



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

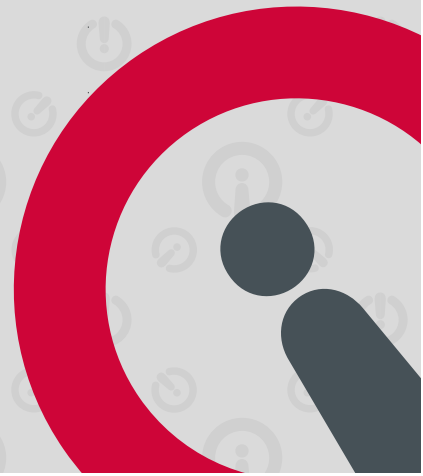
**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**GAZ METAL ARK  
KAYNAKLI AISI 430  
FERRİTİK PASLANMAZ  
ÇELİK LEVHALARIN İÇ YAPI  
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Mustafa ŞENOL**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**AĞUSTOS 2021**





**GAZ METAL ARK KAYNAKLI AISI 430 FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİK  
LEVHALARIN İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Mustafa ŞENOL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2021**

GAZ METAL ARK KAYNAKLI AISI 430 FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİK LEVHALARIN  
İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa ŞENOL

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2021

ÖZET

Ferritik paslanmaz çelikler başlıca alaşım elementi olarak Cr içerirler ve yüksek sıcaklıklarda bile iyi korozyon dayanımı gösterirler. Bu çelikler sıcak su tankları, gıda işleme sanayi, makine ve imalat sanayi, dışçılık ve tıbbi cihazlar, mutfak gereçleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu tür paslanmaz çeliklerin ergitme kaynağında karşılaşılan en karakteristik sorun ısıdan etkilenmiş bölgede kaba taneli yapı oluşumudur. Ayrıca, kaynak işleminde ısı girdisinin aşırı yüksek olması durumunda ısıdan etkilenmiş bölgede tane sınırlarında karbür çökmesi problemi ile de karşılaşılmaktadır. Dolayısıyla, bu çeliklerin başarılı bir şekilde klasik ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilebilmesi için kaynak işleminde kullanılan ısı girdisinin düşük tutulması gerekmektedir.

Bu çalışmada AISI 430 paslanmaz çelik levhaların gaz metal ark kaynağında ısı girdisinin kaynak bölgesindeki içyapı oluşumuna ve kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede, 5 mm kalınlığındaki AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhalar farklı ısı girdisi kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynaklı levhaların içyapıları ve mekanik özellikleri detaylı optik mikroskop çalışmaları, mikrosertlik ölçümleri ve çekme deneyleri ile incelenmiştir. Kaynaklı levhaların kaynak bölgesinde sertliğin arttığı ve çekme mukavemetinin baz levha düzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, artan ısı girdisi ısıdan etkilenmiş bölgenin tokluğunu olumsuz etkilediği de belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Ferritik paslanmaz çelik, AISI 430, karbür çökmesi, ısı girdisi

Sayfa Adedi : 46

Danışman : Prof. Dr. Gürel ÇAM

DETERMINATION OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF  
GAS METAL ARC WELDED AISI 430 FERRITIC STAINLESS STEEL PLATES

(M.Sc. Thesis)

Mustafa ŞENOL

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

August 2021

ABSTRACT

Ferritic stainless steels contain Cr as the main alloying element and display very good corrosion resistance even at high temperatures. These stainless steels are widely used in manufacturing of products such as hot water tanks, food processing industry, machinery and manufacturing industry, dental and medical devices, and kitchenware. The most characteristic difficulty encountered in fusion joining of this type of stainless steels is the grain coarsening in the heat affected zone. Furthermore, carbide precipitation at grain boundaries in the heat affected zone may also be observed if the heat input used in the welding process is extremely high. Thus, it is required that the heat input should be kept low in order to successfully join these steels by conventional fusion welding methods.

The determination of the effect of heat input on microstructural evolution in the weld region and the mechanical properties of the welded joints in gas metal arc welding of AISI 430 ferritic stainless steel plates was aimed in this study. To that end, AISI 430 ferritic stainless steel plates with a thickness of 5 mm were joined using different heat input values. The microstructures in the weld region and mechanical properties of the welded plates were investigated by detailed optical microscopy investigations, micro-hardness measurements and tensile tests. It was determined that the hardness increased in the weld region of the welded plates and the joints displayed similar tensile strength levels similar to that of the base plate. Moreover, it was observed that increasing heat input negatively affected the toughness of the heat-affected zone.

Key Words : Ferritic stainless steel, AISI 430, carbide precipitation, heat input  
Page Number : 46  
Supervisor : Prof. Dr. Gürel ÇAM

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bana yol gösteren, katkı ve eleştirileri ile her zaman yanımda olduğunu hissettiğim ve kendisi ile çalışmaktan büyük onur duyduğum çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Gürel ÇAM'a teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca teknik konularda desteklerini esirgemeyen Dr. H. Tarık SERİNDAĞ'a da müteşekkirim.

Ayrıca, malzeme temini konusunda bana yardımcı olan FMS ve Askaynak firmalarına da teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, numene hazırlamada ve deney çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Noksel Çelik Boru San. A.Ş., İskenderun, Fabrika Müdürü Sedat UYSAL beye ve Tuğrul YAZGAN beye ve bu zorlu süreçte beni yalnız bırakmayan aileme teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Paslanmaz Çeliğin Tarihçesi ve Kullanım Alanları .....	3
2.2. Paslanmaz Çelik Türleri.....	4
2.2.1. Ferritik paslanmaz çelikler.....	6
2.2.2. Östenitik paslanmaz çelikler.....	6
2.2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler.....	6
2.2.4. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler.....	7
2.2.5. Dupleks paslanmaz çelikler .....	7
2.3. Gaz Metal Ark Kaynağı .....	7
2.4. Ferritik Paslanmaz Çeliğin Kaynak Kabiliyeti ve Karşılaşılan Problemler .....	8
2.5. Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Ark Kaynağı Konusundaki Çalışmalar....	10
3. MATERYAL VE METOT.....	14
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	20
4.1. İçyapı Analizleri.....	20
4.2. Mekanik Özellikler.....	30
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	39
KAYNAKLAR .....	43
DİZİN.....	46

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Günümüzde yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelik türlerinin özellikleri ve kullanım alanları .....	5
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan AISI 430 ferritik çelik plakaların kimyasal bileşimi ....	14
Çizelge 3.2. Kaynak denemelerinde kullanılan kaynak parametreleri .....	15
Çizelge 4.1. Çekme testi sonuçları.....	32



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Gaz metal ark kaynağının şematik gösterimi.....	8
Şekil 3.1. Plakaların kaynak denemeleri için hazırlanması .....	14
Şekil 3.2. Kaynak denemelerinde kullanılan seramik altlık .....	15
Şekil 3.3. Kaynaklı levhalardan test numunelerinin çıkarılışının şematik gösterimi .....	16
Şekil 3.4. Mikro sertlik ölçümlerinin uygulandığı noktaları gösteren şematik çizim.....	17
Şekil 3.5. Baz plakadan çıkarılan çekme numunelerinin test öncesi görünümü.....	18
Şekil 3.6. Düşük ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test öncesi görünümü .....	18
Şekil 3.7. Yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test öncesi görünümü .....	19
Şekil 3.8. Düşük ve yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantılardan çıkarılan bükme numuneleri.....	19
Şekil 4.1. İki farklı ısı girdisi kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantıların kaynak kesitlerini gösteren makro resimler: (a) düşük ve (b) yüksek ısı girdili bağlantı .....	21
Şekil 4.2. Baz levha içyapısını gösteren optik mikroskop görüntüleri: (a) 10X büyütme ve (b) 20X büyütme .....	22
Şekil 4.3. Düşük ısı girdisi ile elde edilen kaynaklı bağlantının ergime bölgesinde oluşan içyapıyı gösteren optik mikroskop görüntüleri: (a) 10X ve (b) 20X büyütme .....	23
Şekil 4.4. Yüksek ısı girdisi ile elde edilen kaynaklı bağlantının ergime bölgesinde oluşan içyapıyı gösteren optik mikroskop görüntüleri: (a) 10X büyütme ve (b) 20X büyütme .....	24
Şekil 4.5. İki farklı ısı girdisi ile elde edilen kaynaklı bağlantıların IEB'lerini gösteren düşük büyütme (10X) mikro resimler: (a) düşük ve (b) yüksek ısı girdisi.....	25
Şekil 4.6. Düşük ısı girdisi kullanılarak üretilen kaynaklı bağlantıların IEB (a) ve IEB ile baz malzeme arasında kalan bölgenin (b) iç yapısını gösteren mikro resimler.....	27



<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.7. Yüksek ısı girdisi ile üretilen kaynaklı bağlantıların IEB (a) ve IEB ile baz malzeme arasında farklı bölgelerin (b, c, d) içyapısını gösteren mikro resimler.....	28
Şekil 4.8. Kaynak bağlantılarda kaynak kesiti boyunca sertlik dağılımını gösteren sertlik profilleri: (a) düşük ısı girdili bağlantı ve (b) yüksek ısı girdili bağlantı .....	31
Şekil 4.9. Baz plakadan çıkarılan çekme numunelerinin deney sonrası görünümü.....	33
Şekil 4.10. Düşük ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin deney sonrası kırılmanın baz plaka içerisinde gerçekleştiğini gösteren makro resimler .....	33
Şekil 4.11. Yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin deney sonrası kırılmanın baz plaka içerisinde gerçekleştiğini gösteren makro resimler .....	34
Şekil 4.12. Baz plakadan çıkarılan çekme numunelerinden elde edilen gerilme-yüzde uzama eğrileri.....	34
Şekil 4.13. Gerilme-uzama (%) eğrileri: (a) düşük ısı girdili kaynaklı bağlantı ve (b) yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantı. ....	35
Şekil 4.14. Düşük ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan bükme numunelerinin test sonrası görünümü: (a) Yüzey bükme ve (b) Kök bükme.....	36
Şekil 4.15. Yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan bükme numunelerinin test sonrası görünümü: (a) Yüzey bükme ve (b) Kök bükme.....	37
Şekil 4.16. Yüksek ısı girdili bağlantıdan çıkarılan kök bükme numunesindeki çatlayan bölgeyi gösteren makro resim. (Çatlak iri taneli IEB’de meydana gelmiştir).....	38

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

<b>mm<sup>2</sup></b>	Milimetre kare
<b>MPa</b>	Mega Pascal
<b>mm</b>	Milimetre
<b>°C</b>	Santigrat derece
<b>σ</b>	Sigma

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>AISI</b>	American Iron and Steel Institute
<b>GMAW</b>	Gas Metal Arc Welding
<b>GMAK</b>	Gaz Metal Ark Kaynağı
<b>GTAW</b>	Gas Tungsten Arc Welding
<b>SMAW</b>	Submerged Arc Welding
<b>MIG</b>	Metal İner Gaz
<b>MAG</b>	Metal Aktif Gaz
<b>HAZ</b>	Heat affected zone (Isıdan Etkilenen Bölge)
<b>IEB</b>	Isıdan Etkilenmiş Bölge
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>(Cr<sub>eş</sub>)</b>	Krom Eşdeğeri
<b>(Ni<sub>eş</sub>)</b>	Nikel Eşdeğeri
<b>C</b>	Karbon
<b>Si</b>	Silisyum
<b>Mn</b>	Mangan
<b>P</b>	Fosfor
<b>Ni</b>	Nikel

<b>Nb</b>	Niyobyum
<b>Cu</b>	Bakır
<b>Cr</b>	Krom
<b>S</b>	Kükürt
<b>Mo</b>	Molibden



## 1. GİRİŞ

Çelik üretimi insanlığın ihtiyaçları doğrultusunda zamanla farklılık göstermiştir. Paslanmaz çeliklere olan gereksinim de bu duruma bağlı olarak kaçınılmaz olmuştur. Alaşımli çelik türlerinden biri olan paslanmaz çelik grubu içerdiği krom-nikel ve diğer alaşım elementlerinin oranlarına bağlı olarak yapısal farklılıklar gösterir. Bu yapısal farklılıklar ise paslanmaz çeliğin kullanım alanlarını belirler. Günümüzde birçok endüstriyel alanda kullanılan bu çelik türü, sahip olduğu krom içeriği sonucu korozyon ve paslanmaya karşı olan yüksek direnciyle kısa sürede günlük hayattaki uygulamalarda yoğun olarak kullanılmaya başlanmış ve kısa süre içinde bazı endüstrilerde vazgeçilmez bir malzeme konumuna gelmiştir. Bu çelik grubu, çoğunlukla kimya ve güç üretim mühendisliği, gıda endüstrisi, sağlık uygulamaları, petrol ve petrokimyasal alanlarda, tekstil alanında, taşımacılıkta, yüksek veya sıfır altı sıcaklık uygulamalarında ve mimari uygulamalar gibi endüstri alanlarını kapsayan geniş bir alanda kullanılmaktadır (Taban, 2007).

AISI 430 diğer adlarıyla X6Cr17 ve 1.4016 paslanmaz çeliği ferritik paslanmaz çelikler sınıfına giren düşük karbonlu, yapısında nikel bulunmadığından anti manyetik etki göstermeyen, üzerinde uygulanabilecek kaynak yöntemleri sınırlı, diğer paslanmaz çeliklere nazaran daha ucuz maliyetli olmasına rağmen ülkemizde daha az bulunan bir paslanmaz çelik türüdür.

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağı konusunda yürütülmüş çalışmalara kısaca bir göz atmak gerekirse, mesela Kaya (2010) 3'er mm kalınlıklarındaki 430 ferritik ve 304 östenitik paslanmaz çelik levhaları farklı ark kaynağı yöntemleri kullanarak birleştirmiştir. Bu farklı kaynak yöntemleri arasında en yüksek çekme dayanımını TIG kaynaklı bağlantının gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, 430 kalite ferritik paslanmaz çeliğin ısıdan etkilenen bölgesinde (IEB) tane irileşmesi meydana geldiği rapor edilmiştir (Kaya, 2010).

Diğer taraftan, Kaçar & Gündüz (2007) direnç nokta kaynaklı AISI 304 östenitik / AISI 430 ferritik paslanmaz çelik bindirme bağlantıların kaynak kalitesine soğuk şekil verme miktarının etkisini incelemiştir. Yaptıkları detaylı mikroyapı incelemeleri sonucu, ferritik paslanmaz çelik tarafındaki IEB'de tane irileşmesi olduğu bulgularına rastlamışlardır (Kaçar & Gündüz, 2007). Benzer şekilde, Arabacı (2019) yürüttüğü

çalışmada yakma alın kaynağı yöntemiyle AISI 430 çeliğin kaynağını yapmış ve elde ettiği bağlantıların mekanik özelliklerini incelemiştir. Araştırmadan elde edilen verilere göre AISI 430 paslanmaz çelik bağlantının IEB’de sertlik değerinde önemli ölçüde düşüş olduğu belirlenmiştir (Arabacı, 2019).

Yürük (2017), yaptığı çalışmada St-37 çeliği ile AISI 430 paslanmaz çeliğinin farklı tel besleme hızlarında MIG kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve kaynak bölgesindeki sertlik değerini tespit etmiştir. AISI 430 paslanmaz çeliği tarafındaki IEB’inde krom karbür çökmesi sonucu sertliğin arttığı belirtilmiştir (Yürük, 2017).

Teker (2010) ise, AISI 430 paslanmaz çelik levhaları sinerjik kontrollü darbeli gaz metal ark kaynağı ve manuel gaz metal ark kaynağı ile kaynak yapmış ve birleşme bölgesindeki mikroyapılar incelenmiştir. Araştırma sonucu darbeli gaz metal ark kaynağından elde edilen kaynak kalitesi ve mekanik özelliklerin daha iyi olduğu görülmüş ve yine kaynaklı bağlantılarda krom karbür oluşumu gözlemlenmiştir (Teker, 2010).

Ülkemizde paslanmaz çeliklerin tüketimi, son yıllarda giderek artmaktadır. Paslanmaz çeliklerin başlıca kullanıldıkları alanlar arasında ilk sırada petrol rafinerileri, kimya ve ilaç sanayileri ile gıda sektörü gelmektedir. Paslanmaz çelik tüketiminin büyük bir kısmı yassı mamul biçimindedir. Az miktarlarda da; çubuk, tel, boru, dövme parça ve döküm parça olarak kullanılmaktadırlar. AISI 430 ferritik paslanmaz çelikler paslanmaz çelikler içerisinde en ucuz çelik olsa da, diğer çeliklere oranla çok daha yüksek maliyetlidir. Ancak, yüksek maliyetinin yanında diğer tüm paslanmaz çelikler gibi bakımının ucuz ve kolay olması, uzun ömürlü olması, tümüyle geri kazanılabilmesi ve çevreci olması gibi birçok avantajı bulunmaktadır. Dolayısıyla, kullanım ömrü dikkate alınarak yapılacak fiyat analizlerinde, paslanmaz çelik kullanmanın daha ekonomik olduğu görülmüştür (Aran & Temel, 2004).

Bu tez beş ana bölüm içermekte olup birinci ve ikinci bölümde paslanmaz çelikler hakkında genel bilgiler, kaynak kabiliyetleri ve önceki çalışmaları verilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal ve mekanik özellikleri ile yapılan deneysel çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde ise deneysel bulgular tartışılmıştır. Beşinci ve son bölümde ise çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve konu hakkında sonraki çalışmalar için öneriler yapılmıştır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu kısım, paslanmaz çelik türleri, paslanmaz çeliklerin tarihçesi ve kullanım alanları, gaz metal ark kaynağı, ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti ile ferritik paslanmaz çeliklerin ergitme kaynağında karşılaşılan problemler ve ferritik paslanmaz çeliklerin ark kaynağı konusunda daha önce yapılmış çalışmalar olmak üzere beş ana başlık içermektedir. Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağı bölümünde sadece gaz metal ark kaynağı (GMAK) ele alınacaktır.

### 2.1. Paslanmaz Çeliğin Tarihçesi ve Kullanım Alanları

Yapısında Fe-Cr, Fe-Cr-C veya Fe-Cr-Ni içeren yüksek alaşımlı çelikler paslanmaz çelikler olarak adlandırılır. Bir çeliğin paslanmaz olarak sınıflandırılabilmesi için yapısında en az %10,5 krom elementi içermesi gerekmektedir. İçerdiği krom elementinin oksijenle ilişkisi sayesinde çeliğin tüm yüzeyinde krom oksit oluşur ve bu oksit tabakası atmosferdeki oksijen ile nemin çeliğin içerisindeki demire ulaşmasına engel olur. Bu da malzemeye paslanmazlık (korozyon direnci) sağlamaktadır. Paslanmaz çelikler ayrıca yüksek sıcaklıklara olan dayanım ile birlikte iyi bir oksidasyon direncine sahiptir. Bu da paslanmaz çeliklerin çok çeşitli sektörlerde kullanımını sağlamaktadır (Lippold, 2005).

Paslanmaz çeliğin ortaya çıkması bir bakıma krom elementinin keşfedilmesiyle hızlanmıştır. 1797 yılında Fransız kimyager Louis Nicholas Vauquelin, krom oksit cevherini Sibiryaya yakınlarında keşfetmesinin hemen sonrasında 1798 yılında dünyanın ilk krom metal parçasını Fransız Akademisinde sergilemiştir. Bundan sonraki süreçte ise krom elementi paslanmaz çeliklerin olmazsa olmaz elementi olmuştur. 1821 yılında ise Fransız Pierre Berthier yüksek oranda krom ve demirden elde ettiği alaşımla ferrokrom malzemeyi keşfetmiştir ve günümüzde kullanılan paslanmaz çeliklerin temelini atmıştır. 1904'lü yılların başında metalurji profesörü Leon Guillet martenzitik ve ferritik paslanmaz çelikleri keşfetti. Martenzitik sertleştirilebilir çelikler daha sonradan AISI 410, 420 ve 440C olarak, ferritik sertleştirilemeyen çelikler ise AISI 442 ve 446 olarak tanımlanmışlardır. Paslanmaz çeliklerdeki korozyon direncinin keşfedilmesi ise 1908 yılında Almanya'da Philip Monnartz'ın yüksek kromlu çeliklerde karbon oranının korozyon direncine olan etkisi adlı çalışmasıyla gerçekleşmiştir (Cobb, 2010).

Korozyona dirençli alaşımlara yönelik çalışmalar özellikle 1900 ile 1915 yılları arasında artmıştır. Ticari paslanmaz çelik alaşımlarının ilk olarak rapor edilmesi İngiltere'nin Sheffield kentinde bulunan Thomas Firth and Sons' da metalurjist olan Harry Brearly' e atfedilmektedir. 1897 yılında Almanya'da Goldschmidt tarafından düşük C'lu Cr alaşımlarının üretilmesi üzerine geliştirdiği teknik bu yenilenen ilgiyi artırmıştır. Devamında Guillet, Portevin ve Giesen 1904 ve 1909 yıllarında %13 Cr'lu martenzitik ve %17 Cr'lu ferritik çelikler ile ilgili çalışmaları içeren makaleler yayımlamışlardır. 1909'da Guillet, ostenitik paslanmaz çeliklerin işareti olan Cr-Ni çelikleri hakkında bir makale yayımlamıştır. 1899'da Heroult'un elektrik ergitme fırınlarını geliştirmesi de paslanmaz çeliklerin yaygın biçimde üretimini olanaklı duruma getirmiştir (Taban, 2007; Lippold ve Kotecki 2005).

Yüksek korozyon direnci, yüksek mukavemet, oksidasyona karşı dayanıklılık, paslanmazlık, şekillendirilebilme, düşük ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık, kararlı bir yapı ve yenilenebilme özellikleriyle birlikte paslanmaz çelikler gıda, petrokimya, ilaç, kişisel bakım aletleri, kriyojenik depolama uygulamaları, inşaat, otomotiv ve daha birçok endüstride tercih edilen malzeme olmuştur (Erkkila, 2004). Çizelge 2.1'de en yaygın kullanılan paslanmaz çelikler ve kullanım alanları verilmektedir.

## 2.2. Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaya gösterdikleri dirençleri yanında paslanmaz çelikler, yüksek dayanım ve süneklige de sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde birçok uygulamada tercih sebebi olsalar da imalat sırasında işleme zorluğu gösterirler. Ayrıca, paslanmaz çeliklerin maliyeti sade karbonlu çeliklere veya düşük alaşımlı çeliklere nazaran oldukça yüksektir. Paslanmaz çelikler yaygın olarak 5 gruba ayrılmaktadır. Bunlar:

- Ferritik
- Östenitik
- Martenzitik
- Çökelme sertleştirmeli
- Dupleks paslanmaz çeliklerdir.

Çizelge 2.1. Günümüzde yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelik türlerinin özellikleri ve kullanım alanları (Azim Paslanmaz Çelik, 2021).

KALİTE	ODA SICAKLIĞINDA	YÜKSEK SICAKLIKTA	KULLANMA LİMİTİ	ÜRETİM	KULLANMA SAHASI
410	Zayıf sulandırılmış asitlere, klorlanmış veya havası alınmış sulara iyi dayanıklılık gösterir	Yaklaşık 700 °C'ye kadar oksidasyona dayanıklılığı iyidir.	Özellikle oksitleyici ortamda kloride çok hassastır. Düşük sıcaklıklarda kırılındır.	200-300 °C'de ön ısıtmadan sonra TIG kaynağı yapılabilir. 650 °C'de tavlanır.	Petrokimya endüstrilerinde borulama ısı değiştirgeçlerinde ve rekuparatörlerinde; buhar ve su vanalarında fittingslerinde, mutfak aletleri ve spor ekipmanlarında.
420	Zayıf veya sulandırılmış asitlere iyi dayanıklılık, su verme ve menevişleme sonrasında mükemmel mekanik özellikler gösterir.	Yaklaşık 700 °C'ye kadar oksidasyona iyi dayanıklılık gösterir.	Özellikle oksitleyici ortamda kloride çok hassastır. Düşük sıcaklıklarda kırılındır.	200-300 °C'de ön ısıtmadan sonra TIG kaynağı yapılabilir. 650 °C'de tavlanır.	Karbondioksit ve kirlenmiş petrol kuyularında dişli boru yapımında
430	Korozyona 410 ve 420 kaliteden daha dayanıklıdır. Kloridsiz asit oksidasyonlarına iyi dayanıklılık gösterir.	800 °C'ye kadarki yüksek sıcaklık oksidasyonuna dayanıklılığı iyidir.	Oksitleyici ortamda kloride karşı hassastır. Düşük sıcaklıklarda kırılındır.	200-300 °C'de ön ısıtmadan sonra TIG kaynağı yapılabilir. 700-800 °C'de tavlanır.	Yüksek sıcaklık, susuz ortamlarda petrokimya endüstrisinde ısı değiştirgeçlerinde ve ısı reküptörlerinde
304	Atmosferik korozyona nötr nemli ortamlar alkalın korozyonuna kloridsiz asit ortamlarına karşı dayanıklılığı iyidir. Bütün sıcaklıklarda işlenebilir yumuşaktır.	Yaklaşık 900 °C'ye kadar yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı dayanıklı olup iyi mekanik ve sürtünme dayanıklılığına sahiptir.	600-800 °C arasında özellikle oksitli ve sıcak nemli klorid ortamlarda iç yapı gerilme korozyon çatlağına sebebiyet verir.	Kaynak yapılabilir fakat iç yapı bozulabilir. Bükülebilir ve genişletilebilir.	Kimya; petrokimya ve kazanlarda boru ve ısı değiştirgeçlerinde kullanılır. Ev aletleri endüstriyel mutfaklar ve otomotiv sanayinde.
304L	304 kalitenin düşük karbonlu şeklidir. Bu durum iç yapı değişmelerine karşı dayanımı yükseltir. Özellikle nitrik aside karşı direnci iyidir.	900 °C'ye kadar yüksek ısı oksidasyonuna karşı dayanıklılığı iyidir. Sürtünme dayanıklılığı 500 °C üzerinde garanti edilemez.	Gerilme korozyon çatlağına (SCC) karşı dayanıklılığı iyidir.	Isıl işlem uygulanmadan kaynak yapılabilir, bükülebilir ve genişletilebilir.	Kimya; petrokimya ve yiyecek endüstrilerinde boru ve ısı değiştirgeçlerinde, süthane ekipmanlarında, kağıt sanayi, nitrik asit ünitelerinde, sabun ve deri sanayinde.
321	304 kaliteye benzergenel korozyon özelliklerine sahiptir. İç yapı korozyonuna karşı hassasiyeti titanyum stabilizasyonu ile giderilmiştir. Bütün ısılarda yumuşaktır.	900 °C kadar ısı oksidasyonuna karşı dayanıklılığı iyidir. Çok iyi mekanik ve sürtünme dayanıklılığına sahiptir.	Gerilme korozyon çatlağına hassastır.	Isıl işlem uygulanmadan kaynak yapılabilir, bükülebilir ve genişletilebilir.	Kimya ve petrokimya sanayinde kazanlarda ve süpe ısıtıcılarda kullanılır.
316	Molibdenin varlığı nemli klorid çevrelerde haddedençkilmiş 304 kaliteye nazaran her tür sıcaklıkta daha iyi cevap verir.	900 °C'ye kadar olan sıcaklıkta oksidasyona, gerek mekanik özelliği ve çekme mukavemeti iyidir.	Gerilme korozyon çatlağı (SCC) ve dahili korozyona karşı hassastır.	TIG ve MIG kaynağı yapılabilir, iyi bükülebilir ve uzayabilir.	Sıcağa mukavim eşanjörlerde, kimya sanayinde petrokimya ve gıda sanayinde kullanılan buhar kazanlarında meyvesuyu ve likör üretimi ile et işletme ünitelerinde kullanılır.
316L	316 kalitenin düşük karbonlu kompozisyonudur. İç korozyona karşı duyarlı değildir. Bütün sıcaklıklarda yumuşaktır.	Yaklaşık 900 °C'ye kadar yüksek ısı oksidasyonuna karşı dayanıklılığı iyidir. Fakat 500 °C üzerinde sürtünme kabiliyeti düşüktür.	316 kalite gibi gerilme korozyon çatlağına mekanik özellikleri 316 kaliteden daha azdır.	Kaynak yapılabilir, bükülebilir ve genişletilebilir.	Kimya petrokimya ve gıda endüstrilerinde ısı değiştirgeç ve borularında suni ipek sanayi, süthane ekipmanları, nükleer mühendislik.
316Ti	316 kalitenin titanyum stabileli şeklidir. 316 kaliteye benzer genel korozyon dayanıklılığına sahiptir. İç korozyona karşı duyarlı değildir. Bütün ısılarda yumuşaktır.	900 °C kadar ısı oksidasyonuna karşı dayanıklılığı iyidir. Sürtünme kabiliyeti yüksektir.	Gerilme korozyon çatlağına duyarlıdır.	Isıl işlem uygulanmadan kaynak yapılabilir, bükülebilir ve genişletilebilir.	Kimya petrokimya ve gıda endüstrilerinde boru ve ısı değiştirgeçlerinde kazan ve fırınlarda , vernik, sentetik reçine lastik ve motor yakıtı endüstrilerinde pompa kompresör parçaları, nükleer mühendislik.
309 ve 310	25/20 paslanmaz çelik ve düşük karbon içeriğiyle yüksek sıcaklıklarda ve nemli ortamlarda tercih edilir.	Tipik ateşe dayanıklı kalite yaklaşık 1100 °C kadar oksidasyona karşı mükemmel dayanıklıdır. 800 °C kadar sürtünme kabiliyeti yüksektir.	900 °C'den fazla sıcaklıklarda devamlı çalışma durumunda sigma oluşumuna yol açar. Buda iç korozyona karşı duyarlı hale getirir.	Kaynak yapılabilir, fakat iç korozyon olabilir.	Kimya petrokimya endüstrilerinde ısı değiştirgeçlerinde fırın tüplerinde



### **2.2.1. Ferritik paslanmaz çelikler**

Ferritik paslanmaz çelikler yapısında yaklaşık olarak %12-30 arası krom bulundururlar. Yüksek oranda krom bulunduranları, geniş sıcaklık aralığında çalışan kazan boruları ve türbin kanatçıkları gibi uygulamalarda tercih edilir. Kullanım açısından baktığımızda ferritik paslanmaz çelikler süneklik, kaynak kabiliyeti, kırılmalığa ve çentik etkisine karşı dayanıklılık, şekillendirilebilme gibi özellikleriyle östenitik paslanmaz çeliklerin gerisinde kalırken bazı uygulamalarda (özellikle yüksek sıcaklıklarda) korozyon direnci açısından östenitik paslanmaz çeliklere göre daha iyi sonuçlar verebilir (Azim Paslanmaz Çelik, 2021). Bununla birlikte ferritik paslanmaz çelikler östenitik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek ısı iletkenliğe sahip iken daha düşük ısı genişleme gösterir ve korozyondan dolayı gerilim çatlamlarına karşı oldukça dayanıklıdır. Ferritik paslanmaz çeliklerden AISI 405, 409, 430, 434, 439 en çok bilinenleridir (Lai, 2012).

### **2.2.2. Östenitik paslanmaz çelikler**

Östenitik paslanmaz çelikler yapısında bulunan nikelden dolayı pahalı olmasına karşın paslanmaz çelikler arasında en yaygın ve kullanım alanı açısından çok çeşitli uygulamalarda tercih edilmektedir. Yapısında %10'a kadar nikel bulunduran paslanmaz çelikler östenitik gruba girmektedir. Süneklik ve toklukları diğer paslanmaz çeliklere göre iyidir. En önemli özellikleri ise anti-manyetik özellik göstermeleridir. Genelde yapısında %18 krom - %8 nikel içerirler. Krom-nikel oranı optimize edilerek paslanmaz çeliğin şekillendirilebilme kabiliyeti artırılabilir. En yaygın olarak kullanılanları AISI 304, 304L, 306, 316 olanlarıdır (Khatib, 2009).

### **2.2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler**

Martenzitik paslanmaz çelikler yapısında %18'e kadar krom içerirken hiç nikel bulundurmazlar. Ferritik paslanmaz çeliklere göre daha fazla karbon içerdiklerinden dolayı ısı işleme daha yatkındırlar. Yorulma dirençleri yüksek olmasına rağmen paslanmaya karşı direnci ferritik ve östenitik paslanmaz çeliklere göre düşüktür. Kullanım alanları genelde sağlık ve gıda sektörüdür. En bilinenleri AISI 410, 420 ve 440 kalite olanlarıdır (Groover, 2015).

#### **2.2.4. Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler**

Krom-nikel çelik kompozisyonlarına az miktarda bakır, alüminyum, niyobyum, tantal gibi elementlerin eklenmesi, bazı durumlarda martenzitik paslanmaz çeliklerden daha dayanıklı olan yüksek mukavemetli çökeltilerin oluşmasına yol açar. Bu çökeltileri oluşturduğu paslanmaz çelik türü çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler olarak adlandırılır. Bu türdeki paslanmaz çelikler benzer mukavemete sahip martenzitik paslanmaz çelikler göre daha iyi sünekliğe sahiptir. Ayrıca kaynak edilebilme kabiliyetleri ve korozyon dirençleri daha iyidir. Genelde uzay-havacılık alanlarında kullanılır (Khatib, 2009).

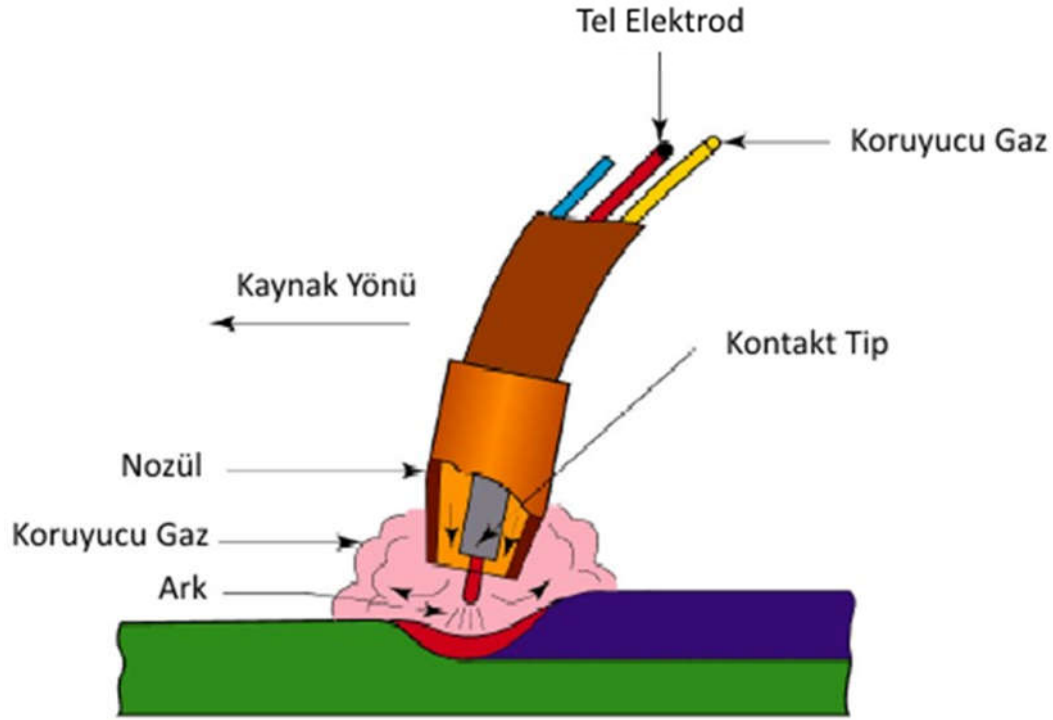
#### **2.2.5. Dupleks paslanmaz çelikler**

İçyapılarında eşit oranda ferrit ve östenit fazlarını içerirler. Paslanmaya karşı dirençleri östenitik paslanmaz çelikler ile benzerlik gösterirken gerilmeli korozyon çatlamasına karşı daha dirençlidir. Daha çok petrokimya, kağıt ve nükleer gibi endüstri alanlarında yaygın olarak kullanılır (Groover, 2015).

### **2.3. Gaz Metal Ark Kaynağı**

Şekil 2.1' de şematik olarak gösterilen bu kaynak yönteminde, işin büyük kısmını tel sürme ünitesi ile birlikte kaynak makinesi yapar. Tel sürme ünitesine bağlanan makara yardımıyla kaynak teli otomatik bir şekilde torca doğru iletilerek uç kısım ile kaynak yapılacak malzeme arasında oluşan arkın oluşturduğu ısı ile kaynak yapılır. Kaynak esnasında isminden de anlaşıldığı üzere gaz korumalı bir şekilde kaynak işlemi gerçekleşir. İyi bir kaynak elde etmek için gaz debisi her zaman için kullanılan tel çapının 10 katı olacak şekilde ayarlanmalıdır. Örnek olarak 1,2 mm tel için 12 lt/min. Çeliklerin kaynağında inert gaz yanında karışım gazlar veya karbondioksit gazı da kullanılabilir. Çelikler dışındaki alaşımlarda, özellikle de oksitlenme problemi olan malzemelerin kaynağında, sadece soy gaz koruma gazı olarak kullanılmalıdır. Buna rağmen karışım gaz kullanılması, sıçramaları azaltarak daha iyi bir kaynak elde etmemize yardımcı olur.

Kullanılan gaz inert bir gaz ise bu yöntem metal inert gaz kaynağı (MIG), aktif bir gaz ise metal aktif gaz kaynağı (MAG) adı verilir.



Şekil 2.1. Gaz metal ark kaynağının şematik gösterimi (Çam, 2020)

#### 2.4. Ferritik Paslanmaz Çeliğin Kaynak Kabiliyeti ve Karşılaşılan Problemler

Bir malzemenin kaynak kabiliyetini, malzemenin kaynak yöntemine uygunluğu ve kaynak edilebilme kolaylığı ile ilişkilendirebiliriz. Kaynak kabiliyeti, malzemenin mukavemet, süneklik, Charpy V-çentik, tokluk, korozyona karşı direnci gibi özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Çeliklerin kaynak edilebilme performansı bu malzemelerin darbe kopma testlerinin karşılaştırılmasıyla belirlenebilir. Ayrıca HAZ bölgesindeki darbe testine bağlı olarak kaynakçı ve kaynak yöntemi nitelendirilebilir.

Ferritik paslanmaz çelikler, karbon-mangan alaşımlı çeliklerden daha düşük bir genleşme katsayısına sahip olduğundan, kaynak sırasında bükülme ve bozulma çok daha azdır ancak

manyetikler. Bu nedenle manyetik ark darbesine maruz kalırlar. Ayrıca, ferritik paslanmaz çelikler geleneksel ısıl işlemlerle sertleştirilemezler (Afrox, 2021).

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynaklarında, ergime bölgesinde döküm yapısına benzer dendritik bir yapı oluşur. Bu bölgede oluşan dendritik yapı karakteristik olarak ergime sınırından merkez çizgisine doğru uzanan kolonsal (sütun şeklinde) tanelerden oluşur. Ayrıca, ferritik paslanmaz çeliklerin ergitme kaynakları sonrası genel olarak IEB'nin ergime arayüzüne yakın kısmında tane irileşmesi oluşma eğilimi vardır. Ferritik paslanmaz çeliklerin IEB'deki tane boyutu, IEB'nin baz metal tarafından ergime sınırına doğru kademeli olarak artmaktadır (Çam, 2020).

Yüksek karbon veya düşük krom içerikli ferritik paslanmaz çeliklerde (AISI 409, 430, 434, 442, 446) kaynak esnasında martenzit oluşumu meydana gelebilir. Kaynak sonrasında bu malzemelerin süneklikten kırılganlığa geçiş sıcaklığı erimiş halden soğutma safhasına geçince ve sonrasında kaynak çatlamaına artan duyarlılıkla birlikte oda sıcaklığının üzerinde olacaktır. Bu tür malzemelerin ağır ve büyük boyutta olanlarının kaynağı esnasında ekstra dikkatli olmak gerekebilir. Ön ısıtma, soğutma hızını yavaşlatma ve buna bağlı olarak gerilmeli korozyon çatlamaalarını en aza indirmek için tercih edilebilir (American Society of Metals [ASM], 1993).

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında karşılaşılan başlıca problemler şunlardır:

- Kaynak işleminde ergime bölgesinde ve IEB'de yeterli yüksek sıcaklığa çıkılırsa hızlı bir şekilde tane kabalaşması ve bunun sonucunda bu bölgelerdeki süneklik ve toklukta düşüş.
- Hızlı soğuma sonucu IEB'de martenzitik yapı oluşumu ve bununla birlikte süneklikte ve toklukta düşüş.
- Yine hızlı soğuma sonucu IEB'nin tane sınırlarında krom-karbür çökmesi gerçekleşmesi ve akabinde tane sınırlarında korozyon meydana gelmesi.
- Kalınlığı 10 mm'nin üzerindeki parçalarda ön ısıtma kullanılmaz ise kaynaktaki gerilmelerin çatlamaa yol açması.
- Kaynak sonrası 885 °C civarında yavaş soğumanın kırılgan faz oluşumuna neden olmasıdır (Çam, 2020).

## 2.5. Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Ark Kaynağı Konusundaki Çalışmalar

Bu bölümde ağırlıklı olarak, sayıca fazla olmasa da ferritik paslanmaz çeliklerin gaz metal ark kaynağı yöntemiyle birleştirilmesi üzerine daha önce yapılan çalışmalar ele alınacaktır.

Lippold & Kotecki (2005), ferritik paslanmaz çeliklerin ark kaynağında soğutma sırasında karbon ve nitrojenin çözünürlüğünün önemli ölçüde azalması nedeniyle ferrit fazında aşırı doymuş karbon ve nitrojen ihtiva eden karbürler, nitrürler veya karbonitritler oluştuğunu belirtmektedir. Nitekim, Van Warmelo ve ark. (2007), genellikle ferritik paslanmaz çeliğin IEB'nde yukarıda bahsi geçen çökelti türlerinin gözlemlendiğini bildirmişlerdir. Ancak, Zou ve ark. (2019), ana çökeltinin krom bakımından zengin karbür olduğunu ve moleküler formülün  $M_{23}C_6$  olduğunu ve buradaki "M" nin çoğunlukla Cr ve Fe'yi temsil ettiğini belirtmişlerdir.

Taban ve ark. (2007) da, 6 mm kalınlığında modifiyeli X2CrNi12 ferritik paslanmaz çeliğin iki farklı ısı girdisine bağlı olarak mikroyapısal özellikleri ile birlikte mekanik özelliklerini ele almıştır. Çalışma sonuçları kaynak bölgesindeki tane boyutu ile darbe dayanıklılığının birbiriyle bağlantılı olduğunu ortaya koymuştur. Bu kapsamda tane kabalaşmasının ne gerilme özellikleri ne de bükülme özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı, ancak sıfırın altındaki sıcaklıklarda IEB'nin darbe tokluğunun genellikle azaldığı ve bunun tane büyüklüğüne ve yapıdaki mevcut çökeltilerin miktarına bağlı olduğunu rapor etmişlerdir (Taban ve ark., 2007).

Bir başka çalışmada, Kaçar & Gündüz (2007) direnç nokta kaynaklı AISI 304 östenitik / AISI 430 ferritik paslanmaz çelik bindirme bağlantıların kaynak kalitesine soğuk şekil verme miktarının etkisini ve kaynak bölgesinde oluşan içyapıları incelemiştir. Çalışma sonucunda, ferritik çelik tarafındaki IEB'de tane irileşmesi meydana gelirken östenitik tarafındaki IEB'de yeniden kristalleşme sonucu tane incelmeye tespit edilmiştir (Kaçar, 2007). Benzer şekilde, Aguilar ve ark., (2013) ferritik ve östenitik paslanmaz çelik levhaları ark kaynağı ile birleştirmiş ve elde ettikleri birleştirmelerin ferritik çelik tarafındaki IEB'de ergime ara yüzeyine yakın kısmında oldukça belirgin tane irileşmesi ve martenzit oluşumu gözlemişlerdir.

Bunlara ilaveten, Khorrami ve ark. (2014) da, orta kromlu ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak işlemi sonrasında IEB'de martenzit oluşumu söz konusu olduğunu rapor etmişlerdir. Dahası, yaptıkları çalışmada bu çalışmaya benzer biçimde ısı girdisinin tane boyutunu etkilediğini ve granüler çökeltilerin ferrit taneleri içinde ayrı bir şekilde dağıldığını tespit etmişlerdir.

Kaya (2010) ise, TIG (Tungsten Inert Gas), MIG (Metal Inert Gas) ve örtülü elektrot ark kaynağı (EMAK) kaynaklı 3'er mm kalınlığındaki 430 ferritik ve 304 östenitik paslanmaz çelik bağlantıların çekme dayanımı, mikrosertlik, mikroyapı özellikleri ve çentik darbe dayanımlarını incelenmiştir. En yüksek çekme dayanımını TIG kaynaklı bağlantının gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, mikroyapıdaki incelemelerde 430 kalite ferritik paslanmaz çeliğin ısıdan etkilenmiş bölgesinde (IEB, heat affected zone -HAZ) tane irileşmesi meydana gelmiştir (Kaya, 2010).

Bir başka çalışmada, Teker (2010) sinerjik kontrollü darbeli gaz metal ark kaynağı (GMAK-P) ve manuel GMAK kaynaklı AISI 430 paslanmaz çelik bağlantıların kaynak bölgesindeki mikroyapıları ve mekanik davranışlarını incelemiştir. Bu incelemelerde GMAW-P kaynağından elde edilen kaynak kalitesi ve mekanik özelliklerin daha iyi olduğu rapor ve yine kaynaklı bağlantılarda krom karbür oluşumu gözlemlenmiştir (Teker, 2010). Bu çalışmanın devamında, Teker ve Kurşun (2011) 10 mm kalınlığında ferritik paslanmaz çelik (AISI 430) ve orta karbonlu çelik (AISI 1030) çiftinin sinerjik kontrollü GMAK-P ve manuel GMAK ile birleştirilmesini incelemiştir. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme ve mikro sertlik testleri yapılmıştır. Deney sonucuna göre GMAK-P ile birleştirilen AISI 430/AISI 1030 çelik bağlantıların, GMAK ile elde edilen bağlantılara kıyasla daha üstün gerilme mukavemeti, daha az tane büyümesi ve daha dar IEB gösterdiği raporlanmıştır. Bunun daha düşük ısı girdisi, ergime bölgesinde daha ince taneli yapı oluşumu ve ergime bölgesinin daha yüksek sertliğe sahip olmasından kaynaklandığı ileri sürülmüştür (Teker ve Kurşun, 2011).

Poonayom ve ark. (2015), yürüttükleri araştırmada akım ve kaynak hızı parametrelerinin, SS400 karbon çeliği ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin gaz metal ark kaynağı (GMAK) ile birleştirilmesi sonucu oluşacak kaynaklı bağlantı üzerine etkisinin

incelenmesini hedeflemiştir. Kaynak parametreleri kaynak hızı, akım, gaz akış hızları, gaz karışım oranı tel çapı (400 mm/min, 90-120 A, 4 mm/s, 5-12 L/min, %80Ar+%20CO<sub>2</sub>, 1,2mm) olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler daha düşük kaynak akımı ile elde edilen bağlantının daha zayıf ve düşük mukavemetli olduğunu göstermiştir. Kaynaklı bağlantıların mikro yapı incelemesinde, kaynak metalinde (ergime bölgesinde) kolonsal taneler, IEB'de ise kaba taneli yapı görülmüştür. Ayrıca, hem kaynak metali ve hem de IEB'deki tane sınırlarında sert çökelti partikülleri tespit edilmiştir. Farklı kaynak akımları ile kaynak yapılan bağlantıların sertliğinde herhangi bir farklılık görülmemiş, ancak kaynak metalinin sertliğinin diğer bölgelere kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Poonnayom ve ark., 2015).

Yürük (2017) ise, farklı mekanik özellik ve kimyasal kompozisyonlara sahip St-37 çelik ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhaları farklı tel besleme hızlarında MIG kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Bu çalışmada, elde edilen bağlantıların kaynak bölgesindeki (baz metal, IEB ve EB) mikroyapısal değişimler ve sertlik dağılımı incelenmiş ve bağlantıların mekanik özellikleri belirlenmiştir. AISI 430 paslanmaz çeliğinin IEB'sinde tane sınırlarında meydana gelen krom karbür çökmesinin sertlik artışına yol açtığı rapor edilmiştir. Ayrıca, MIG kaynağında tel besleme hızının artması ısı girdisinin artmasına dolayısı ile kaynak sonrası soğuma hızının düşmesine yol açmış, bu da sertlik düşüşüne neden olmuştur (Yürük, 2017).

Gupta ve ark. (2018), iki farklı östenitik dolgu teli ER304L ve ER308L kullanarak 409L ferritik paslanmaz çeliğin gaz metal ark kaynağında mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki ısı girdisinin değişimi incelemiştir. Bu çalışmada 0,3, 0,4 ve 0,5 kJ / mm'lik üç farklı ısı girdisi parametresi kullanılmış ve ısı girdisinin kaynak kalitesine etkisi metalografik çalışma ve mekanik testlerle incelenmiştir. Yüzde seyreltme, krom nikel oranı, mikroyapı, mikrosertlik ve gerilme özelliklerin hepsinin ısı girdisinden etkilendiği görülmüştür. 0,4 kJ /mm ısı girdisine sahip kaynaklı numunenin, kullanılan dolgu telinin türüne bakılmaksızın daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğu ortaya çıkmıştır. 304L dolgu teli kullanılarak elde edilen mekanik özelliklerin, kaynak sırasında sağlanan ısı girdisine bakılmaksızın 308L dolgu teli kullanılarak elde edilenlere göre daha iyi olduğu raporlanmıştır (Gupta ve ark., 2018).

Arabacı (2019) ise, yakma alın kaynağı yöntemiyle AISI 304, 430 ve 1050 çelik levhaları kaynak etmiş ve elde edilen bağlantıların mekanik özelliklerini incelemiştir. Tüm kaynak işlemlerinde parametreler sabit tutulmuş olup bu tür çeliklerin kaynağını yapan imalatçılara kolaylık sağlayacak verilere ulaşılması hedeflenmiştir. Araştırmadan elde edilen verilere göre AISI 304 ve 1050 malzemelerindeki en yüksek sertlik değeri IEB’de görülürken AISI 430 ferritik paslanmaz çelikte bu durumun tam tersi olduğu yani IEB’de sertlik değerinde önemli ölçüde düşüş olduğu gözlenmiştir (Arabacı, 2019).

Ambade ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, 4mm kalınlığında hazırlanan AISI 409M ferritik paslanmaz çelik levhaların 90, 100 ve 110 amperde örtülü elektrot elektrik ark kaynağı (ÖMAK), GMAK ve GTAK yöntemleri uygulanarak mikro yapıdaki değişimler ve oluşacak korozyonun karşılaştırmalı olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kaynaklı birleştirmedeki korozyon hızının ana metaldekinden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kaynak akımının yükseltilmesiyle korozyon hızının arttığı görülmüştür. Bununla birlikte ÖMAK’da korozyon hızının GMAK ve GTAK’daki kaynaklı bağlantılara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir (Ambade ve ark. 2020).

Yukarıdaki tartışmadan anlaşılacağı üzere AISI 430 ferritik paslanmaz çelikler konusundaki literatürdeki mevcut çalışmaların daha ziyade farklı kaynak yöntemlerinin kaynaklı bağlantı özelliklerine etkisi, kaynaklı bağlantıların korozyon performansı gibi konularda olduğu görülmektedir. Mevcut çalışmada ısı girdisinin kaynak dikişinde ve özellikle IEB’de içyapı oluşumu ve bunun sonucunda kaynak performansına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.



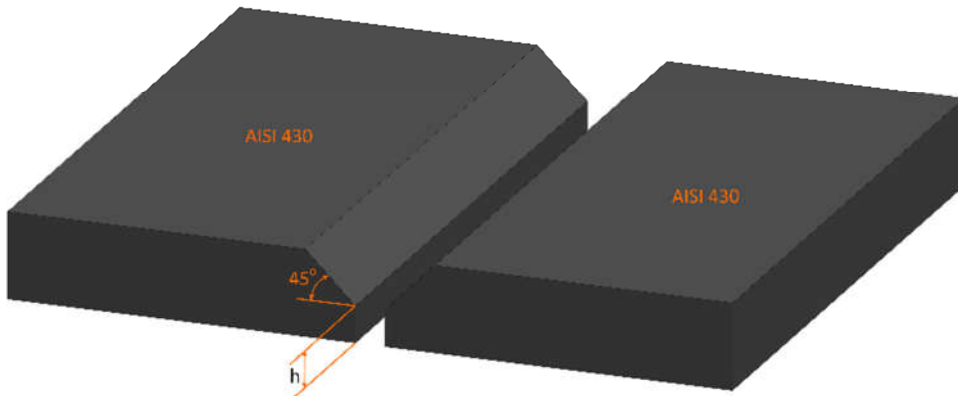
### 3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, soğuk haddeden geçirilmiş 5 mm kalınlığında AISI 430 tipi ferritik paslanmaz çelik malzemeler kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan malzemeler ilk olarak 1500x1000x5 mm<sup>3</sup> ebatlarında büyük bir levha şeklinde satın alınmıştır. Çalışmada kullanılan ferritik paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi (temin edilen firmanın verdiği sertifikaya göre) Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan AISI 430 ferritik çelik plakaların kimyasal bileşimi

Kimyasal kompozisyon (ağ. %)										
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Mo	Cu
<b>Baz Metal (AISI 430)</b>	0,037	0,38	0,50	0,031	0,002	16,16	0,27	0,033	0,01	0,20
<b>İlave Tel (ER307)</b>	0,075	0,790	7,10	0,009	0,020	19,075	9,010	----	0,005	0,070

Alınan 430 kalite büyük levha, 250x190 mm boyutlarında dikdörtgen parçalara CNC'de kesilmiş ve kaynak denemeleri için Şekil 3.1'de şematik olarak gösterildiği gibi kaynak ağızları işlenmiştir. Kaynak edilecek plakalarda, kaynak öncesi kaynak mukavemetini arttırmak için ergimiş bölgenin enini genişletmek amacı ile Şekil 3.1'de görüleceği üzere EN ISO 9692-1 standardına uygun biçimde kaynak ağızı açılmıştır. Kaynak yapılacak yüzeyler, birleştirmeden önce paslanmaz çelik metal fırça kullanılarak mekanik olarak temizlenmiştir.



Şekil 3.1. Plakaların kaynak denemeleri için hazırlanması (h=1 mm)

Yapılan deneysel çalışmalarda, tel besleme hızı 17,5 mm/s olacak şekilde ve 1,2 mm çapında bir ER307 tipi dolgu teli kullanılarak iki pasoda GMAK yöntemi ile birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılmış olan kaynak işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Bu tablodan da görüldüğü gibi kaynak işlemleri, ısı girdisinin kaynak bağlantılarının performansına etkisini belirlemek için iki farklı ısı girdisi kullanılarak yapılmıştır. Bu iki farklı ısı girdisini belirlemek için ön çalışmalar yürütülmüş olup, 385 A'in altında kaynak profilinde bazı kusurlar tespit edildiğinden minimum akım 385 A olarak belirlenmiştir. Ayrıca, birleştirme işleminin daha iyi sonuç verebilmesi için (kaynak tabanından sıvı metal akması sonucu yetersiz doldurma hatası oluşmaması için) Şekil 3.2' de gösterilen seramik altlıklar paslanmaz çelik levhaların altına konularak kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.

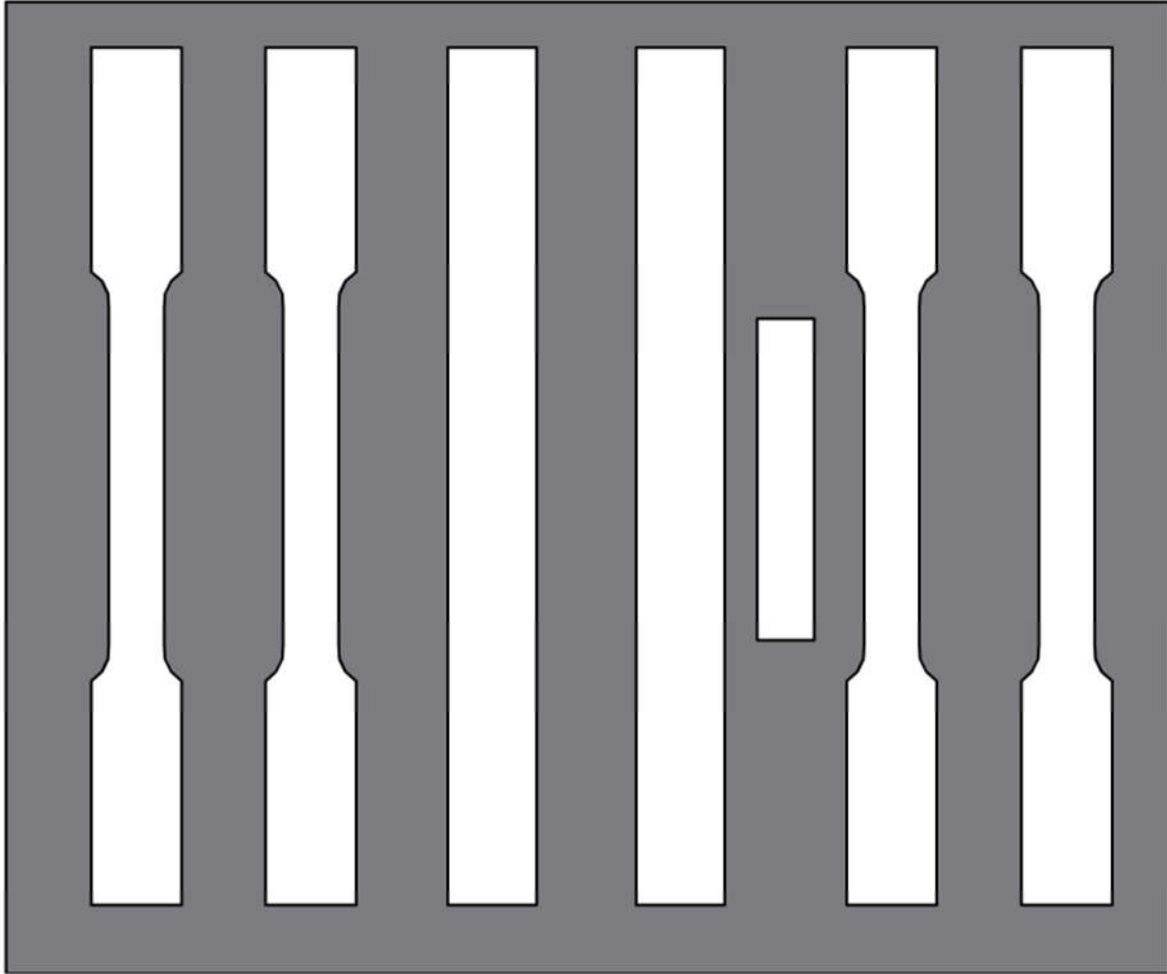
Çizelge 3.2. Kaynak denemelerinde kullanılan kaynak parametreleri

Kaynak İşlemi	Akım (A)	Gerilim (V)	Kaynak Hızı (mm/s)	Tel Besleme Hızı (mm/s)	Koruyucu Gaz
Düşük ısı girdisi	Ort. 385	28	4,5	17,5	Argon (%99,95)
Yüksek ısı girdisi	Ort. 465	27	4,0	17,5	Argon (%99,95)



Şekil 3.2. Kaynak denemelerinde kullanılan seramik altlık

Kaynak işlemlerinin ardından, kaynaklanan levhaların kaynak bölgelerindeki mikro yapı değişimlerini ve kaynak bağlantıların mekanik özelliklerini incelemek için CNC’de her bir kaynaklı levhadan bir metalografi numunesi, iki bükme (eğme) numunesi ve ASTM E8/E8M standardına uygun olarak dört çekme numunesi çıkarılmıştır (Şekil 3.3).

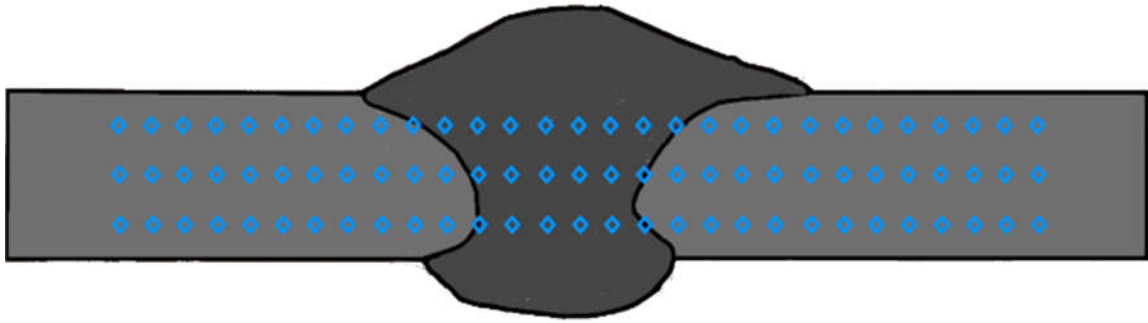


Şekil 3.3. Kaynaklı levhalardan test numunelerinin çıkarılışının şematik gösterimi

Ayrıca kaynaklı bağlantılar ile baz malzeme arasında mekanik özellikler ve içyapı değişimleri üzerine karşılaştırma yapabilmek amacıyla baz malzemedan de dört çekme numunesi de çıkarılmıştır.

Elde edilen metalografi numunelerine uygulanacak dağlama işleminden önce numunelere dört farklı aşamada zımparalama işlemi (240, 400, 800 ve 1200 grid zımpara kağıtları kullanılarak) uygulanmış daha sonrasında ise numune yüzeylerinde kalan aşındırıcı izlerini

yok etmek için elmas solüsyonlu parlatma işlemi uygulanarak numune dağlamaya hazırlanmıştır. Metalografi numunelerine uygulanacak dağlama işlemi için 50 ml HCl ve 150 ml HNO<sub>3</sub> içeren bir solüsyon kullanılmıştır. Metalografi numuneleri yaklaşık 17 sn boyunca bu solüsyona tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bu metalografi numuneleri üzerinde ayrıca mikrosertlik ölçümleri de yapılarak kaynak işlemi sonrası kaynak dikişinde meydana gelen sertlik profilleri elde edilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri, Şekil 3.3'de şematik olarak gösterildiği gibi, kaynak bölgesi üzerindeki üç farklı çizgi boyunca, biri merkezde, diğer iki çizgi ise yüzeyden ve kökten 1'er mm uzaklıkta, 500 g'lık bir yük kullanılarak ve 10 sn yük bekleme süresi uygulanarak yapılmıştır.



Şekil 3.4. Mikro sertlik ölçümlerinin uygulandığı noktaları gösteren şematik çizim

Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'de sırasıyla baz plaka, düşük ısı girdili ve yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantılardan elde edilen çekme numunelerinin resimleri verilmiştir. Hem baz malzemeden hem de kaynaklı levhalardan elde edilen çekme numuneleri Zwick/Roell marka çekme cihazında 15 mm/dak çekme hızı kullanılarak çekme deneyine tabi tutulmuşlar ve bu testler sonucunda çekme-uzama eğrileri elde edilerek, bu eğriler sayesinde akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve yüzde uzama gibi mekanik özellikler tespit edilmiştir. Ek olarak, baz malzeme ile kaynaklı levhalardan elde edilen çekme numuneleri için yukarıda bahsi geçen mekanik özelliklerden, yüzde uzama ve çekme dayanımları değerleri aşağıda 3.1 ve 3.2 formüllerinde yerlerine yazılarak kaynaklı levhaların süneklik ve mukavemet performansları hesaplanmıştır.

$$\text{Süneklik Performansı (\%)} = \frac{\text{Kaynaklı levhanın ortalama yüzde uzaması}}{\text{Baz levhanın ortalama yüzde uzaması}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{Mukavemet Performansı (\%)} = \frac{\text{Kaynaklı levhanın ort. çekme mukavemeti}}{\text{Baz levhanın ortalama çekme mukavemeti}} \times 100 \quad (3.2)$$

Bunlara ilaveten, Şekil 3.7’de gösterilen, farklı ısı girdisi ile elde edilen kaynaklı levhalardan elde edilen ikişer adet bükme numunelerinden biri yüzey bükme (surface bend) ve diğeri de kök bükme (root bend) konfigürasyonunda 3 nokta bükme testine tabi tutularak her iki bükme koşulunda da kaynak bölgesinde çatlama olup olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, ısı girdisinin kaynaklı levhaların bükme şartlarındaki davranışlarına etkisi de tespit edilmiştir.



Şekil 3.5. Baz plakadan çıkarılan çekme numunelerinin test öncesi görünümü



Şekil 3.6. Düşük ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test öncesi görünümü



Şekil 3.7. Yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test öncesi görünümü



Şekil 3.8. Düşük ve yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantılardan çıkarılan bükme numuneleri

## 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm, yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçları yani farklı ısı girdisinin kaynaklı levhaların kaynak bölgesinde içyapı ve mekanik özellikler üzerine meydana getirdiği değişimleri irdeleyebilmek amacı ile iki alt bölüm olarak tartışılacaktır.

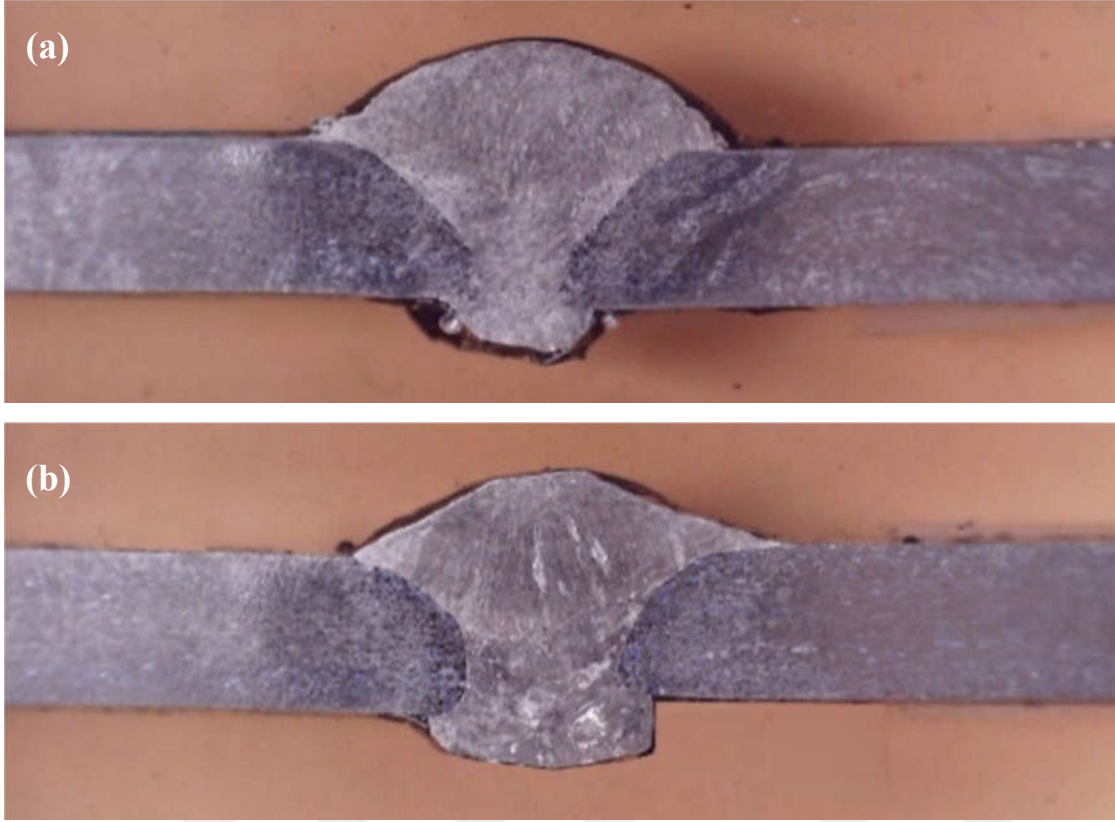
### 4.1. İçyapı Analizleri

Bu başlık altında, baz malzeme içyapısı ile farklı ısı girdilerinin etkilerini gözlemleyebilmek amacı ile yapılan kaynak işlemleri ile elde edilen kaynak bölgesi içyapılarını kıyaslamak için elde edilen sonuçlar değerlendirilecektir.

İki farklı ısı girdisi kullanılarak yapılan gaz metal ark kaynaklı AISI 430 ferritik paslanmaz çelik bağlantıların kesit görüntüleri gösteren makro resimler Şekil 4.1'de verilmiştir. Verilen bu şekillerden de görüleceği üzere, elde edilen kaynaklı bağlantıların her ikisinde de porozite ve çatlak oluşumu gibi herhangi bir kaynak kusuru meydana gelmemiştir.

Ayrıca, bu çalışmada kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhanın baz malzeme olarak içyapısını gösteren optik mikroskop ile elde edilen iki farklı büyütme ile ortaya çıkan mikro resimleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, baz malzeme içyapısı hem tane sınırları boyunca hem de taneler içinde düzgün bir biçimde dağılmış karbürler içeren tamamen ferritik bir mikro yapıdan oluşmaktadır.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4, sırasıyla düşük ve yüksek ısı girdileri kullanılarak üretilen kaynaklı bağlantılarında ergime bölgesinin (EB) içyapıda meydana gelen değişimi gösteren mikro resimleri gösterilmektedir. Bu mikro resimlerde görüleceği üzere, elde edilen her iki bağlantının EB' inde döküm yapılan malzemelerde görülen içyapıya benzer bir içyapı yani ince taneli dendritik bir yapı gözlemlenmiştir. Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında bu döküm yapısına benzer içyapı oluşumu daha önce yapılan çalışmalarda da rapor edilmiştir (Zhou, 2019).

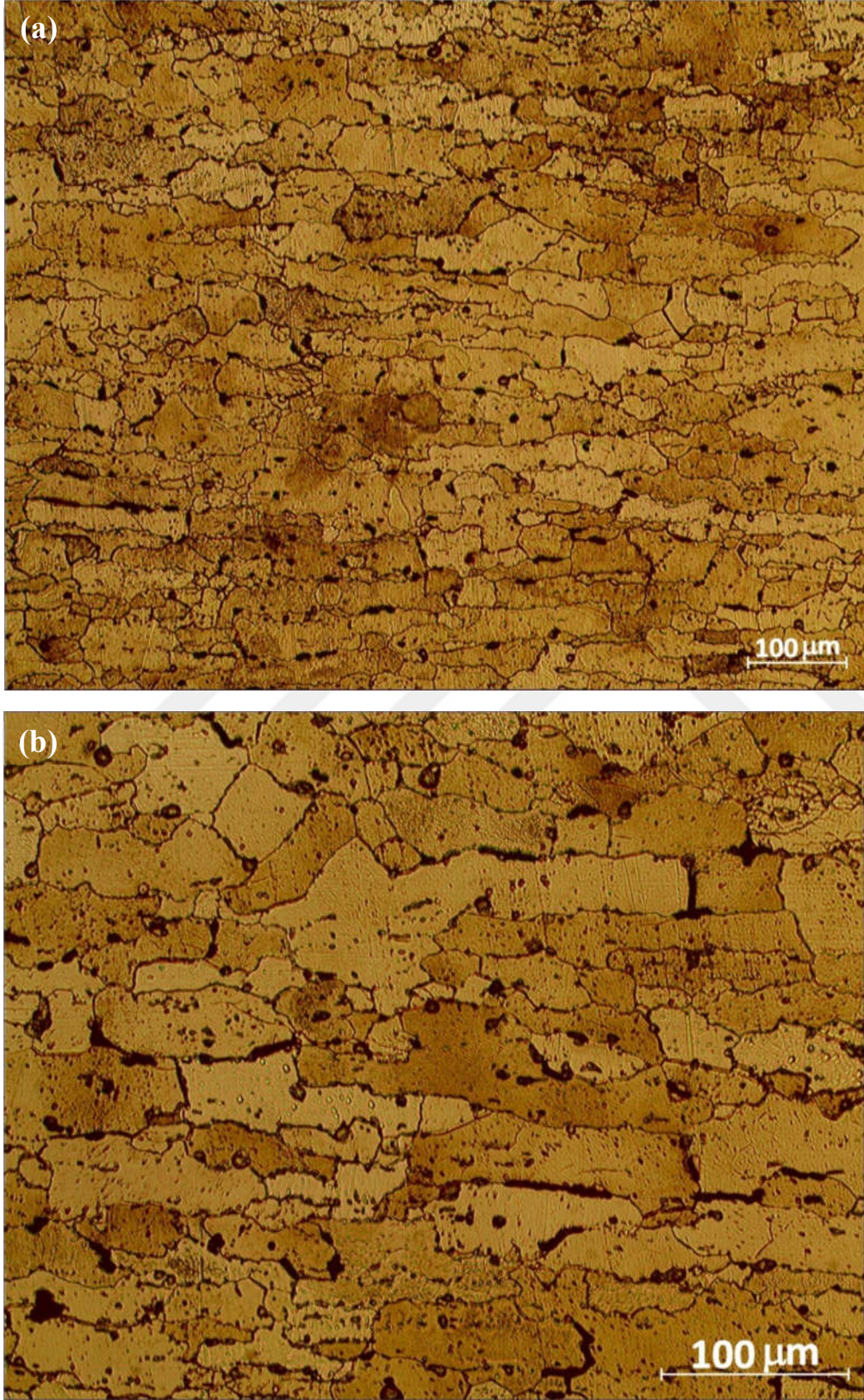


Şekil 4.1. İki farklı ısı girdisi kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantıların kaynak kesitlerini gösteren makro resimler: (a) düşük ve (b) yüksek ısı girdili bağlantı

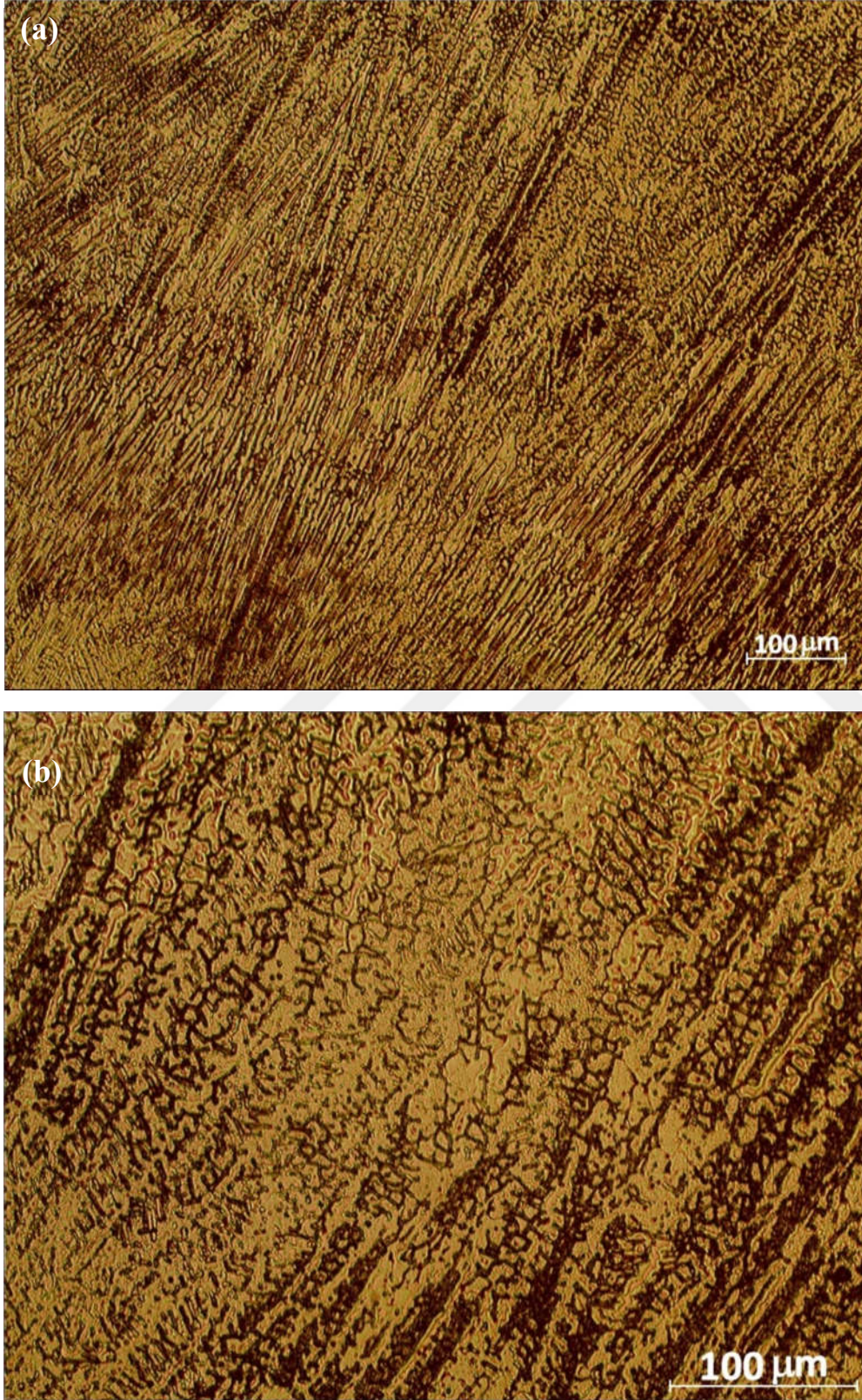
Ayrıca, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 den anlaşılacağı üzere, elde edilen kaynaklı bağlantıların kaynak dikişlerinde (ergime bölgesi) oluşan döküm benzeri dendritik yapılar incelendiğinde yüksek ısı girdisi verilerek elde edilen bağlantıda dendritik yapı kısmen daha iri tanelerden meydana geldiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, beklendiği üzere ısı girdisindeki artış oluşan dendritik yapının tane boyutunda belirgin bir artışa yol açmıştır.

Şekil 4.5(a) ve (b)'de ise, sırası ile düşük ısı girdisi ve yüksek ısı girdisi uygulanarak elde edilen kaynaklı birleştirmelerin ısıda etkilenmiş bölgelerinde (IEB) oluşan içyapıları gösteren farklı büyütme (sırası ile 10X ve 20X) kullanılarak optik mikroskoptan alınan elde edilen mikro resimler verilmiştir. Bu resimlerden anlaşılacağı üzere, yukarıda da bahsi geçen kaynak dikişinde meydana geldiği ifade edilen kısmi tane irileşmesi durumu bu bölgede çok daha net bir biçimde ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla ısı girdisinin değişimi IEB'de daha farklı bir içyapının oluşmasına neden olmuştur. Bu değişimin nedeni aşağıda daha detaylı bir biçimde değerlendirilecektir.

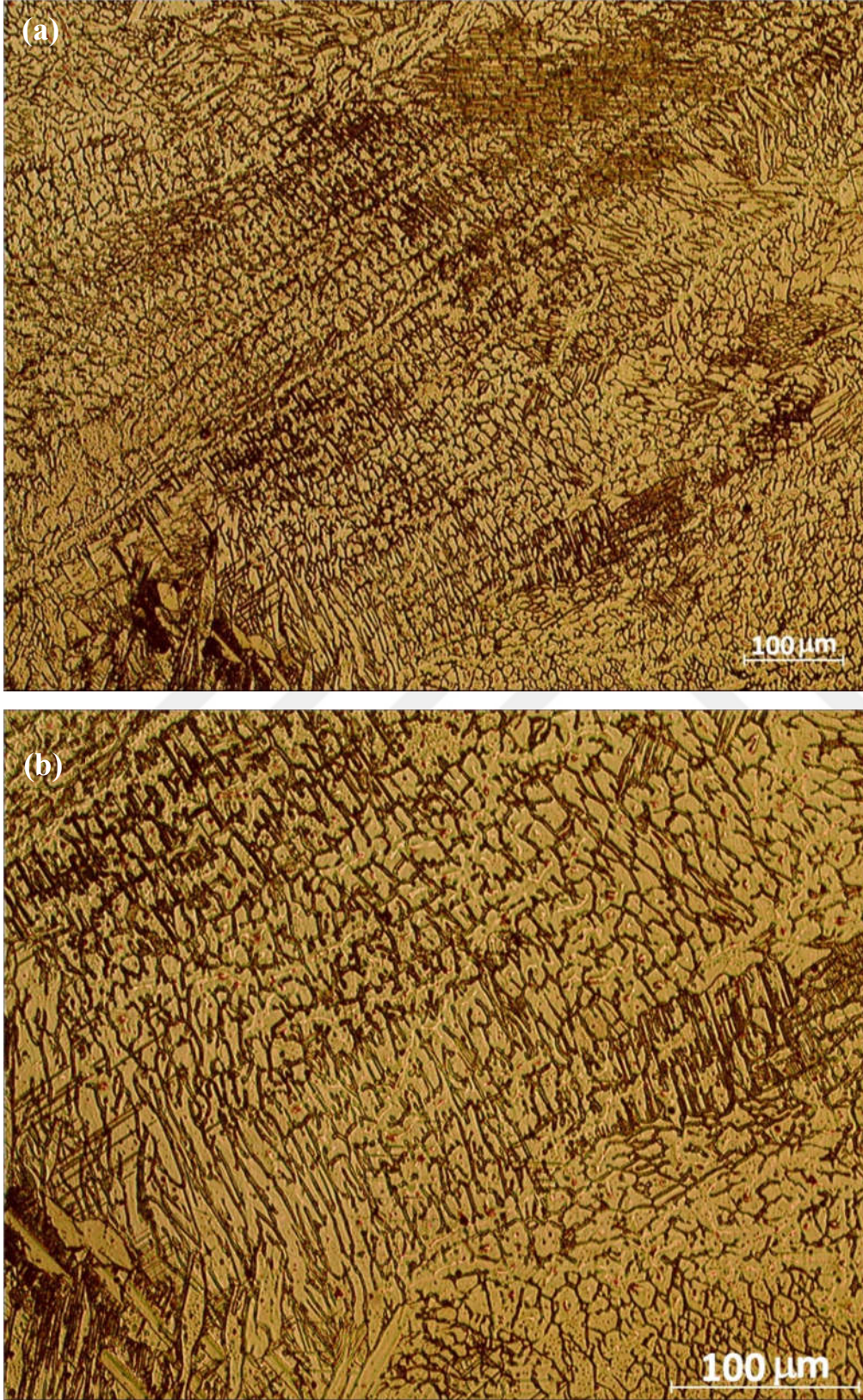




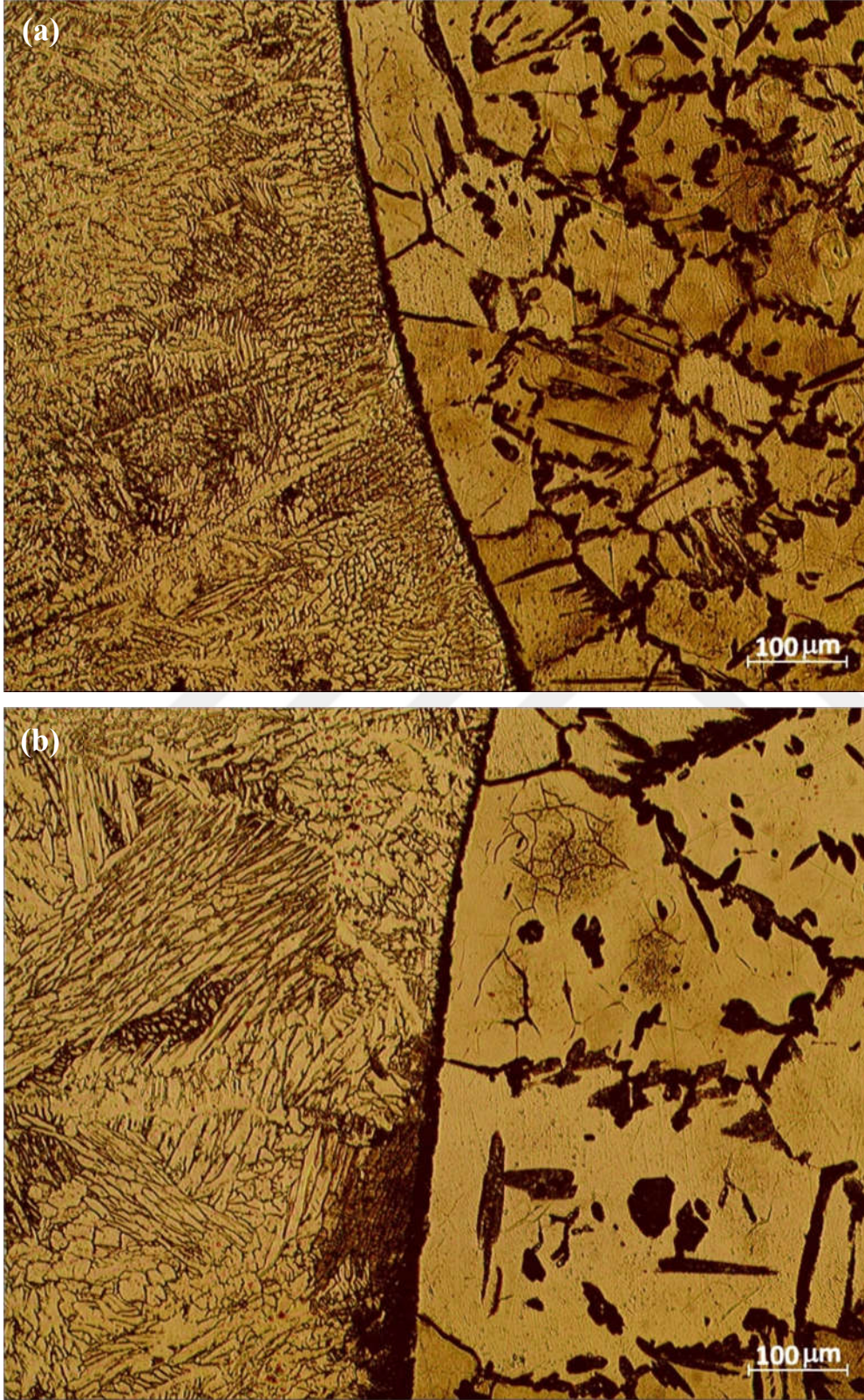
Şekil 4.2. Baz levha içyapısını gösteren optik mikroskop görüntüleri: (a) 10X büyütme ve (b) 20X büyütme



Şekil 4.3. Düşük ısı girdisi ile elde edilen kaynaklı bağlantının ergime bölgesinde oluşan içyapıyı gösteren optik mikroskop görüntüleri: (a) 10X ve (b) 20X büyütme

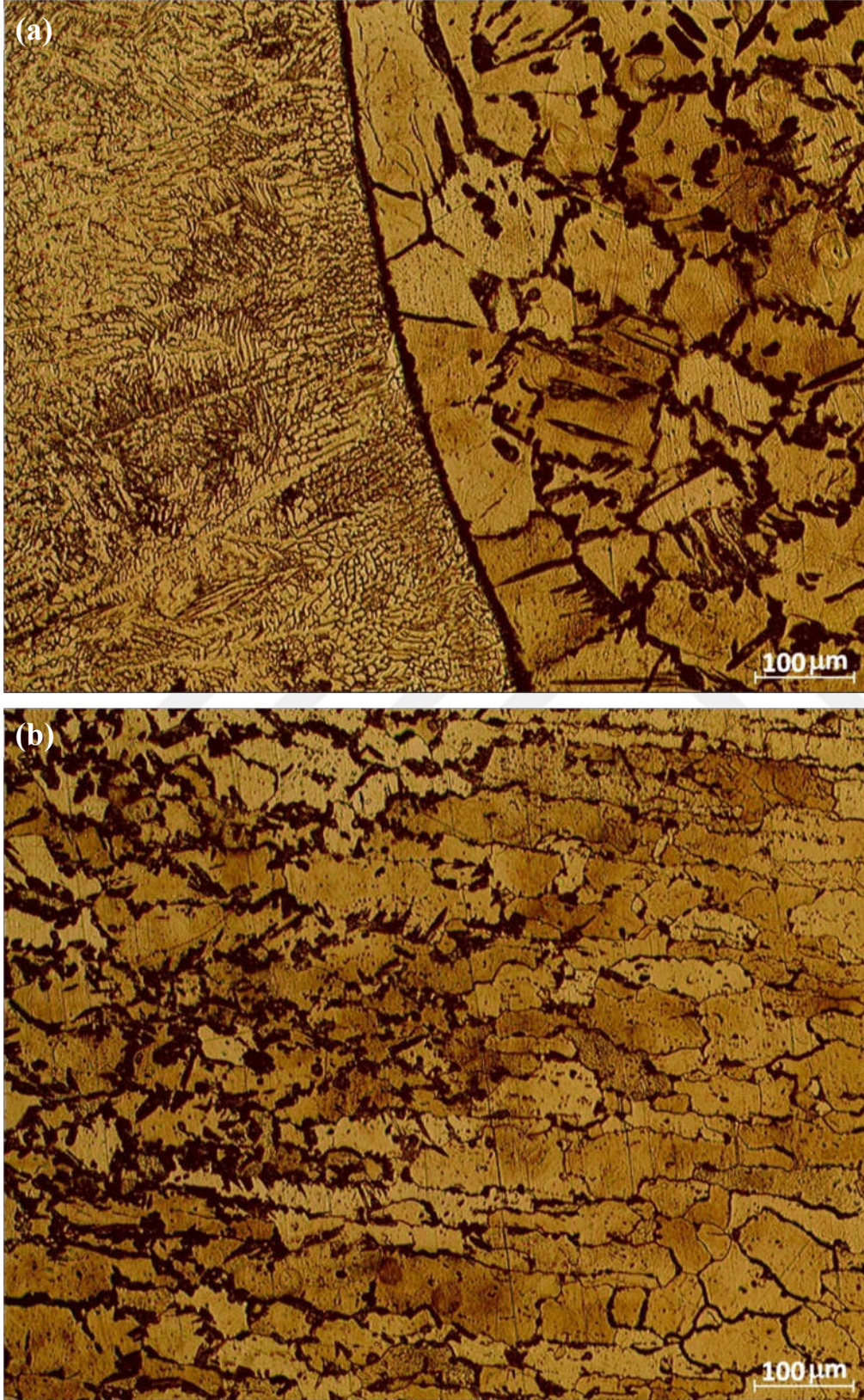


Şekil 4.4. Yüksek ısı girdisi ile elde edilen kaynaklı bağlantının ergime bölgesinde oluşan içyapıyı gösteren optik mikroskop görüntüleri: (a) 10X büyütme ve (b) 20X büyütme

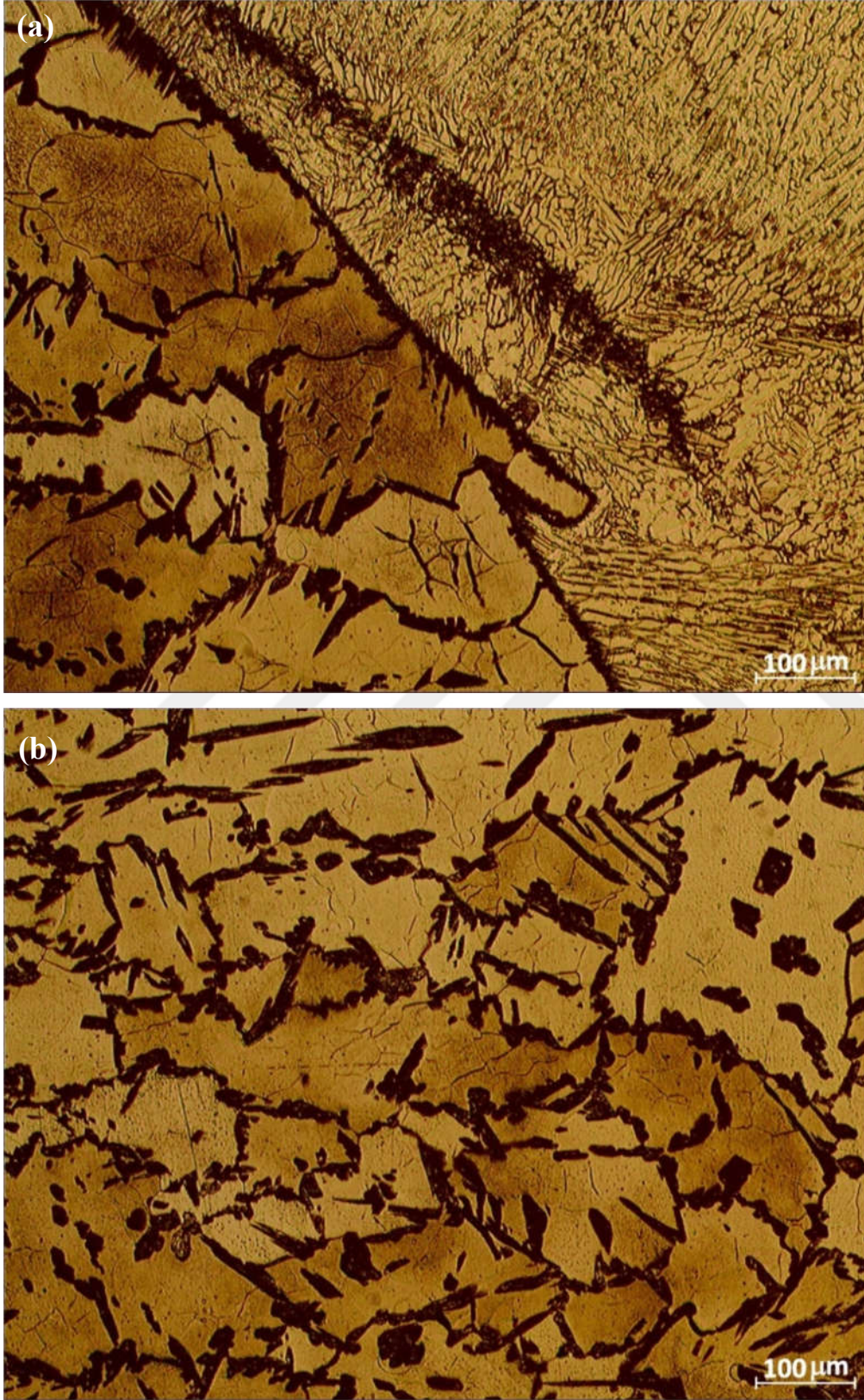


Şekil 4.5. İki farklı ısı girdisi ile elde edilen kaynaklı bağlantıların IEB'lerini gösteren düşük büyütme (10X) mikro resimler: (a) düşük ve (b) yüksek ısı girdisi

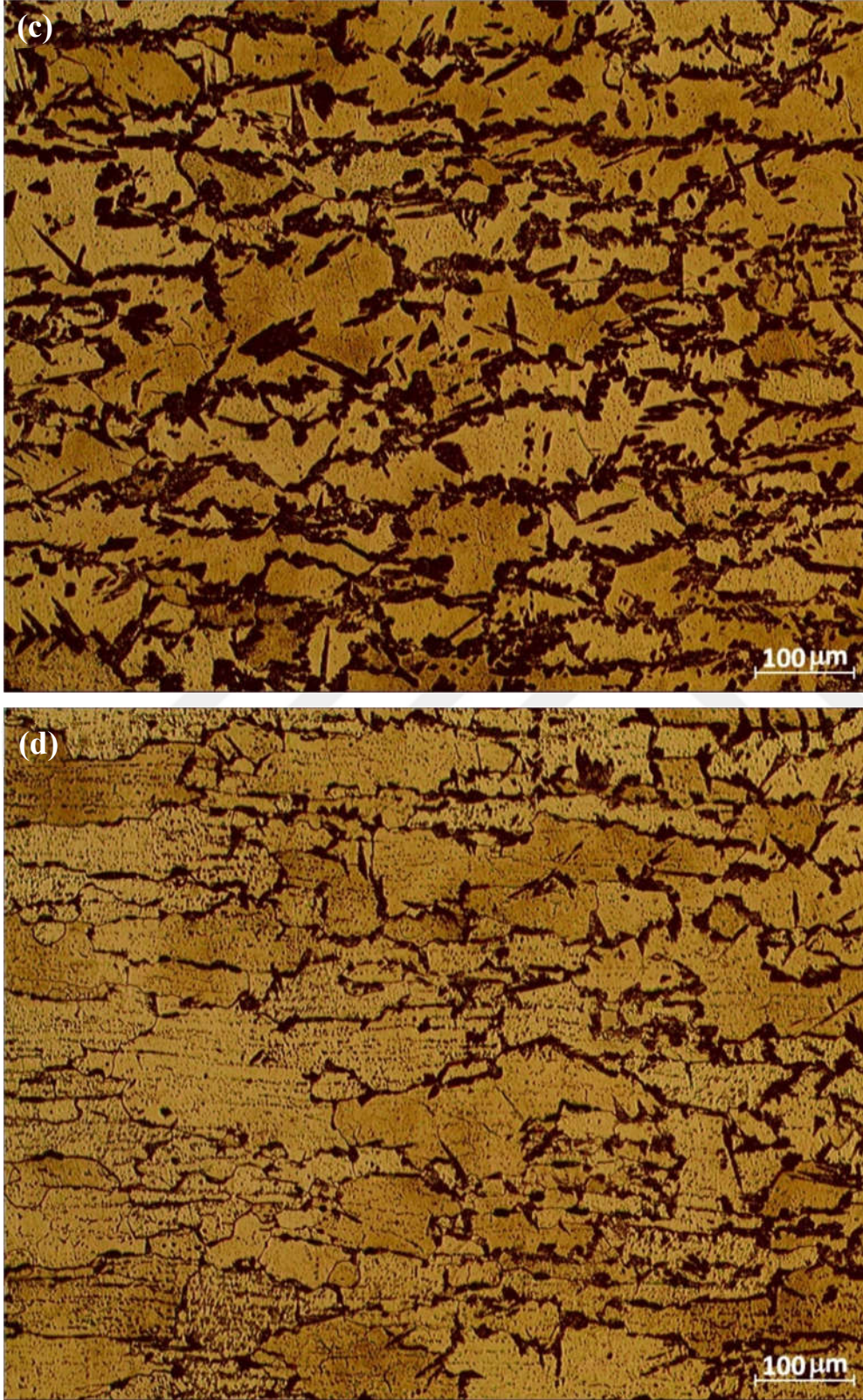
Kaynaklı bağlantıların ergime bölgesinde ve IEB'lerinde farklı tane yapılarının meydana geldiği yukarıda ifade edilmişti. Baz malzeme içyapısı, her iki bağlantının IEB'lerinde kaynak sıcaklık döngüsünün (kaynak işleminde ergime ve soğuma sırasında meydana gelen sıcaklık değişimleri) neden olduğu tane kabalaşması gözlemlenmiştir. Her iki bağlantıda baz malzeme tarafına yakın IEB'de iki farklı HAZ bölgesi meydana gelmiş olup, bunlar yüksek sıcaklıkta meydana gelen IEB (kaba taneli IEB) olarak ve düşük sıcaklıkta meydana gelen IEB (ince taneli IEB) olarak ifade edilmektedir. Her iki bağlantıda da IEB'lerde tane büyümesi oluşmasına rağmen, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'den de görüleceği gibi, yüksek ısı girdili bağlantının hem kaba taneli IEB'sine ve hem de ince taneli IEB'sinde tane büyümesinin derecesi düşük ısı girdisi ile üretilen bağlantıdan çok daha yüksektir. Ayrıca, kaynak ısı döngüsü nedeniyle karbür çökmesi, ferrit tane sınırlarında martenzit oluşumu (taneler arası martenzit) ve IEB'de ferrit tanelerinin irileşmesi gibi bir içyapı değişimleri her iki bağlantıda da meydana gelmiştir. Farklı ısı girdileri kullanılarak yapılan kaynak işlemleri sonucunda meydana gelen içyapılar tane yapıları açısından incelendiğinde ise, ince taneli IEB'de (düşük ısı girdisi ile elde edilen) oluşan tane yapısının, tane boyutu olarak daha iri olan kaba taneli IEB'nin aksine çok daha düzgün ve baz malzeme ile de neredeyse aynı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, ince taneli IEB'de karbür çökmesi ve taneler arasında martenzit oluşumu da gözlenmiştir. Bununla birlikte, kaba taneli IEB ile karşılaştırıldığında, martenzit içeriği önemli ölçüde azalmış olup, martenzit bu bölgede bir ağ oluşturmak yerine tane sınırında ayrı ayrı dağılmaya başlamıştır. Bunun nedeni, ince taneli bölgenin kaynak merkezinden uzakta olması ve sıcaklığın bu bölgede düşük kalmasından dolayıdır. Bu durumda, yüksek sıcaklıkta meydana östenit oluşumu için yeterli olmamış ve böylece martenzit yapı oluşumunu da engellemiştir. Ayrıca, kaba taneli IEB'de (ergime bölgesi sınırının yanında) bulunan tanelerde tane içinde çökelti oluşmamıştır. Taneler arası martenzit ve karbür çökeltilerinin oranı, ısı girdisinin artmasıyla artmıştır. Ayrıca, IEB'nin genişliği de artan ısı girdisiyle biraz daha genişleşmiş olur.



Şekil 4.6. Düşük ısı girdisi kullanılarak üretilen kaynaklı bağlantıların IEB (a) ve IEB ile baz malzeme arasında kalan bölgenin (b) iç yapısını gösteren mikro resimler



Şekil 4.7. Yüksek ısı girdisi ile üretilen kaynaklı bağlantıların IEB (a) ve IEB ile baz malzeme arasında farklı bölgelerin (b, c, d) içyapısını gösteren mikro resimler



Şekil 4.7. Yüksek ısı girdisi ile üretilen kaynaklı bağlantıların IEB (a) ve IEB ile baz malzeme arasında farklı bölgelerin (b, c, d) içyapısını gösteren mikro resimler.

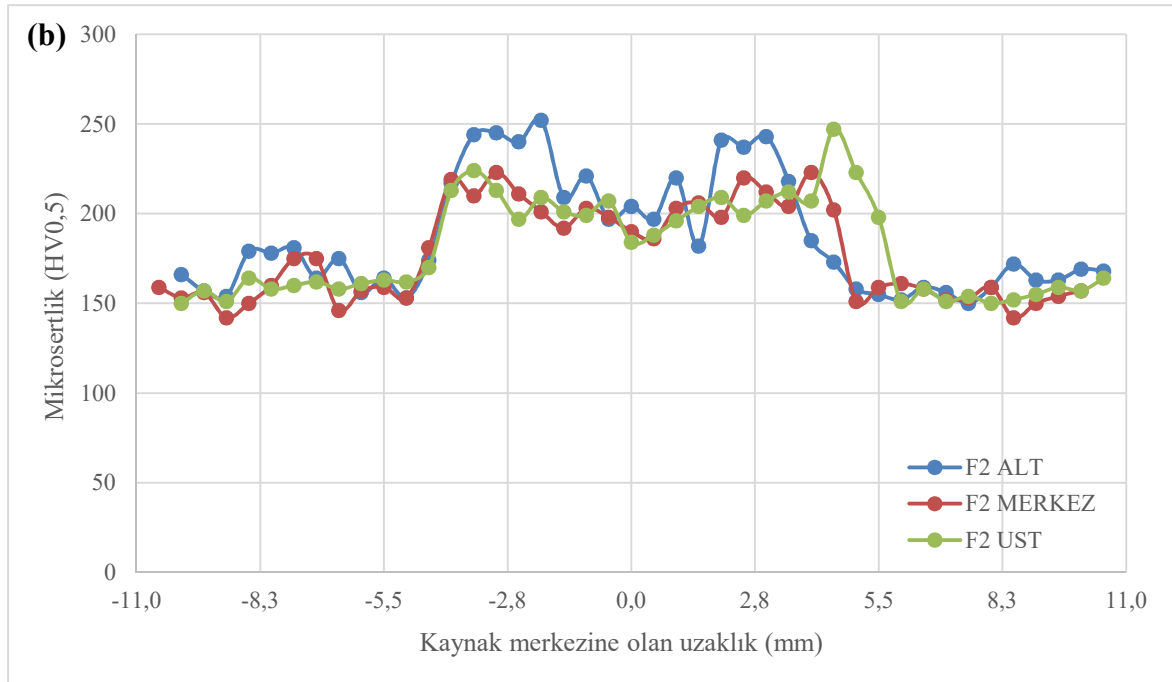
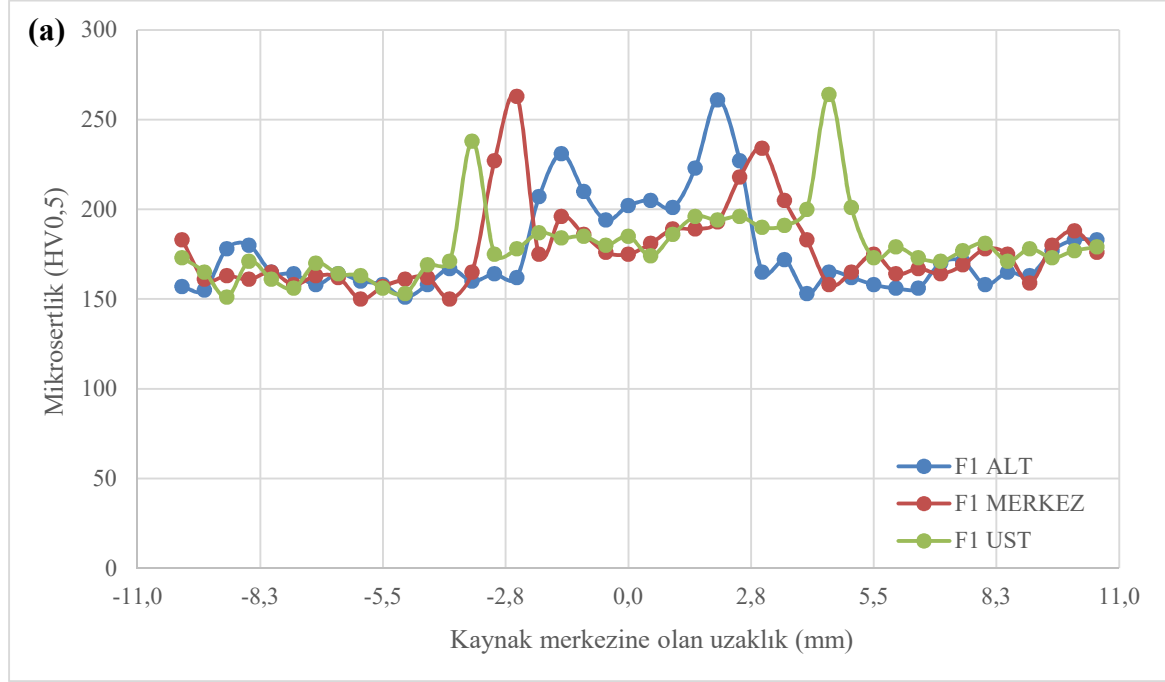


Bu çalışma sonuçlarına benzer şekilde, Aguilar ve ark., (2013) ferritik ve östenitik paslanmaz çelik levhaları ark kaynağı ile birleştirmiş ve elde ettikleri birleştirmelerin ferritik çelik tarafındaki IEB'de ergime arayüzeyine yakın kısmında oldukça belirgin tane irileşmesi ve martenzit oluşumu gözlemişlerdir. Ayrıca, Khorrami ve ark. (2014) da, orta kromlu ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak işlemi sonrasında IEB'de martenzit oluşumunun söz konusu olduğunu rapor etmişlerdir. Dahası, yaptıkları çalışmada bu çalışmaya benzer biçimde ısı girdisinin tane boyutunu etkilediğini ve granüler çökeltilerin ferrit taneleri içinde ayırık bir şekilde dağıldığını tespit etmişlerdir. Lippold & Kotecki (2005), ferritik paslanmaz çeliklerin ark kaynağında soğuma sırasında karbon ve nitrojenin çözünürlüğünün önemli ölçüde azalması nedeniyle ferrit fazında aşırı doymuş karbon ve nitrojen ihtiva eden karbürler, nitrürler veya karbonitritler oluştuğunu bildirmişlerdir. Buna ek olarak, Van Warmelo ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmaya göre ise, yukarıda bahsi geçen çökelti türleri genellikle ferritik paslanmaz çeliğin IEB'nde meydana gelmiştir. Zou ve ark. (2019), ana çökeltinin krom bakımından zengin karbür olduğunu ve moleküler formülün  $M_{23}C_6$  olduğunu ve buradaki "M" nin çoğunlukla Cr ve Fe'yi temsil ettiğini belirtmişlerdir.

#### 4.2. Mekanik Özellikler

Şekil 4.8 (a) ve (b), sırasıyla düşük ve yüksek ısı girdileri kullanılarak üretilen kaynaklı bağlantılarda kaynak bölgesinin enine kesiti boyunca üç farklı hat çizgisinde gerçekleştirilen mikro sertlik ölçümlerinden elde edilen sertlik dağılımını göstermektedir. Şekilde verilen grafiklerden anlaşılacağı üzere, elde edilen sertlik profilleri baz malzeme bölgesinden itibaren kaynak hattını da içeren çizgi boyunca sertlik değişimlerini göstermektedir. Bu sertlik profilleri incelendiğinde açıkça görüleceği üzere, her iki kaynaklı bağlantıların kaynak dikişi bölgesinde benzer sertlik değerleri tespit edilmiştir. Mikro sertlik değerleri, kaynak bölgesi ile kıyaslandığında IEB' de bir miktar artma gözlemlenmiştir. Bu duruma IEB'de meydana gelen tane irileşmesinden ve esas olarak büyük miktarda taneler arası martenzit ve karbür oluşumundan kaynaklanmaktadır. Baz malzemenin mikro sertliği, ergime bölgesi ve IEB'den elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Ayrıca, IEB'de sertlik değerlerinde ortaya çıkan artışın,

yüksek ısı girdisi ile kaynağı yapılan bağlantıdan elde edilen sertlik profilleri ile kıyaslandığında da biraz daha yüksektir.



Şekil 4.8. Kaynak bağlantılarda kaynak kesiti boyunca sertlik dağılımını gösteren sertlik profilleri: (a) düşük ısı girdili bağlantı ve (b) yüksek ısı girdili bağlantı

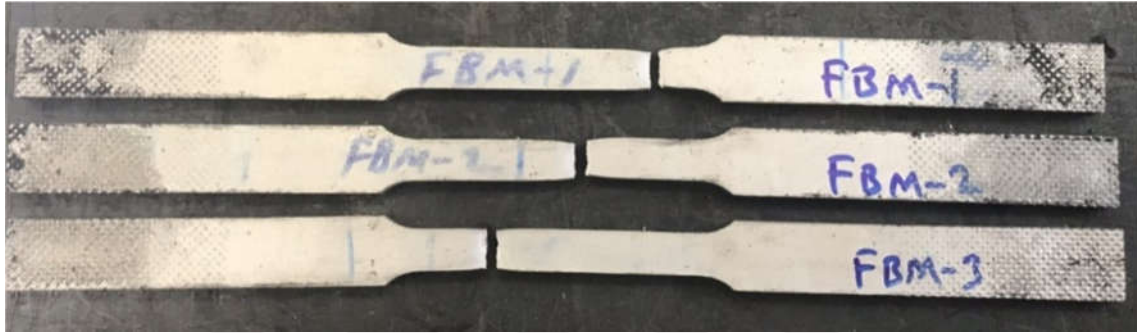
Kaynaklı levhaların ve BM'nin mekanik özelliklerini belirleyebilmek ve kaynaklı levhaların süneklik ve mukavemet performans değerlerini tespit etmek için BM'den ve farklı ısı girdi değerleri kullanılarak üretilen kaynak bağlantılardan elde edilen numuneler kullanılarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.1' de çekme testi sonuçları özetlenmiş ve BM ve kaynaklı levhalardan elde edilen numunelerin çekme testlerinin ardından kopma yerlerinin net biçimde görüldüğü test sonrası resimleri sırası ile Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11' de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çekme testi sonuçları

Numune	R <sub>p0.2</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	Süneklik (%)	Mukavemet Performansı (%)	Süneklik Performansı (%)	Kopma Yeri
<b>Baz malzeme</b>	396, 392, 395 <b>(394)</b>	506, 501, 504 <b>(504)</b>	21, 25, 22 <b>(23)</b>	----	----	--
<b>Düşük ısı girdisi</b>	358, 364, 348, 354 <b>(356)</b>	498, 496, 495, 499 <b>(497)</b>	14, 15, 15, 15 <b>(15)</b>	99	65	Baz malzeme
<b>Yüksek ısı girdisi</b>	352, 300, 342, 341 <b>(335)</b>	497,496, 498, 503 <b>(499)</b>	15, 16, 14, 15 <b>(15)</b>	99	65	Baz malzeme

Her iki bağlantı da iyi bir çekme mukavemeti göstermiş ve kırılmalar tüm numuneler için BM tarafında gerçekleşmiştir. Her iki kaynaklı bağlantının çekme mukavemeti, BM mukavemetine yakın değerler göstermiştir. Bu durum, Çizelge 4.1 Şekil 4.12 ve Şekil 4.13a ve Şekil 4.13b de görülmektedir. Dolayısıyla, her iki kaynaklı bağlantıda çekme mukavemeti yaklaşık %99 oranında olup, yani yüksek bir kaynak performansı ortaya çıkmıştır. Öte yandan, her iki kaynaklı bağlantıda BM'ye oranla daha düşük süneklik göstermiştir; yüksek ve düşük ısı girdili numunelerin her ikisinde yaklaşık % 15, BM'de ise % 23 yüzde uzama değerleri elde edilmiştir. Sertlik profilleri de göz önüne alındığında görüleceği üzere her iki bağlantıda da IEB'de oluşan mukavemet artışından dolayı (BM'ye göre) bu durumun (süneklik düşüşü) meydana gelmesi şaşırtıcı değildir. Ayrıca bu durum, çekme testi esnasında yüksek mukavemetli ergime bölgesi ve IEB'nin deney sonuna kadar

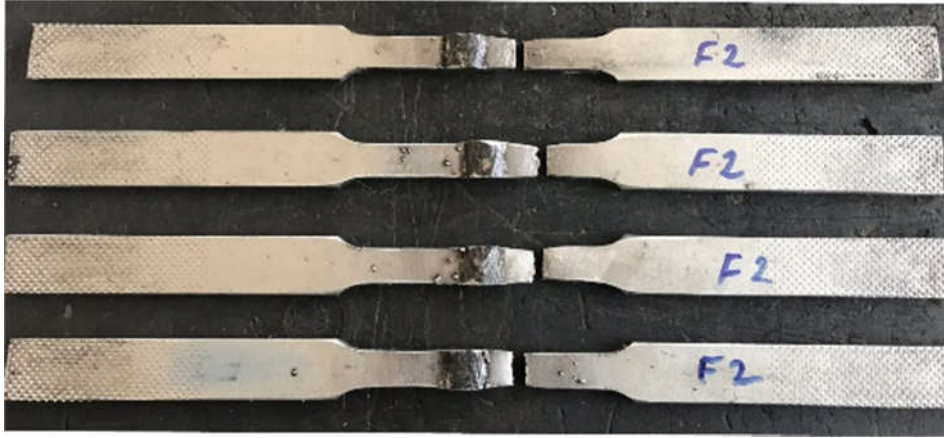
elastik bölgede kalmasına neden olur dolayısı ile bu bölgenin (EB ve daha düşük mertebede de olsa IEB'nin) toplam uzamaya katkısı olmamıştır. Bu durum da genellikle kaynak bölgesine sertlik ve mukavemet artışı olan tüm kaynaklı bağlantılarda olduğu gibi çekme deneyi sonucunda süneklikte düşüşe neden olmaktadır.



Şekil 4.9. Baz plakadan çıkarılan çekme numunelerinin deney sonrası görünümü

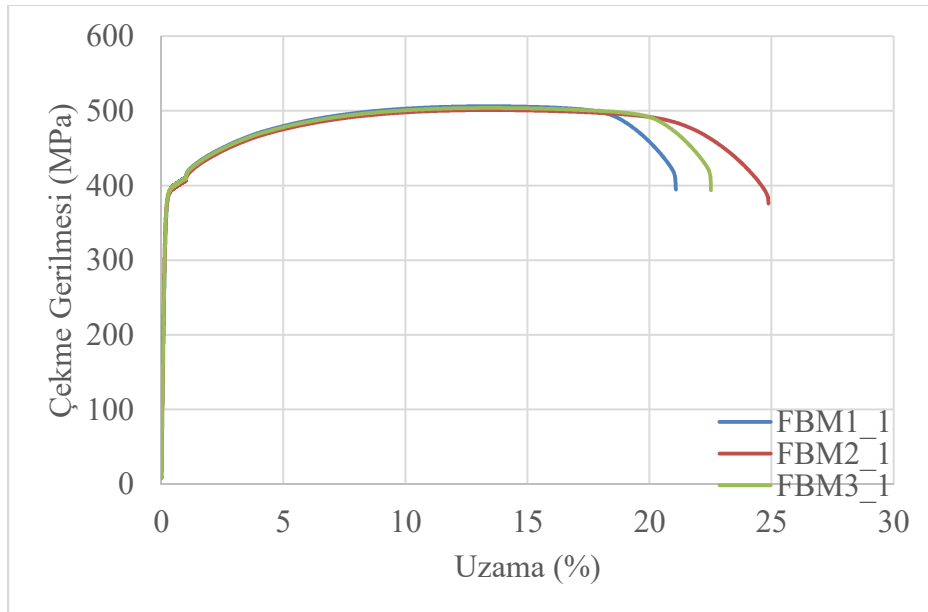


Şekil 4.10. Düşük ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin deney sonrası kırılmanın baz plaka içerisinde gerçekleştiğini gösteren makro resimler

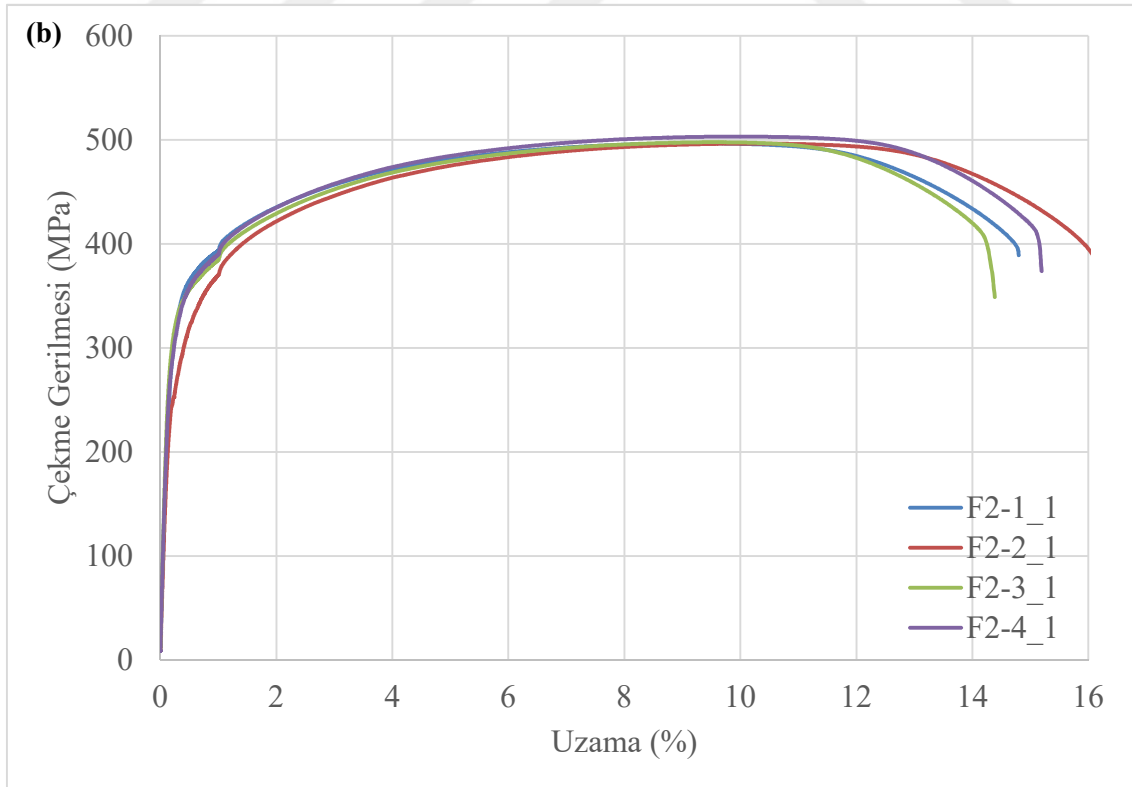
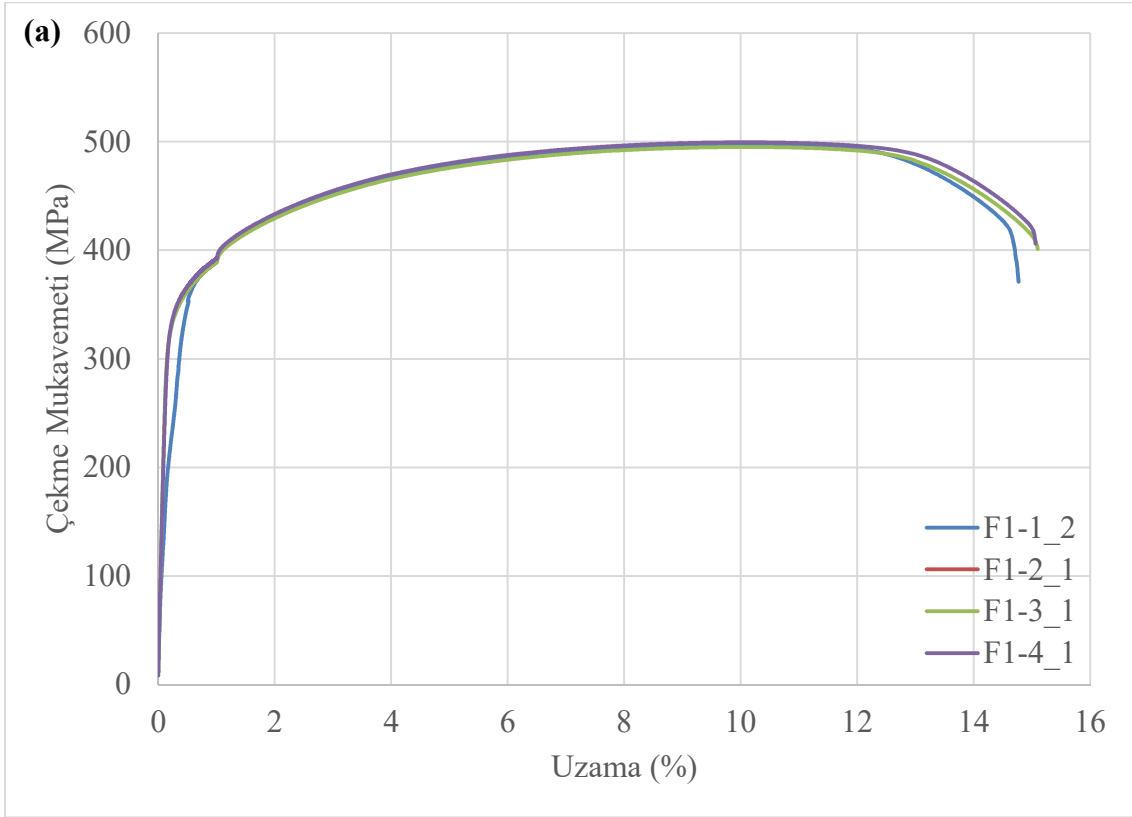


Şekil 4.11. Yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin deney sonrası kırılmanın baz plaka içerisinde gerçekleştiğini gösteren makro resimler

Çekme testi uygulanan kaynaklı bağlantılardan elde edilen numunelerde yukarıda da açıklandığı üzere sadece BM tarafında meydana gelen bu sınırlı plastik deformasyondan dolayı kaynaklı bağlantıların yüzde uzama değerlerinde düşüşler gerçekleşmiştir. Ayrıca, her iki bağlantıdan çıkarılan tüm numuneler, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterildiği gibi, BM tarafında kaynak bölgesinden uzakta (ince taneli IEB ile BM arasındaki bölgede) kopma meydana gelmiştir.

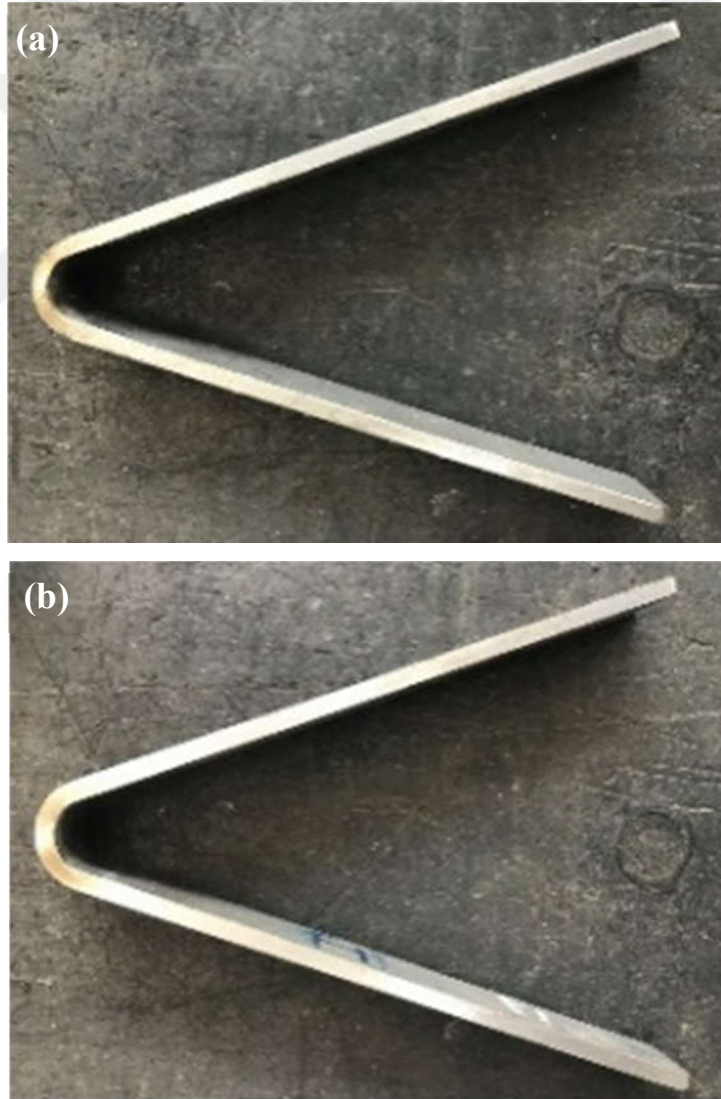


Şekil 4.12. Baz plakadan çıkarılan çekme numunelerinden elde edilen gerilme-yüzde uzama eğrileri

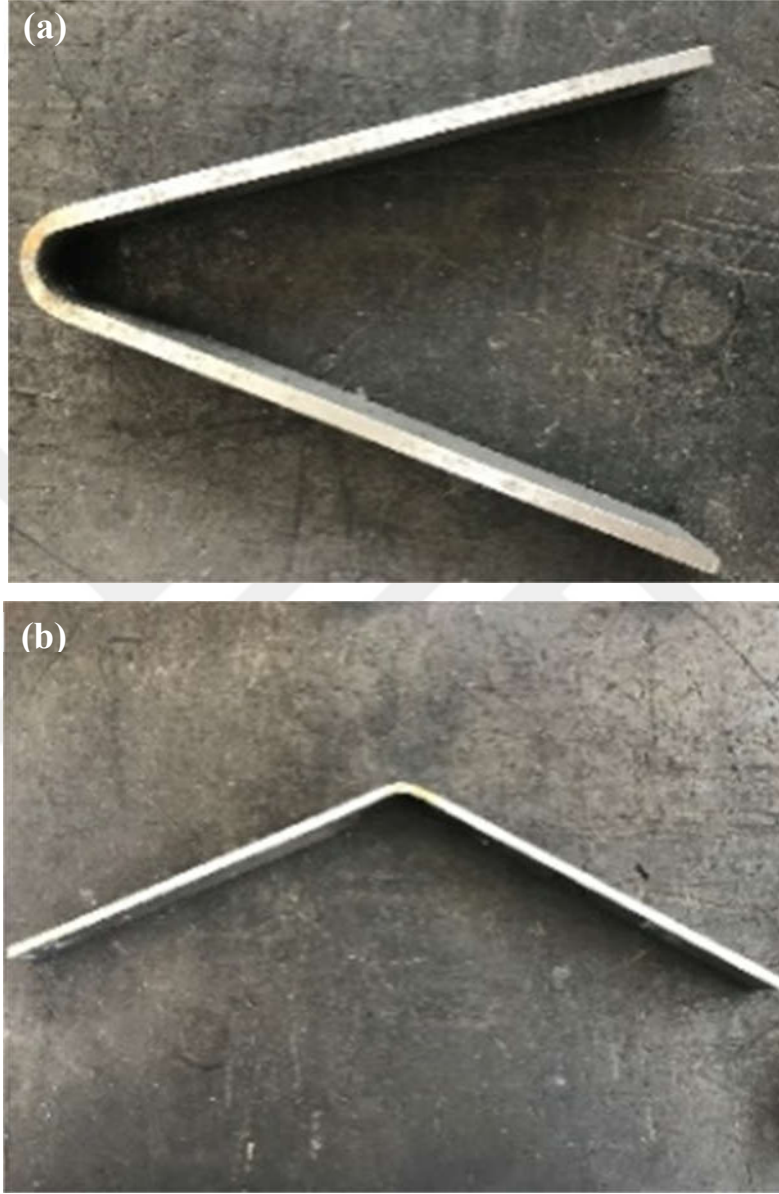


Şekil 4.13. Gerilme-uzama (%) eğrileri: (a) düşük ısı girdili kaynaklı bağlantı ve (b) yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantı.

Çekme testine benzer şekilde, düşük ısı girdili bağlantıdan çıkarılan hem yüzey hem de kök eğme numuneleri ve ayrıca yüksek ısı girişli bağlantıdan çıkarılan yüzey eğme numuneleri, bükülme testinde çatlama göstermedi (Şekil 4.6 a-c). Öte yandan, Şekil 4.6 d' de görüldüğü gibi, test sırasında düşük ısı girdisi uygulanan kök bükme numunesi bağlantısında kırılma meydana geldi. Şekil 4.7'den de görüldüğü gibi, kırılma, ergime hattının yanında iri taneli HAZ (CGHAZ) içerisinde gerçekleşmiştir. Bu bölgedeki tane irileşmesi, karbür çökmesi ve martenzit oluşumuna bağlanabilir ve bu da tokluğun azalmasına sebep olur.



Şekil 4.14. Düşük ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan bükme numunelerinin test sonrası görünümü: (a) Yüzey bükme ve (b) Kök bükme



Şekil 4.15. Yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantıdan çıkarılan bükme numunelerinin test sonrası görünümü: (a) Yüzey bükme ve (b) Kök bükme





Şekil 4.16. Yüksek ısı girdili bağlantıdan çıkarılan kök bükme numunesindeki çatlayan bölgeyi gösteren makro resim. (Çatlak iri taneli IEB’de meydana gelmiştir.)

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Tezin bu bölümünde, yürütülen çalışmalarda elde edilen sonuçlar kısaca özetlenecek ve AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhanın gaz metal ark kaynağı (GMAK) ile alakalı bundan sonra devam ettirilmesi faydalı olacağı düşünülen çalışmalar ile ilgili bazı öneriler sunulacaktır.

### Sonuçlar

Bu çalışmada, AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhalarda iki değişik akım (ısı girdisi) seviyesinde ve 1,2 mm çapında ER307 dolgu teli (ilave metal) kullanılarak iki pasoda gaz metal ark kaynağı (GMAK) yöntemi ile kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılardan çıkarılan metalografi, çekme ve bükme numunelerinde yapılan metalografik çalışmalar ve mekanik deneyler ile elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- 5 mm kalınlığındaki AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhalar GMAK yöntemi ile iki değişik akım seviyesinde ve iki pasoda başarılı bir şekilde kaynak edilmiştir.
- Bu çalışma kapsamında elde edilen bağlantıların her ikisinde de çatlak ve porozite gibi herhangi bir kaynak hatası gözlenmemiştir. Bir başka ifadeyle, bu tezde çalışılan ısı girdisi aralığındaki bir ısı girdisi 5 mm kalınlığındaki AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhalarda üretilen kaynaklı bağlantılarda gözle ve optik mikroskopla görülür herhangi bir kaynak hatasına yol açmamıştır.
- İki değişik akım (ısı girdisi) seviyesinde yapılan her iki kaynaklı bağlantının kaynak dikişinde (ergime bölgesinde - EB) de döküm yapısına benzer ince taneli dendritik bir yapı oluştuğu görülmüştür. Ancak, yüksek ısı girdisi ile üretilen kaynaklı birleştirmenin ergime bölgesinde oluşan dendritik yapının tane boyutu düşük ısı girdili kaynaklı bağlantıdakinden daha iri olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla, artan ısı girdisi EB'de oluşan dendritik yapının tane boyutunu artırmaktadır.
- Her iki (düşük ve yüksek ısı girdili) kaynaklı bağlantının IEB'si de, ergime bölgesinde yakın kısmında kaba taneli IEB ve baz levha tarafına yakın kısımda ince taneli IEB olmak üzere iki farklı kısımdan oluşmakta olduğu tespit edilmiştir. Ancak, yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantının IEB'sinin kaba taneli kısmındaki

tane boyutu düşük ısı girdili bağlantıdan çok daha büyüktür. Ayrıca, IEB'sinin toplam genişliği düşük ısı girdili kaynaklı bağlantıda, yüksek ısı girdisi ile elde edilen bağlantıdan çok daha dardır. Dolayısıyla, bu sonuçlar yüksek ısı girdisinin hem ergime bölgesine yakın IEB'de daha kaba taneli bir yapı oluşumuna ve hem de IEB'ni genişliğinin artmasına yol açtığı görülmüştür.

- Ayrıca, her iki kaynaklı bağlantının IEB'de hem ferrit tanelerinde kabalaşma hem de taneler arası ve tanelerin içinde martenzit oluşumu gözlenmiştir. Ancak, hem IEB'nin tane irileşmesi oluşan kısmı hem de martenzit oluşumu gerçekleşen toplam IEB'nin eni yüksek ısı girdili bağlantıda çok daha geniştir.
- Isıdan etkilenmiş bölgenin (IEB'nin) yüksek ısı girdili bağlantıda daha geniş olduğu mikrosertlik ölçümleri ile elde edilen sertlik profillerinde de gözlenmiştir. Ayrıca, her iki kaynaklı bağlantının kaynak kesidi boyunca sertlik dağılımı birbirine benzemekte olup, özellikle IEB'lerinde sertlik değerlerinde dikkate değer bir artış gözlenmiştir. Sertlik artışı her iki kaynaklı bağlantının kaynak dikişinde (ergime bölgesinde) de söz konusudur. Her iki bağlantının ergime bölgesindeki sertlik IEB'dekinden düşük ama baz levha sertliğinden yüksektir. Bu sonuçlar her iki kaynaklı bağlantının kaynak bölgesinde bir sertlik artışı (strength overmatching) olduğunu göstermiştir.
- Kaynaklı bağlantılardan çıkarılan tüm çekme deneyi numunelerinin hepsi kaynak dikişinden oldukça uzak bir mesafede baz levha içerisinde kopmuştur (kırılmıştır). Bu sonuç, kaynaklı bağlantılardan elde edilen ve kaynak bölgesinde belirgin bir sertlik artışı gözlenen sertlik profilleri ile de uyumludur. Ayrıca, bu sonuç her iki kaynaklı levhanın mekanik performansının iyi olduğunu ve bu çalışmadaki ısı girdisi farkının çekme deneyindeki kaynak performansı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını da göstermektedir.
- Her iki kaynaklı bağlantıdan çıkarılan çekme numuneleri de baz levha numunelerine benzer mukavemet değerleri göstermiştir. Nitekim, her iki kaynaklı bağlantıdan elde edilen çekme mukavemeti değerleri baz malzeme çekme mukavemetine çok yakın olup, her iki kaynaklı bağlantının mukavemet performansı değerleri %99 olarak belirlenmiştir.
- Ancak, her iki kaynaklı bağlantıdan çıkarılan çekme numuneleri baz levha numunelerinden çok daha düşük % uzama değerleri göstermiş olup, her iki

kaynaklı bağlantının süneklik performansı değerlerinin %65 civarında olduğu tespit edilmiştir. Bu da kaynak bölgesinde sertliğin daha yüksek olduğu kaynaklı levhalardan çıkarılan çekme numunelerin boyları boyunca homojen plastik deformasyon gerçekleşmediğinden, diğer bir deyişle çekme deneyinde plastik şekil değiştirmenin sadece toplam numune boyunca sadece baz levha kısımlarında gerçekleşmesinden ve boydaki uzamanın toplam numune boyuna bölünmesinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak, tüm kaynak bölgesinde mukavemet artışı gözlenen kaynaklı bağlantılarda % uzama, dolayısıyla süneklik performansı değerlerinde böyle bir düşüş gözlenmektedir.

- Ayrıca, yüksek ısı girdisi sonucu hem IEB'de tane irileşmesi ve martenzit oluşumu hem de IEB'sinin genişliğinin artması kaynaklı bağlantıların bükme deneyindeki performansları üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Nitekim, her iki kaynaklı bağlantıdan çıkarılan bükme numunelerinde yüzey bükme şartlarında çatlama olmazken kök bükme şartlarında sadece düşük ısı girdili kaynaklı levha numunesi çatlama olmamış olup, yüksek ısı girdili bağlantıdan çıkarılan numunede çatlama gerçekleşmiştir. Bu çatlamanın nedeni IEB'de hem ferrit tanelerinin aşırı irileşmesi hem de martenzit oluşumu sonucu bu bölgenin gevrekleşmesidir.

## Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelikler üzerinde yapılması yararlı olacağı düşünülen öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Her iki kaynaklı levhanın da kaynak bölgelerinde meydana gelen içyapı değişimleri ile ilgili daha detaylı inceleme yapılabilir. Bu kapsamda, taramalı elektron mikroskopunda (SEM) EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ve X-ışını difraksiyonu çalışmaları ile martenzit ve karbür partiküllerin tam olarak ne olduğu veya başka bir deyişle kimyasal kompozisyonu tam olarak tespit edilebilir.
- Bu çalışmada GMAK yönteminde kaynaklanan levhalara aktarılan ısı girdisindeki artışın kaynaklı bağlantıların içyapısı ve oda sıcaklığındaki çekme ve bükme şartlarındaki performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aynı şartlarda üretilen kaynaklı levhalardan çıkarılan Charpy numuneleri ile hem oda sıcaklığında hem de düşük sıcaklıklarda (-30 ve/veya -60 °C'de) kırılma tokluğu (çentikli darbe)

deneyleri gerçekleştirilerek kaynaklı levhaların tokluğunun sıcaklık düşüşü ile nasıl değiştiği de incelenebilir.

- Bunlara ilaveten, bu çalışmada GMAK yöntemiyle başarılı bir şekilde kaynak edilen 5 mm kalınlığındaki AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhalar, daha düşük ısı girdisinin söz konusu olduğu bir ergitme kaynağı olan lazer kaynağı (LB) veya elektron kaynağı (EB) ile birleştirilebilir. Elde edilen kaynaklı bağlantıların kaynak bölgesinde oluşan içyapı değişimleri ve mukavemet ve süneklik performansları incelenip, bu çalışma sonuçları ile mukayese edilebilir.
- Ayrıca, elde edilen LB veya EB kaynaklı AISI 430 ferritik paslanmaz çelik bağlantıların oda sıcaklığı ve düşük sıcaklıklarda (-30 ve/veya -60 °C'de) Charpy çentikli darbe deneyi numuneleri ile tokluk değerinin sıcaklıkla değişimi GMAK'lı bağlantılar ile karşılaştırılabilir.

## KAYNAKLAR

- Afrox, (2021). African Oxygen Limited (AFROX), Linde Group, South Africa. [https://www.afrox.co.za/en/images/Section%2012%20%205%20%20Stainless%20steel%20Interactive\\_tcm266-598950.pdf](https://www.afrox.co.za/en/images/Section%2012%20%205%20%20Stainless%20steel%20Interactive_tcm266-598950.pdf), Erişim tarihi: 05 Haziran 2021.
- Aguilar, S., Tabares, R., Serna, C. (2013) Microstructural transformations of dissimilar austenite-ferrite stainless steels welded joints, *Journal of Materials Physics and Chemistry*, 1 (4), 65-68.
- Ambade S.P., Sharma, A., Patil, A.P., and Puri, Y.M. (2021). Effect of welding processes and heat input on corrosion behaviour of ferritic stainless steel 409M, *Materials Today: Proceedings*, 41 (5), 1018-1023.
- American Society of Metals, (1993). Selection of Stainless Steels, ASM Handbook, "Welding, brazing and soldering", American Society of Metals (ASM) International, 6. Cilt, 1145-1146.
- Arabacı, U., Çimen, M.. (2019). AISI 1050, AISI 304 ve AISI 430 tip çeliklerin yakma alın kaynak yöntemiyle kaynatılması ve mekanik özelliklerin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (4), 927-937.
- Aran, A., & Temel, M. (2004). Paslanmaz çeliklerin kaynağı, paslanmaz çelik yassı mamuller üretimi kullanımı standartları, Sarıtaş Teknik Yayını, İstanbul.
- Azim Paslanmaz Çelik, (2021). Azim Paslanmaz Çelik Mamulleri Sanayi ve Tic. A.Ş. [https://azimtic.com/paslanmaz-celiklerin-kullanim-ozellikleri\\_57.html](https://azimtic.com/paslanmaz-celiklerin-kullanim-ozellikleri_57.html), Erişim tarihi: 04 Haziran 2021.
- Çam, G. (2020). Kaynak bilimi ve teknolojisi. Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık. 205-209.
- Cobb, H.M. (2010). History of stainless steel melting and refining, ASM International, Ohio, USA.

- Erkkila, P. (2004). Trends and challenges in the stainless steel industry. *Ironmaking & Steelmaking*, 31, 277-284.
- Groover, M.P. (2015). Modern imalatın prensipleri (çev. editör. M. Yurdakul ve Y.T. İç). Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara. (Eserin orijinali 2015, 4. Baskı) 699-732.
- Gupta, S.K., Raja, A.R., Vashista, M., Yusufzai, M.Z.K. (2018). Effect of heat input on microstructure and mechanical properties in gas metal arc welding of ferritic stainless steel. *Materials Research Express*, 6 (3), 036516.
- Kaçar, R. & Gündüz, S. (2007). AISI 304-AISI 430 paslanmaz çeliklerin direnç kaynak kalitesine soğuk deformasyonun etkisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, IV. Demir Çelik Sempozyumu, Karabük, 1-3 Kasım 2007.
- Kaya, Y. (2010). AISI 304 ve AISI 430 paslanmaz çeliklerin TIG, MIG ve örtülü elektrod ark kaynağıyla birleştirilebilirliğinin araştırılması. *G.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (3), 549-557.
- Khatib, J. (2009). Sustainability of construction materials. Woodhead Publishing, Cambridge, UK.
- Khorrami, M.S., Mostafaei, M.A., Pouraliakbar, H., and Kokabi, A.H. (2014). Study on microstructure and mechanical characteristics of low-carbon steel and ferritic stainless steel joints, *Materials Science & Engineering A*, 608, 35-45.
- Lai, J.K.L.; Shek, C.H.; Lo, K.H. (2012). Stainless steels: An introduction and their Recent developments; Bentham Science Publishers: Beijing, China.
- Lippold, J.C. ve Kotecki, D.J. (2005) Welding metallurgy and weldability of stainless steels', John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 141-200.
- Poonayom, P., Chantasri, S., Kaewwichit, J., Roybang, W., and Kimapong, K. (2015). Microstructure and tensile properties of SS400 carbon steel and SUS430 stainless steel butt joint by gas metal arc welding, *International Journal of Advanced Culture Technology*, 3 (1), 61-67.

- Taban E. ; Deleu , E.; Dhooge , A.; Kaluc , E. (2007). Gas metal arc welding of modified X2CrNi12 ferritic stainless steel, *Kovove Materialy–Metallic Materials*. 45 (2), 67-73.
- Teker T. & Kursun T. (2010). AISI 430 çelik çiftinin manuel (GMAW) ve sinerjik kontrollü (GMAW-P) kaynağında ısı girdisinin mikroyapı üzerindeki etkisi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* (elektronik), 7(2), 35-43.
- Teker, T. & Kursun, T. (2011). Weldability of AISI 430/AISI 1030 steel couples via the synergic controlled pulsed (GMAW-P) and manual gas metal arc (GMAW) welding techniques. *Materials and Manufacturing Processes*. 26 (7), 926-932.
- Van Warmelo, M., Nolan, D., and Norrish J. (2007). Mitigation of sensitisation effects in unstabilised 12%Cr ferritic stainless steel welds, *Materials Science & Engineering A*, 464, 157-169.
- Yürük, A., Bozkurt, B., Kahraman, N. (2017). An investigation on the weldability of s235jr carbon steels and aisi 430 ferritic stainless steels with gas metal arc welding. *Sakarya University Journal of Science*, 21 (2), 90-97.
- Zhou, J., Shen, J., Hu, S., Zhao, G, and Wang, Q. (2019). Microstructure and mechanical properties of AISI 430 ferritic stainless steel joints fabricated by cold metal transfer welding, *Materials Research Express*, 6 (11), 116536.



**DİZİN****A**

AISI 430 · 1, xv, xvii, xviii, xxi, 27, 28, 29, 37, 38, 39, 40,  
47, 66, 68, 69, 70, 71, 72

**B**

baz malzeme · xxiii, 43, 44, 47, 53, 54, 55, 57, 67

**D**

dendritik yapı · 36, 48

**F**

ferritik · xvii, xxi, 27, 29, 30, 31, 33, 35, 36, 37, 38, 39,  
40, 47, 57, 66, 68, 69

**G**

gaz metal ark kaynağı · 28, 30, 37, 38, 66

**I**

ısı girdisi · xvii, xxii, xxiii, 38, 39, 41, 45, 47, 48, 50, 51,  
52, 53, 54, 55, 58, 63, 66, 67, 68

**K**

karbür çökmesi · xvii, 36, 53, 63  
kaynak performansı · 59, 67

**M**

martenitik · 30, 31, 34, 36  
mikrosertlik · xvii, 27, 38, 39, 43, 67  
mikroyapı · 27, 28, 38, 39

**Ö**

östenitik · 27, 33, 34, 37, 38, 39, 57

**P**

paslanmaz çelik · xvii, xxi, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 37,  
38, 39, 40, 41, 47, 57, 66, 69, 70

**S**

sertlik profilleri · xxiii, 44, 57, 58, 67

**T**

tane irileşmesi · 27, 28, 36, 37, 38, 48, 57, 63, 67, 68  
tane rafinasyonu · 28



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

