerine konulduğunda kaynak metali içindeki ferrit ve östenit miktarını hesaplanabilmektir.

$$Cr_{es} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb + 2\%Ti \quad (2)$$

$$Ni_{es} = \%Ni + 0,5\%Mn + 30\%C \quad (3)$$

Formüller 2 ve 3 ışığında hesaplanan Cr ve Ni eşdeğerlikleri  $Cr_{es}=0.1967$ ,  $Ni_{es}=0.1124$  olarak bulunmuştur. Cr ve Ni eşdeğerliklerinin oranı ise  $Cr_{es}/Ni_{es}=1.75$  olarak bulunur.  $Cr_{es}/Ni_{es}$  oranı yardımı ile çizilen ikili faz diyagramı Şekil 9'da verilmiştir.  $Cr_{es}/Ni_{es}$  oranı 1.5'ten büyük olduğu için AISI 316 paslanmaz çelikte katılaşma FA modunda gerçekleşir. Şekil 9'daki ikili faz diyagramına göre FA modunda öncelikli olarak δ ferrit kristalleşir ve soğuma sürecinde δ ferrit östenite dönüşür. Hedayat ve Morteza, TIG kaynağı ile AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çelikleri birleştirmişler ve AISI 316 paslanmaz çelik tarafındaki katılaşmanın FA modunda gerçekleştiğini ve FA modunda önce çıta ferritten çekirdeklendiğini ve daha sonra soğuma sürecinde bunun östenite dönüştüğünü rapor etmişlerdir [6].



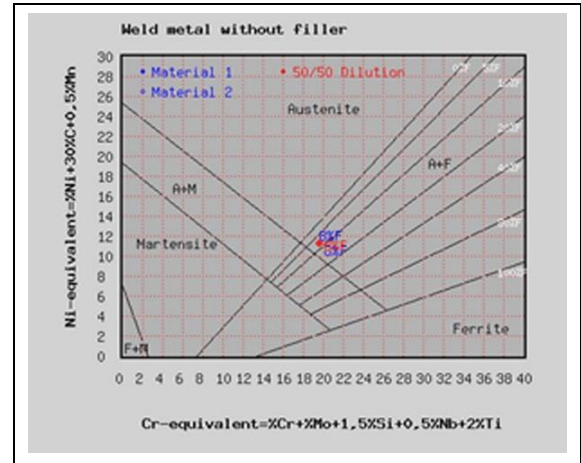
Şekil 9. Cr<sub>es</sub>/Ni<sub>es</sub> ikili faz diyagramı.

Figure 9. Binary phase diagram.

Sonuç olarak TIG kaynağında soğuma hızı yüksek olduğu için kaynak metalinin mikroyapısı tamamen östenite dönüşecek zamanı bulmadığı için nihai kaynak metalinin yapısı östenit + çıtsal ferrit ya da çıta ferritten meydana gelir. Kianersi ve diğ. AISI 316L paslanmaz çeliğini direnç kaynak yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada  $Cr_{es}/Ni_{es}$  oranının yaklaşık olarak 1.618 olduğundan kaynak çekirdeğinin çıtsal delta ferritten oluşacağını söylemişlerdir [27].

Aynı şekilde literatürde hızlı soğuma oranları nedeni ile ferritten östenite dönüşüm için yeterli zaman olmadığından numunelerin mikroyapılarının östenit, çıtsal delta ferrit ya da östenit, delta ferrit yapılardan oluştuğunu belirtmişlerdir [6].

Bilindiği üzere Schaeffler diyagramı çeliklerin kaynağında, kaynak metalinin içeriğini belirlemek için kullanılmaktadır. Bu amaçla yapılan hesaplamalar sonucunda çizilen Schaeffler diyagramı Şekil 10'da verilmiştir. Çizilen Schaeffler diyagramından yararlanılarak, kaynak metalinin mikroyapısının %8 ferrit+östenitten meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 10. Schaeffler diyagramı.

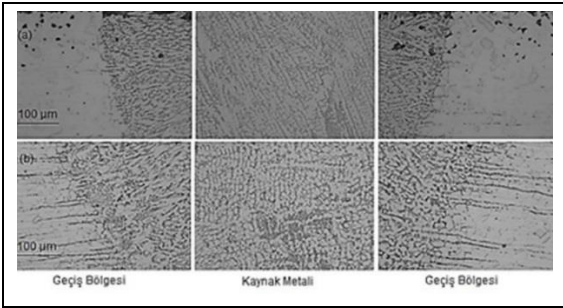
Figure 10. Schaeffler diagram.

ITAB, kaynak metalini çevreleyen ve kaynak esnasında meydana gelen ısıdan ve kaynak sonrasında meydana gelen soğumadan etkilenen bölge olduğu için mikroyapısı da ana metale ve kaynak metaline göre değişiklik göstermektedir. Kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ITAB'ın tane yapısının, östenit matrisi içinde küçük sütunlar halinde rastgele dağılmış olan küçük delta ferritlerden meydana geldiği görülmektedir. Benzer şekilde Abdeljilil ve diğ. AISI 316 paslanmaz çeliği TIG kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada ITAB'ın mikroyapısının östenit matrisi için rastgele dağılmış küçük çıta şeklindeki delta ferritten meydana geldiğini bildirmişlerdir [28]. ITAB'ın tane yapısını ana metal ile karşılaştırdığımızda ITAB tane yapısının ana metalin tane yapısına oranla daha büyük olduğu görülmektedir. Bertan ve Yılmaz'ın AISI 304 paslanmaz çeliğini TIG kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada ısının etkisi ile ITAB'ın tane yapısında büyümeler meydana geldiği ifade edilmiştir [28].

Literatürde Lui ve diğ. 304 paslanmaz çeliğini plazma ark ve gaz tungsten ark kaynak kombinasyonu ile birleştirdikleri çalışmada kaynak termal döngüsü nedeni ile ITAB'ın tane boyutunun ana metalin tane boyutuna göre büyüdüğünü belirtmişlerdir [29].

Kaynak akımının artması ile kaynak metalinin ve ITAB'ın tane yapısının büyüdüğü görülmektedir. Burada tanelerin büyümesine kaynak akımının artması ile artan ısı girdisi ile beraber soğuma süresinin uzaması sebep olmaktadır. Soğuma süresi arttığı için katılaşma gecikmekte ve bu da tanelerin büyümesine neden olmaktadır. Kahraman ve diğ. TIG kaynağı ile AISI 304 paslanmaz çeliğini birleştirdikleri çalışmada kaynak akımının artması ile ısı girdisinin arttığını ve ısı girdisinin artışına paralel soğuma hızının artması ile tanelerin irileştiğini ifade etmişlerdir [30]. Sufizadeh ve Mousavi, ND:YAG lazer kaynak yöntemi AISI 4340 ve AISI 316L paslanmaz çelikleri birleştirmişler ve mikroyapı çalışmaları sonucunda ısı girdisindeki artışın katılaşma süresini artırdığı için tanelerin aşırı büyümesine yeterli olacak zamana sahip olduklarını ifade etmişlerdir [31].

Kaynak hızının mikroyapı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11'deki mikroyapı görüntüleri incelendiğinde hem ITAB hem de kaynak metalinde kaynak hızının artması ile tane yapılarının küçüldüğü görülmektedir. Sabit kaynak akımında kaynak hızının artması ile metallerdeki ısı girdisi azalmakta ve bunun sonucunda da soğuma hızı artmaktadır. Artan soğuma hızı da katılaşma süresini kısalttığı için mikroyapı içindeki taneler büyümek için gerekli olan yeterli zamanı bulamaz ve mikroyapı içinde büyüyemeden küçük taneler halinde katılaşmak zorunda kalırlar. Aynı şekilde Cao ve diğ. lazer kaynağı AISI 316L ve EH 36 malzemelerini birleştirdikleri ve lazer kaynak hızının kaynaklı birleştirmelerin özelliklerine olan etkilerini inceledikleri çalışmada kaynak hızının 0.4 mm/dk.'dan 1.2 mm/dk. artması ile tane boyutlarının küçüldüğünü bildirmişlerdir [32].



Şekil 11. 150 A kaynak akımında ve 250 mm/dk. ve 270 mm/dk.'da üretilen numunelerin mikroyapı görüntüleri. (a): N2, b) N5.

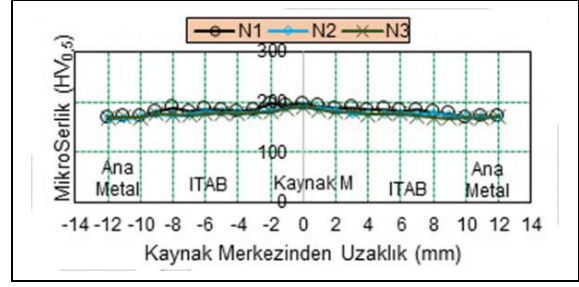
Figure 11. Images of samples produced at 150 A welding current and 250 mm/min and 270 mm/min. (a): N2, b) N5.

Mikroyapı sonuçlarını genel olarak değerlendirdiğimizde kaynak metalinin mikroyapısının östenit + çatsal ferrit ya da çita ferritten oluştuğu görülmüştür. Ayrıca kaynak hızında ve kaynak akımında meydana gelen değişiklikler ısı girdisini etkilemesi sebebiyle soğuma rejimi üzerinde etkili olmuş ve bunun sonucunda mikroyapıdaki tane boyutlarında değişiklikler meydana gelmiştir.

### 3.4 Mikrosertlik

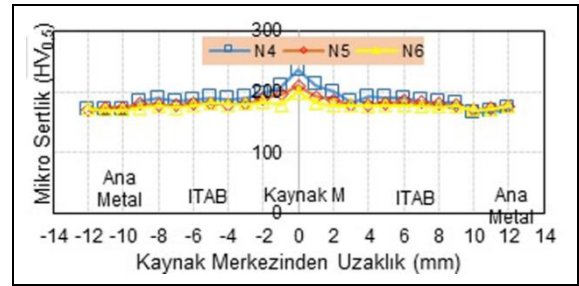
Kaynak parametrelerinin meydana getirdiği değişikliklerin üretilen kaynaklı birleştirmelerin sertlikleri üzerine olan etkilerini araştırmak amacıyla sertlik ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda 250 mm/dk. kaynak hızında birleştirilen numunelerin sertlik ölçüm grafiği

Şekil 12'de, 270 mm/dk. kaynak hızında birleştirilen numunelerin sertlik ölçümleri Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 12. 250 mm/dk. kaynak hızında üretilen numunelerin sertlik ölçüm sonuçları.

Figure 12. Hardness measurement results of samples produced at 250 mm/min. welding speed.



Şekil 13. 270 mm/dk. kaynak hızında üretilen numunelerin sertlik ölçüm sonuçları.

Figure 13. Hardness measurement results of samples produced at a welding speed of 270 mm/min.

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak üretilen birleştirmelerin hepsinde de en sert bölge kaynak metalidir. Kaynak metalinin mikroyapısının %8 ferrit+östenitten, ana metalin mikroyapısının ise eşeksizli östenitten meydana geldiği mikroyapı çalışmalarında belirtilmiştir. Bilindiği üzere ferritin sertliği östenitin sertliğinden daha yüksektir. Bu nedenle de üretilen kaynaklı birleştirmelerin tümünde kaynak metalinin sertliği, ana metalin ve ITAB'ın sertliğinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yueqiao ve diğ. TIG kaynağı ile AISI 316L paslanmaz çeliğini birleştirdikleri çalışmada kaynak metalinin sertliğinin ana metalden daha yüksek olarak belirlediklerini ve buna ise kaynak metalinin, sertliği östenitten yüksek olan %5 oranında ferrit içermesinin sebep olduğunu ifade etmişlerdir [25]. Aynı şekilde Saha ve Pal, mikro plazma ark kaynağı ile AISI 316L paslanmaz çeliğini birleştirdikleri çalışmada kaynak bölgesinin en sert bölge olduğunu ve buna kaynak metalinin  $\delta$  ferrit+östenitten oluşmasının ve hızlı soğumanın neden olduğunu göstermişlerdir [21].

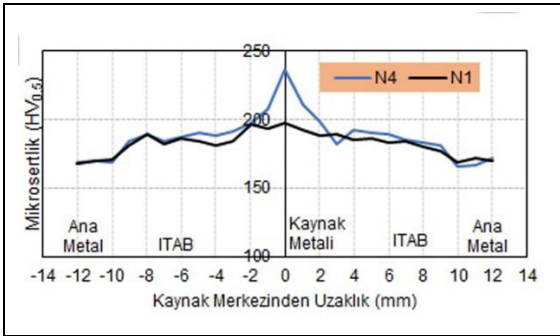
Kaynak bölgesinde ölçülen en yüksek sertlik 236 HV<sub>0.5</sub> ile N4 No.lu numunede ölçülürken en düşük sertlik 190 HV<sub>0.5</sub> ile N3 kodlu numunede ölçülmüştür. ITAB'da ölçülen en yüksek sertlik ise 191 HV<sub>0.5</sub> ile N4 No.lu numunede ölçülürken en düşük sertlik 177 HV<sub>0.5</sub> ile N2 No.lu numunede ölçülmüştür. Kaynak metalinden ana metale doğru gidildikçe sertliğin düştüğü görülmüştür. Sertlikte meydana gelen bu düşüşe kaynak metalinden uzaklaştıkça mikroyapı içerisindeki ferrit miktarının azalmasının sebep olmuş olabileceği düşünülmektedir. Kar ve diğ. elektron ışın kaynağı ile AISI 316L paslanmaz çeliği birleştirdikleri çalışmada kaynak bölgesinden ana metale doğru ilerleyince sertliğin düştüğünü, buna ise



mikro yapı içindeki  $\delta$  ferrit içeriğinin azalmasını ve tane kabalaşmasının neden olabileceğini belirtmişlerdir [33].

Kaynak akımının sertlik üzerine etkileri incelendiğinde kaynak akımında meydana gelen artışların kaynak metalinin sertliğini düşürdüğü Şekil 12 ve Şekil 13'te açıkça görülebilmektedir. Kaynak akımının artması ile kaynak bölgesine giren ısı miktarı artmakta, bunun sonucunda soğuma rejimi değişmektedir. Soğuma rejiminde meydana gelen değişiklikte katılaşma süresini etkilediği için taneler büyümekte, bu da sertlikte düşmeye neden olmaktadır. Ayrıca soğuma süresinin uzaması ile mikroyapı içerisinde bulunan ferritin bir miktarının östenite dönüşmesi sonucunda mikroyapı içerisindeki ferrit miktarındaki azalmanın da sertlikteki düşmede etkili olduğu düşünülmektedir. Kumar ve diğ. TIG kaynağı ile 304L paslanmaz çeliğini birleştirdikleri çalışmada, yüksek kaynak akımının yüksek ısı girdisi ürettiğini ve bunun sonucunda da soğuma hızını düşürmesi sebebi ile daha fazla ferrit östenite dönüşümü gerçekleştiği için mikro sertliğin düştüğünü ifade etmişlerdir [34]. Aynı şekilde Moi ve diğ. TIG kaynağında ısı girdisinin mekanik ve mikroyapı üzerine etkilerinin araştırdıkları çalışmada yüksek ısı girdisinin kaynak bölgesinde düşük sertliğe sebep olduğunu bununla düşük  $\delta$  ferrit içeriğinden ve tane irileşmesinden kaynaklanabileceğini rapor etmişlerdir [35].

Kaynak hızının kaynaklı birleştirmeler üzerine etkilerini incelemek amacıyla 110 A kaynak akımında ve 250 mm/dk. kaynak hızında (N1) ve 270 mm/dk. kaynak hızında (N4) birleştirilen numunelerin sertlik ölçüm sonuçlarından yararlanılarak çizilen sertlik grafiği Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. 110 A kaynak akımında 250 mm/dk. ve 270 mm/dk. kaynak hızında üretilen numunelerin sertlik ölçüm sonuçları.

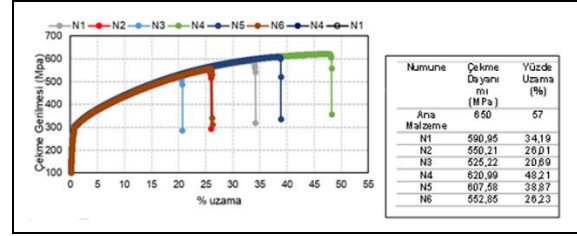
Figure 14. Hardness measurement results of samples produced at 110 A welding current at 250 mm/min and 270 mm/min welding speed.

Şekil 14 incelendiğinde kaynak hızının artması ile sertliğin de arttığı görülmektedir. Sertlikte meydana gelen bu değişime kaynak hızının artması ile ısı girdisinin azalması sonucu soğuma hızının artması ve tanelerin irileşmeye fırsat bulamadan katılaşması neticesinde ince taneli bir mikroyapının meydana gelmesinin neden olabileceği düşünülmektedir. Cao ve diğ. fiber lazer kaynak yönteminin, AISI 316L ve EH36 malzemelerinden oluşan birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkilerini araştırdıkları çalışmada kaynak hızının artması ile sertliğin arttığını buna ise kaynak hızının artması ile ısı girdisinin azalması sonucunda tane yapısının incelenmesinin etkili olabileceğini söylemişlerdir [32].

### 3.5 Çekme deneyi sonuçları

Kaynak parametrelerinin ve dolayısı ile de ısı girdisinin üretilen numunelerin çekme dayanımı üzerine etkilerini belirlemek için

çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi sonucunda elde edilen veriler yardımı ile çizilen çekme dayanımı grafiği Şekil 15'te verilmiştir. Çekme deneyi sonucunda en yüksek çekme dayanımı 620.99 MPa ile N4 kodlu numunede elde edilirken en düşük çekme dayanımı 525.22 MPa ile N3 No.lu numunede ölçülmüştür.



Şekil 15. Çekme deneyi sonuçları.

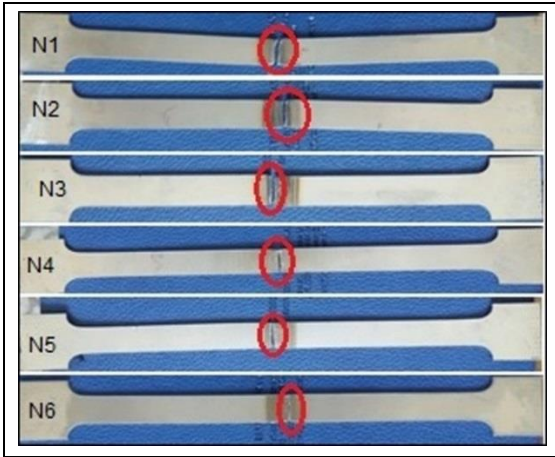
Figure 15. Tensile test results.

Şekilde 15'deki çekme deneyi sonuçları incelendiğinde kaynak parametrelerinin çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Kaynak akımı ve kaynak hızı, ısı girdisini ve beraberinde soğuma hızını etkiledikleri için üretilen kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini etkileyen ana parametrelerden ikisidir. Kaynak akımında ve kaynak hızında yapılan değişiklikler kaynak sürecinde birleştirilen metallere verilen ısı girdisinde değişikliğe neden olmaktadır. Bunun sonucunda da mikroyapıda tanelerin boyutlarında değişiklik meydana gelmektedir. Mikroyapıda tane boyutundaki değişim de mekanik özelliklerde artma ya da düşme şeklinde kendini göstermektedir. Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde kaynak akımının artması ile çekme dayanımının düşme eğiliminde olduğu görülebilmektedir. Örneğin 250 mm/dk. kaynak hızında kaynak akımının 110 A'den 130 A'ye çıkması ile çekme dayanımı yaklaşık olarak %6,9 azalırken 270 mm/dk. kaynak hızında kaynak akımının 110 A'den 130 A'ye çıkması ile çekme dayanımı yaklaşık olarak %2,16 azalmıştır. Bu sonucun ortaya çıkmasındaki etken ise kaynak akımının artması ile artan ısı girdisi sebebiyle mikroyapıdaki tanelerin boyutlarının artmasının ya da mikroyapıda bulunan ferrit miktarının azalmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Okonji ve diğ. östenitik paslanmaz çelikleri TIG kaynak yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada kaynak akımının 91 A'den 95 A'ye çıkması ile östenitik paslanmaz çeliğin düşük ısıl iletkenlik özelliği nedeni ile soğuma hızının düştüğünü ve bununla iri taneler ürettiği için çekme dayanımını düşürdüğünü belirtmişlerdir [36]. Kaynak hızının çekme dayanımı üzerinde etkileri incelendiğinde ise kaynak hızının artması ile çekme dayanımının arttığı görülmüştür. Örnek olarak 110 A kaynak akımı sabit tutulup kaynak hızının 250 mm/dk.'dan, 270 mm/dk. yükseltilmesi ile çekme dayanımı yaklaşık olarak %5 artmıştır. Aynı şekilde 150 A kaynak akımı sabit tutulup kaynak hızının 250 mm/dk.'dan, 270 mm/dk.'ya yükseltilmesi ile çekme dayanımı yaklaşık olarak %5,3 artmıştır. Kaynak hızında meydana gelen artış ile çekme dayanımının artmasına, kaynak hızının artması ile soğuma hızının artması sonucunda mikroyapıdaki tanelerin büyüyemeden katılaşarak ince taneli bir mikroyapı ve daha fazla ferrit içeren bir mikroyapı oluşturmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Paulraj ve Garg, TIG kaynak parametrelerinin, S31803 ve S32750 çelikleri ile üretilen kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerine etkilerini araştırdıkları çalışmada, düşük ısı girdisinin yüksek çekme dayanımı ürettiğini buna ise düşük ısı girdisinin soğuma hızı artırması sebebiyle ince taneli bir mikroyapı ve daha fazla

ferritten oluşan bir mikroyapı üretmesinden kaynaklandığını bildirmişlerdir [16].

Yüzde uzama değerleri üzerine yapılan inceleme sonucunda en yüksek yüzde uzama değeri 48.21 ile N4 No.lu numunede görülürken en düşük yüzde uzama değeri 20.69 ile N3 No.lu numunede görülmüştür. Yüzde uzama değerleri de çekme dayanımı ile benzerlik göstererek artan kaynak akımı ile düşme eğilimi gösterirken artan kaynak hızı ile de yükselme eğimi göstermiştir.

Üretilen kaynaklı numunelerin çekme deneyi sonrasında kopma yerleri üzerinde yapılan incelemeler sonucu elde edilen kopma görüntüleri Şekil 16'da verilmiştir. Birleştirmelerin kopma görüntüleri incelendiğinde numunelerin ITAB'dan ve geçiş bölgesinden koptuğu görülmüştür. Numunelerin ITAB'dan kopmasında ITAB'ın kaynak bölgesinin en zayıf bölgesi olması ve ayrıca kaynak esnasında ilave kaynak metalin kullanılmamış olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Chuaiphan ve Srijaroenpramong, TIG kaynak yöntemi ile AISI 205 ve AISI 216 çeliklerini birleştirmişler ve numunelere çekme testi uygulamışlardır. Yaptıkları çekme testleri sonucunda numunelerin AISI 216 tarafında kaynak metali ile ana metalin bitişik olduğu bölgelerinden koptuğunu rapor etmişlerdir [37].



Şekil 16. Numunelerin kopma görüntüleri.

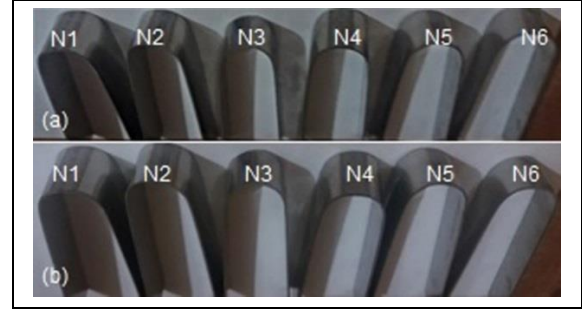
Figure 16. Fracture images.

Çekme ve sertlik ölçüm sonuçlarını birlikte değerlendirdiğimizde ise çekme test sonuçları ile sertlik ölçüm sonuçlarının birbirine uyumlu olduğu görülmüştür. Sertlik ölçüm sonuçlarında en yüksek sertliğe sahip olan N4 kodlu numunenin çekme dayanımında da en yüksek dayanıma sahip olduğu görülürken sertlik ölçüm sonuçlarına göre en düşük sertliğe sahip olan N3 kodlu numunenin çekme testleri sonucunda en düşük dayanıma sahip olduğu görülmüştür. N4 kodlu numunenin en yüksek sertlik ve dayanıma sahip olmasına, en düşük kaynak akımı ve en yüksek kaynak hızında birleştirilmesinden dolayı en az ısı girdisine sahip olması ve dolayısı ile soğuma hızının artması sonucunda diğer kaynak parametrelerinde birleştirilen numunelere oranla daha ince taneli ve ferrit içeriği daha fazla olan bir mikro yapıya sahip olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. N3 kodlu numunenin en düşük sertlik ve çekme dayanımına sahip olmasına ise en yüksek kaynak akımı ve en düşük kaynak hızında birleştirmesinden dolayı en fazla ısı girdisine sahip olması sebebi ile soğuma hızının düşmesi ile katılma süresinin

uzaması neticesinde daha iri taneli ve daha az ferrit içeren bir mikroyapıya sahip olmasının neden olduğu düşünülmektedir.

### 3.6 Eğme deneyi sonuçları

Kaynaklı birleştirmelerin eğmeye karşı nasıl bir tepki göstereceklerini belirlemek amacıyla tüm numunelere 180° eğme testi uygulanmıştır. Eğme testi sonucunda elde edilen görüntüler Şekil 17'de verilmiştir. Farklı kaynak akımları ve kaynak hızları kullanılarak üretilen numunelerin hepsinin eğme testleri sonucunda başarılı bir şekilde 180° eğilebildiği Şekil 17'de görülmektedir. Ne kep eğme testleri sırasında ne de kök eğme testleri sırasında herhangi bir çatlama ya da kırılma gözlenmemiştir. Kumar ve diğerleri, TIG kaynağı ile AISI 304 paslanmaz çeliğini birleştirdikleri ve birleştirmelere üç nokta eğme testi uyguladıkları çalışmada herhangi bir açılma ya da çatlak oluşumuna rastlanmadığını rapor etmişlerdir [38]. Kar ve diğ. AISI 316 paslanmaz çeliğini elektron ışın kaynağı ile birleştirdikleri çalışma sonucunda eğme testlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini ve kaynak bölgesinde açılma, yırtılma ve çatlama gibi bir kusura rastlanmadığını bildirmişlerdir [33].



Şekil 17. Eğme deneyi sonrası numune görüntüleri.

(a): Kep eğme. (b): Kök eğme.

Figure 17. Bending test results. (a): Cap bending. (b): Root bending.

## 4 Sonuçlar

Nükleer güç santrallerinde kullanılan AISI 316L paslanmaz çelik TIG kaynak yöntemi ile farklı kaynak parametreleri kullanarak ve ilave tel kullanılmadan başarı bir şekilde birleştirilmiş ve yapılan mikroyapı, sertlik ölçümü, çekme ve eğme deneyi çalışmaları sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kaynak akımının ve kaynak hızının, ısı girdisini etkilemesi sebebiyle mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir,
- Mikroyapı incelemeleri sonucunda kaynak metalinin mikroyapısının östenit + %8 ferritten oluştuğu görülmüştür. ITAB'ın mikroyapısının, östenit matrisi içinde küçük sütunlar halinde rastgele dağılmış olan küçük delta ferritlerden meydana geldiği belirlenmiştir,
- Sertlik ölçümleri sonucunda bütün birleştirmelerde kaynak metali en sert bölge olarak belirlenirken kaynak akımının artması ile sertliğin düştüğü buna karşılık kaynak hızının artması ile sertliğin arttığı gözlenmiştir,



- Çekme deneyi sonuçlarında en yüksek çekme dayanımı 110 A kaynak akımında ve 270 mm/dk. kaynak hızında birleştirilen numunede elde edilirken, çekme deneyi sonuçları da sertlik ölçüm sonuçları ile benzerlik göstererek kaynak akımının artması ile düşüş, kaynak hızının artması ile artış göstermiştir. Ayrıca çekme deneyi sonucunda numunelerin ITAB ve kaynak geçiş bölgesinden kopduğu görülmüştür,
- Eğme testleri sonucunda, kep eğmede ve kök eğmede herhangi bir çatlama, kırılma, yırtılma ve boşluk oluşumuna rastlanmamıştır.

## 5 Conclusions

AISI 316L stainless steel used in nuclear power plants was successfully joined with TIG welding method using different welding parameters and without the use of additional wire, and the following results were obtained as a result of the microstructure, hardness measurement, tensile and bending test studies.

- It has been determined that welding current and welding speed have an effect on microstructure and mechanical properties because of the affect heat input,
- As a result of microstructure experiments, it has been observed that the microstructure of the weld metal consists of austenite + 8% ferrite. It has been determined that the microstructure of ITAB consists of small columns shaped delta ferrites randomly distributed in the austenite matrix,
- As a result of the hardness measurements, while the weld metal was determined as the hardest zone in all joints, it was observed that the hardness decreased with the increase of the welding current, whereas the hardness increased with the increase in the welding speed,
- In the tensile test results, the highest tensile strength was obtained in the 110 A welding current and 270 mm/min welding speed sample, while the tensile test results were similar to the hardness measurement results, and decreased with the increase of the welding current, and increased with the increase of the welding speed. In addition, as a result of the tensile test, it was observed that. The samples broke off from HAZ and the transition zone welding interface,
- As a result of the bending tests, no cracking, breakage, tearing and void formation were observed in either cap bending or root bending.

## 6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen bu çalışmasının bütün aşamalarında gerekli olan tüm çalışmalar Ali YÜRÜK tarafından gerçekleştirilmiştir.

## 7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur"  
"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır."

## 8 Kaynaklar

- [1] Moteshakker A, Danaee I, Moeinifar S, Ashrafi A. "Hardness and tensile properties of dissimilar welds joints between SAF 2205 and AISI 316L". *Science and Technology of Welding and Joining*, 21(1), 1-10, 2016.

- [2] Hussien AM, El-Shabasy AB, Abd El-Ghany KM. "Evaluation of stainless steel 316L joints welded by laser". *Journal Of Al-Azhar University Engineering Sector*, 14(50), 229-236, 2019.
- [3] Subhas CM, Pradip KP, Asish B. "Design optimization of TIG welding process for AISI 316L stainless steel". *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 5348-5354, 2019.
- [4] Kumar M, Punia A. "Investigation on dissimilar metal welding of stainless steel 316L and dild steel A-2062 using GTAW". *International Research Journal of Engineering and Technology*, 6(8), 286-292, 2019.
- [5] Luis HG, Carlos ADR, Sebastião EK, Marcelo F, de O. "Corrosion behaviour of a dissimilar joint TIG weld between austenitic AISI 316L and ferritic AISI 444 stainless steels". *Welding International*, 30(4), 268-276, 2016.
- [6] Hedayat MS, Morteza T. "Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd:YAG laser welding". *Journal of Alloys and Compounds*, 767, 112-121, 2018.
- [7] Kocabekir B, Kacar R, Gündüz S, Hayat F. "An effect of heat input, weld atmosphere and weld cooling conditions on the resistance spot weldability of 316L austenitic stainless steel". *Journal of Materials Processing Technology*, 195, 327-335, 2008.
- [8] Merich C, Karabash O, Babayev Y, Demirkiran K. "An investigation of the weld region of AISI 304, AISI 316L and AISI 431 stainless steels joined by GTAW". *Journal of Qafqaz University-Mechanical And Industrial Engineering*, 1(1), 73-81, 2013.
- [9] Çınar Ö, Yaralı MC, Erdemir E, Çetiner BN, Mergen A, Güllüoğlu AN. "The similar and dissimilar TIG welding of 316L and 321 austenitic stainless steels". *ALKU Journal of Science*, 1(3), 148-155, 2019.
- [10] Bolarinwa JK, Saliu OS, Godwin IE, Ayotunde II. "Review of GTAW welding parameters". *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 6, 541-554, 2018.
- [11] Sathish T, Dinesh Kumar S, Muthukumar K, Karthick S. "Natural inspiration technique for the parameter optimization of A-GTAW welding of naval steel". *Materials Today: Proceedings*, 21, 843-846, 2020.
- [12] Priya C, Hemant P. "A review on activated gas tungsten arc welding (A-GTAW)". *International Journal of Scientific Development and Research*, 1(5), 798-803, 2016.
- [13] Malhotra D, Shahi AS, Gupta K. "Effect of GTAW remelting on the corrosion performance of AISI 316L cladding". *Materials and Corrosion*, 72, 141-153, 2021.
- [14] Abhirav M, Md Areeb M, Sricharan SS, Chandra SK. "Gas Tungsten Arc Welding of AISI 304 Austenitic Stainless Steels". *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(12), 148-150, 2015.
- [15] Elmesalamy A, Francis JA, Li L. "A comparison of residual stresses in multi pass narrow gap laser welds and gas-tungsten arc welds in AISI 316L stainless steel". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 113, 49-59, 2014.
- [16] Paulraj P, Garg R. "Effect of welding parameters on mechanical properties of GTAW of UNS S31803 and UNS S32750 weldments". *Manufacturing Review*, 2(29), 2-9, 2015.

- [17] Kahraman N, Durgutlu A, Gülenç B. "316L paslanmaz çeliğin TIG kaynağında koruyucu argon gazına hidrojen ilavesinin kaynak bölgesi tane morfolojisine etkilerinin araştırılması". *Journal of Polytechnic*, 7(3), 223-228, 2004.
- [18] Demarque R, dos Santos EP, Silva RS, de Castro JA. "Evaluation of the effect of the thermal cycle on the characteristics of welded joints through the variation of the heat input of the austenitic AISI 316L steels by the GMAW process". *Science and Technology of Materials*, 30, 51-59, 2018.
- [19] Barrios AM, Burgos LM, Niebles-Nuñez EE, Espitia L A, Unfried-Silgado J. "Influence of immersion corrosion on mechanical properties of AISI 430/AISI 316L dissimilar welded joints". *Ije Transactions B: Applications*, 34(5), 1352-1361, 2021.
- [20] Ragavendran M, Vasudevan M. "Effect of laser and hybrid laser welding processes on the residual stresses and distortion in AISI Type 316L(N) stainless steel weld joints". *Metallurgical And Materials Transactions B*, 52, 2582-2603, 2021.
- [21] Saha D, Pal S. "Microstructure and work hardening behavior of micro-plasma arc welded AISI 316L sheet joint". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(5), 2588-2599, 2019.
- [22] Türkan M, Karakaş Ö. "The influence of corrosion on the mechanical behavior of AISI 316L stainless steel welds". *Mechanika*, 25(2), 114-118, 2019.
- [23] Yılmaz R, Barlas Z. "Paslanmaz çeliklerin gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde koruyucu gaz kompozisyonunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi". *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 391-400, 2005.
- [24] Gokul KK, Devendranath RK, Arivazhagan N. "Characterization of metallurgical and mechanical properties on the multi-pass welding of Inconel 625 and AISI 316L". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(3), 1039-1047, 2015.
- [25] Yueqiao F, Zhen L, Zuming L, Yang L, Yucan L, Yongxian H. "Keyhole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel". *Materials and Design*, 85, 24-31, 2015.
- [26] Köse C, Kaçar R, Zorba AP, Bağirova M, Allahverdiyev AM. "The effect of CO<sub>2</sub> laser beam welded AISI 316L austenitic stainless steel on the viability of fibroblast cells, in vitro". *Materials Science and Engineering C*, 60, 211-218, 2016.
- [27] Kianersi D, Mostafaei A, Amadeh AA. "Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations". *Materials and Design*, 61, 251-263, 2014.
- [28] Abdeljlil CH, Kamel T, Rachid D, Abousoufiane O, Hussein A, Mohamed MZA. "Mechanical properties and microstructure of TIG and ATIG Welded 316L austenitic stainless steel with multi-components flux optimization using mixing design method and particle swarm optimization (PSO)". *Materials*, 14(23), 2-17, 2021.
- [29] Liu K, Li Y, Wang J. "Microstructure and low-temperature mechanical properties of 304 stainless steel joints by PAW+GTAW combined welding". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(10), 4561-4561, 2016.
- [30] Kahraman H, Güvenç MA, Mıstıkoğlu S. "AISI 304 östenitik paslanmaz çelik levhaların TIG kaynağı ile birleştirilmesinde farklı koruyucu gaz tiplerinin mekanik özelliklerine etkisi". *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 2(1), 1-12, 2021.
- [31] Sufizadeh AR, Akbari Mousavi SAA. "Investigation of Nd:YAG pulsed laser dissimilar welding of AISI 4340 and AISI 316L stainless steels on weld geometry and mechanical properties". *Mechanics & Industry*, 2017. <https://doi.org/10.1051/meca/2016079>.
- [32] Cao L, Shao X, Jiang P, Zhou Q, Rong Y, Geng S, Mi G. "Effects of welding speed on microstructure and mechanical property of fiber laser welded dissimilar butt joints between AISI 316L and EH36". *Metals*, 7(270), 2-13, 2017.
- [33] Kar J, Roy SK, Roy GG. "Effect of beam oscillation on microstructure and mechanical properties of AISI 316L electron beam welds". *Metallurgical And Materials Transactions A*, 48, 1759-1770, 2017.
- [34] Kumar P, Sinha AN, Hirwani CK, Murugan M, Saravanan A, Singh AK. "Effect of welding current in TIG welding 304L steel on temperature distribution, microstructure and mechanical properties". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(7), 2-20, 2021.
- [35] Moi SC, Pal PK, Bandyopadhyay A, Rudrapati R. "Effect of heat input on the mechanical and metallurgical characteristics of TIG welded joints". *Journal of Mechanical Engineering*, 16(2), 29-40, 2019.
- [36] Okonji PO, Nnuka EE, Odo JU. "Effect of welding current and filler metal types on macrostructure and tensile strength of GTAW welded stainless steel joints". *International Journal of Scientific Research and Engineering Trends*, 1(1), 9-12, 2015.
- [37] Chuaiphana W, Srijaroenpramongb L. "Optimization of TIG welding parameter in dissimilar joints of low nickel stainless steel AISI 205 and AISI 216". *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 163-178, 2020.
- [38] Dinesh KR, Elangovan S, Siva SN. "Parametric optimisation of pulsed - TIG welding process in butt joining of 304L austenitic stainless steel sheets". *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(11), 213-219, 2014.