



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**S355JR – S700MC YAPI ÇELİKLERİNİN MAG
KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ,
MİKROYAPI VE YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Fatma Nur ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Nisan-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Fatma Nur Şahin tarafından hazırlanan “S355JR – S700MC Yapı Çeliklerinin MAG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi, Mikroyapı ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 22/04/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE

.....

Üye

Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL

.....

Üye

Doç. Dr. Mehmet Emin ERGÜN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Fatma Nur ŞAHİN

Tarih: 22.04.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

S355JR – S700MC YAPI ÇELİKLERİNİN MAG KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ, MİKROYAPI VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Fatma Nur ŞAHİN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE

2024, 79 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE

Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL

Doç. Dr. Mehmet Emin ERGÜN

Bu tez çalışmasında, otomotiv ve inşaat sektörü başta olmak üzere; özellikle vinç ve treyler imalatında kullanımı yaygın olan S700MC ince taneli yapı çeliği ile endüstride hemen her alanda kullanılan S355JR yapı çeliğinin farklı koruyucu gaz altında MAG kaynak yöntemiyle kaynak kabiliyeti araştırılmıştır. Deney numunelerinin, kaynak metal ve ITAB'tan parça kesitleri alınarak mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. 4 mm kalınlığındaki metal saclar, aynı kaynak parametrelerinde SG2 kaynak teli ve %2O₂+%5CO₂+%93Ar ve %2O₂+%12CO₂+%86Ar karışım gazları ile alın kaynağı yöntemiyle kaynatılmıştır. MAG kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynaklı birleştirme çalışmaları neticesinde deney numuneleri mikroyapısal karakterizasyonu için genel metalografi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kaynak metal, ITAB ve esas metal kapsayacak şekilde elde edilen numunelerden elde edilen mikroyapı sonuçlarına göre kaynak gazının herhangi belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Mikroyapı sonuçları incelendiğinde, S700MC ve S355JR çeliğinin kaynak metaline doğru tane boyutunda büyüme görülmüştür. Deney numunelerinin kaynak metalinde faz ve faz dönüşümlerinin belirlenmesi için XRD analiz gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirme sonrası elde edilen numunelerin mekanik davranışları açısından HV1 yük altında Vickers sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. S355JR çeliğinde ana metalden kaynak metaline doğru sertlik artarken, S700MC çeliğinde azalmıştır. Malzemelerin mekanik davranışlarını incelemek üzere gerçekleştirilen çekme deneyi sonuçlarına bakıldığında, S355JR çeliğinin birbiri ve S700MC çeliği ile kaynağında esas metalden sünek bir kopma olurken; S700MC çeliğinde kaynak bölgesinden kırılma meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: ITAB, MAG, Mikroyapı, Sertlik, S355JR, S700MC

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF MICRO STRUCTURE AND STRUCTURAL PROPERTIES OF S355JR – S700MC STRUCTURAL STEELS USING MAG WELDING METHOD

Fatma Nur ŞAHİN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

2024, 79 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

Assoc. Prof. Dr. Şaban BÜLBÜL

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin ERGÜN

In this thesis study, especially the automotive and construction sectors; the welding ability of S700MC fine-grained structural steel, which is especially common in crane and trailer manufacturing, and S355JR structural steel, which is used in almost every field in the industry, was investigated using the MAG welding method under different protective gas. Microstructure and mechanical properties of the test samples were examined by taking weld metal and part sections from the HAZ. 4 mm thick metal sheets were welded by butt welding method with SG2 welding wire and 2%O₂+5%CO₂+93%Ar and 2%O₂+12%CO₂+86%Ar mixture gases at the same welding parameters. As a result of the welded joining studies using the MAG welding method, general metallography studies were carried out for the microstructural characterization of the test samples. According to the microstructure results obtained from the samples obtained including the weld metal, HAZ and base metal, the weld gas does not have any significant effect. When the microstructure results were examined, an increase in grain size was observed towards the weld metal of S700MC and S355JR steel. XRD analysis was performed to determine phase and phase transformations in the weld metal of the test samples. Vickers hardness measurements were carried out under HV1 load in terms of mechanical behavior of the samples obtained after welded joining. While the hardness increased from the base metal to the weld metal in S355JR steel, it decreased in S700MC steel. Considering the results of the tensile test carried out to examine the mechanical behavior of the materials, while there is a ductile rupture from the base metal when welding S355JR steel with each other and with S700MC steel; a fracture occurred in the welding area of S700MC steel.

Keywords: Hardness, HAZ, MAG, Microstructure, S355JR, S700MC

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimiyle bana yol gösteren, tezimin araştırma safhasından deneysel çalışmalarına kadar her aşamasında fazlasıyla destek sağlayan ve her konuda desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE'ye; yine yüksek lisans eğitimim süresince ders döneminde, sonrasında tez aşamasında da her konuda bilgi ve deneyiminden çekinmeden yararlandığım, her konuda bana destek olan değerli hocam Doç. Dr. Şaban Bülbül'e ve deneysel çalışmalarımda destek sağlayan değerli hocam Öğr. Gör. Dr. Onur GÖK'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Deneysel çalışmalarım esnasında bana destek sağlayan Özgül Treyler'deki yöneticilerime ve ekip arkadaşlarıma; Lokinox Gıda Makinaları firma yöneticisi ve bana burada çalışma imkânı sağlayan kuzenime; Çelikel Tarım Makineleri'nde deney çalışmalarımın yapımını sağlayan ERP Danışmanı Mehmet ÖZMEN'e ve firma yöneticilerine; deneysel çalışmalarına destek sağlayan Musa VURAL'a; lazer kesim işlemlerimi yapan Alioğlu Pres'in kurucularından Veysel KARA'ya; çekme deneylerimin yürütülmesinde yardımlarını aldığım Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu müdürü Prof. Dr. Alpay ÖZER ve öğretim görevlisi Dr. Ufuk TAŞCI'ya teşekkürlerimi sunarım. Hayatımın her aşamasında ve her zaman bana desteğini esirgemeyen, ilham ve motivasyon kaynağım olan, emeklerini asla ödeyemeceğim kıymetli aileme sonsuz minnettarım. Ayrıca bu tez çalışmamda, bu yola beraber hayalini kurarak çıktığım ve bana yokluğunda bile yol gösteren, yıllar önce kaybettiğim can dostum Batuhan ARIKAN'a ve bana bu süreçte maddi ve manevi destek olan tüm sevdiklerime teşekkürlerim sonsuzdur.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
3. KAYNAKLI İMALATIN TANIMI VE TARİHÇESİ	5
3.1. Kaynak Yöntemleri	7
3.1.2. Elektrik ark kaynağı.....	8
3.1.2.1. Örtülü elektrot kaynağı.....	9
3.1.2.2. Tozaltı kaynağı	10
3.1.2.3. Gaz tungsten ark kaynağı (TIG)	11
3.1.2.4. Ergiyen elektrotla gazaltı kaynağı (MIG/ MAG)	12
4. MIG/ MAG KAYNAK YÖNTEMİ.....	14
4.1. MIG/ MAG Kaynağının Çalışma Prensibi	14
4.2. MIG/ MAG Kaynağı Damla İletim Mekanizmaları	15
4.2.1. Kısa devre metal iletimi (kısa ark).....	16
4.2.2. İri damla iletimi (uzun ark)	17
4.2.3. Sprey iletimi (sprey ark)	17
4.3. MIG/ MAG Kaynak Donanımı ve Kullanılan Malzemeler	18
4.3.1. Güç ünitesi.....	19
4.3.1.1. Motor jeneratör tipi akım üreteçleri	20
4.3.1.2. Redresör tipi akım üreteçleri	20
4.3.1.3. İnverter tipi akım üreteçleri	21
4.3.1.4. Sinerjik darbeli akım üreteçleri	22
4.3.2. Koruyucu gaz ünitesi	22
4.3.3. Elektrot besleme ünitesi	22
4.3.4. Kaynak torcu	23
4.3.5. Kaynak telleri (elektrotlar)	24
4.3.6. Koruyucu gazlar	25
4.4. Kaynak Kalitesine Etki Eden Parametreler	27
4.4.1. Kaynak akım şiddeti	27
4.4.2. Ark gerilimi (ark boyu).....	27
4.4.3. Kaynak hızı	29
4.4.4. Kaynak akım türü ve kutuplama.....	29

4.4.5. Tel hızı	30
4.4.6. Elektrotun cinsi ve çapı.....	30
4.4.7. Serbest tel uzunluğu.....	31
4.4.8. Koruyucu gazın cinsi ve debisi.....	32
4.4.9. Torç açısı ve kaynak yönü.....	33
5. ÇELİKLERİN KAYNAK KABİLİYETİ VE YAPISI.....	35
5.1. Çeliklerin Kaynaklanabilirliği	35
5.2. Çeliklerin Yapısı ve Özellikleri	37
5.3. Çeliklerin Sınıflandırılması	38
5.3.1. Yapı çeliklerinin özellikleri.....	38
5.3.1.1. S355JR çeliğinin özellikleri	40
5.3.1.2. S700MC çeliğinin özellikleri.....	40
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	41
6.1. Malzeme	41
6.2. Yöntem	43
6.2.1. Metalografik çalışmalar	46
6.2.2. Mikroyapı incelemeleri	49
6.2.3 XRD analizi.....	49
6.2.4. Sertlik ölçümleri	50
6.2.5. Çekme deneyi	51
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	54
7.1. Mikroyapı Sonuçları.....	54
7.2. XRD Analiz Sonuçları.....	62
7.3. Sertlik Sonuçları.....	66
7.4. Çekme Testi Sonuçları	68
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	72
8.1. Sonuçlar.....	72
8.2. Öneriler.....	73
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
°	: Derece
°C	: Celcius degree
A	: Amper
Al	: Alüminyum
Ar	: Argon
C	: Karbon
C _{eş}	: Karbon eşdeğeri
Cl	: Klor
CO ₂	: Karbondioksit
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
He	: Helyum
Hz	: Hertz
HV	: Vickers Sertlik
kg/mm ²	: kilogram/ milimetrekaare
m/ dk	: metre/ dakika
m/ dk	: metre/ dakika
m ³ /s	: metreküp/ saniye
mm	: milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
N	: Azot
N ₂	: Azot
Ni	: Nikel
O ₂	: Oksijen
P	: Fosfor
PA	: Düz kaynak pozisyonu

S	: Kükürt
Si	: Silisyum
V	: Vanadyum
V	: Voltaj
Zr	: Zirkonyum

Kısaltmalar

AISI	: American Iron and Steel Institute
AWS	: American Welding Society
DIN	: Deutsches Institut für Normung
EN	: European Norm
GMAW	: Gas Metal Arc Welding
ISO	: International Organization for Standardization
ITAB	: Isının tesiri altındaki bölge
M.Ö.	: Milattan Önce
MAG	: Metal Active Gas
MIG	: Metal Inert Gas
SAE	: Society of Automotive Engineers
TIG	: Tungsten Inert Gas
TS	: Türk Standardı
XRD	: X-Ray Diffraction
ZSD	: Zaman-sıcaklık-dönüşüm

1. GİRİŞ

Taş devrinin ardından metallerin bulunmasıyla işleme yöntemleri de beraberinde gelişmiştir. Avcılıkla geçimini sağlayan o dönem insanı için özellikle silah yapımında kullanılan metaller, oldukça büyük bir önem kazanmıştır. İlk olarak altın, bakır, gümüş, kurşun ve kalayın bulunmasının ardından M.Ö. 1500 yıllarında demir bulunmuştur. Ardından devam eden süreçte krom, alüminyum, nikel gibi birçok farklı metal türü keşfedilmiştir. İlerleyen tarihsel süreçte demirin ergitilmesi keşfedilerek araç ve silah yapımında kullanılmıştır. Bronz devrinde ise alaşımın temelleri atılmış olup, iki farklı metalin karıştırılarak daha güçlü bir metalin elde edilebileceği keşfedilmiştir (Kalemtaş, 2023).

Sanayi devrimi sonrası gelişen teknolojiyle beraber eskiçağdan beri kullanılan demirin yanına çelik de eklenerek sanayinin temelini oluşturmuştur. Bu gelişmeyle beraber üretim teknikleri de değişime uğramıştır. İki malzemenin mukavemetli bir şekilde birleştirilmesini sağlayan kaynaklı imalat da ağır sanayide büyük önem kazanmıştır. İlk çağlarda demirci kaynağı olarak bilinen bu yöntem çeliğin ve diğer malzemelerin de bulunmasıyla farklı metotlar bulunarak geliştirilmiştir.

Endüstride kullanılan en önemli üretim yöntemlerinden biri olan kaynak, birden çok malzemenin farklı tekniklerle eritilerek birleştirilmesidir. İlk olarak çekiç darbeleriyle birleştirmeye başlayan kaynaklı imalat, oksijen, elektrik gibi kaynakların keşfedilmesiyle daha da geliştirilmiştir. Sırasıyla oksiasetlen, elektrik ark kaynağı, TIG, MIG ve MAG kaynağı yöntemleri ile uygulamalar yapılmıştır. İlerleyen teknolojiyle birlikte tozaltı, direnç, lazer kaynağı gibi birçok farklı kaynak tekniği geliştirilmiştir.

Sanayide hammadde olarak alaşımlı ve alaşımsız çeliklerin kullanımının yaygın olması sebebiyle MIG/ MAG kaynağı uygulamaları geniş yer tutmaktadır. Otomotiv, havacılık, ulaşım, inşaat ve taşıma/ vinç sektöründe kullanılan çelik malzemenin yapısı, mekanik ve kimyasal özellikler yönünden iyi kaynaklı birleşimler ve maliyet nedeniyle özellikle MAG kaynak yöntemi tercih edilmektedir. Bu kaynak yöntemiyle birlikte kaynak metalinin mekanik ve kimyasal özelliklerini etkileyen koruyucu gazların önemi de artmış ve üzerine pek çok çalışma yapılarak geliştirilmiştir. Özellikle argon ağırlıklı karbondioksit ve oksijen ilave gazlar hem iyi özellikte kaynak dikişi hem ekonomiklik hem de elde edilebilirlik açısından oldukça fazla tercih edilmektedir.

Geniş kullanım alanına sahip S235, S355 gibi yapı çeliklerinin yanı sıra gelişen teknolojiyle birlikte tane boyutları küçültülerek mukavemet kazandırılan SSAB'nin markası Strenx hafif yapı çeliklerinin de kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle diğer çeliklere göre aynı ağırlıkta daha fazla yük taşıma kapasiteleri sebebiyle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Avrupa'da yük taşıyan ulaşım araçlarının daha hafif olma beklentisi sebebiyle bu çelikleri tercih eden firmalar ihracatta da büyük maddi kazanımlar sağlamaktadır.

Otomotiv sektöründe treyler ve dorse imalatında S700MC ile S355JR çeliğinin kaynaklı birleşimi yaygın görülen bir uygulamadır. Yanlış uygulama teknikleri uygulandığında malzemede deformasyonlar olması muhtemeldir. Oldukça yüksek tonajlarda yük taşıyan bu ürünlerin kaynak yapısının ve mekanik özelliklerin anlaşılabilmesi için bu tez çalışmasında üzerine deneysel araştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada MAG kaynağı yöntemiyle sanayide yaygın olarak kullanılan S355JR (St52) yapı çeliği ile S700MC (Strenx 700) ince taneli yapı çeliği; 1,2 çapında SG2 kaynak teli ve %86Ar+%12CO₂+%2O₂ ve %93Ar+%5CO₂+%2O₂ koruyucu gazları ile kaynaklanarak çeliklerin kaynak bölgeleri, ITAB ve ana metalindeki tane yapılarının değişimi ve mekanik özelliklerini incelemek için incelemeler yapılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Gudadhe ve arkadaşları, SAE 1035 çeliğinin MAG yöntemiyle kaynağında elektrik akımı ve gaz parametrelerinin etkisini değerlendirmiştir. Her bir numune için farklı kaynak gazı ve akım kullandılar. Saf karbondioksit gazıyla yapılan kaynakta akımın artmasıyla ITAB artmıştır. Saf argon ile yapılan kaynakta ITAB'ın mikro sertliğinde bir azalma olmuştur. Artan elektrik akımıyla ITAB'ta artış olmuştur (Gudadhe vd., 2023).

Zhao ve arkadaşları, MAG kaynağı yönteminde metal transferine koruyucu gazın etkisini araştırmışlardır. Ar+%4CO₂+%3O₂ gazı kullanıldığında ark sıçraması olmasına rağmen darbeli akımla kararlı bir spreycik ark elde edildi. Ancak Ar+%13CO₂+%3O₂ gazı kullanıldığında akımdaki kararlılığının bozulması sebebiyle metal transferinde değişiklikler oldu. Gazda karbondioksit miktarının artmasıyla sıkıştırma etkisi nedeniyle ark boyu azaldı ve daha parlak bir ark oluştu. Ark kuvvetinin artmasıyla kaynak dikliğinin nüfuziyeti ve genişliği arttı. Ayrıca kaynak metalindeki ferrit miktarı da bir miktar arttı (Zhao vd., 2018).

Tao ve arkadaşları, argon koruyucu gazına karbondioksit ilavesinin etkilerini araştırdılar. Ar+CO₂ karışımında yeterli nüfuziyetin ortadan kaldırılarak iyi bir kaynaklı bağlantı elde edildiği görülmüştür. %3CO₂ ilavesi ile saf argona göre %57,9'luk bir artışla 480 MPa dayanım elde edilmiştir. Titanyum ve çelik olarak iki farklı metalin kaynağında kullandıkları bu yöntemin karbondioksit ilavesiyle çekme mukavemetini arttırdığı görülmüştür (Tao vd., 2023).

Liu ve arkadaşları, argon gazına azot ve oksijenin ilavesiyle yüksek nitrojenli çelik ile düşük alaşımlı çeliğin birleşimindeki kaynak metalinde oluşan değişimleri incelediler. Koruyucu gazdaki N₂ metalin nitrojen içeriğini artırırken nitrojenin dağılımının düzgün olmasını sağlar. O₂ ilavesi, iri damla küresel metal transferini spreycik arka dönüştürerek kaynak banyosunda nitrojenin çözünürlüğünü artırarak nitrojen miktarının artışına sebep olur. Böylece ferritin azalarak mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlar. N₂ ilavesi ise kısa devre metal transferine neden olarak ark kararlılığını zayıflatmıştır. N₂ artışıyla kaynaklı bağlantının performansı iyileştirilirken düşük alaşımlı çeliklerde nitrojenin çözünme oranı düşük olduğu için gözenek oluşmuş ve darbe direnci düşmüştür. Bu nedenle %4-8 oranında N₂ takviyesi ile daha dayanımlı kaynaklı bağlantılar elde edilecektir (Liu vd., 2023).

Li ve arkadaşları, 10Ni5CrMoV çeliğinin Cr-Ni tel kullanılarak gaz metal ark kaynağında koruyucu gazın etkisini araştırdılar. %40Ar+%58He+%2CO₂ bileşiminden oluşan

gaz ile kaynak yapıldığında gözenek, yetersiz ergime ve çatlaklara rastlanmamıştır. Kaynak metalinde sertleşme eğilimi olmamış ve kaynak bağlantısı iyi mekanik özelliklere sahip olmuştur (Li vd., 2018).

Liao ve arkadaşları, AISI 304 paslanmaz çelik kaynaklarının mekanik özellikleri ve mikroyapılarına koruyucu gazın etkisi incelemiştir. Ar+CO₂ karışım gazlarında karbondioksit oranı %2'den %20'ye yükselince kaynakta sıçrama miktarı arttığı görülmüştür. Malzemenin çentik tokluğunun ise çoğunlukla oksijen potansiyeline ve delta ferrit oluşumuna bağlı olduğu görülmüştür. -196 °C sıcaklıkta oluşan delta ferrit yapılar ve oksit kalıntıları çentik tokluğunu olumsuz etkilemiştir. Karbondioksit oranı %2'den %20'ye çıkınca ferrit içeriğinin azaldığı görülmüştür (Liao & Chen, 1998).

Katherasan ve arkadaşları, AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin %100Ar, %95Ar+%5CO₂, %90Ar+%10CO₂, %80Ar+%20CO₂, %75Ar+%23CO₂+%2O₂, %70Ar+%25CO₂+%5O₂ ve %100CO₂ koruyucu gaz karışımları ile özlü ark kaynağının mekanik özellikler ve metalurjik karakterlere etkisini araştırdılar. Oda sıcaklığında kırılma yüzeyinde sünek bir kopma olurken daha düşük sıcaklıklarda birkaç bölünmeden oluşan sünek bir kopma gerçekleştiği görülmüştür. Koruyucu gazdaki karbondioksit miktarının artmasıyla kaynak metalinin tokluğu ve ferrit yüzdeleri azalmıştır (Katherasan vd., 2013).

Mercan ve arkadaşları, AA5754 ve AA6013 alüminyum alaşımlarını farklı kaynak parametreleri kullanarak gaz altı metal ark kaynağı ile birleştirerek kaynak metalinin mekanik ve yapısal özelliklerini incelemiştir. Çentik darbe testi sonucunda iki metalin de ITAB ve kaynak metalleriindeki tokluk değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Üç nokta eğme testi sonucunda uygun kaynak parametreleri ile birleştirilen numuneler 180° eğilirken, uygun olmayan parametrelerde ise ITAB ile kaynak metali arasında çatlama ve kırılmalar görülmüştür. AA6013 ITAB'ında en yüksek sertlik değerleri ölçülürken kaynak metalinde sertlik daha azdır. AA5754 ITAB'ında ise daha da düşük sertlik değerleri görülmüştür. Mikroyapılara baktıklarında ise tüm kaynak metalleriinin dentritik yapıya sahip olduğunu tespit etmişlerdir (Mercan vd., 2020).

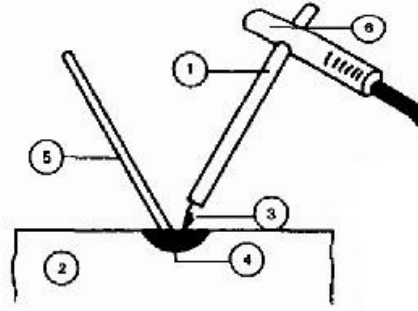
Şık, 4 mm kalınlığındaki S355JR yapı çeliğini %80Ar+%18CO₂+%2O₂, %88Ar+%10CO₂+%2O₂ ve %93Ar+%5CO₂+%2O₂ koruyucu gaz altında SG2 ve SG3 elektrotları ile MAG kaynak yöntemiyle birleştirerek kaynak metalinin mekanik özelliklerini incelemiştir. %88Ar+%10CO₂+%2O₂ gazı ve SG3 elektrodu kullanılarak elde edilen kaynak dikişinin mekanik özelliklerinin daha yüksek olduğunu görmüştür (Şık, 2007).

3. KAYNAKLI İMALATIN TANIMI VE TARİHÇESİ

Bir malzemenin şeklini, işlevini ve özelliklerini fiziksel veya kimyasal işlemler uygulayarak değiştirerek yeni bir ürün elde etmeye imalat denmektedir. Hammadde olarak kullanılan bu malzemeler metaller, kompozitler, seramikler ve polimerler olmak üzere dört ana gruba ayrılmaktadır. İmalat yöntemleri ile bu malzemeleri işleyerek veya bunlardan oluşan bileşenleri birleştirerek yeni bir ürün ortaya çıkarılması sağlanır. Talaşlı imalat, döküm işleme; kaynak, lehimleme, vidalı veya geçmeli bağlantılar yani montaj birleştirme operasyonları olarak sınıflandırılmaktadır. Tüm bu imalat yöntemleri arasında, iki parçanın ısı veya basınç etkisi altında bir bütün oluşturmak için ergiyerek birleştirilmesi işlemi olarak tanımlanan kaynak, endüstri uygulamalarında büyük bir önem ve paya sahiptir (Ayan, 2010).

Kaynak işlemi sonrası ortaya çıkan ürünler bir bütün olarak davranır ve birden fazla parçanın kolaylıkla birleştirilmesine olanak sağlar. Elde edilen ürün dayanım ve sızdırmazlık açısından oldukça avantajlıdır. Dayanıklılık, güvenilirlik, verimlilik, kalıcılık ve uygun maliyet sebebiyle de yıllardan beridir en çok tercih edilen imalat yöntemlerinden biri olmuştur (Günaydın, 2022). Bu imalat yönteminin geçmişinin günümüzden yaklaşık 3500 yıl öncesine dayandığı öngörülmektedir. Bazı tarihçilerin araştırmalarına göre de M.Ö. 1400 yıllarında demirin kaynak ile birleştirildiği görülmüştür. İki demirin çekiçlenerek birleştirildiği bu kaynak yöntemi demirci kaynağı olarak bilinmektedir. Roma medeniyetindeki eserlere bakıldığında metal işçiliğinin ne kadar geliştiği ve önemsendiği birçok tarihçi tarafından kabul edilmektedir. Ancak Mısır Firavunları devrinde lehimleme ile birleştirme yapılmış metal işleri lehimleme tarihinin demirci kaynağından çok daha eskilere dayandığını göstermektedir. Ülkelerin endüstrileşmesiyle beraber çekiç ile yapılan demirci kaynağı, yalnızca küçük demirci ve nalbant atölyelerinde kalarak neredeyse tarihe karışmıştır.

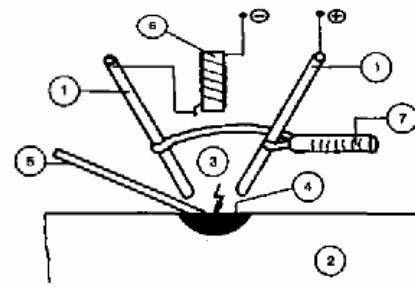
Oksijenin endüstriyel olarak üretilmesi sonucu, 19. yüzyılın ikinci yarısında oksiasetilen kaynağının yaygınlaşmasıyla endüstriyel kaynak uygulamaları başlamıştır. Volta'nın 18. yüzyılda elektrik arkını bulmasına rağmen elektrik ark kaynağı uygulamalarının başlaması 19. yüzyılın son çeyreğini bulmuştur. El ile yapılan elektrik ark kaynağının ilk örneği, 1885'te karbon bir elektrotla iş parçası arasında ark oluşturarak başka bir kaynak teliyle kaynak yapılan Bernardos kaynak yöntemidir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Bernardos kaynak yöntemi (Anık vd., 1991)

1. Karbon elektrot
2. Esas metal
3. Elektrik arki
4. Kaynak banyosu
5. Tel elektrot
6. Hamlaç

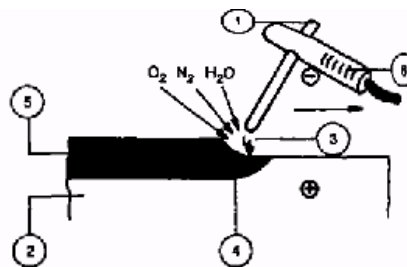
1889'da geliştirilen Zerener kaynak yönteminde, iki karbon elektrot arasındaki manyetik bir bobin ile arkın iş parçasına üflenmesini sağlamış ve kaynaklama işlemi için ayrıca bir tel elektrot daha kullanılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Zerener kaynak yöntemi (Anık vd., 1991)

1. Karbon elektrotlar
2. Esas metal
3. Elektrik arki
4. Kaynak banyosu
5. Tel elektrot
6. Manyetik bobin
7. Hamlaç

Zerener ile aynı dönemlerde Slavianoff halen kullanılan elektrik ark kaynağının temellerini atmıştır (Şekil 3.3). Bu yöntemde, diğer iki yöntemde kullanılan karbon elektrot yerine sadece eriyen tel bir elektrot kullanılmıştır. Slavianoff kaynak yönteminde, iş parçasıyla elektrot arasında oluşan arkın sıcaklığıyla çıplak tel elektrot eriyerek kaynak ağzını doldurmaktadır. Ancak bu yöntem, kaynak banyosu havanın olumsuz etkilerinden korunmadığı için kaynak dikişinin mekanik özelliklerinin düşük olması sebebiyle yetersiz kalmıştır.



Şekil 3.3. Slavianoff kaynak yöntemi (Anık vd., 1991)

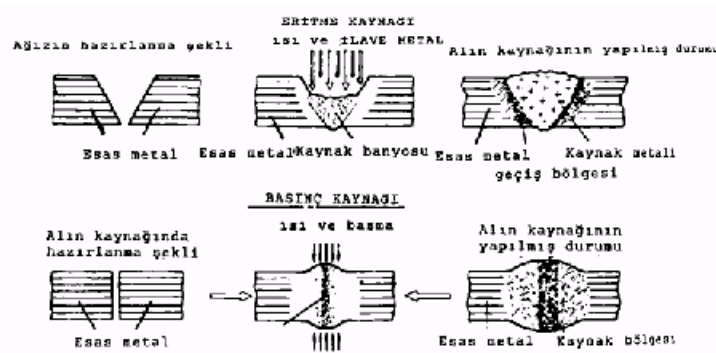
1. Eriyen elektrot
2. Esas metal
3. Elektrik arki
4. Kaynak banyosu
5. Kaynak dikişi
6. Hamlaç

1904 yılında İsveçli bilim adamı Oscar Kielberg'in örtülü elektrotu bulmasıyla kaynak banyosunun havada bulunan azot ve oksijenden korunarak kaynak dikişlerinin iyileştirilmesi sağlanmıştır. Bu gelişmeyle birlikte Birinci Dünya Savaşı'ndan sonra kaynak sadece tamir yöntemi olmaktan çıkıp bir imalat yöntemi olmuştur. Gaz ve ark kaynağının birbirleriyle rakip olduğu bu dönemlerde uçakların yapımında kullanılan alüminyum-magnezyum alaşımlı malzemelerin kaynağında karşılaşılan problemler sonucu 1940'lı yıllarda bir iş birliği doğmuş ve soygaz koruması altında TIG kaynağı yapılmıştır. Böylece bütün metal ve alaşımları kaynakla birleştirilebilir hale gelmiştir. Daha sonrasında ise MIG/ MAG gazaltı ark kaynağı yöntemleri geliştirilmiş ve özellikle az alaşımlı çeliklerin kaynağında MAG kaynak yöntemiyle diğer yöntemlere göre tercih yönünden üstünlük sağlanmıştır (Anık vd., 1991).

Ülkemizdeki kaynaklı imalat gelişmelerine baktığımızda ilk kaynak denemelerinin 1920 yıllarında İstinye ve Gölcük tersanelerinde yapılmıştır. Devlet Demir Yolları fabrikalarında kaynak atölyesinin kurulmasıyla 1937 yılında ilk planlı kaynak çalışmasına başlanmıştır (Ayan, 2010).

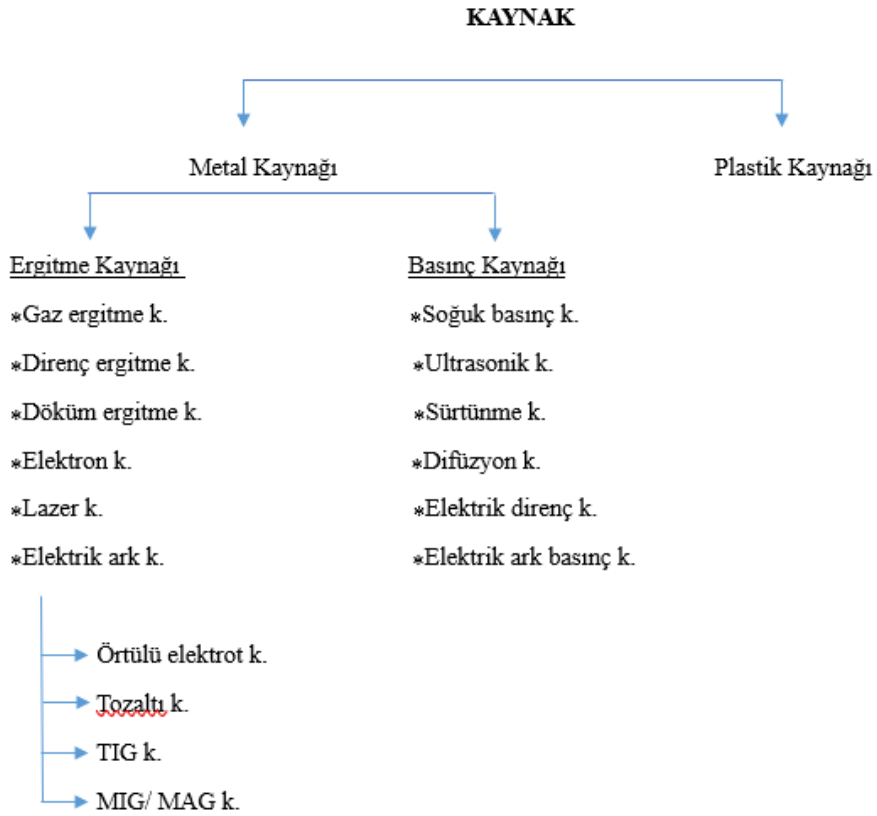
3.1. Kaynak Yöntemleri

Kaynak, uygulanacak malzemenin cinsine göre metal ve plastik kaynağı olarak tanımlanır (Şekil 3.4). Uygulanan yöntemde eğer ısı girdi varsa bu ergitme kaynağıdır ve bu yöntemin bazı uygulamalarında iki malzemenin birleştirilmesi için ergiyen bir ilave metal kullanılır. Eğer basınç altında bir kaynak işlemi yapılıyorsa bu da basınç kaynağı olarak adlandırılır. Basınç kaynağında herhangi bir ilave metal kullanılmadan malzeme bölgesel olarak basınç altında kaldığından ısınarak birleşme sağlanır.



Şekil 3.4. Eritme ve basınç kaynağı yöntemi (Anık, 1991)

Kaynak yapılış amacına göre sınıflandırıldığında birleştirme ve doldurma kaynağı olarak tanımlanır; metal ve plastik kaynağı olarak malzeme cinsine göre sınıflandırılır (Şekil 3.5). Birden çok malzemeyi ayrılmaz bir bütün haline getirmek için yapılan yöntem birleştirme kaynağı olarak adlandırılırken; bir parçadaki eksikliği tamamlamak veya parçayı büyütmek için kullanılan yöntem doldurma kaynağı olarak adlandırılır (Anık, 1991).

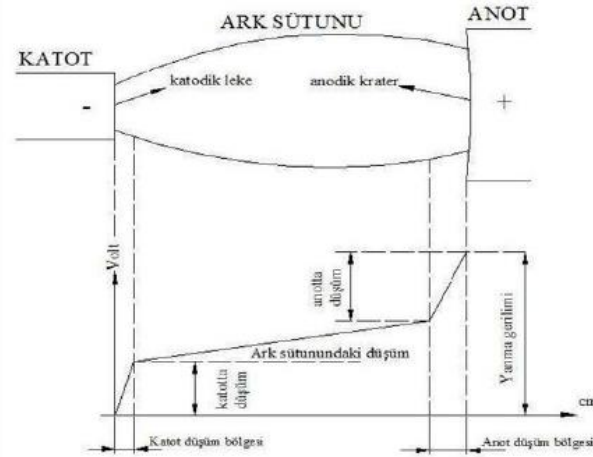


Şekil 3.5. Kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması (Kul, 2009)

3.1.2. Elektrik ark kaynağı

Atomun iyonizasyonu sonucu oluşan ark, plazma içinde kızgın katottan yayılan elektronların anotta bombardıman yapması sonucu oluşan bir elektrik deşarjıdır (Şekil 3.6). Elektrotla kaynak yapılan ark kaynağında gerekli ısıyı ve tutuşmayı sağlar.

Elektrik arkı ile gerekli olan ısının sağlandığı elektrik ark kaynağı; metal ark kaynağı (örtülü elektrotla kaynak), karbon ark kaynağı, koruyucu gazla ark kaynağı (TIG, MIG/MAG) ve tozaltı kaynağı olmak üzere dört ana gruba ayrılır (Karagöz, 2010).

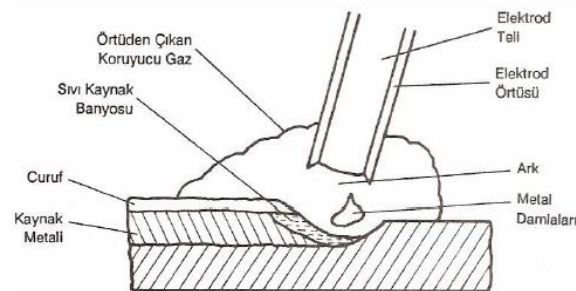


Şekil 3.6. Kaynak arkının oluşumu (Karagöz, 2010)

3.1.2.1. Örtülü elektrot kaynağı

Ergiyen örtülü bir elektrot ile iş parçası arasında ark oluşturularak yapılan kaynak, örtülü elektrot (metal ark) kaynağı olarak adlandırılır. Yüksek ısıyla örtülü elektrot eridiğinde ortaya çıkan örtüdeki koruyucu gaz kaynak banyosunu, oluşan cüruf ise kaynak dikişini örterek kaynak metalini korur (Şekil 3.7). Ayrıca kaynak dikişini alaşımlandırarak istenilen özellikte kaynaklı malzeme, problemsiz ve derin nüfuziyetli bir kaynak dikişi elde etmek; aynı zamanda kolay bir şekilde ark oluşturabilmek için elektrotların örtü malzemelerine katılan alaşım elementleri oldukça önemlidir (Ekici, 2009). Çeşitli miktarda elektrot bulunması sebebiyle ana metalin kimyasal ve mekanik özelliklerine yakın kaynaklı birleşmeler edilebilir (Şenöz, 2015).

Arkın başlatılarak yanması, ark boyunun ayarlanması, arkın söndürülmesi, kaynak hızı ve eriyen elektrot metalinin kaynak ağzını uygun şekilde doldurması kaynakçı tarafından yapıldığı için kaynağın kalitesine kaynakçının kalifiye ve bilgili olmasının çok büyük etkisi vardır (Karagöz, 2010).

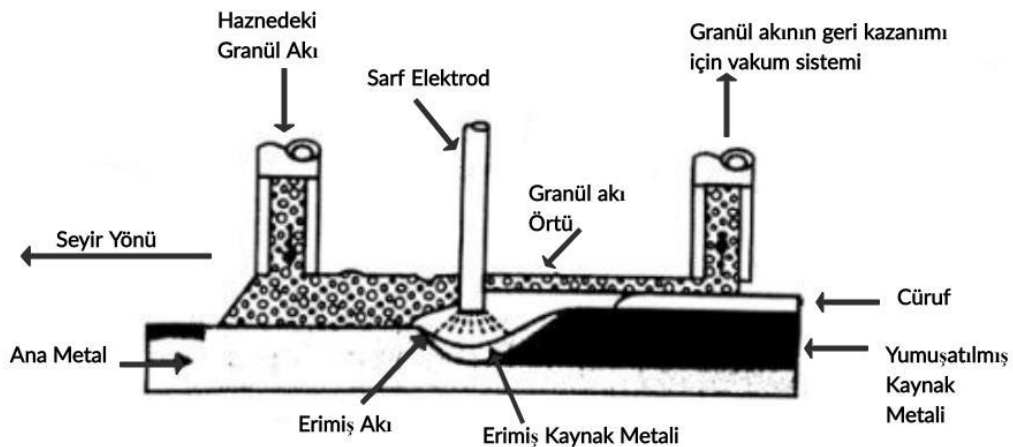


Şekil 3.7. Elektrik ark kaynağı yöntemi (Karagöz, 2010)

Örtülü elektrot kaynağı, elektrotun erişebildiği her pozisyonda, kaynak ekipmanlarının hafif ve taşınabilir olması sebebiyle her ortamda, açık ve kapalı alanlarda kaynak yapabilme özelliği sebebiyle oldukça avantajlı bir yöntemdir. Ancak bu yöntemde pek çok ark kaynağı yöntemine göre metal yığıma hızı ve verimliliğinin düşük olması en büyük dezavantajdır. Ayrıca kaynak işlemi yapılırken gerekli nüfuziyet ve düzgün kaynak dikişi için her pasodan sonra iş parçası üzerinde oluşan cüruf temizlenmelidir (Şenöz, 2015).

3.1.2.2. Tozaltı kaynağı

Tozaltı kaynak yönteminde tozun örttüğü ark, otomatik bir şekilde sürülen çıplak tel elektrot ile kaynak parçası arasında yanar. Ark, kaynak banyosunu tamamen kaplayan tozu ergitir ve tozun içindeki bileşenler sayesinde kaynaklı metalin alaşımlandırılması, arkın korunması ve kararlılığı, kaynak dikişinin düzgünlüğü sağlanmaktadır (Şekil 3.8). Tamamen toz altında kalan kaynak dikişi teknik açıdan oldukça yüksek özelliklere sahiptir (Toprak Şenol, 2020). Kaynak tozunun arka yanması sonucu ortaya çıkan reaksiyon gazları ve metal gazlarıyla dolu bir mağara oluşmaktadır. Bu bölgenin içi sıvı bir cüruf tabakasıyla dolarak havanın girişi tamamen engellenmektedir. Bu sayede de ark kararlı bir şekilde yanmaktadır. Ayrıca tel elektrot çok yüksek bir akımla yüklenebilmektedir ve toz örtü sayesinde konveksiyon kayıpları azalmaktadır. Bunların sonucunda diğer kaynak yöntemlerine göre daha yüksek eritme gücü ve daha derin nüfuziyetli kaynak dikişi elde edilmektedir. Tozun bir diğer faydası ise kaynakçıyı arkten koruyarak ortaya çıkan dumanı azaltmasıdır.



Şekil 3.8. Tozaltı kaynağı yöntemi (Toprak Şenol, 2020)

Kaynak akım şiddeti yüksek olması sebebiyle derin nüfuziyet sağlandığı için bu kaynak yönteminde ağız açmadan bir paso ile 18 mm ve ağız açarak 150 mm kalınlığındaki parçaları iki paso ile kaynaklamak mümkündür. Kaynak bölgesi ergimiş cüruf ile örtüldüğü için hızlı soğuma olmadan emniyetli bir katılaşma olmaktadır. Ayrıca bu cüruf sayesinde yanma oluklarının önüne geçilebilmektedir. Tüm bunlar da kaynak dikişinin formunun düzgün olmasını sağlamaktadır. Ancak geniş ergime banyosuna sahip bu kaynak yönteminde düşük kaynak hızlarında dikişte segregasyonlara ve çatlaklara rastlamak mümkündür. Yardımcı bir donanım olmadan yatay ve oluk pozisyonlar dışında kaynak yapmak ise mümkün değildir.

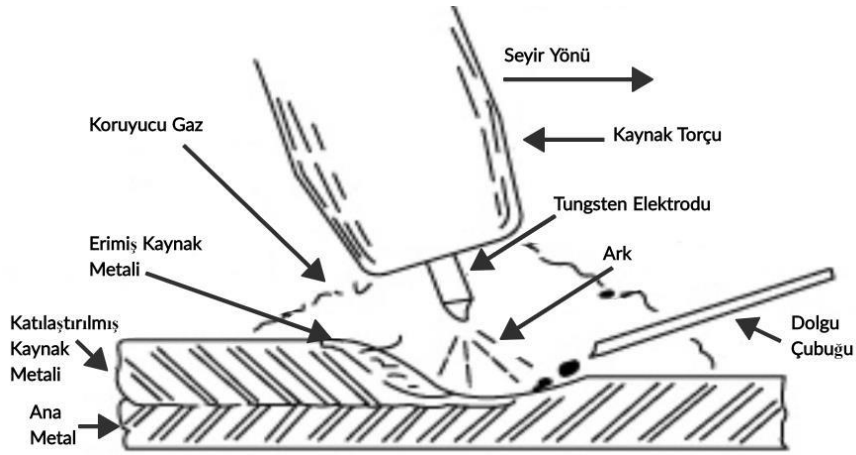
Tozaltı kaynağı, yüksek kaynak kalitesi sebebiyle yüksek güvenlik gerektiren yapı elemanları, taşıyıcı platformlar, gemi inşası, boru ve kazan imalatı vb. alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle kalın levha ve uzun dikişlerde tercih edilmektedir (Dündar, 2010).

3.1.2.3. Gaz tungsten ark kaynağı (TIG)

Tungsten inert gaz (TIG) kaynağı, arkın ergimeyen bir tungsten elektrot ile metal arasında oluşturularak metallerin ısıyla eritilmesi ve birleştirilmesi yöntemidir (Al-Helli, 2013). TIG kaynağında, kaynak akımını ileten tungsten elektrot kaynak torcunda bulunur. Kaynak torcundan üflenen koruyucu inert gaz (soy gaz) sayesinde kaynak banyosu ve tungsten elektrotun açık uç kısmı havanın olumsuz etkilerinden korunur. TIG uygulamalarının birçoğunda dışardan kaynak dolgusunu besleyen bir ilave metal kullanılır. İlave metalin ısı kaynağından bağımsız bir şekilde kullanılması, TIG kaynağının kaynak dikişini olumlu etkileyen en önemli avantajlarından biridir (Toprak Şenol, 2020). Dolgu metali kullanmadan yapılan TIG kaynağı yöntemi ise otojen kaynak olarak adlandırılmaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda kimyasal olarak fazla reaktif olan titanyum ve alaşımlarının kaynağı oldukça zordur. TIG kaynağı, koruyucu gaz etkisi ve uygulama kolaylığı sebebiyle titanyum alaşımları için en uygun kaynak yöntemidir. Ayrıca zirkonyum, alüminyum ve magnezyum gibi diğer reaktif metallerin kaynağında da kullanılan en yaygın yöntemdir.

TIG kaynağı, düşük ısı girdisi sebebiyle ince metallerin birleştirilmesinde kolaylık sağlar. Ancak bu kaynak yöntemi, düşük ısı girdisi nedeniyle kaynaklanan metalin mekanik özelliklerini ve tane oluşumunu olumsuz etkileyebilmektedir. Kaynak yapılan bölgede daha düzgün bir ısı dağılımı sağlayan darbe akımlarını kullanan darbeli TIG kaynak işlemi, bu olumsuzlukların giderilmesini kolaylaştırır. Darbeli TIG kaynağı ile iyi kaynak kalitesi, mekanik özellikler ve metalurjik özelliklere sahip kaynaklı malzeme elde edilebilmektedir (Şekil 3.9) (Al-Helli, 2013).

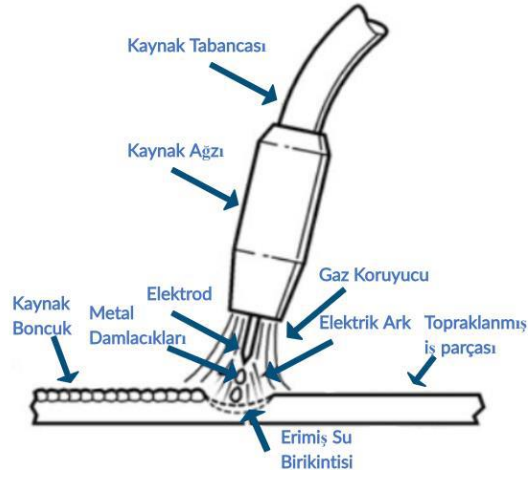


Şekil 3.9. Tungsten inert gaz kaynak yöntemi (TIG) (Toprak Şenol, 2020)

3.1.2.4. Ergiyen elektrotla gazaltı kaynağı (MIG/ MAG)

Ergiyen bir elektrotla yapılan gazaltı metal ark kaynağında, kaynak banyosunu havanın olumsuz etkilerinden korumak için koruyucu bir gaz kullanılır. Kullanılan kaynak gazı inert (asal) ise MIG (Metal Inert Gas) kaynağı, aktif ise MAG (Metal Active Gas) kaynağı olarak adlandırılır. (Koç, 2009) Kaynak gazı kaynak yapılırken kaynak torcunun içinden telin üzerinden geçerek kaynak banyosunu örter. Bu kaynak yönteminde ark, kaynak teli ve kontak meme arasında sağlanarak tel üzerinden iş parçasının üzerine taşınır.

MIG kaynağında genellikle soy gaz olarak argon ve helyum gazı kullanılmaktadır. MAG kaynağında ise aktif gaz olarak karbondioksit veya karbondioksitle belirli oranlarda karıştırılmış soy gazlardan oluşan karışım gazlar kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanım amacına göre elektrotlar, çeşitli minerallerle beslenerek özlü tel haline getirilerek daha verimli ve nitelikli bir kaynak elde edilebilir. MIG ve MAG kaynağında kullanılan ekipman ve donanım birbiriyle aynıdır; yalnızca kullanılan gaz ve elektrot değişiklik göstermektedir (Toprak Şenol, 2020).



Şekil 3.10. MIG/ MAG kaynak yöntemi (Toprak Şenol, 2020)

MIG kaynağı, alaşımsız ve düşük alaşımlı çelikler için uygun bir yöntemdir. MAG kaynağı buna ek olarak alüminyum, bakır, nikel ve titanyum alaşımlarının kaynağında da kullanılabilir (Şekil 3.10) (Koç, 2009).

4. MIG/ MAG KAYNAK YÖNTEMİ

MIG/ MAG kaynağı, arkın ısının etkisiyle ergiyen metal elektrotla iş parçası arasında olduğu bir gazaltı ark kaynağı yöntemidir. Sürekli beslenen çıplak tel elektrot kaynak bölgesinde dolgu metali olarak tüketilmektedir. Elektrotla birlikte sürekli olarak beslenen koruyucu gaz ile ark ve kaynak banyosu havanın olumsuz etkilerinden korunmaktadır. Asıl gazla yapılan yöntem MIG (Metal Inert Gas) kaynağı, aktif gazla yapılan yöntem ise MAG (Metal Active Gas) olarak adlandırılmaktadır. Gaz korumasının tam sağlanamaması halinde kaynak metali hava ile reaksiyona girerek kirlenebilmektedir (Geçmen, 2006).

Ergiyen elektrotla gazaltı kaynağı 1920'li yıllarda fikir olarak ortaya çıkmış olsa da ticari olarak kullanımı 1948'den itibaren başlamıştır. İlk zamanlarda yüksek akımlarda, ergiyen ince elektrotlarla soy gaz korumasında kaynak işlemleri yapılmış ve bu yöntem alüminyumun kaynağında kullanılmıştır. Daha sonrasında düşük ve darbeli akımlarla, koruyucu gaz olarak karbondioksit ve gaz karışımlarının kullanıldığı değişik metallere uygulanan bir yöntem haline almıştır. (Eryürek vd., 2007) Koruyucu gaz olarak CO₂ kullanılarak yapılan tam otomatik, yüksek ergime güçlü ve hızlı ilk MAG kaynağı 1950'lerin başında otomotiv endüstrisinde kullanılmıştır (Şık, 2002).

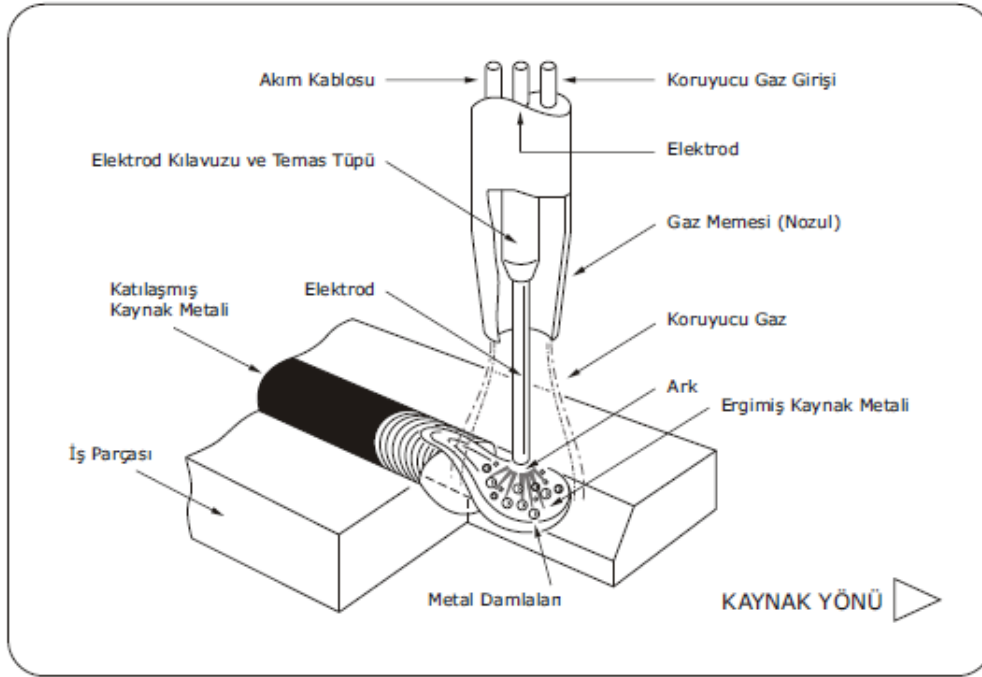
MIG kaynağıyla başlayan tarihsel süreç MAG kaynağıyla devam etmiştir. İngiliz ve Almaların kullandığı bu isimlendirme Amerika'da GMAW (Gas Metal Arc Welding) olarak kullanılmaktadır (Eryürek vd., 2007).

4.1. MIG/ MAG Kaynağının Çalışma Prensibi

Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi MIG/ MAG kaynak yönteminde koruyucu gazla birlikte otomatik olarak sürekli beslenen ergiyen elektrot kullanılır. Yarı otomatik kaynak makinelerinde, manuel makinelerde kaynakçının ayarladığı serbest tel uzunluğu ve arkın elektriksel karakteristikleri otomatik belirlenirken; kaynakçı sadece kaynak torcunun pozisyonunu ve ilerleme hızını kontrol eder.

Telin torcun içinden beslenmeye başlamasıyla elektrot ve iş parçası arasında oluşan arkın ısıyla ergime gerçekleşir. Elektrotun iş parçasına temasıyla ark başlamaktadır. Elektrik arkı, elektrik akımı vasıtasıyla iyonize bir gazın içinden geçmektedir. Koruyucu gazın iyonlaşabilmesi için belirli bir gerilim değerine ulaşması gerekir ve her bir gazın bir iyonlaşma değeri vardır. Katottan anoda hızla giden elektronların hareketlerinin sonucu oluşan enerjiyle ısı açığa çıkar ve ısınan bölgede malzeme erimeye başlar. Elektron kaybeden atom iyonlaşır ve

hızla katota doğru ilerler. Bunun sonucunda ısınan o bölgede de erime gerçekleşir. Bu şekilde sürekli şekilde erime devam eder (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. MIG/ MAG kaynağının çalışma prensibi (Eryürek vd., 2007)

Isının yaklaşık %95'i elektronlarla, geri kalan kısmı ise iyonlarla taşınmaktadır. Bu ısının oluşturduğu sıcaklıkla kaynak yapılan metalin yüzeyi ve elektrot erimekte. Ergiyen elektrot dolgu metali olarak kaynak banyosunu doldurur. Eriyen metalin kaynak bölgesi ve elektrot kaynak torcundan gelen koruyucu gaz ile atmosferin olumsuz etkilerinden korunmaktadır. Birleşme bölgesinde ark kesildikten sonra kaynak metali katılaşı ve kaynak işlemi tamamlanmış olur (Şık, 2002).

4.2. MIG/ MAG Kaynağı Damla İletim Mekanizmaları

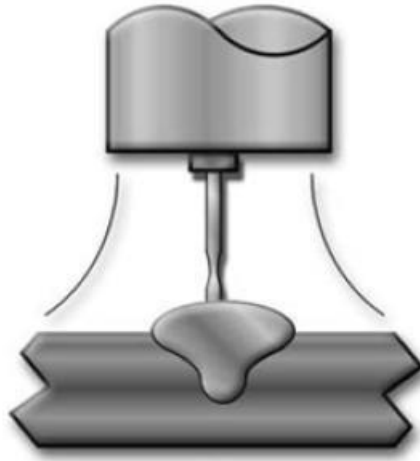
MIG/ MAG kaynağında metal damlaların kaynak metaline iletimi üç farklı mekanizmayla gerçekleşmektedir:

- Kısa devre iletimi (kısa ark)
- İri damla iletimi (uzun ark)
- Sprey iletimi

Damla iletim tipi; koruyucu gazın çeşidi, elektrotun kimyasal özellikleri ve çapı, serbest tel uzunluğu, kaynak akımının türü ve şiddeti gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir (Eryürek vd., 2007).

4.2.1. Kısa devre metal iletimi (kısa ark)

Kısa ark, düşük elektrot çaplarıyla çok düşük akımlarda yapılan gazaltı kaynağında oluşur. İş parçasına metal iletimi ark aralığında olmaz; sadece elektrot kaynak banyosuyla temas ettiğinde gerçekleşir. Elektrot kaynak banyosuna temas ettiğinde kaynağın akım değeri artar ve bu temas saniyede 20-200 kere gerçekleşir. Bu temasın ardından eriyen damla telin ucundan iş parçasına geçer ve yeniden ark oluşur. Akım, iletim esnasında sıçramanın az olacağı şekilde düşük; elektrotun hızla ısınarak metal iletimini sağlayacak şekilde yüksek ayarlanmalıdır. Bu da güç ünitesindeki endüktansın ayarlanmasıyla sağlanır. Kaynak devresinin elektrik direnci ve elektrotun ergime sıcaklığına göre endüktans ayarı yapılır. Kısa devre iletiminde gerilim değeri, elektrotun ucundaki damlanın ana metale temas etmesini önlemek için düşük tutulur. Ark oluşuktan sonra ileri doğru beslenen elektrotun ucu ergir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Kısa devre ark iletimi (Ceran, 2019)

Kısa devre iletimde koruyucu gazın kimyasal bileşimi, metal damla çapını, arkın karakteristiğini ve iş parçasına nüfuziyetini, kısa devre süresini oldukça etkilemektedir. Karbondioksit soy gazlara kıyasla daha derin nüfuziyet sağlarken daha fazla sıçrama yapar. Bu dengeyi sağlamak için genellikle karbondioksit ve argon karışımı tercih edilmektedir. Argon helyum karışımı da demir dışındaki metallerde iyi bir nüfuziyet sağlar (Eryürek vd., 2007).

4.2.2. İri damla iletimi (uzun ark)

İri damla iletiminde metal damla çapı elektrot çapından büyüktür (Şekil 4.3). Koruyucu gazın türünün belirleyici olmadığı iri damla iletimi, doğru akım elektrot pozitif kutuplamada düşük kaynak akımlarında oluşur. Yalnızca karbondioksit ve helyum gazlarıyla yapıldığında tüm kaynak akımlarında oluşur. Tamamen soy gaz korumasıyla yapılan kaynaklarda kısa ark akımından biraz yüksek bir akım değerinde uzun ark elde edilebilir.

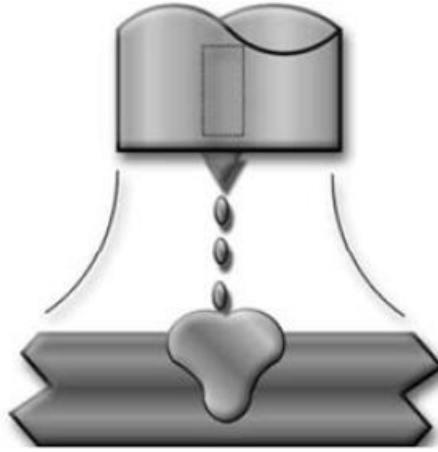
İri damla iletiminde yerçekiminin etkisiyle kolay hareket olduğu için oluk pozisyonunda daha iyi kaynak yapılmaktadır. Gerilimin düşük tutulup ark boyunun kısa olması durumunda elektrotun ucundaki damla büyüyerek ana metale temas eder ve aşırı ısınır. Bunun sonucunda da aşırı sıçramaya neden olabilir. Ancak gerilim çok yüksek tutulduğunda da yetersiz ergime ve nüfuziyet, dikişte aşırı taşma durumu olabilir (Eryürek vd., 2007).



Şekil 4.3. İri damla iletimi (Ceran, 2019)

4.2.3. Sprey iletimi (sprey ark)

Sprey iletimi, argon gazı koruması altında, doğru akım elektrot pozitif kutuplamada ve akım şiddetinin kritik değer olan geçiş akımından yüksek olması halinde sıçrama olmadan elde edilebilir. Metal iletimi, elektrot çapından daha küçük damlaların saniyede yüzlerce damla iletim hızında ayrılmasıyla oluşur. Ergime sıcaklığı ve koruyucu gazın kimyasal bileşimi geçiş akımını etkilemektedir. Ayrıca geçiş akımı elektrot çapı ve serbest tel uzunluğuyla da ters orantılıdır.

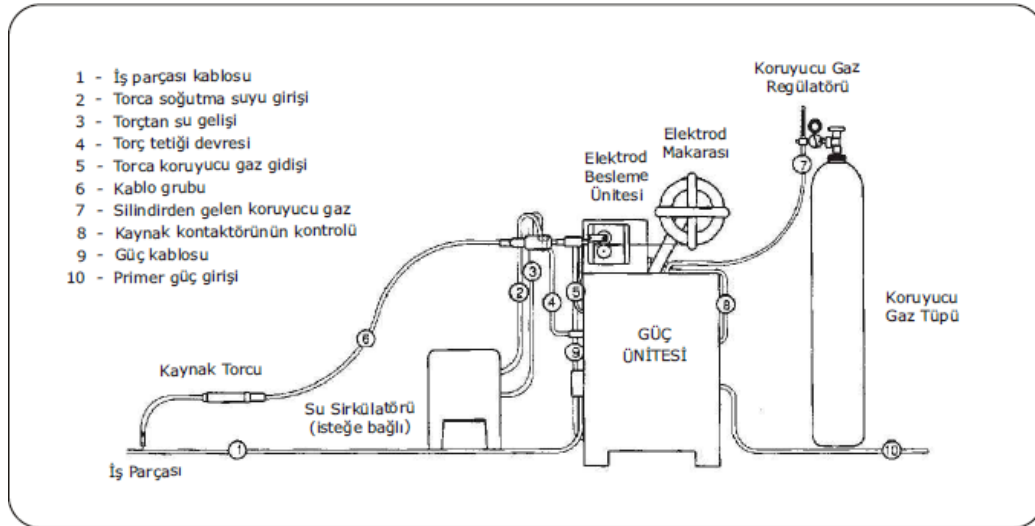


Şekil 4.4. Sprey iletimi (Ceran, 2019)

Sprey iletimde damla demetindeki damlalar, ark kuvvetleri tarafından gittikçe hızlanarak yerçekimi etkisini ortadan kaldırırlar. Bu nedenle de uygun şartlar sağlandığında her pozisyonda kaynak yapılabilir. Damlaların çapı ark boyundan küçük olduğu için kısa devre oluşmaz ve bu sebeple de sıçrama oldukça azdır (Şekil 4.4). Sprey iletim argon gazı koruması altında yapıldığında neredeyse tüm alaşım metallere kullanılabilir. Ancak akım değerleri yüksek olduğu için sprej ark yöntemini ince saclarda uygulamak zor olmaktadır. Yüksek yağma hızı sebebiyle de düşey ve tavan pozisyonlarında taşınamayacak büyüklükte kaynak banyosu oluşturur. Darbeli akım üreteçleri ile hassas bir şekilde kontrol edilebilen dalga formları ve frekanslar üretilerek bu sınırlamalar ortadan kaldırılmaktadır. Darbeli akım üreten makinelerden birinde akım sabittir ve bu sayede elektrot ucunda damla oluşmadan ark oluşumu devam eder. Diğerinde ise darbe akımı gerekli geçiş akımından büyüktür ve darbe esnasında bir veya birden fazla damla oluşarak kaynak banyosuna iletilir. Arkın enerji seviyesi bu sayede ayarlandığı için elektrotun ergime hızı da kontrol edilebilmektedir. Bu üreteçle tüm sac metallere ve kalın kesitli metallerin tüm pozisyonlarında kaynak yapılabilmektedir (Eryürek vd., 2007).

4.3. MIG/ MAG Kaynak Donanımı ve Kullanılan Malzemeler

Gazaltı kaynağında kullanılan donanım güç ünitesi, koruyucu gaz ünitesi, elektrot besleme ünitesi, kaynak torcu ve kablo grubu olarak beş temel gruba ayrılır (Şekil 4.5). Gazaltı ark kaynağı ekipmanları elektrik ark kaynağına göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir (Küpeli, 2008).



Şekil 4.5. Gazaltı kaynak donanımı (Eryürek vd., 2007)

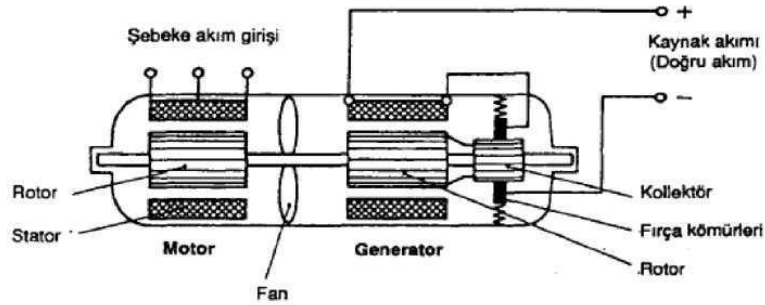
4.3.1. Güç ünitesi

Arkı oluşturmak için gerekli elektrik enerjisini elektrotla iş parçasına ileten teçhizat güç ünitesidir. Genellikle güç ünitesinin pozitif ucu torca, negatif ucu ise iş parçasına bağlıdır. Pozitif kutupdaki elektrotla doğru akımda kaynak yapılır (Küpeli, 2008). MIG/ MAG kaynağında, TIG ve örtülü elektrot kaynağında kullanılan düşey karakteristikli akım üreteçlerinin yanı sıra yaygın olarak yatay karakteristiğe sahip sabit gerilimli akım üreteçleri kullanılmaktadır. Bunun sebebi düşük karakteristikli güç üniteleri kullanıldığında ark boyunu sabit tutmak için tel sürme motorunun devrinin değiştirilmesi gerekliliğindedir. Bu da daha maliyetli ve yeterince hızlı olmayan bir sistemdir. Ancak 2,5 mm'den daha kalın elektrot çaplarında daha yavaş bir tel besleme hızı gerektiği için kullanılabilir (Uzun, 2014).

Ark boyu güç ünitesinden yapılan gerilim ayarına bağlıdır ve bir kere ayar yapıldıktan sonra kaynak işlemi bitinceye kadar değiştirilmesine gerek yoktur; ark kaynak süresince sabittir. Ark gerilimi arttığında akım şiddeti azalır. Bu nedenle de ergiyen tel miktarı azalarak sürekli beslenen tel sayesinde ark normal boyuna döner. Tam tersi durumda ise gerilim düşer ve akım şiddeti artar. Bunun neticesinde ergiyen tel miktarı artar ve ark boyu normale döner (Küpeli, 2008).

4.3.1.1. Motor jeneratör tipi akım üreteçleri

Dizel veya benzin motoruyla tahrik edilen bu tip üreteçler, elektrik akımına erişilemeyen yerlerde kullanılmaktadır. Hem yatay hem de düşey karakteristikli olabildiği için örtülü elektrot, elektrik ark kaynağı ve MIG/ MAG kaynak yöntemlerinin hepsinin kullanımına uygundur (Şekil 4.6) (Uzun, 2014).



Şekil 4.6. MIG/ MAG kaynağında kullanılan motor jeneratör akım üreteci (Uzun, 2014)

4.3.1.2. Redresör tipi akım üreteçleri

Standart akım üreteci olan bu üreteçlerde bir transformatör ve bir redresör bulunmaktadır (Şekil 4.7). Redresörlü akım üreteçlerinde, şebekeden çekilen alternatif akım ilk olarak transformatöre girer ve burada gerilim ayarlanır. Frekansı değişmeyen akım redresörde doğrultulur ve filtrelenerek kaynak için uygun doğru akıma çevrilir. Kontrol devreleri de çıkış akımından aldıkları sinyalleri giriş kontrol sinyalleri ile karşılaştırarak redresör çıkışını ayarlar.

Üç fazlı akım ile çalışan bu üreteçler tek faza göre daha kararlı kaynak arkı oluşturduğu için tercih sebebidir. Bunun yanı sıra güvenilir kaynak bağlantıları için akım ve gerilim değerlerinin ayarlanabilir olması gerekmektedir. Sabit gerilimli akım üreteçlerinde bu iki parametre birbirinden bağımsız bir şekilde ayarlanabilmektedir (Uzun, 2014).



Şekil 4.7. Sabit gerilimli MIG/ MAG kaynak makinesi (Uzun, 2014)

4.3.1.3. İverterer tipi akım üreteçleri

Kaynaklı imalatta en önemli teknolojik gelişmelerden biri inverter tipi akım üreteçlerin kullanılmaya başlanmasıdır. Daha öncesinde uçak imalatında kontrol devrelerinde doğru akım üretimi için kullanılan inverterler daha sonrasında kaynaklı imalatta güç kaynağı olarak yerini almıştır.

İnverterlerde şebekeden çekilen alternatif akım ilk olarak redresöre girerek doğru akıma dönüştürülür. Bu akım Chooper olarak bilinen bir cihazda yüksek frekanslı alternatif akıma dönüştürülür ve frekans değeri yaklaşık olarak 20.000 Hz'dir. Daha sonra bu yüksek frekanslı akım transformatörde uygun gerilime düşürülür. Buradan çıkan akım yine bir redresörde doğrultularak filtelenir ve kaynak için uygun doğru akım elde edilir. Aynı sonuca ulaşılmış olsa da standart akım üreteçlerine göre inverter tipi üreteçlerin bazı üstünlükleri vardır. Bunlar;

- Frekans büyüdükçe transformatör küçüldüğü için inverterler ağırlık ve hacim açısından daha küçüktür.
- Daha yüksek verim ve güce sahip olduğu için elektrik kullanımı daha düşüktür.
- Akımın inme ve çıkma hızı (endüktans) daha iyi kontrol edilebildiği için ark ayarı kolay yapılabilmektedir ve sıçrama, yanma oluğu gibi olumsuzlukların da azalmasını sağlar. Buna ek olarak ark ayarının hassas yapılabilmesi sayesinde kaynak arkının kararlılığı da sağlanmaktadır.

Darbeli akımla çalışan inverter tipi üreteçlerinin de ısı girdisinin kontrolü, yüksek akımlarda dahi sprey ark oluşumu gibi birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Karbondioksit koruması altında kaynak yapıldığında bile sıçrama olmamaktadır (Uzun, 2014).



Şekil 4.8. İnverter MIG/ MAG kaynak makinesi (Uzun, 2014)

4.3.1.4. Sinerjik darbeleri akım üreteçleri

Darbeleri akım üreteçleri, ısı girdisinin sınırlı olması gereken derin nüfuziyetli kaynak işlemlerinde kullanılır. Sinerjik darbeleri akım üreteçlerinde ergiyen metal damlaları elektrottan kaynak banyosuna temel ve darbe akım şiddetine göre iki farklı değerde gerçekleşir. Darbe akım esnasında tepe akımda kaynak metalinde hızlı bir ergimeyle damla iletimi kaynak banyosuna sprej ark olarak geçer. Sonrasında temel akımda elektrotun ergimesi azalarak kaynak banyosuna ısı girdisi azalır ve kaynak banyosu katılaşır. Ancak temel akım şiddeti arkın sönmeyeceği bir şekilde ayarlandığı için arkın yeniden tutuşturulmasına gerek kalmaz. Böylece tüm pozisyonlarda kaynak yapmak mümkün olur.

İlerleyen teknoloji sayesinde frekans, darbe akım şiddeti, temel akım şiddeti ve süreleri birbirinden bağımsız bir şekilde ayarlanabilmektedir. Bu akım üreteçleri MIG/ MAG kaynağında kaynak banyosuna her akım darbesinde tek damla metal iletimi gerçekleştirebilmektedir (Uzun, 2014).

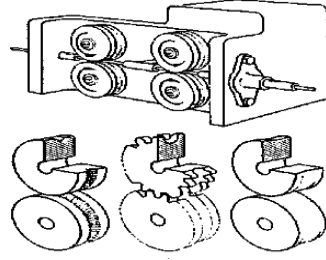
4.3.2. Koruyucu gaz ünitesi

Koruyucu gazlar yüksek basınçlı tüplerden gaz halinde veya sıvı halde depolanan tanklardan buharlaşarak sağlanmaktadır. Kullanılan gazın çeşitliliği ve kaynak kapasitesine göre üniteler değişiklik göstermektedir. Bu gaz besleme kaynağına ek olarak üniteye bir gaz regülatörü, akış ölçer ve kaynak torcuna gazı ileten bir boru bulunmaktadır. Çoklu sistemlerde iletim borusu bir manifolda bağlıdır.

Gaz basınç regülatörü, 200 bar olan tüp basıncını işlem basıncına düşürerek sabit bir basınç elde etmeyi sağlar. Regülatör, basıncın işlem uygunluğuna göre değiştirilebilmesi için ayarlanabilir olmalıdır. Akış ölçer, kaynak bölgesine verilen gazın debisini ayarlamak için kullanılır (Küpeli, 2008).

4.3.3. Elektrot besleme ünitesi

Tel sürme düzeneği, bir makara sistemiyle elektrotu belirlenen hızla ark bölgesine besleyen mekanizmadır (Şekil 4.9). Hız ayarı, bir doğru akım motoru vasıtasıyla gerçekleştirilir. Tel sürme hızları gazaltı kaynağında 2-20 m/ dk arasında değişebilmektedir (Küpeli, 2008).

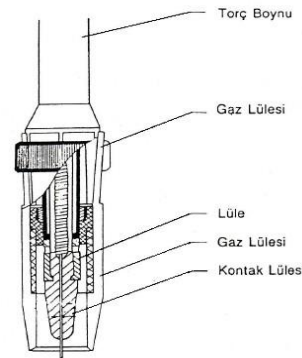


Şekil 4.9. Elektrot besleme ünitesi (tel sürme mekanizması) (Küpeli, 2008)

Elektrot besleme üniteleri, makaralı ve planet düzenekler olarak çalışma prensibi açısından iki gruba ayrılmaktadır. Makaralı düzenekler, telin iki veya dört rulo arasından geçirildiği sistemlerdir. Düz ya da kanallı olan üst makaralar serbest dönüş yaparlar. Üzerine tel çaplarına uygun kanallar açılan alt makaralar ise tel besleme hızına denk bir şekilde çevresel dönüş yaparlar. İki makaralı düzeneklerde dört makaralılardan farklı olarak tel sürme düzeneğinden önce telin doğrusallığı sağlamak için bir tel düzeltme makara sistemine daha ihtiyaç vardır. Planet düzeneklerde ise, eksenleri çarpık üç rulonun arasından geçen elektrot gövdenin dönmesiyle ilerler. Makaralı sistemlere kıyasla elektrot daha doğrusal bir şekilde torç spiraline gönderilir ve düzensiz tel besleme hızı gibi sürtünmeden kaynaklı olumsuzlukları engeller (Uzun, 2014).

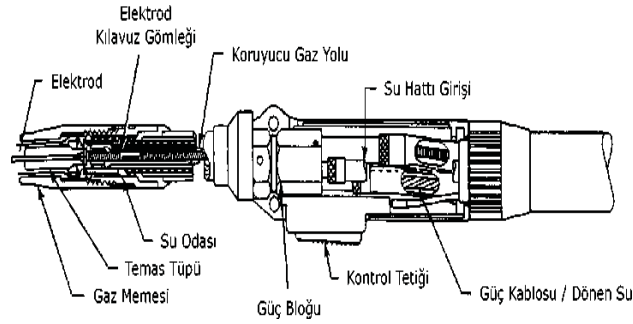
4.3.4. Kaynak torcu

Güç ünitesinden gelen akımı elektrota ileterek elektrot ve koruyucu gazın kaynak bölgesine iletilmesini sağlayan teçhizat kaynak torcudur. Tabancanın üzerindeki tetik ile koruyucu gaz, akım ve elektrotun aynı anda kaynak bölgesine iletilmektedir. Elektrik akımını elektrota ileterek elektrotu dışarıya itme işi torç içindeki kontak meme (lüle) tarafından gerçekleştirilir. Koruyucu gaz ise torç içindeki gaz nozulu tarafından iletilir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Torcun uç kısmı (Küpeli, 2008)

Kaynak torçları, su soğutmalı ve hava soğutmalı olmak üzere ikiye ayrılır. Koruyucu gazın cinsi, kaynak akım değerleri, kaynak teli ve kaynak geometrisine göre torç seçimi yapılabilmektedir. Su soğutmalı torçlar, fazla güç gerektiren kaynak işlemlerinde tercih edilmektedir (Şekil 4.11). Aynı akımlarda kaynak yapıldığında gaz soğutmalı torçlar, su soğutmalılara göre daha yavaştır. Ancak su soğutmalı torçlara göre daha hafif olan gaz soğutmalı torçlar, zor kaynak pozisyonlarında ve kaynak alanlarında daha iyi kaynak yapabilme kapasitesine sahiptir (Uzun, 2014).



Şekil 4.11. Su soğutmalı gazaltı kaynak torcu (Küpeli, 2008)

4.3.5. Kaynak telleri (elektrotlar)

MIG/ MAG kaynağında kullanılan tel formdaki elektrotlar belirli standartlardaki makaralara sarılmış bir halde bulunmaktadır (Durmuşoğlu, 2006). Elektrotlar, çoğunlukla Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılan AWS standartlarına göre kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri açısından gruplandırılmaktadır. Alman DIN standartlarına göre ise, tel çapları, yüzey toleransları ve durumları, kimyasal bileşimleri, kullanım yerleri açısından bir sınıflandırma yapılmaktadır. DIN 8559 ve TS 5618' göre endüstride yaygın olarak tercih edilen çeliklerin kaynağında kullanılan elektrotların kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Alaşimsız ve az alaşımlı çeliklerin kaynağında kullanılan elektrotların kimyasal bileşimi (Geçmen, 2006)

Simge	Mal. No	C	Si	Mn	P <	S <	Cu <	Müsaade Edilen Safsızlık
SG 1	15112	0.07-0.12	0.5-0.7	1.0-1.3	0.025	0.025	0.30	Cr 0.15 V 0.05
SG 2	15125	0.07-0.14	0.7-1.0	1.3-1.6	0.025	0.025	0.30	Zr+Ti 0.15 Al 0.02
SG 3	15130	0.07-0.14	0.8-1.20	1.6-1.9	0.025	0.030	0.30	Ni 0.15 Mo 0.15

Elektrotların kaynak esnasında ilerlemesini engelleyecek çapak, çukur ve yabancı maddeler gibi yüzey kusurları olmamalı; yüzeyleri tamamen pürüzsüz olmalıdır (Geçmen, 2006).

Çelik elektrotlar, kontak memeden geçişi kolaylaştırmak ve paslanmadan korumak amacıyla standartlar dahilinde ince bir bakır tabakayla kaplanırlar. Bunların yanı sıra kaynak metalini alaşımlandırarak mekanik özelliklerini iyileştirmek için özlü teller de kullanılmaktadır. Özlü tellerin yapısı yumuşak çelik, demir içeren alaşım tozları ve dekapanlardan oluşmaktadır. Telin özündeki bileşenlerin sağladığı katkılar aşağıdaki gibidir:

- Kaynak mukavemetini artırarak istenilen özellikte kaynak metali elde etmek
- Kaynak metalini yabancı maddelerden arındırmak
- Kaynak banyosunda cüruf oluşturarak havayla reaksiyonu engelleyerek oksitlenmeyi önlemek
- Yumuşak ve kararlı bir ark oluşturarak sıçramayı minimize etmek

Özlü elektrotlar aşınmaya karşı dirençli çelikler, paslanmaz çelikler ve Cr-Mo bileşimli çeliklerin kaynağında CO₂ veya Ar-CO₂ karışım gaz koruması altında kullanılması iyi sonuçlar vermektedir.

MIG/ MAG kaynağında kullanılan ergiyen elektrotların seçimi, koruyucu gazla birleşimi sonucunda kaynak metalindeki fiziksel ve kimyasal özellikleri etkilemesi sebebiyle oldukça önemlidir. Kaynak metalinin fiziksel ve mekanik özellikleri, kimyasal bileşimi; koruyucu gazın cinsine göre bir seçim yapılır. Çeliklerin kaynağında kullanılan elektrotların yapısında bulunan bileşenlerin kaynak dikişine etkisinin bilinmesiyle bu seçim kolaylaşır. Bu bileşenler; karbon, silisyum, mangan, alüminyum, titanyum, zirkonyum, nikel, krom ve molibden elementleridir (Durmuşoğlu, 2006).

4.3.6. Koruyucu gazlar

MIG kaynağında argon ve helyum gibi tepkimeye girmeyen asal gazlar (soy gazlar), MAG kaynağında ise karbondioksit gibi aktif ya da aktif-asal gaz karışımları kullanılmaktadır. MIG/ MAG kaynağında kullanılan koruyucu gazların temel amacı, kaynak banyosu ve sının tesiri altındaki bölgeyi atmosferin sebep olduğu kirlenme ve oksitlenmeden korumaktır. Kaynak banyosundaki ergimiş metaller atmosferdeki oksijen ve azotu emer ve bu gazlar kendi bünyesinde çözünür. Çözünen bu elementlerin metaldeki alaşım elementleriyle bileşik yaparak metalin kimyasal ve fiziksel yapısını bozmasını; gözenek ve çatlak oluşumuyla gevrekleşmesini

koruyucu gazlar önlemek mümkündür. Bunun yanı sıra koruyucu gazların kaynak hızı, metal iletim şekli, nüfuziyet ve dikiş geometrisi, ark karakteristiği ve yanma oluşu gibi kaynak özelliklerine etkisi bulunmaktadır. Kullanılacak koruyucu gazlar, parça kalınlığı, istenilen kaynak dikiş geometrisi ve mekanik özellikleri, esas metalin kimyasal bileşimi, maliyet ve erişilebilirlik, kaynak hızı gibi kriterler göz önünde bulundurularak seçilmektedir. MIG/ MAG kaynağında kullanım alanına göre seçilen koruyucu gazlar Çizelge 4.2’de belirtilmiştir (Durmuşoğlu, 2006).

Çizelge 4.2. MIG/ MAG kaynağında yaygın olarak kullanılan koruyucu gazlar (Durmuşoğlu, 2006)

Koruyucu Gaz	Karışım Bileşim Miktarı	Kullanım Alanı
Argon		Çelik dışındaki tüm metal ve alaşımları
Helyum		Al ve Cu alaşımları (Daha yüksek sıcaklık ve az gözeneklilik için)
Ar-He	%20-80 / %50-50	Al ve Cu alaşımları (Daha yüksek sıcaklık ve az gözeneklilik, daha kontrollü bir ark için)
Ar-Cl	Klor çok az miktarda	Alüminyum ve alaşımları (Daha az gözeneklilik için)
Azot		Bakır (Güçlü bir ark için)
Ar-N	%25-30 azot	Bakır (Güçlü ve daha yumuşak bir ark için)
Ar-O ₂	%5-10 oksijen	Çelikler (Dezokside edilmiş elektrot ile)
Ar-CO ₂	%20-30 karbondioksit	Çelikler (Kısa ark ile)
Ar-O ₂ - CO ₂	%5 oksijen, %15 karbondioksit	Çelikler (Dezokside edilmiş elektrot ile)
CO ₂		Karbonlu ve az alaşımlı çelikler (Dezokside edilmiş elektrot ile)
CO ₂ - O ₂	%3-5 / %20 oksijen	Çelikler (Dezokside edilmiş elektrot ile)

4.4. Kaynak Kalitesine Etki Eden Parametreler

Kaynak parametreleri, kaynak prosesinin ve kaynak dikişinin kalitesini etkileyen en önemli kriterlerdir. İstenilen mekanik özelliklerde kaynak bağlantısı elde edebilmek ve uygun koşullarda daha kolay bir şekilde kaynak yapabilmek için uygun parametreler seçilmelidir. Bu parametrelerin seçiminde, beklenen mekanik özelliklere ek olarak; kaynak metalinin malzeme cinsi ve kalınlığı, uygulanacak kaynak pozisyonu gibi faktörler göz önüne alınır (Demirci, 2010).

Ergiyen elektrotla gazaltı ark kaynağında en önemli kaynak parametreleri; kaynak akım şiddeti, ark gerilimi, kaynak akım türü ve kutuplama, kaynak hızı, elektrot cinsi ve çapı, tel sürme hızı, serbest tel uzunluğu, koruyucu gazın cinsi ve debisi, nozul mesafesi, torcun açısıdır. Kaynak işlemine başlamadan önce elektrotun cinsi ve çapı, koruyucu gazın cinsi, kaynak akım türü ayarlanması gereken değişkenlerdir ve kaynak boyunca değiştirilmesi mümkün değildir. Torç açısı ve serbest tel uzunluğu ise ancak kaynak esnasında belirlenebilen ikinci derece ayarlanabilir parametrelerdir. Bunların dışında kalan akım şiddeti, ark gerilimi, tel sürme hızı, kaynak hızı gibi diğer değişkenler birinci derece ayarlanabilir kaynak parametreleridir (Geçmen, 2006)

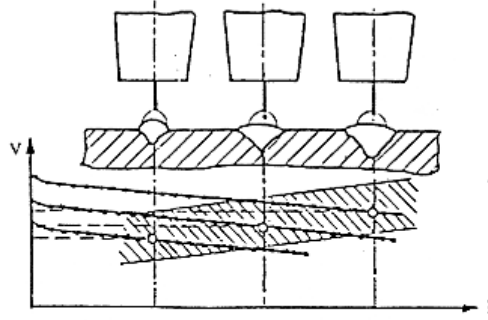
4.4.1. Kaynak akım şiddeti

Kaynak dikişinin nüfuziyeti, genişliği ve yüksekliğine etki eden önemli parametrelerden biri akım şiddetidir. MIG/ MAG kaynağında tüm parametreler sabitken akım şiddeti arttırıldığında kaynak dikişinin derinliği, genişliği ve yüksekliği de artar. Akım şiddeti düşürüldüğünde ise ergiyen metal miktarı azalarak dikişin derinliği de azalır. Akım şiddeti çok düşük seviyelerde olduğunda iş parçasında yeterli ergime olmadığından kaynaklı bölgede yeterli birleşme olmaz (Demirci, 2010). Çok yüksek akım şiddetlerinde ise geniş bir kaynak banyosu ve fazla derin bir nüfuziyet olur ve bu da ince kalınlıklardaki metallerde delinmeye neden olur (Geçmen, 2006).

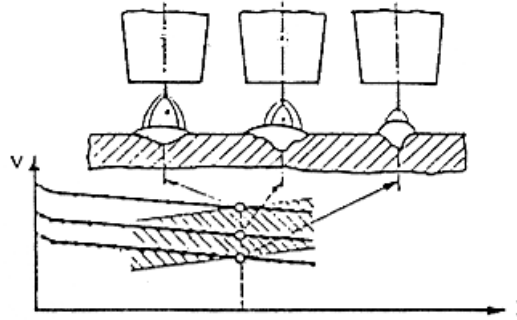
4.4.2. Ark gerilimi (ark boyu)

Ergimiş kaynak banyosu ile elektrotun ucu arasındaki mesafe ark boyudur ve ark gerilimini etkileyen en önemli değişkendir. MIG/ MAG kaynağında ark geriliminin yeterli miktarda artışı geniş bir kaynak dikişi elde edilmesini sağlar. Gerilimin artmasıyla nüfuziyet de

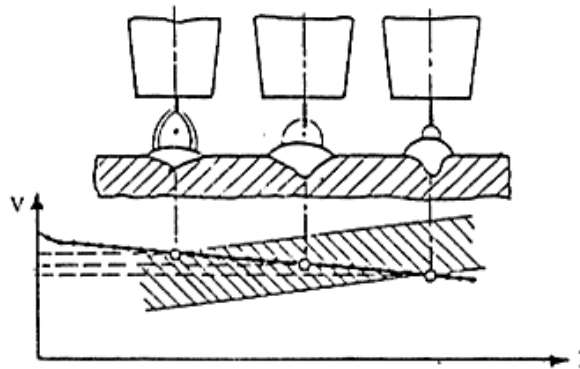
artarken belirli bir değerden sonra nüfuziyette azalma görülür (Şekil 4.12). Bu nüfuziyetli azlığından yararlanmak için bazı geniş aralıklı kök pasolarda çok yüksek gerilim değerleri kullanılabilir. Böylece geniş kaynak dikişleriyle iki paso arasında bağlantı sağlanır. Ark gerilimi çok düşük seviyelerdeyken kaynak dikişi oldukça dar ve yüksektir (Şekil 4.13-4.14). Gerilim daha da düşürüldüğünde ise kaynak dikişinde istenmeyen bir durum olan poroziteye sebep olur (Demirci, 2010).



Şekil 4.12. Artan gerilim ve akım değerlerinin kaynak dikişinin derinliği, genişliği ve yüksekliğine etkisi (Geçmen, 2006)



Şekil 4.13. Düşen gerilim ve sabit akım değerlerinin kaynak dikişinin derinliği, genişliği ve yüksekliğine etkisi (Geçmen, 2006)



Şekil 4.14. Düşen gerilim ve artan akım değerlerinin kaynak dikişinin derinliği, genişliği ve yüksekliğine etkisi (Geçmen, 2006)

4.4.3. Kaynak hızı

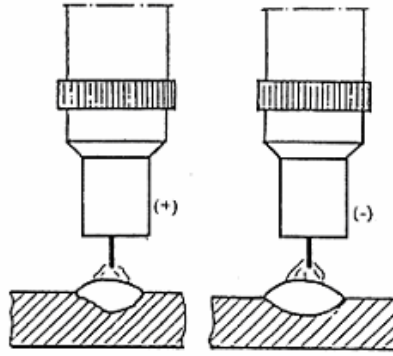
MIG/ MAG kaynağında kaynak hızı arttıkça dikiş genişliği azalır. Çok yüksek kaynak hızlarında dikişin formu bozulur. Ancak bazı uygulamalarda tek bir pasoyla yavaş kaynak yapmak yerine birkaç pasoda hızlı kaynak yapmak daha iyi sonuç vermektedir. Optimum kaynak hızından daha yavaş kaynak yapıldığında ise, arkın kaynak banyosu önüne düşmesi sebebiyle düşük nüfuziyetli ve hatalı birleşmeler gerçekleşebilmektedir (Karakoç, 2012). Ancak kaynak hızı tek başına bir parametre değildir. Endüstriyel uygulamalarda maliyeti düşürmek için optimum seviyeleri geçmeden en hızlı kaynak tercih edilmektedir (Demirci, 2010).

4.4.4. Kaynak akım türü ve kutuplama

Güç ünitesi tarafından sağlanan kaynak akımı doğru akım ve alternatif akım olmak üzere iki çeşittir. Sabit akım değerlerinde kaynak yapılmak istendiğinde doğru akım kaynak makineleri tercih edilirken; bazı durumlarda elde edilmek istenen kaynak dikişine göre alternatif (değişken) akım sağlayan kaynak makineleri tercih edilmektedir. Kaynak akımının çeşidi kutuplamayı da etkilemektedir. Alternatif akım kaynak makinelerinde sabit bir kutupta kaynak yapılırken sabit akımlı doğru akım kaynak makinelerinde kutuplar değiştirilebilir. Kutup değişkeni kaynak dikiş geometrisi, derinliği ve yüksekliği üzerinde önemli bir etkidir. Kullanılan malzeme ve kaynak yönteminde uygun kutuplama seçilir. Kutuplama, esas metale giden ısı miktarını etkiler (Demirci, 2010).

Kaynak yönteminde kullanılan iki çeşit kutuplama yöntemi bulunmaktadır. Elektrotun katoda (negatif kutup), iş parçasının anoda (pozitif kutup) bağlanması düz (doğru) kutuplamadır ve elektronlar elektrottan iş parçasına doğru akar. Elektrotun anoda, iş parçasının ise katoda bağlandığı kutuplama şekli ise ters kutuplama yöntemidir ve elektronlar iş parçasından elektrotta doğru akar (Demirci, 2010).

MIG/ MAG kaynağında doğru akım kaynak makineleri kullanılmaktadır. Bu kaynak makinelerinde elektrot pozitif kutba, iş parçası ise negatif kutba bağlanır. Yani ters kutuplama yöntemi kullanılmaktadır. Kutuplama değiştirildiği takdirde, düzensiz ark sebebiyle sıçrama artacaktır (Şekil 4.15). Ayrıca ısı bölgesi değiştiği için elektrotta ergime miktarı artacak ve kaynak bölgesinde nüfuziyet azalacaktır (Geçmen, 2006).



Şekil 4.15. Pozitif ve negatif kutba bağlanan elektrotun dikiş formu ve sıçramaya etkisi (Geçmen, 2006)

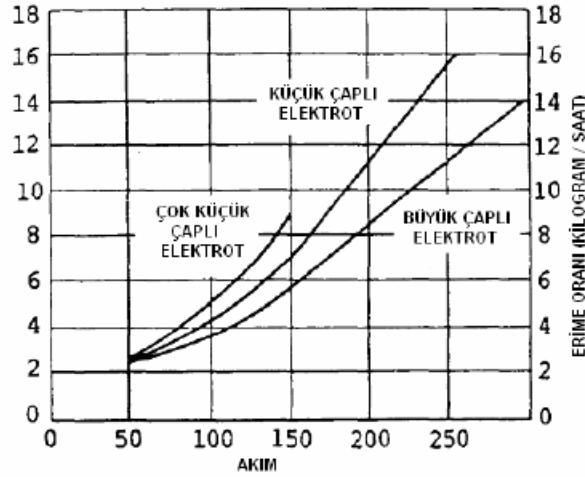
4.4.5. Tel hızı

Ergime hızıyla tel hızı arasında doğru orantı vardır. Tel hızı arttıkça akım şiddeti artar; bu da nüfuziyeti arttırır. Tel hızı akım şiddeti ve gerilim parametreleriyle ilişkili bir değişkendir. Sabit gerilimli gazaltı ark kaynağı makinelerinde akım şiddeti tel hızıyla birlikte ayarlanmaktadır (Karakoç, 2012).

4.4.6. Elektrotun cinsi ve çapı

Elektrik akımını iş parçasına taşıyan elektrotun bileşiminin kaynak dikişi üzerinde çok büyük bir etkisi vardır. Bu nedenle kaynak yapılacak malzemenin cinsi, kalınlığı, kullanılacak gazın bileşimine göre, kaynaklı bölgede istenen mekanik özelliklere uygun elektrot seçimi oldukça önemlidir.

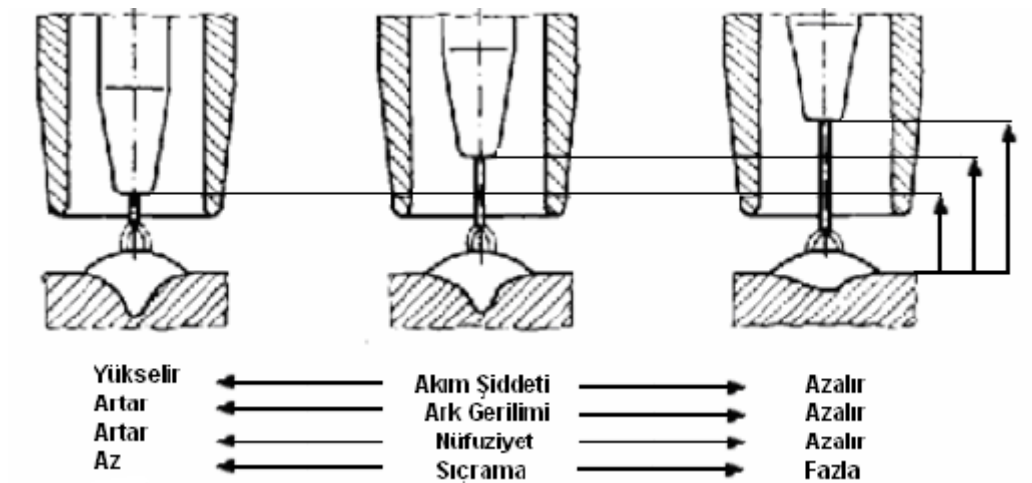
MIG/ MAG kaynağında yüksek akım şiddetleri ile büyük çaplı elektrotla kullanılır. Kalın metallerin kaynağında kullanılan bu elektrotlar, kaynak ağzında tam ergime sağlar ve daha kısa sürede kaynak yapılır. Büyük çaplı elektrotlardan kaynak banyosuna daha geniş damlalar düşer ve daha geniş kaynak dikişleri elde edilir. Küçük çaplı elektrotlarla daha düşük akımlar kullanılıyor olsa da küçük çaplı elektrotların akım yoğunluğu daha yüksektir. Böylece küçük çaplı elektrotlarla daha derin nüfuziyetli kaynak dikişleri elde edilir (Şekil 4.16) (Demirci, 2010).



Şekil 4.16. Elektrot çapının akım yoğunluğuna ve ergime oranına etkisi (Demirci, 2010)

4.4.7. Serbest tel uzunluğu

MIG/ MAG kaynağında en önemli değişkenlerden biri de serbest tel uzunluğudur. Serbest tel uzunluğu, torcun içindeki memenin en uç noktası ile elektrotun dışarda kalan en uç kısmı arasındaki mesafedir. Bu mesafe uzadıkça elektrotun direnci artar ve sıcaklığı yükselir. Bunun sonucunda da akım şiddeti azalarak elektrotun ucundaki ergime miktarı azalır. Bu da derinliğin azalmasına ve dikiş yüksekliğinin artmasına neden olur. Birleştirme kaynağında istenmeyen bu durum, yığılan metal miktarının artması sebebiyle doldurma kaynağı için uygundur. Serbest tel boyunun kısa tutulmasıyla daha kararlı ve sabit bir ark elde edilir (Şekil 4.17) (Demirci, 2010).



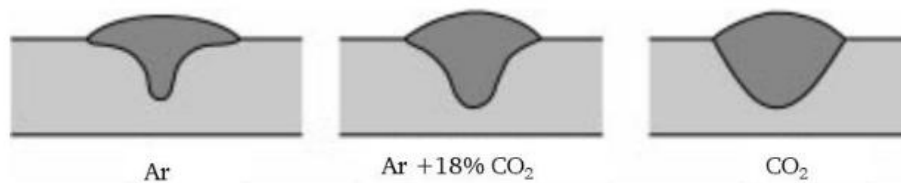
Şekil 4.17. Serbest tel uzunluğunun kaynak değişkenlerine etkisi (Demirci, 2010)

4.4.8. Koruyucu gazın cinsi ve debisi

MIG/ MAG kaynağında kaynak banyosunu havanın olumsuz etki yaratan azot ve oksijen bileşenlerinden koruyan gazlar; kaynak kalitesini, kaynak dikişinin nüfuziyeti, formu, mekanik ve kimyasal özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle esas metalin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılacak elektrotun çeşidi, kaynak yöntemi göz önünde bulundurularak en uygun koruyucu gaz seçilmelidir (Geçmen, 2006).

MAG yöntemi kullanılarak demir esaslı metallerin kaynağında saf karbondioksit veya karbondioksit, oksijen ve argonun çeşitli kombinasyon ve oranlarda karışımıyla elde edilen karışım gazlar kullanılır. Saf karbondioksitle yapılan kaynaklarda yüksek ısı girdisi sebebiyle aynı akım şiddetlerinde kullanılan diğer gazlara göre daha hızlı kaynak yapılabilir. Ayrıca daha fazla ergime miktarı ve derin nüfuziyet elde edilir. Ancak fazla sıçrama yapması ve yoğun kaynak dumanı en büyük dezavantajlarıdır.

Argon-oksijen karışımı gazlar en düşük ergime gücüne sahip karışım gazlardır. Kaynak dikişinde nüfuziyet az, yükseklik fazladır. Ancak karbondioksitin aksine en az duman ve sıçramayla kaynak yapılır. Argon-karbondioksit karışımı gazlar ise saf karbondioksit ve argon-oksijenin sağladığı nüfuziyetin ortasında bir derinlik sağlar (Şekil 4.18) (Demirci, 2010). Yüksek oranda argon ile karbondioksit ve oksijen karışımlarında daha doğrusal bir metal transferi elde edilerek; gazların tek başına gösterdiği olumsuz etkiler dengelenerek kaliteli bir kaynak dikişi elde etmek mümkün olmaktadır (Geçmen, 2006).



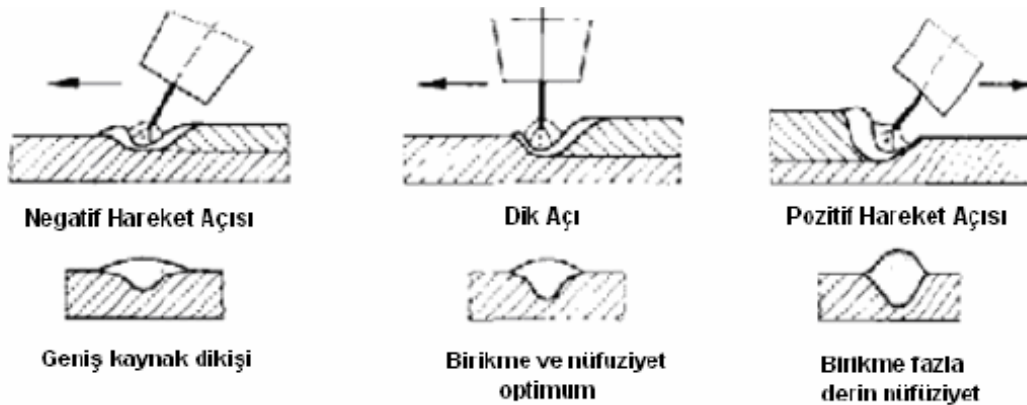
Şekil 4.18. Koruyucu gaz türlerinin kaynak dikiş formuna etkisi (Eleman, 2022)

MIG kaynak yönteminde argon, helyum ve argon-helyum karışımı koruyucu gazları hafif metallerin birleştirilmesinde kullanılır. Bu gazlar arasında argon en az ergime miktarı, en dar dikiş ve nüfuziyete sahip; bunların yanı sıra en maliyetli ve en az sıçrama yapan koruyucu gazdır. Helyum kullanıldığında ise yüksek ergime gücüyle daha geniş ve derin nüfuziyetli kaynak dikişi elde edilir. Ancak argonla aynı ark boylarında daha yüksek ark gerilimine sahiptir ve daha fazla gaz sarfiyatı sebebiyle daha da maliyetlidir (Demirci, 2010).

Koruyucu gazın türü kadar gaz debisinin de kaynak kalitesi üzerine etkisi vardır ve kullanılan elektrot çapına göre bir debi ayarı yapılır. Gaz debisi çok düşük olduğunda yetersiz koruma olacağından kaynak dikişinde gözenekler (köpürme) olur. Ayrıca iyonize gaz ortamı yeterince oluşmadığından kararsız ark oluşumu sebebiyle sıçrama da fazla olur. Gaz debisinin fazla yüksek olması halinde de oluşan türbülansla ergimiş metal damlaları savrulur ve yine fazla sıçramaya sebep olur. Bu da yine fazla gözenek oluşturur (Geçmen, 2006).

4.4.9. Torç açısı ve kaynak yönü

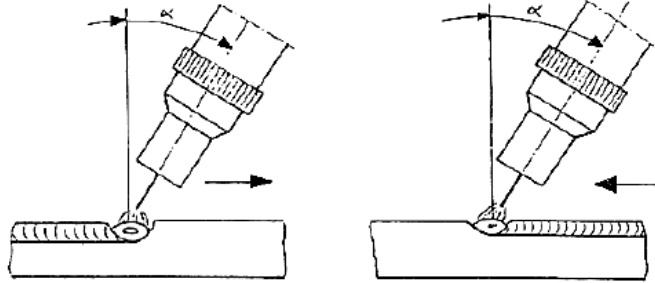
MIG/ MAG kaynağında kaynak torcu iş parçasına dik tutulup sağa veya sola kaynak yapıldığında aynı sonuç elde edilir; koruyucu gaz elektrot ve kaynak bölgesinde tam koruma sağlar. Uygulama yaparken kaynak bölgesinde daha kolay kontrol sağlanarak kaynak dikişinin kalitesinin artırılması için torca 30° 'yi geçmeyecek şekilde açı verilebilmektedir. Ancak torca açı verildiğinde kaynak yönünün kaynak dikişi üzerinde etkisi olmaktadır. Torcun açısı 30° 'yi geçtiğinde ise dikiş incelerek nüfuziyeti azalır; gazın koruması da azalır (Şekil 4.19). Kaynak hızı arttırılmazsa ergimiş metal damlaları kaynak banyosunun önüne düşerek dikişte gözenek ve kalıntı oluşumuna sebep olur (Demirci, 2010).



Şekil 4.19. Torç açısının kaynak dikişine etkisi (Demirci, 2010)

Sağa kaynak yönteminde torç kaynak yönüne doğru eğilir. Böylece arkın basıncı ergimiş metali kaynak yönünün tersine iterek esas metalin daha derine ergimesini sağlar ve nüfuziyet artar. Ayrıca daha yüksek ve dar bir kaynak dikişi elde edilir. Sola kaynak yönteminde ise torç kaynak yönünün tam tersine doğru eğilir. Ark basıncı ergimiş metalin bir kısmını kaynak yönünde iterek kaynak banyosunun daha büyük olmasına neden olur ve geniş bir dikiş elde edilir. Ancak esas metal derine doğru bir ergime yapamaz ve nüfuziyeti az, düz bir kaynak dikişi

ortaya çıkar (Şekil 4.20). Bu nedenle sola kaynak yöntemi ince parçaların birleştirilmesinde ve kök paso kaynağında kullanılır (Geçmen, 2006). Çeliklerin MIG/MAG kaynağında çoğunlukla sıçramanın da daha az olduğu sağa kaynak yöntemi tercih edilir (Demirci, 2010).

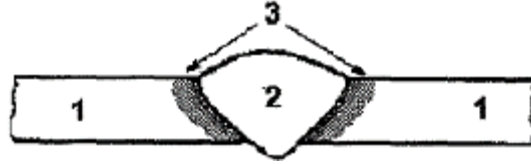


Şekil 4.20. Sağa ve sola kaynak yönteminde torç açısının gösterimi (α) (Geçmen, 2006)

5. ÇELİKLERİN KAYNAK KABİLİYETİ VE YAPISI

5.1. Çeliklerin Kaynaklanabilirliği

Gazaltı ark kaynağıyla elde edilen kaynaklı bir bileşim, esas metal, ergiyen dolgu metaliyle esas metalin karışımında oluşan kaynak metali ve ısıdan tesiri altındaki bölgeden (ITAB) oluşur (Şekil 5.1). Ergitmeli ark kaynaklarında kaynak bölgesindeki karışım tam ve homojen bir şekilde gerçekleşir. Kaynağın sağladığı ısı miktarı ve metalin bu ısıyı iletme kabiliyeti, kaynak hızına bağlı olarak da ITAB bölgesinin genişliği değişmektedir (Karakoç, 2012).



Şekil 5.1. Kaynak bölgesinin gösterimi (Karakoç, 2012)

1. **Esas metal:** ITAB'a sınır olan bu bölgede herhangi bir değişim olmaz.
2. **Kaynak metali (kaynak dikişi):** Kaynak işlemi esnasında tamamen ergime olduktan sonra yeniden katılaşmanın olduğu bölgedir.
3. **Isının tesiri altındaki bölge (ITAB):** Kaynak işlemi esnasında ergime olmamasına rağmen ısıdan etkilenerek mikroyapı değişikliklerinin olduğu bölgedir.

Çeliklerin kaynağında doğru kaynak yöntemi ve tasarım uygulandığında kaynak metalinde deformasyonlara pek az rastlanır. Uygulama esnasında iyi bir nüfuziyet sağlamak için verilen yüksek ısı, optimum değerde tutulmazsa ITAB genişliğini ve bu bölgedeki taneciklerin boyutunu arttırır. Çeliğin mikroyapısındaki dönüşüm ile kaynaklı bölgeyi ve ITAB'ı sertleştirerek çatlaklar oluşmasına sebep olur. Bu nedenle ısı girdisi kaynak prosesinde en önemli etkendir ve gerekli hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bu değişikliklerin gerçekleşmesine kaynağın soğuma hızının da büyük etkisi vardır. Çeliğin zaman ve sıcaklığa bağlı dönüşümünü gösteren ZSD grafiğiyle kontrollü bir soğuma gerçekleştirilebilmektedir.

Winterton'un çeliğin yapısındaki katkı maddelerinin sertleşmeyi etkilediğini bulması üzerine; çeliklerde iyi bir kaynak kalitesi elde edebilmek için yapısına katkı maddelerinin eklenmesi sınırlandırılmıştır. ITAB'ta oluşan bu sert fazlar çatlak ve deformasyonlara neden olmaktadır. Bunun üzerine Winterton çeliklerin kimyasal bileşimi ile sertleşebilirlik arasında

bir bağıntı oluşturarak bir formül bulmuştur. Karbon eşdeğeri ($C_{eş}$) olarak adlandırılan bu formül aşağıdaki gibidir:

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Cu+Ni)}{15} \quad \text{Eşitlik 5.1}$$

(Eleman, 2022)

Karbon eşdeğerini hesaplamak için Winterton'un eşitliğinin haricinde başka formüller de bulunmuştur. Bunlardan en yaygın olan birkaç eşitlik aşağıdaki gibidir:

$$\text{Uluslararası Kaynak Enstitüsü'ne göre; } C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{Cr+V+Mo}{5} \quad \text{Eşitlik 5.2}$$

$$\text{Dearden ve Neill'e göre; } C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr+V}{5} + \frac{Mo}{4} \quad \text{Eşitlik 5.3}$$

$$\text{İnce taneli çelikler için; } C_{eş} = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad \text{Eşitlik 5.4}$$

(Yüksekkaya, 1996)

Karbon eşdeğeri 0,45'in altında olan çelikler iyi kaynak kabiliyetine sahipken; değer 0,40-0,60 arasında olduğunda orta derece kaynak kabiliyetine sahiptir ve kaynaklanırken ön tavlama işlemine gerek vardır. Karbon eşdeğeri 0,60'ın üzerinde ise daha yüksek tavlama sıcaklıkları gerekmektedir. Böylelikle ön tavlama ile çeliğin daha yavaş soğuyarak ITAB'ta sert fazların oluşması engellenebilmektedir. Karbon eşdeğerine göre gerekli tavlama sıcaklıkları Çizelge 5.1'de verilmiştir. Ayrıca soğuma hızı, malzeme kalınlığının artmasıyla artacağından ön tav işlemi düşük karbon değerine sahip kalın parçalarda da uygulanabilmektedir (Eleman, 2022).

Çizelge 5.1. Çeliklerin karbon eşdeğerine göre ön tavlama sıcaklıkları (Eleman, 2022)

Karbon Eşdeğeri (%)	Ön Tavlama Sıcaklığı (°C)
$0,45 < C_{eş}$	Diğer koşullara göre istenirse uygulanabilir.
$0,45 \leq C_{eş} < 0,60$	100-200
$C_{eş} > 0,60$	200-300

5.2. Çeliklerin Yapısı ve Özellikleri

Çelik, demirin temel alaşım elementi olan karbon ve belirli miktarlarda bulunabilen diğer alaşım elementleri krom, vanadyum, molibden, mangan vb. ile elementler ile oluşturduğu bir alaşımdır. Çeliğin alaşımındaki karbon miktarı, malzemenin karakteristik özelliklerinde ve sınıflandırılmasında önemli bir faktördür (Eleman, 2022).

Çeliğin yapısında bulunan alaşım elementleri iki gruba ayrılır. Birinci grup elementler olarak adlandırılan Cr, Al, Si, P, W ve Mo ferrit bölgesini genişleten elementlerdir. İkinci grup elementler olarak adlandırılan C, Mn, Co ve N ise östenit bölgesini genişleten elementlerdir. Çeliğin kaynak kabiliyetini etki eden bu elementlerden bazılarının özellikleri aşağıda açıklanmıştır:

Karbon (C): Çeliklerin temel alaşım elementi olan karbonun %3 oranını geçmesi istenmez ve kaynak kabiliyetini en çok etkileyen elementtir.

Krom (Cr): Alaşımli çeliklerde genellikle Ni, Mo gibi diğer elementlerle beraber bulunur ve çeliğin α fazını genişleten bir elementtir. Çeliğin sertleşmesini sağlar. Saf halde bulunduğunda krom miktarı arttıkça kaynak kabiliyeti düşer. Ayrıca kaynak esnasında krom oksit bileşiği oluşturarak da kaynak kabiliyetini olumsuz etkiler.

Silisyum (Si): Krom gibi bu da α fazını genişleten bir elementtir. Kaynak esnasında çatlak oluşumunu arttırdığı için oranı %0,15-0,30 arasında sınırlandırılır.

Nikel (Ni): Çeliğin γ fazını genişletir. Kaynak deformasyonu ve çeliğin gevrek-sünek geçiş sıcaklığı üzerinde olumlu bir etki yaratması için düşük oranda tutulur. Karbonla beraber artışıyla kaynak bölgesinin sertliğini artırır.

Molibden (Mo): Çeliğin sertliğini artırır. İnce tane oluşumunu sağladığı ve meneviş kırılma dayanımını azalttığı için kaynak kabiliyeti üzerinde olumlu etkisi vardır. %0,5 oranından fazla bulunduğu takdirde karbonun da artmasıyla kaynak kabiliyetini düşürür.

Alüminyum (Al): Yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeye dayanım için çeliğin yapısına eklenebilmektedir ve α fazını genişletmektedir. Ancak alüminyum oksit oluşumunu önlemek için kaynaklarken bazik elektrot kullanmak gereklidir.

Kükürt (S): Çeliklerde segregasyonlara ve sıcak çatlama problemlerine sebep olduğu için %0,06 oranını geçmesi istenmez.

Fosfor (P): Kükürtle birlikte çatlama riskini arttırdığı için çelikler için kükürt gibi fosfor da bir problemdir. Ancak krom ve bakır içeren bazik bir elektrotla kaynaklandığında çeliğin içeriğinde krom ve bakır olması halinde korozyona karşı dayanım sağlar (Yüksekkaya, 1996).

5.3. Çeliklerin Sınıflandırılması

Çeliğin yapısında bulunan elementlerle oluşturduğu farklı kombinasyonlardaki kimyasal bileşimlerle farklı özellikler kazanmaktadır. Yapısına element eklenmesi dışında iç yapısına uygulanabilen işlemlerle kullanım farklı kullanım amaçlarına uygun çelikler elde edilebilmektedir. Çelikler, kompozisyonlarına göre alaşımlı, düşük alaşımlı ve alaşımsız çelikler olarak üç gruba ayrılır. Bu çelikleri kimyasal yapısı, kullanım alanları ve üretim yöntemlerine göre sınıflandırmak da mümkündür.

Alaşımlı çelikler, çeliğe eklenen bir veya birden fazla elementle farklı kimyasal ve mekanik özellikler elde edebilmek için yapılan çeliklerdir. Yapısında %5'ten fazla alaşım elementi içerenler yüksek alaşımlı, %5'ten fazla alaşım elementi içerenler ise düşük alaşımlı çelikler olarak adlandırılır (Gür, 2022).

Çelikler kullanım alanlarına göre yapı çelikleri, takım çelikleri, yay çelikleri, otomat çelikleri, ıslah çelikleri, sementasyon çelikleri ve paslanmaz çelikler olarak sınıflandırılabilir (Ünlütürk, 2023).

5.3.1. Yapı çeliklerinin özellikleri

Kaynaklı imalat ve şekillendirme yöntemlerine oldukça elverişli olması sebebiyle makine ve inşaat sektöründe en çok tercih edilen hammadde olan yapı çelikleri, endüstride %75-80 kullanım oranlarına sahiptir. Bu talep sebebiyle üretimi en fazla olan çeliklerden biridir. Bu nedenle de bulunabilirlik ve maliyet açısından en avantajlı çeliklerdir (Ünlütürk, 2023).

Yapı çelikleri kimyasal bileşim ve üretim yöntemine göre sınıflandırdığımızda; karbon çelikleri, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler, ısıl işlem görmüş karbon ve yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler, ısıl işlem görmüş alaşımlı konstrüksiyon çelikleri olarak ayırabiliriz. Karbon çelikleri, demir ve karbon haricinde yapısında oldukça az miktarda Mn, Si, P, S, Ni, Mo, Cr ve Cu bulunduran çeliklerdir. Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler, alaşım elementleriyle mukavemeti arttırılmış, sac ve levha şeklindeki çeliklerdir. Kaynak yapılabilme ve şekillendirilebilmeyi kolaylaştırmak için düşük karbon içeriğine sahiptir ve bu karbon oranı %0,25'i geçmez. Bu çelikler ısıl işleme tabi tutularak akma dayanımları arttırılabilir ve yeni bir gruba dahil olur. Isıl işlem görmüş alaşımlı konstrüksiyon çelikleri ise alaşım elementleri karbon oranından yüksek tutularak ve ısıl işlem görerek akma dayanımı yükseltilmiş çeliklerdir. Ayrıca yapı çeliklerini ince taneli, sıcak şekillendirilmiş, soğuk

şekillendirilmiş, temperlenmiş vb. gibi farklı şekillerde gruplandırmak da mümkündür (Eleman, 2022).

Genel yapı çelikleri, EN 10025 standardına göre kendi içinde üç ayrı kalite grubuna ayrılır. 1. kalite çelikler yalnızca St33 çeliğinden oluşmaktadır. Özenli bir ergitilme yöntemi olmayan bu çeliklerin kimyasal analizi yapılamamaktadır. 2. kalite çelikler maksimum düzeyde fosfor ve kükürt içermektedir ve kaynaklı imalatta kullanılırlar. 3. kalite çelikler tane yapıları ince taneli çeliklere benzer ve yorulma dayanımları fazladır. Kükürt ve fosfor oranı sınırlandırılmıştır (Ünlütürk, 2023).

Yapı çelikleri, Alman DIN standartlarına göre Stahl kelimesinin kısaltılmışı olan St ve malzemenin kg/mm^2 olarak çekme mukavemetini belirten bir tanımlamayla gösterilmektedir. Yaşanan son gelişmelerle ortak Avrupa normu EN standartlarına geçilerek yeni bir isimlendirme kullanılmaya başlanmıştır. Bu gösterime göre Steel kelimesinin kısaltılmışı olan S, MPa cinsinden minimum akma mukavemeti ve belirli bir minimum sıcaklıkta darbe tokluğu değeri belirtilmektedir. Amerikan AISI ve SAE standartlarına göre ise, dört basamaklı bir sayıdan oluşan gösterim çeliklerin kimyasal bileşimlerini esas almaktadır. İlk iki basamak çeliği ait olduğu grubu gösterirken, son iki basamak ise % cinsinden karbon oranını vermektedir (Eleman, 2022). Sanayide yaygın olarak kullanılan bazı yapı çeliklerinin mekanik özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Sanayide yaygın kullanılan bazı yapı çeliklerinin mekanik özellikleri (Eleman, 2022),(Gür, 2022)

Çelik Numarası	Çelik Sınıfı (EN Normu)	Çelik Sınıfı (DIN Normu)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
1.0037	S235JR	St37-2	235	360-510	26
1.0143	S355K2	St52-3N	355	510-680	22
1.3207	S700MC	S10-4-3-10	700	700-950	12

İnce taneli yapı çelikleri, 3. kalite grubu çeliklerinden olan St52’nin mekanik özellikler açısından geliştirilmiş halidir. Ancak karbon oranı daha düşüktür. 3. kalite çeliklerde olduğu gibi yapısındaki alaşım elementleri nitrür veya karbonitrür oluşturarak tane irileşmesi engellenir. İnce taneli yapısı sayesinde dayanımı ve çentik darbe tokluğu artmaktadır (Karakoç, 2012).

İnce taneli çelikler hafif yapıda malzemelerdir. En bilinen ince taneli yapı çeliği olan S700 çeliğine tane küçültme, soğuk deformasyon ve makro alaşım işlemleri uygulanarak mukavemet kazandırılmıştır (Gür, 2022).

5.3.1.1. S355JR çeliğinin özellikleri

S355JR çeliği birçok sektörde iyi kaynaklanabilme özelliği sebebiyle yaygın olarak tercih edilen yapı çeliğidir. Elde edilmek istenen ürün ve üretim yöntemine göre ham ve ısıtılmış halde bulunabilmektedir.

S355JR yapı çeliği, TS EN 10025-2 standardına göre yeniden adlandırılarak S355 ifadeleriyle gösterilmektedir. Eski gösterimde sadece çekme dayanımı ele alınırken bu yeni gösterimde çeliğin akma dayanımı, darbe enerjisi gibi kimyasal ve mekanik özellikleri esas alınmıştır. Bu nedenle S355 ibaresinin arkasına K2, J2, J0 ve JR gibi ifadeler getirilmiştir. Bu ifadeler 0, 20 ve -20°C'lerde çeliğin darbe enerjisi değerlerini vermektedir. (Türk, 2021) S355J2C+N şeklindeki bir gösterimde C ifadesi malzemenin soğuk şekillendirilme olabileceğini gösterir. +N ifadesi ise çeliğin üretim yönteminin ısıtılmış haddelenme olduğunu belirtir. Ayrıca S355J2C+N çeliğinde karbon oranı %0,2 ile 0,22 arasında iken, S355J2 çeliğinde bu oran %0,24'tür. Buradan yola çıkarak, EN 10025-2 standardına göre kimyasal bileşim hakkında da fikir sahibi olunabilmektedir (Özturan, 2022).

5.3.1.2. S700MC çeliğinin özellikleri

S700MC çeliği, EN 10025-4 standardına göre ısıtılmış haddelenmiş ince taneli yapı çeliği olarak isimlendirilmektedir. Yüksek mukavemetli, hafif yapıya sahip ve iyi kaynaklanabilme özellikleri sebebiyle birçok sektörde son yıllarda tercih sebebi olmaktadır. Yapısında alaşım elementleriyle tane boyutu küçültülen S700MC çeliğine, benzer özelliklerdeki S355JR çeliğiyle karşılaştırıldığında daha ince kesitlerde daha fazla gerilim uygulanabilmektedir. Bu da üretim performansı, yük kapasitesi ve maliyet açısından daha verimli hale getirmektedir. Yapısına eklenen vanadyum, titanyum ve niyobyum elementleri sayesinde tane boyutu küçültülmektedir. Küçük taneli yapısı ve üretim yönteminde kullanılan ısıtılmış haddelenme ile yüksek mukavemetli bir yapı elde edilmektedir (Gür, 2022). S700MC çeliği, SSAB firması tarafından üretilen Strenx çelik olarak da bilinmektedir. SSAB'nin standartlarına göre üretim yapıldığı takdirde bu çelikten yüksek verim sağlanabilmektedir. Ayrıca mekanik özellikler, toleranslar, uygulama tasarımları ve doğru malzeme seçimi konusunda firma tarafından sağlanan verilerle daha hızlı ve kaliteli üretim gerçekleştirmek mümkündür. S700MC çeliği hafif yapısı ve yük taşıma kapasitesi sebebiyle taşıma, kaldırmanın fazla olduğu gemi, vinç ve treyler sektöründe yaygın kullanım alanına sahiptir (Ünlütürk, 2023)

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. Malzeme

Tez çalışmasında 4 mm kalınlığında S700MC (Strenx 700) ve S355JR (St52) yapı çelikleri kullanılmıştır. 200x200 mm boyutundaki metal parçalar, tabak haldeki sacdan O₂ kullanılan plazmada kesilmiştir. S355JR çeliğinin malzeme sertifikası tedarikçi firmadan temin edilmiştir. S700MC çeliğinin özelliklerine ise tedarikçi ve imalatçı firma SSAB'nin internet sitesinden ulaşılmıştır.

Sanayide yaygın kullanıma sahip S355JR çeliğinin yapısında bulunan alaşım elementlerinin miktarı Çizelge 6.1'de ve mekanik özellikleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. S355JR yapı çeliğinin % kimyasal bileşimi (Dikeç, 2023)

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	N	Mo	Ni
0,186	0,13	1,426	0,011	0,008	0,036	0,121	0,042	0,0082	0,0002	0,059

Çizelge 6.2. S355JR yapı çeliğinin mekanik özellikleri (ChnÇelik, 2023)

Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
355	470-630	22

S700MC çeliği, ince taneli yapısı sebebiyle daha mukavemetli ve sert bir yapı kazanmıştır. Yük altında yüksek dayanıma sahip yapısına rağmen oldukça hafif bir çeliktir. Bu nedenle özellikle otomotiv sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedir. Aşağıda SSAB'nin internet sitesinde elde edilen kimyasal ve mekanik özellikleri verilen S700 çeliğinin, ince taneli yapıyı elde etmek için uygulanan üretim yöntemi firma tarafından gizli tutulmaktadır. Ancak firma site üzerinden tasarım ve analiz kolaylığı sağladığı için kullanımı oldukça avantajlıdır. S700MC çeliğinin yapısında bulunan alaşım elementlerinin yüzdesi Çizelge 6.3'te ve mekanik özellikleri Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. S700MC yapı çeliğinin % kimyasal bileşimi (SSAB, 2023)

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti
0,12	0,21	2,1	0,02	0,01	0,015	0,09	0,2	0,15

Çizelge 6.4. S700MC yapı çeliğinin mekanik özellikleri (SSAB, 2023)

Kalınlık (mm)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama A ₈₀ (%)	Uzama A ₅ (%)
2-3	700	750-950	10	12
3.01-6	700	750-950	-	12
6.01-10	700	750-950	-	12

200x200x4 mm boyutlarındaki metal parçalara kesim esnasında O₂ gazı kullanıldığından herhangi bir işlem uygulanmasına gerek kalmamıştır. Alın kaynağı yapılacak olan parçalara düşük kalınlıkta olması sebebiyle kaynak ağzı açılmasına gerek duyulmamıştır.

MAG kaynağı uygulaması yapılan bu çalışmada, Otojen firmasının tedarik ettiği Habaş'a ait HB 205 ve HB 212 karışım gazları kullanılmıştır. Temel olarak argon bazlı olan bu gazlarda nüfuziyeti arttırmak için karbondioksit ve oksijen ilavesi yapılmıştır. Firmanın da verdiği bilgiler göz önünde bulundurularak, 6mm'den düşük kalınlarda düşük karbondioksit oranlı HB205 gazı kaynak kalitesini olumlu etkilemektedir. Ancak 6 mm'den fazla kalınlıklarda daha iyi özelliklerde kaynak dikişi ve nüfuziyet için daha yüksek karbondioksit oranı içeren HB212 karışım gazı kullanılması gerekmektedir. Ancak bu gazla kaynak yapıldığında daha fazla çapak olduğu bilinmektedir. Bu karışım gazlara ait kimyasal bileşim yüzdeleri Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. HB205 ve HB212 karışım gazlarının kimyasal bileşimi (%)

	O ₂	CO ₂	Ar
HB 205	2	5	93
HB 212	2	12	86

4 mm çelik sacı kaynaklamak için kalın ve ince malzemelerde ortak olarak kullanılabilen AWS standardına göre ER70S-6 ürün grubuna dahil 1.2 mm SG2 kaynak teli kullanılmıştır. 2 mm'den 20 mm'ye kadar malzeme kalınlık aralığı geniş olan firmalarda çoğunlukla 1.2 mm elektrot tercih edilmektedir. Bunun en önemli sebebi hem her seferinde rulo veya galon şeklindeki telin değiştirilmesinin zorluğu hem de farklı kalınlıklardaki malzemelerin birbirine kaynaklanmasıdır. Alaşım elementleriyle güçlendirilen elektrotun kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri tedarikçi firmadan edinilen Şekil 6.1'deki ürün sertifikasında belirtilmektedir.

Ürün Grubu	GMAW	THE WELDING EXPERTS®
Ürün	AS SG2	
Boyut(lar) (mm)	1,2	
Lot/Batch	T2MG230366	
Sınıflandırma	AWS 5.18: ER70S-6 EN ISO 14341-A G 42 3 C 3Si1 / G 46 4 M 3Si1	

Kimyasal Analiz (%) Tel												EN 10204 2.2
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Al	Zr
0,065	0,89	1,55	0,006	0,005	0,02	0,03	0,01	0,08	0,03	0,003	0,002	0,02

Mekanik Testler, kaynak metali								EN 10204 2.2
Çekme deneyi				Darbe deneyi				
Şartlandırma	Rp0.2 (Akma D.)	Rm (Çekme D.)	A5 (Uzama)	Şartlandırma	Çentik tipi	Test Sıc.	KV (Darbe D.)	
**	MPa	MPa	%	**		°C	Joule	
AW	480	560	27	AW	ISO-V	-40	85	
Koruma Gazı: M21								

**PWHT: Kaynak sonrası ısıtıl işlem görmüş parça test edilmiştir. AW: Parça kaynak edildiği şekilde test edilmiştir.

Şekil 6.1. SG2 kaynak telinin kimyasal ve mekanik özellikleri (Yegen, 2023)

6.2. Yöntem

Kolarc M500 sinerjik kaynak makinesine malzeme kalınlığı 4 mm, kaynak gazı çeşidi ve elektrot çapı girilerek kaynak parametreleri cihaz tarafından otomatik olarak ayarlanmış ve MAG kaynağı yapılmıştır (Şekil 6.2). Buna göre kaynak akım şiddeti yaklaşık olarak 200 A, kaynak gerilimi 20 V, tel sürme hızı ise 7 m/ dk olarak ayarlanmıştır.

Kaynak makinesinin gösterge panelinde istenilen değerler seçilerek kolaylıkla takip edilebilmektedir. Böylece otomatik sistem sayesinde inisiyatif kaynakçıdan alınarak parametrelerden kaynaklanan hataların önüne geçilebilmektedir.



Şekil 6.2. Kolarc M500 sinerjik kaynak makinesi

Kaynak dikişinin mekanik ve kimyasal özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerden biri olan koruyucu gaz debisi, kaynağa başlamadan önce $12 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak ayarlanmıştır. Gaz debisi teorik olarak elektrot çapının 10 katı olarak hesaplanır. Bunun yanı sıra gazın korumasının tam sağlanabilmesi için su soğutmalı torcun ucu, görüş açısını kaybetmeyecek ve yüzeyden dik çekildiğinde en fazla 20° olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Kaynağın numunelere uygulanması

ISO 5178:2019 Metalik malzemelerdeki kaynaklar üzerinde tahribatlı testler- Ergitme kaynaklı bağlantılarda kaynak metali üzerinde boyuna çekme testi standardına göre, kaynak ağzı açılarak kaynak yapılamayacak kalınlıkta ince bir malzeme kullanıldığı için 200x200 mm boyutunda iki metal alın kaynağı ile iki taraftan da kaynatılmıştır (Şekil 6.4). Kaynak ilerleme hızı saniyede 10 mm olacak şekilde PA (1G) pozisyonunda sağa kaynak yapılmıştır.



Şekil 6.4. Kaynaklı numune

HB 205 karışım gazı kullanılarak aynı kaynak parametrelerinde 200x200 mm boyunda, 4 mm kalınlığında; S355JR-S355JR, S355JR-S700MC ve S700MC-S700MC olmak üzere toplam üç adet numune kaynatılmıştır. Aynı şekilde HB 212 karışım gazı kullanılarak aynı kaynak parametrelerinde 200x200 mm boyunda, 4 mm kalınlığında; S355JR-S355JR, S355JR-S700MC ve S700MC-S700MC olmak üzere toplam üç adet numune kaynatılmıştır. Kaynaklı metalden yaklaşık 50x90 mm olacak şekilde numuneler flexle kesilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. Kaynaklı parçaların flexle kesimi

Flexle kesim işlemi ısı girdisi sebebiyle malzemenin özelliklerini değiştireceğinden büyük ölçülerde numuneler kesilmiştir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Flexle kesilen numunelerden örnekler

6.2.1. Metalografik çalışmalar

Mikroyapı, mikro sertlik ve XRD analizi için flexle kesilen numuneler Qcut 250M model su jetinde kesim için hazırlanmıştır. Flexle kesilen bölgenin ısı girdisi nedeniyle yapısal özellikleri değiştiği için tam tersi bölgeden numune alınmak üzere aparata yerleştirilmiştir. Malzemenin ana metal, ITAB ve kaynak bölgesini kapsayacak şekilde bakalit içine almak için küçük boyutlu numuneler kesilmiştir (Şekil 6.7).



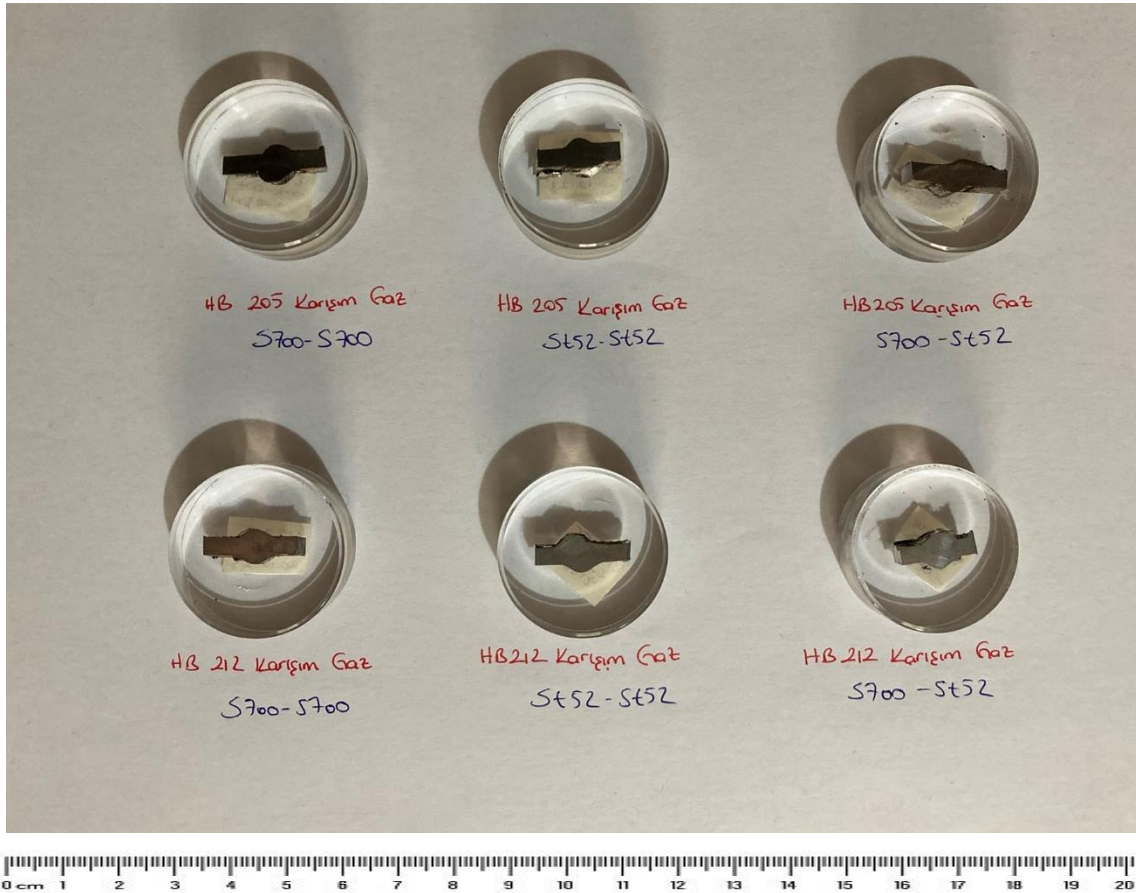
Şekil 6.7. Su jetiyle kesim

Numunelerin boyutunun küçük olması sebebiyle ve daha düzgün bir yüzey elde edilmesi amacıyla numunelere bakalit kalıplama yapılmıştır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Bakalit cihazı

İki ölçek Aka-Resin Acrylic bakalit tozuyla birlikte metal parçalar Opal 410 model kalıplama cihazına yerleştirilir. Bu cihaz içinde 190 °C sıcaklık ve basınç altında 15,5 dakika boyunca işlem gören numuneler zımparalama işlemi için hazır duruma gelmiştir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Bakalite alınan numune örnekleri

Mikroyapı incelemeleri için malzemenin çizik ve deformasyondan arınarak yüzeyinin tamamen pürüzsüz olması gerekmektedir. Aksi halde mikroskop altında malzemenin iç yapısının görüntülenmesi net olmayacaktır. Bu nedenle ilk başta yavaş hızlarda dönen Qpol 250 M2 model zımparalama makinesiyle suyun altında ıslatılarak numunenin yüzeyi zımparalanmıştır. Sırasıyla 400, 800 ve 1200'lük zımparalarla yüzey tamamen pürüzsüz olana kadar işlem yapılmıştır (Şekil 6.10). Her bir zımparalama öncesi numunenin yüzeyi yıkanarak alkolle temizlenmiştir.

En son işlem olarak aynı makinede keçe değiştirilerek kuru bir şekilde parlatma işlemi yapılmıştır. Yüzeyi parlatılan numuneler sabunla yıkanarak alkolle temizlenir ve kurutulur.



Şekil 6.10. Zımparalama ve parlatma işlemi

6.2.2. Mikroyapı incelemeleri

Kaynak işleminin sonrası yapılan metalografik çalışmaları takiben deney numunelerinin mikroyapı incelemeleri açısından optik mikroskop incelemeler gerçekleştirilmiştir. Özellikle deney numunelerinin mikroyapısal karakterizasyonu hususunda faz yapıları ve bunların dağılımları, tane ve tane sınırlarının incelenmesi ayrıca kaynak prosesinin ITAB ve ana malzeme açısından farklılığı incelenmiştir.

Bu incelemeler için Qness 60 M model optik mikroskop cihazı kullanılarak mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir (Şekil 6.11). Kaynaklı numunelerin ve ana malzemelerin de mikroyapı incelemeleri farklı büyütme baz alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 6.11. Mikroskopta mikroyapı incelemesi

6.2.3 XRD analizi

Deneyel çalışmalarda S355JR ve S700MC çelik malzemelerinin kaynaklı imalat işlemleri sonrası XRD analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı imalat açısından kullanılan iki farklı kaynak metali ve kaynak parametreleri değişkenleri kapsamında, özellikle kaynak ergiyik havuzu ve ITAB bölgesi oluşumu için faz dönüşüm farklılıkları önemlidir. Bu bağlamda iki farklı çelik malzeme ve kaynak parametrelerine bağlı oluşması muhtemel bileşiklerin tespitine yönelik olarak, XRD analizi uygulaması gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.12)

Faz ve faz dönüşümlerinin belirlenmesi için yapılan XRD çalışmaları, Rigaku Ultima IV X-Ray difraktometresi analiz cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz alt yapısı ile XRD analizi sonuçları, Cu-K α radyasyonu ($\lambda = 1.544 \text{ \AA}$) ile $10^\circ < 2\theta < 70^\circ$ aralığında, 40 kV gerilim ve 40 mA akım kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 6.12. XRD analiz cihazı

6.2.4. Sertlik ölçümleri

Deney numunelerinin uygulanan MAG kaynak yöntemi neticesinde, ITAB ve kaynak metali sertlik ölçümlerinin kaynak parametreleri farklılığına bağlı olarak değerlendirilmesi için mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaç için her bir kaynak numunesinde ana metalden kaynak bölgesine doğru sertlik ölçümleri alınarak, kaynak parametrelerinin sertlik değeri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu doğrultuda Qness 60 M model mikro sertlik (Vickers) ölçüm cihazı kullanılarak ölçüm sonuçları elde edilmiştir (Şekil 6.13).

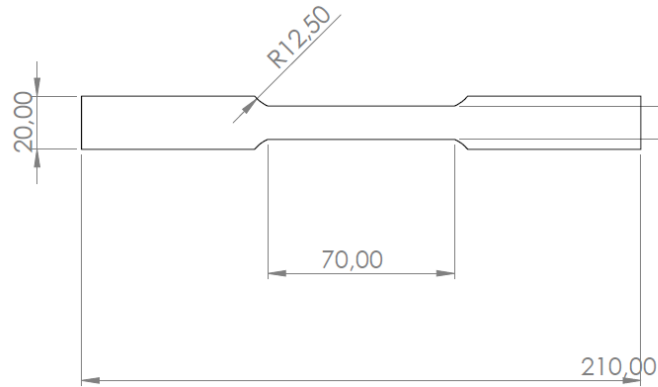
Bu sertlik ölçümleri için mikro sertlik cihazında HV1 yük altında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik ölçümü belirtilen yük ile yaklaşık 10 saniye numune yüzeyine elmas piramit ucun bastırılması sonrasında ortaya çıkan iz üzerinden otomatik olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.13. Mikrosertlik incelemesi

6.2.5. Çekme deneyi

Çekme deneyini yapabilmek için numuneler, çekme cihazının çene ölçülerine ve ISO 5178:2019 standardına uygun şekilde Şekil 6.14.'te gösterildiği gibi kesim için Solidworks'te tasarlanmıştır.



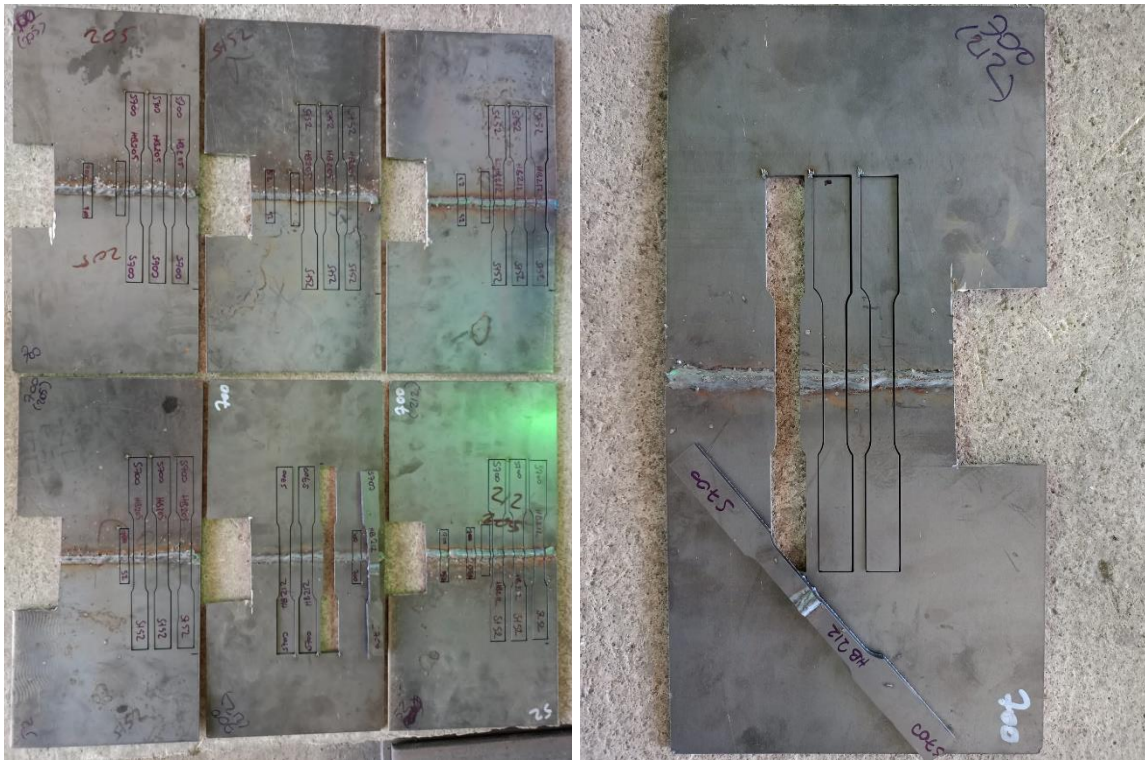
Şekil 6.14. Çekme çubuklarının ölçülerinin gösterimi

ISO 5178:2019 standardına göre, deney yapılacak numunelerin kesimi için lazer yöntemi tercih edilmiştir. Çekme çubukları, tasarıma göre programlanan Teknikzen marka lazer kesim tezgahında Şekil 6.15'te gösterildiği gibi her bir numuneden üçer adet olmak üzere belirlenen ölçülerde kesilmiştir.



Şekil 6.15. Çekme çubuklarının lazerle kesimi

Kesimi yapılan çekme çubukları çekiç yardımıyla yerinde ayrılarak Şekil 6.16'daki gibi çekme deneyine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.16. Çekme çubuklarının kesilmiş haldeki gösterimi

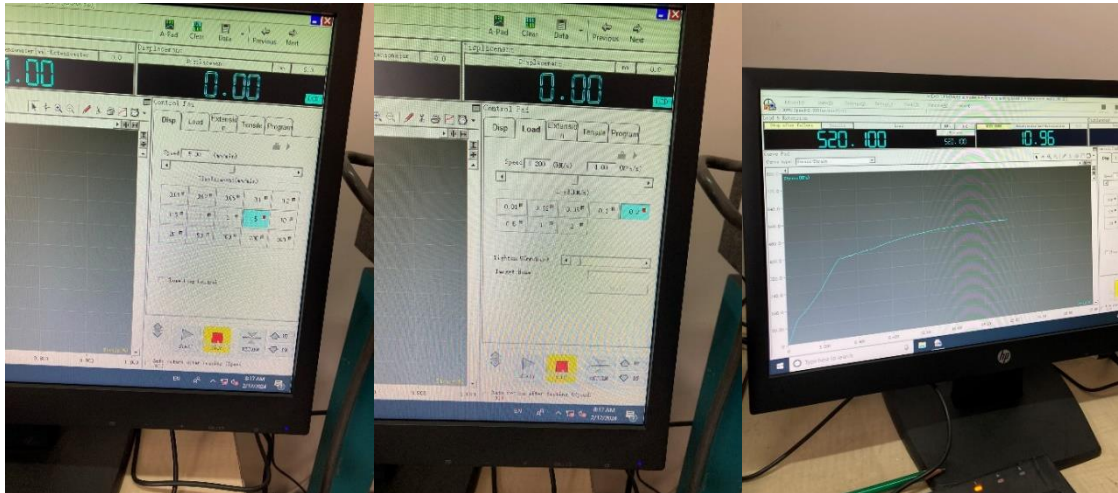
Çekme çubukları ilk olarak MTC Metalurji firmasına ait çekme cihazının ekstansometresine yerleştirilmiştir. Daha sonra çubuklar, cihazın çenelerine numunenin kafa

kısımlarından Şekil 6.17'deki gibi yerleştirilerek doğrusal bir halde sıkıştırılmış ve ekstansometrenin pimi çıkarılmıştır.



Şekil 6.17. Çekme cihazı ve cihaza numune yerleşimin gösterimi

ISO 6892-1 Metalik malzemeler- Çekme deneyi- Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney yöntemi standardına entegre, WDW-100 çekme cihazıyla uyumlu bilgisayar kontrol programında deney parametreleri girilmiştir. Bu parametreler; yer değiştirme hızı 5 mm/sn ve yükleme hızı 0,2 kN/sn olarak ayarlanmış ve test cihazı çalıştırılmıştır. Bu parametreler altında çekme deneyleri her bir numune için üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar ortalama değer olarak verilmiştir.

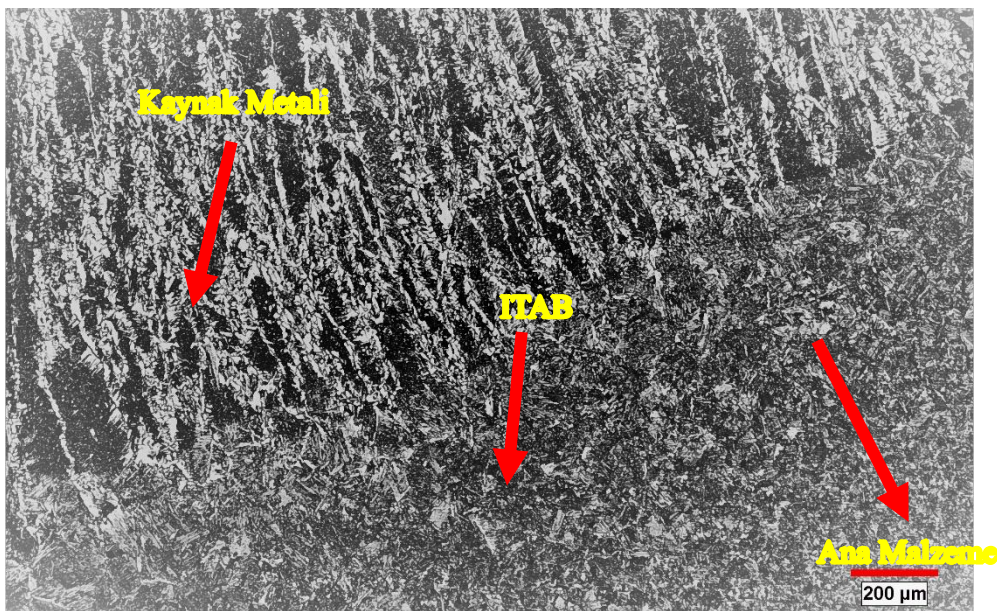
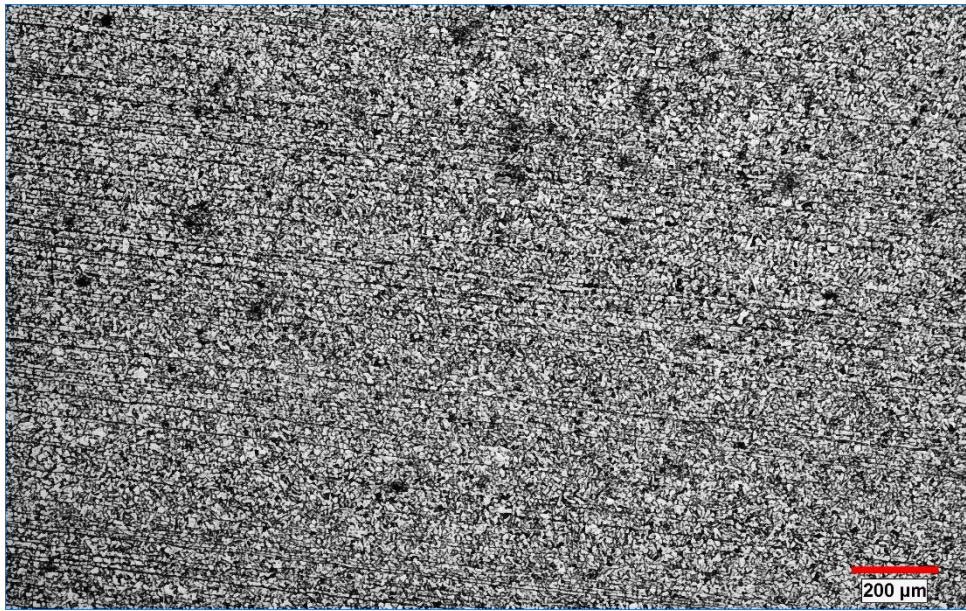


Şekil 6.18. WDW-100 çekme cihazıyla uyumlu bilgisayar kontrol programı

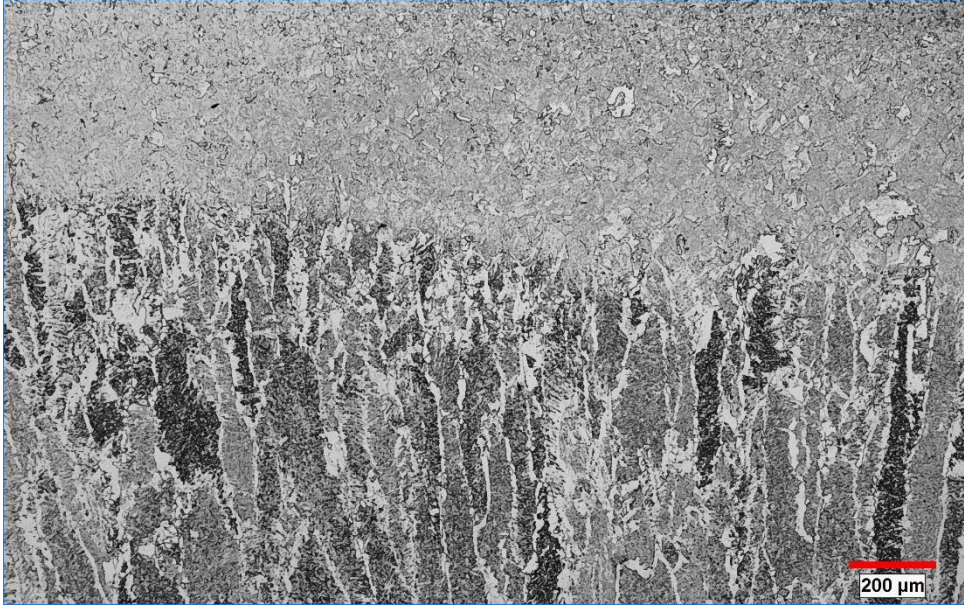
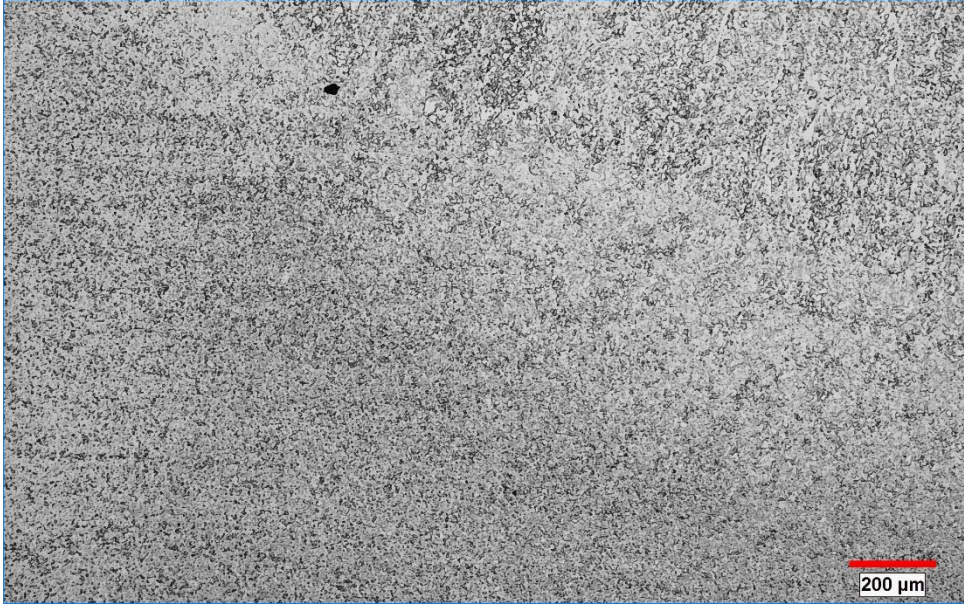
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

7.1. Mikroyapı Sonuçları

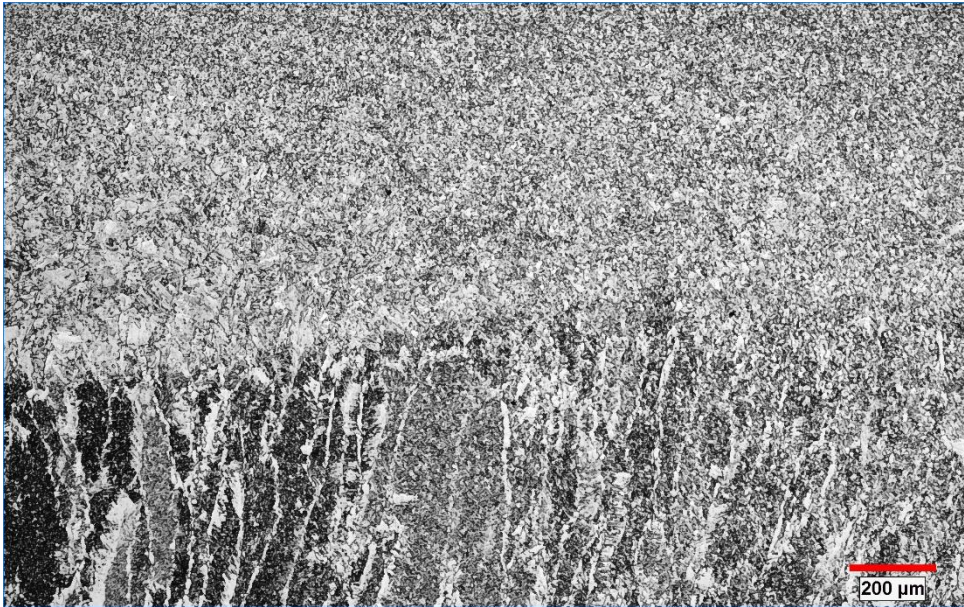
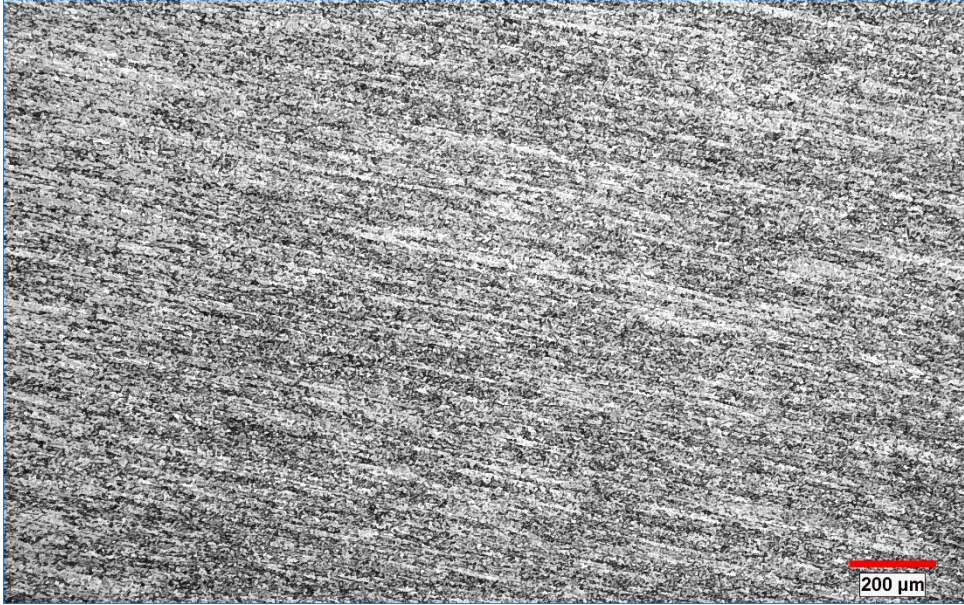
S355JR ve S700MC çelik malzemelerinin MAG kaynak yöntemi kullanılarak alın kaynağı yapılmış bölgelerinden elde edilen optik mikroyapı sonuçları sırasıyla Şekil 7.1-7.6'da verilmiştir. Elde edilen mikroyapı görüntüleri üzerinde ana metal, ITAB ve kaynak metalinin birlikte yer aldığı mikroyapısal farklılıklar, optik mikroyapı görüntüleri üzerinde gösterilmiştir.



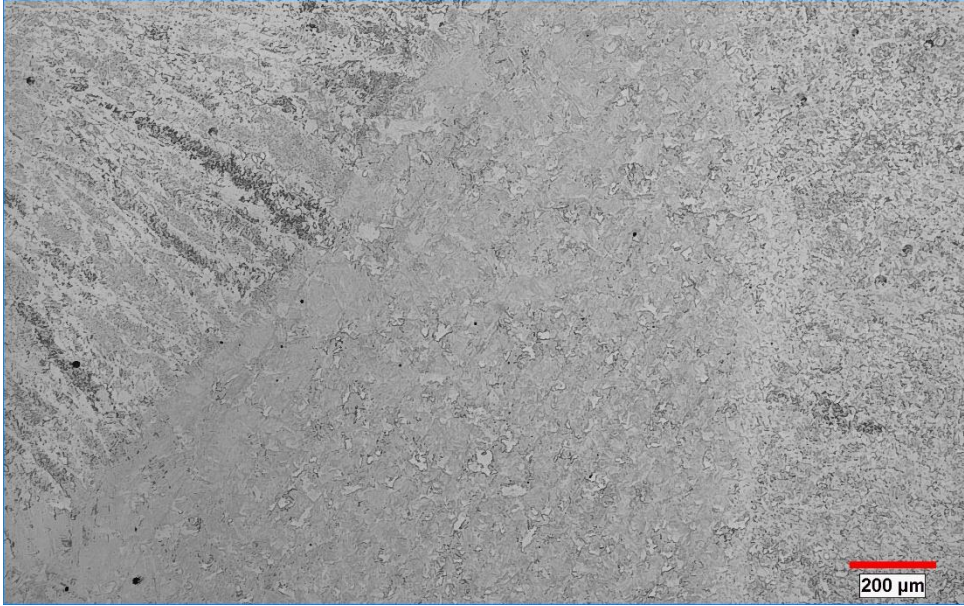
Şekil 7.1. S355JR-S355JR çeliğinin HB 205 karışım gazı altında ana metal ve ITAB mikroyapıları



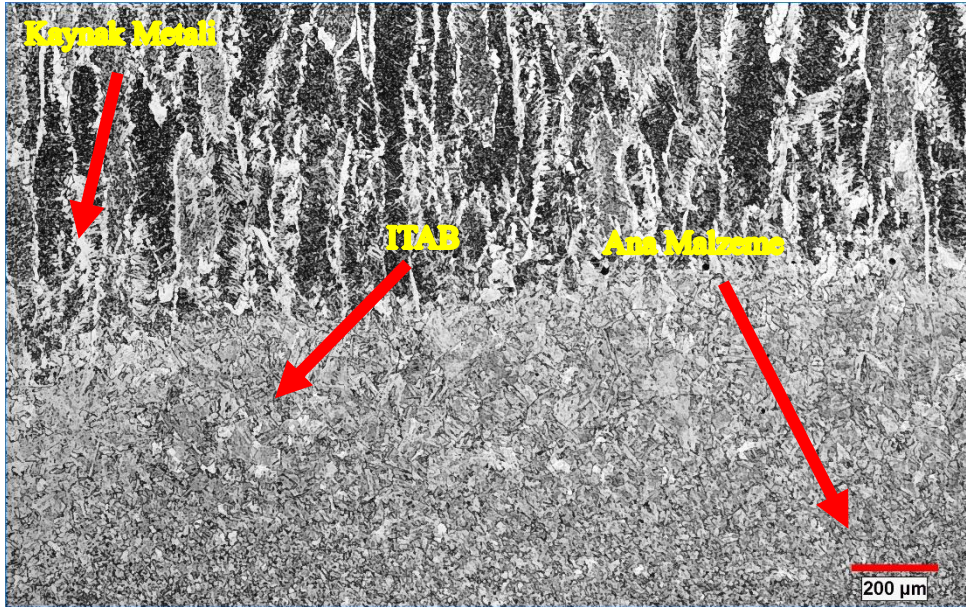
Şekil 7.2. S700MC-S700MC çeliğinin HB 205 karışım gazı altında ana metal ve ITAB mikroyapıları



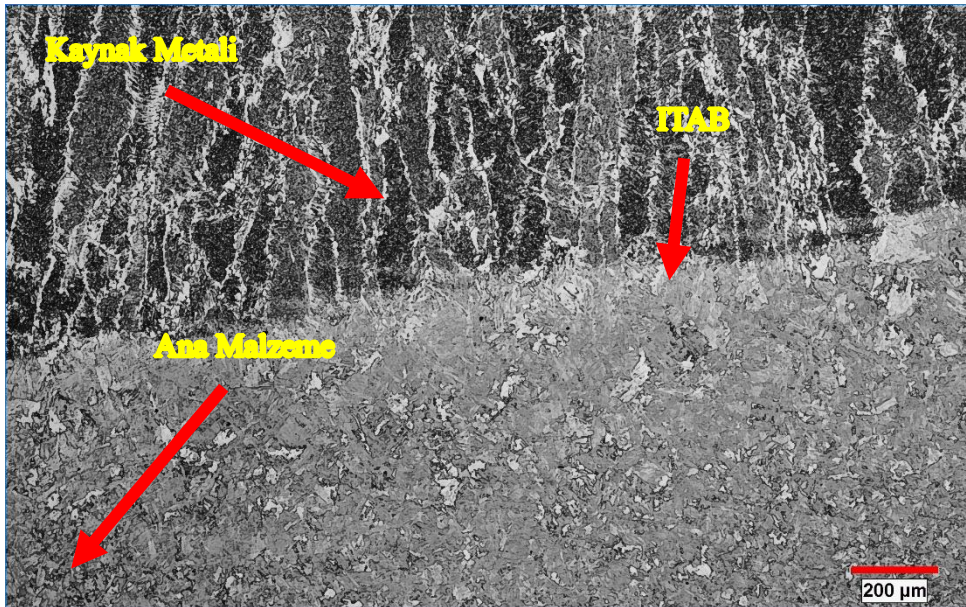
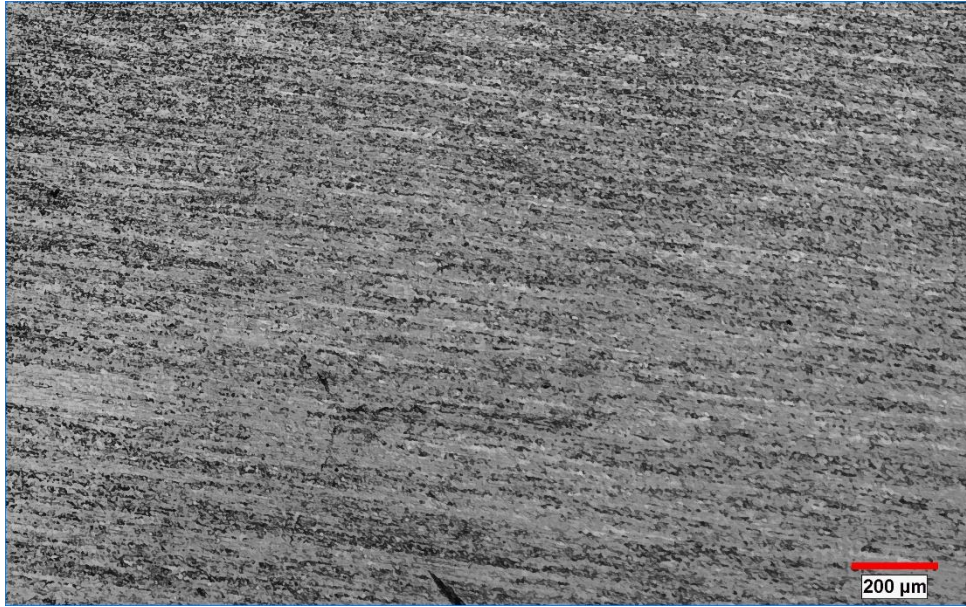
Şekil 7.3. S355JR-S700MC çeliğinin HB 205 karışım gazı altında ana metal ve ITAB mikroyapıları



Şekil 7.4. S355JR-S355JR çeliğinin HB 212 karışım gazı altında ana metal ve ITAB mikroyapıları



Şekil 7.5. S700MC-S700MC çeliğinin HB 212 karışım gazı altında ana metal ve ITAB mikroyapıları

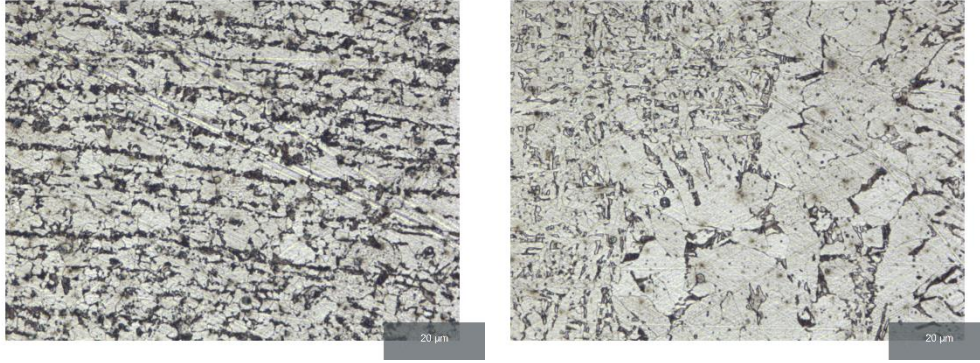


Şekil 7.6. S355JR-S700MC çeliğinin HB 212 karışım gazı altında ana metal ve ITAB mikroyapıları

Kaynaklı imalat sonrasında ana metal yapısının yanı sıra kaynak metali ve ITAB'ın tane yapısı ve dönüşümler açısından daha detaylı optik mikroyapıları ise sırasıyla Şekil 7.7-7.12'de gösterilmiştir.

S355JR yapı çeliğinin esas metaline bakıldığında malzemenin ferrit ve perlit fazlarından oluştuğu görülmektedir. ITAB ve kaynak bölgesine geçildiğinde bu belirgin yapının kaybolduğu ve kaynak metaline gidildikçe tane yapısının büyüdüğü görülmüştür. Kaynak metali bölgesinde iri taneli dentritik kollar gözlenmiştir. Literatürde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, kaynak metali bölgesinde tane büyümesinin ısı girdisinin artmasının bir sonucu

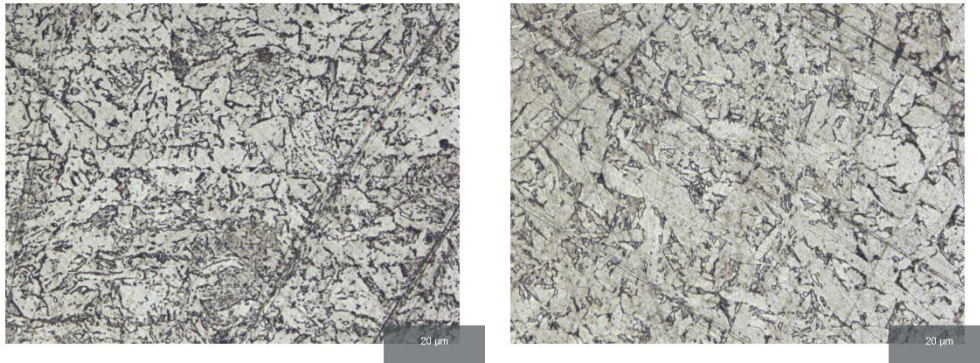
olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu ısının akış yönünde bir tane yönlenmesi olduğu görülmüştür (Kaya vd., 2020; Şık, 2007). Karışım gazın bileşim oranlarının farklı olması mikroyapı üzerinde belirgin bir fark yaratmamıştır.



a) Esas metal-ITAB geçişi

b) ITAB-kaynak metali geçişi

Şekil 7.7. S355JR-S355JR çeliğinin HB 205 karışım gazıyla MAG kaynağında mikroyapı incelemeleri

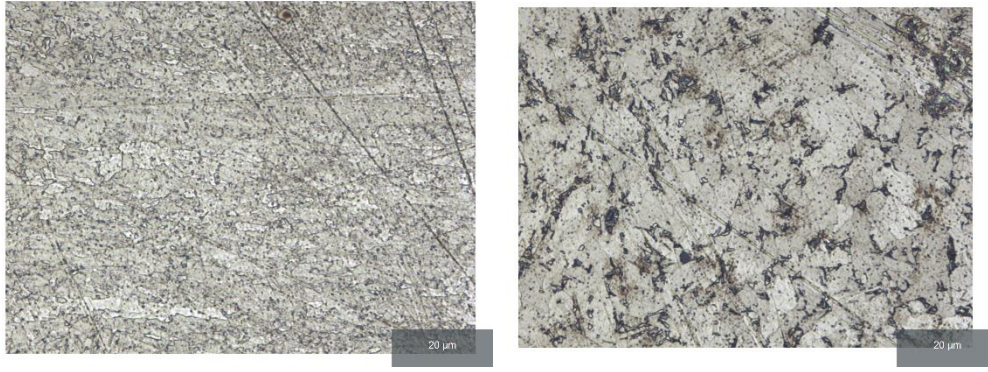


a) Esas metal-ITAB geçişi

b) ITAB-kaynak metali geçişi

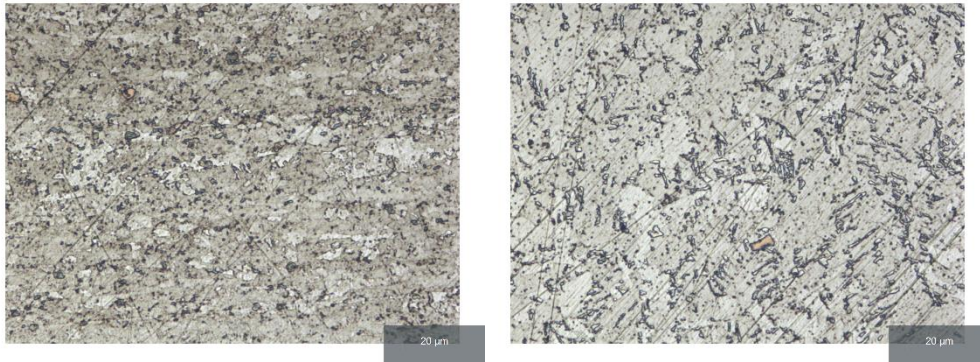
Şekil 7.8. S355JR-S355JR çeliğinin HB 212 karışım gazıyla MAG kaynağında mikroyapı incelemeleri

S700MC çeliğinde ITAB ve kaynak metaline gidildikçe tane boyutunun büyüdüğü gözlemlenmiştir. S355JR çeliğinde olduğu gibi kaynak metali bölgesinde dentritik bir yapı olduğu görülmüştür. Bu metallerde de kaynak gazı farklılığının mikroyapı üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir.



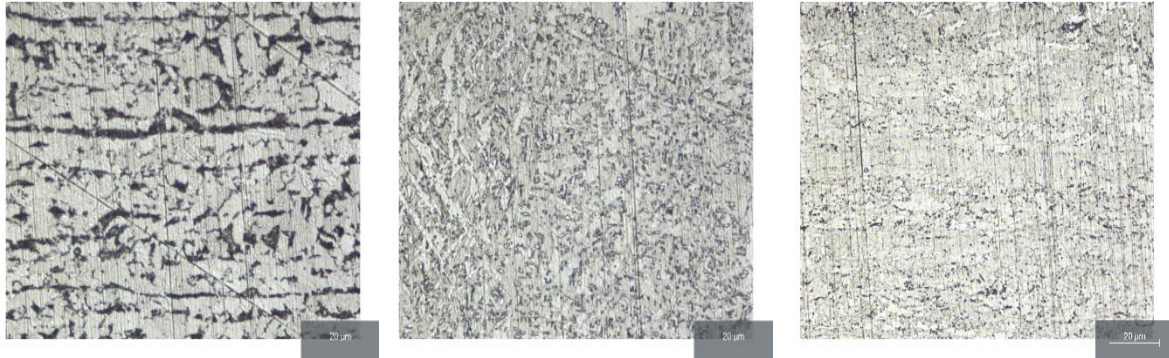
a) Esas metal-ITAB geçişi

b) ITAB-kaynak metali geçişi

Şekil 7.9. S700MC-S700MC çeliğinin HB 205 karışım gazıyla MAG kaynağında mikroyapı incelemeleri

a) Esas metal-ITAB geçişi

b) ITAB-kaynak metali geçişi

Şekil 7.10. S700MC-S700MC çeliğinin HB 212 karışım gazıyla MAG kaynağında mikroyapı incelemeleri

a) S355JR esas metal-ITAB geçişi

b) Kaynak metali

c) S700MC esas metal-ITAB geçişi

Şekil 7.11. S355JR-S700MC çeliğinin HB 205 karışım gazıyla MAG kaynağında mikroyapı incelemeleri

Farklı iki metal kullanılarak yapılan S355JR ve S700MC çeliğinin kaynağındaki birleşim bölgesi olan kaynak metalinde de büyük taneli tipik kaynak yapısı görülmüştür.



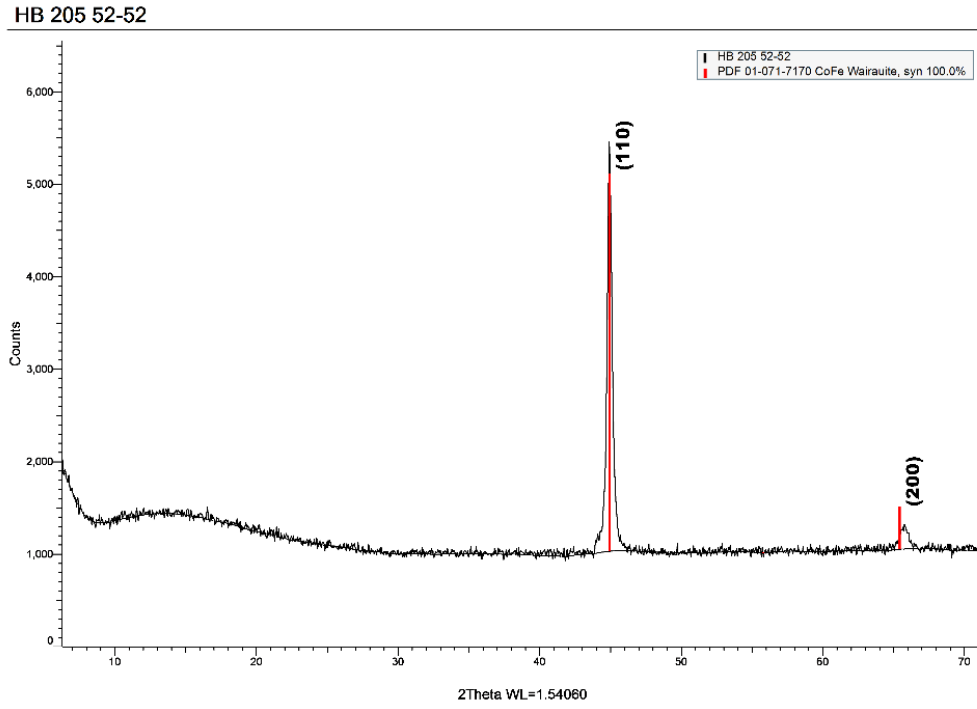
a) S355JR esas metal-ITAB geçişi b) Kaynak metali c) S700MC esas metal-ITAB geçişi
Şekil 7.12. S355JR-S700MC çeliğinin HB 212 karışım gazıyla MAG kaynağında mikroyapı incelemeleri

Ana malzemeden ITAB'a doğru tane irileşmesi, kaynak ısı girdisinin bir sonucudur. Yine kaynak metalinde, ana malzemeden kaynak metali merkezine doğru oluşan iri yapılı dentiritik kollar da yüksek ısı girdisi sebebiyle meydana gelmektedir. S355JR çeliğinde yavaş soğuma sebebiyle de daha sünek ve yumuşak bir yapı oluşmuştur (Ayyıldız, 2022). S700MC çeliğinde ise aynı soğuma hızlarında olmasına rağmen bu malzemede orijinal mikroyapı açısından martenzitik yapının sergilendiği düşünülürse, kaynak işlemi neticesinde de ısı girdisine bağlı olarak mikroyapısal açıdan önemli bir değişimin olmadığı dolayısıyla, martenzitik ve gevrek bir yapının nispeten korunduğu görülmüştür.

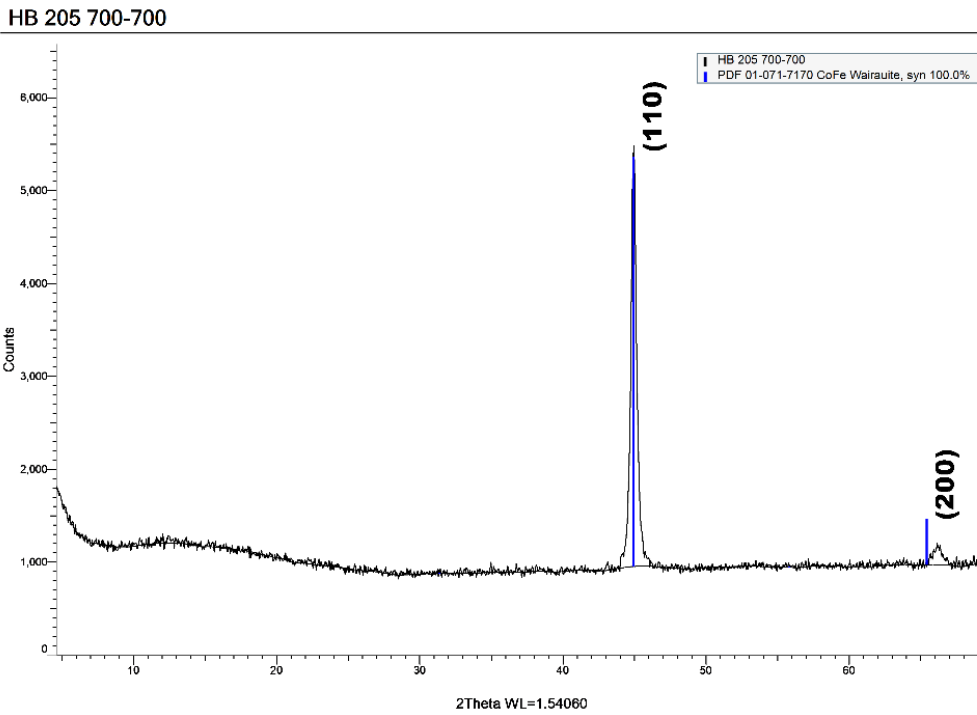
7.2. XRD Analiz Sonuçları

S355JR (St52) ve S700MC çelik malzemelerinin MAG kaynak yöntemi kullanılarak ve özellikle kaynak gazı farklılığı etkisi altında kaynaklı birleştirme işlemine bağlı olarak ergiyen kaynak banyosunda faz ve faz dönüşümlerinin belirlenmesi için yapılan XRD analiz sonuçları sırasıyla Şekil 7.13-18'de gösterilmiştir. Elde edilen XRD analiz sonuçları S355JR ve S700MC malzeme kendi aralarında ve farklılıklarında özellikle kaynak gazı çeşitliliğine bağlı olarak ortaya çıkarılmıştır. Bu bağlamda kaynaklı imalat işlemi sonrası elde edilen XRD analiz sonuçları incelendiğinde, malzemelerin tamamında faz analizi neticesinde en şiddetli temel pikin demir (Fe) fazını sergilediği tespit edilmiştir. Diğer bir şiddetli ancak daha küçük olan pikin ise yine az miktarda demir fazını temsil ettiği görülebilmektedir. Bu tarzdaki malzemelerde özellikle kaynak metalinde nikel ve krom gibi östenitik alaşım elementlerinin yer alması, demir fazının varlığına işaret etmektedir (Górka & Stano, 2018). Genellikle kaynaklı bağlantılarda demir ve demir fazlarının kafes düzlemi açısından X ışını kırınım toplam yoğunluğu özellikle yapıda kalıntı östenit içeriğinin %3-6 aralığında sınırlı kalabileceği ifade

edilir. HB 212 ve HB 205 karışım gaz farklılığına bağlı olarak kaynaklı malzemelerde elde edilen XRD analiz sonuçları birleştirilmiş olarak Şekil 7.19’de verilmiştir.

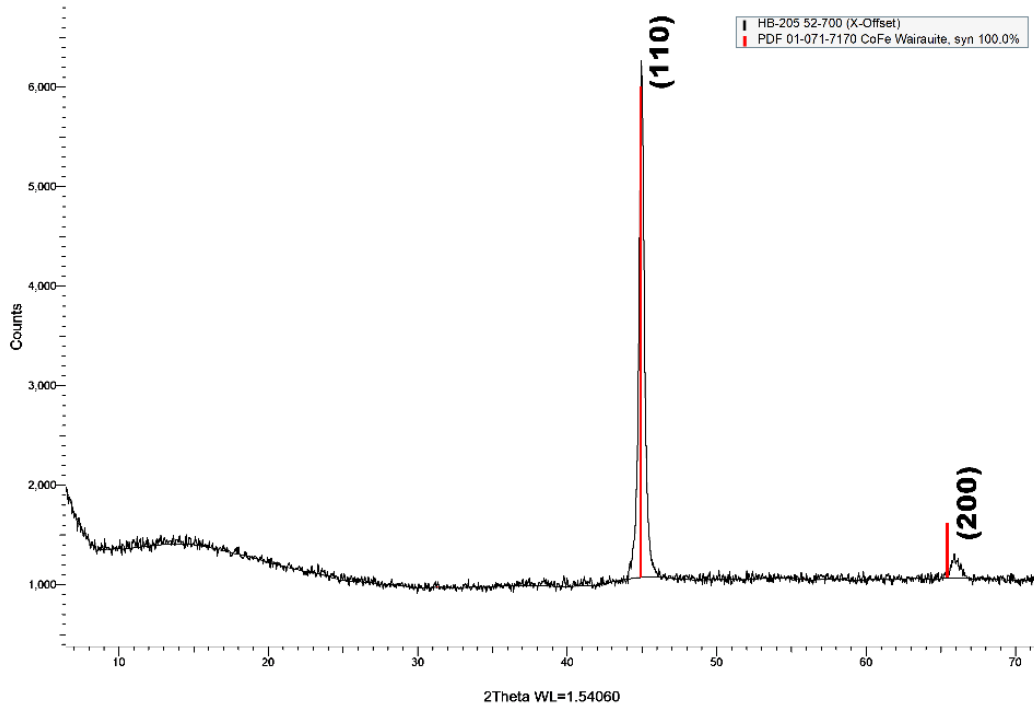


Şekil 7.13. Deney numunesi XRD analizi, HB-205 S355JR- S355JR



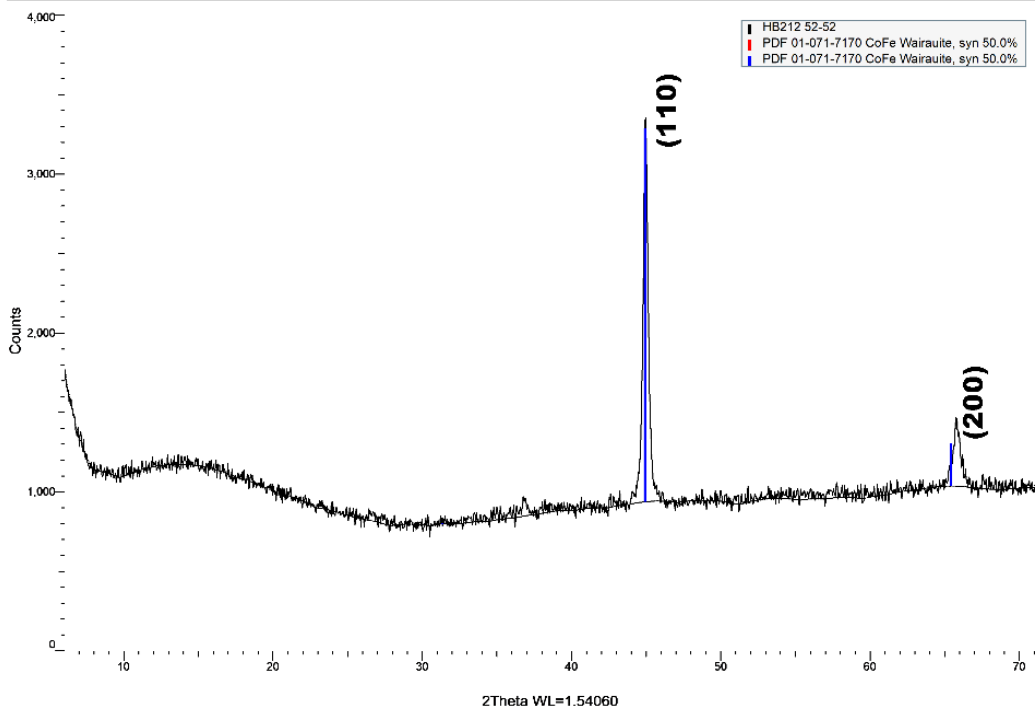
Şekil 7.14. Deney numunesi XRD analizi, HB-205 S700MC-S700MC

HB-205 52-700



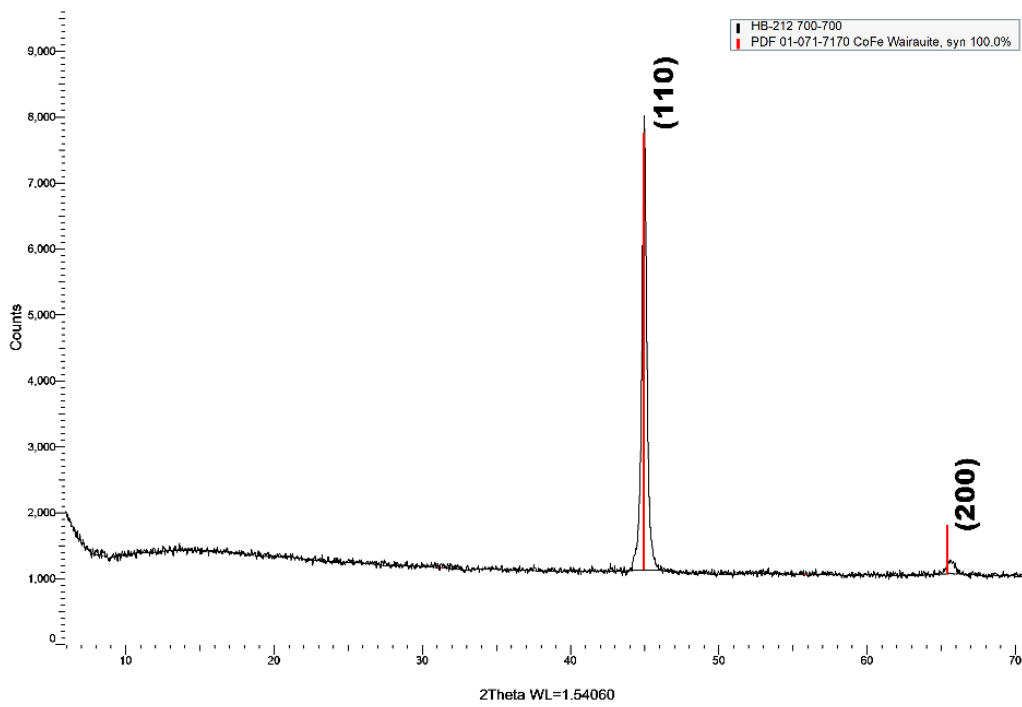
Şekil 7.15. Deneysel numunesi XRD analizi, HB-205 S355JR-S700MC

HB212 52-52



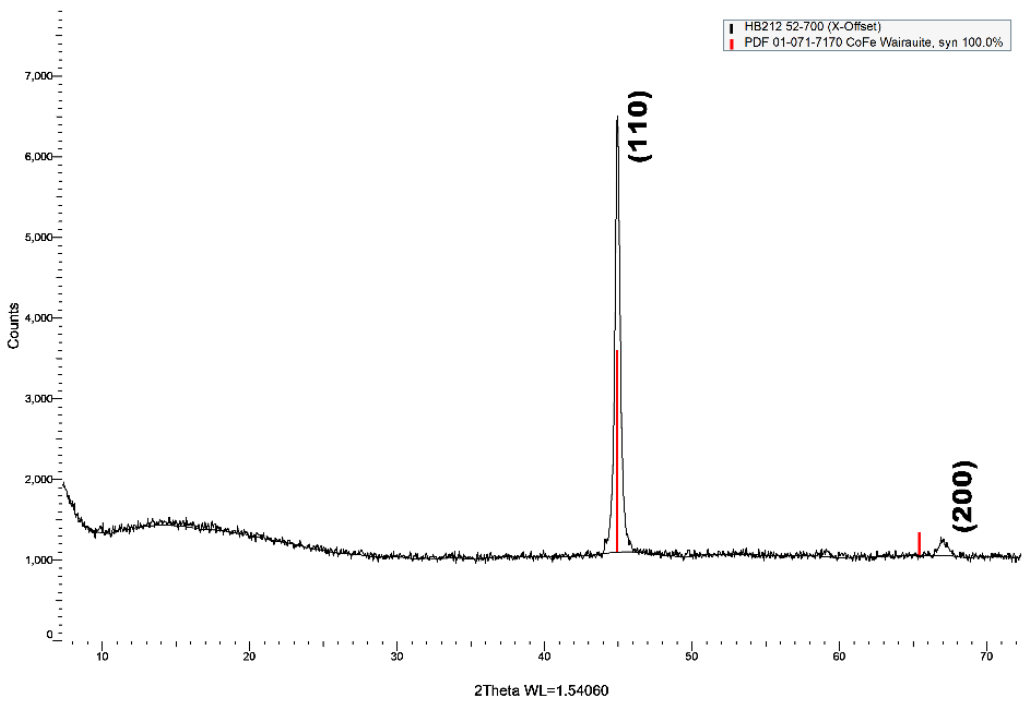
Şekil 7.16. Deneysel numunesi XRD analizi, HB-212 S355JR- S355JR

HB-212 700-700



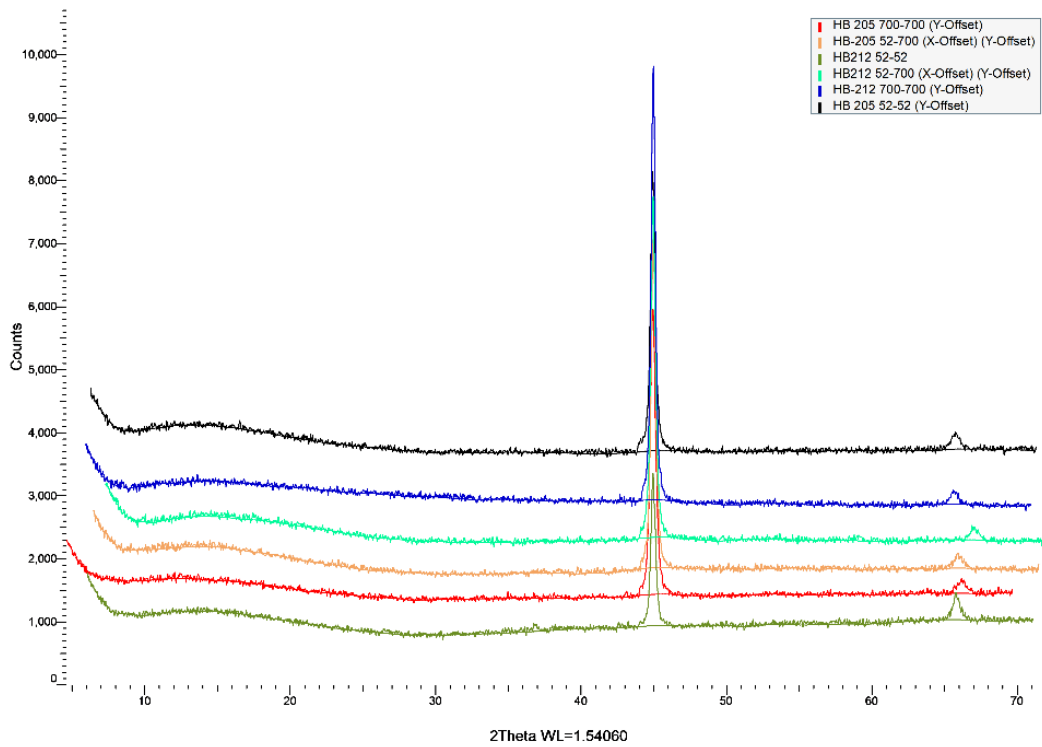
Şekil 7.17. Deney numunesi XRD analizi, HB-212 S700MC-S700MC

HB212 52-700



Şekil 7.18. Deney numunesi XRD analizi, HB-212 S355JR-S700MC

Şekil 7.19 birleştirilmiş XRD analiz sonuçları incelendiğinde, benzer şekilde demir piklerinin yer aldığı görülebilmektedir. Bu durum ayrıca elde edilen XRD analizleri açısından değerlendirildiğinde ana malzemelerin ve kaynak bağlantılarının mikroyapısında α ferrit fazından ortaya çıktığı belirtilebilir. Bu durumun ortaya çıkmasında diğer bir etken ise çalışmada yararlanılan XRD analiz cihazı altyapısına bağlı olarak bakır dalga boyu ($1,544 \text{ \AA}$) kullanılması olarak belirtilebilir. Çünkü beklenen martenzit yapısının α ferritin sahip olduğu kafes parametresinden daha küçük olması ve böylece martenzit piklerinin bakır dalga boyu altında gösterilememesi olarak belirtilebilir (Ekinci & Balalan, 2019).



Şekil 7.19. Deneysel numunelerin çakıştırılmış XRD analizi

7.3. Sertlik Sonuçları

TS EN ISO 9015-1 standardına göre esas metal, ITAB ve kaynak bölgelerinin üç farklı noktadan Vickers sertlik (HV 1) ölçümleri alınmıştır. Malzemelerin her bölgesinden üç farklı ölçüm alınarak ortalamaları alınarak elde edilen sonuçlar ortalama olarak Vickers sertlik değeri açısından Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. HB 205 ve HB 212 karışım gazlarıyla MAG kaynağı yapılan S355JR ve S700MC çeliğinin her bölge için üç noktadan alınan ortalama Vickers sertlik değerleri

	Esas Metal	ITAB	Kaynak Metali	ITAB	Esas Metal
HB205 S355JR-S355JR	165	175	185	177	166
HB212 S355JR-S355JR	170	208	239	201	171
HB205 S700MC-S700MC	305	303	219	290	310
HB212 S700MC-S700MC	304	298	198	261	301
HB205 S355JR-S700MC	174	204	202	250	311
HB212 S355JR-S700MC	177	222	209	223	312

Çizelge 7.1’de verilen mikro sertlik sonuçları incelendiğinde, sertlik değerinin literatürde maksimum 380 HV olduğu düşünüldüğünde (Gür, 2022), elde edilen sertlik değerlerinin bu değer altında olduğu ve literatürle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. S355JR malzemeleri kendi aralarındaki kaynaklı imalatları sonrasında ana malzemede elde edilen sertlik değerleri, HB 205 ve HB 212 gaz farklılığı için sırasıyla 165-166 HV ve 170-171 HV olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde S700MC ana malzemede elde edilen sertlik değerleri incelendiğinde HB 205 ve HB 212 gaz farklılığı için sırasıyla 305-310 HV ve 304-301 HV olarak ölçülmüştür. S355JR çelik malzemeye nazaran S700MC çeliğin sertlik değerinin yüksek seyretmesi hem malzeme ince tane yapısından hem de özellikle bu malzemenin üstün mekanik özellikleri sebebiyle ve yüksek kaynak kabiliyeti açısından olduğu belirtilebilir (Çetin, 2019).

Vickers ölçeğine göre mikro sertlik ölçüm sonuçlarına bakıldığında S355JR çeliğinde, yüksek ısı girdisi sebebiyle sertlik değerlerinde artış görülmektedir. Bunun tam tersi olarak, daha mukavim olan S700 çeliğinde, haddelenmiş yapısından kaynaklı östenit tane sınırlarında oluşan bor karbür çökmesi sebebiyle sertliğin azaldığı görülmektedir (Eski, 2001).

S355JR çeliği HB 212 karışım gazı ile kaynatıldığında, HB 205 karışım gazına göre ITAB ve kaynak metalinin daha sert olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkılarak 4 mm kalınlığında ince sac kullanıldığı için S355JR çeliğinin kaynağında HB 205 karışım gazının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

S700MC çeliğinin kaynağına bakıldığında ise S355JR’nin tam tersine ITAB ve kaynak metalinde HB 205 gazıyla kaynak yapıldığında daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. CO₂ miktarının artışı, ısı girdisini artırdığından kalınlık düşük olmasına rağmen malzemenin yüksek sertliğe sahip olması sebebiyle sertliğin azalmasına neden olmuştur. Bu durumda

S700MC çeliklerinin birbiriyle ve S355JR çelikleriyle kaynağında da HB 205 karışım gazının daha uygun olduğu görülmüştür.

7.4. Çekme Testi Sonuçları

Her bir numuneye ait üçer adet çekme çubuğunun çekme testi yapılmış ve ortalama değerleri alınarak akma ve çekme dayanımları ile yüzde uzama değerleri incelenmiştir.

Çekme deneyinde elde edilen test sonuçlarının yanı sıra çekme çubuğunun koptuğu bölge de sonuçların yorumlanması için oldukça önemlidir. Çekme numunelerinin uygunluğunun kabul edilebilmesi için kopma bölgesinin kaynaklı bölgeden değil malzemeden olması gerekmektedir (Özkan, 2019).

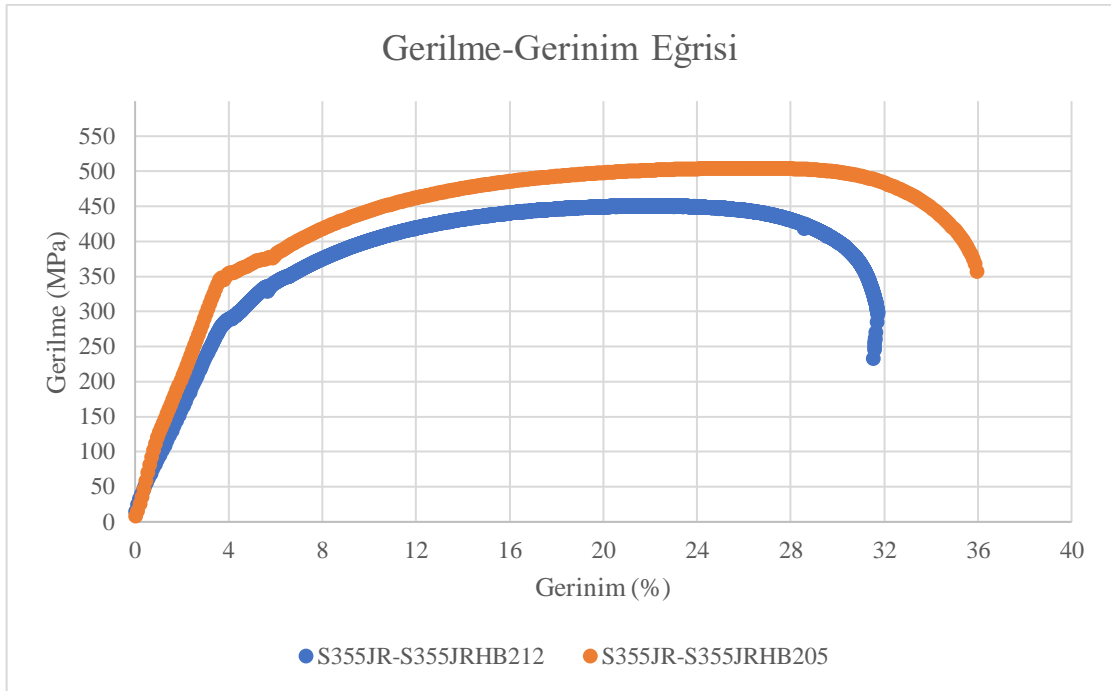


Şekil 7.20. Deney sonrası çekme çubukları

Şekil 7.20’de görselleri verilen S355JR (St52) çeliğinin birbiriyle ve S700MC çeliği ile kaynağından elde edilen numunelere bakıldığında uygun bir şekilde S355JR malzeme tarafında sünek bir kopma gerçekleşmiştir. S700MC çeliğinin birbiri ile her iki karışım gaz ile

kaynağında da uygun olmayan bir şekilde kaynaklı bölgeden kopma olmuştur. Yapılan deneysel çalışmaların verilerine göre, bor karbür çökmesinin tane sınırlarında gevrek bir yapıya sebep olduğu ve çökmenin olduğu bu bölgede taneler arası kırılma ihtimalinin yüksek olduğu belirtilmiştir (Eski, 2001). Bu da yüksek mukavemetli S700MC çeliğinin ön tavlama yapılmadan kaynak yapılmasının olumsuzluklarını ortaya çıkarmıştır.

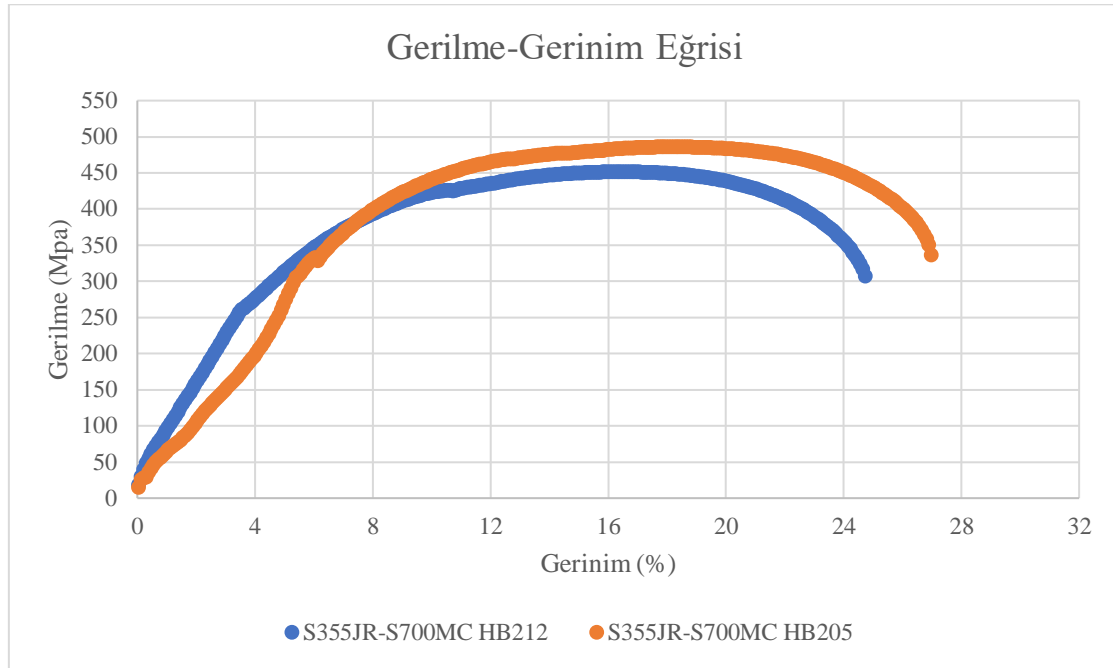
S355JR yapı çeliğinin HB 205 karışım gaz altında birbiri ile kaynağından elde edilen numunelerin çekme testi sonuçlarına bakıldığında ortalama akma dayanımı 355 MPa, çekme dayanımı 500 MPa ve gerinim (yüzde uzama) %36 olduğu görülmüştür. S355JR yapı çeliğinin HB 212 karışım gaz altında birbiri ile kaynağından elde edilen numunelerin çekme testi sonuçlarına bakıldığında ise, ortalama akma dayanımı 300 MPa, çekme dayanımı 450 MPa ve gerinim (yüzde uzama) %31,5 olduğu görülmüştür (Şekil 7.21). S355 çeliğinin malzeme sertifikasında verilen yüzde uzama değerlerinin üzerinde bir performans sergilemiştir.



Şekil 7.21. Kaynaklı S355JR-S355JR çeliğinin gerilme-gerinim değerleri

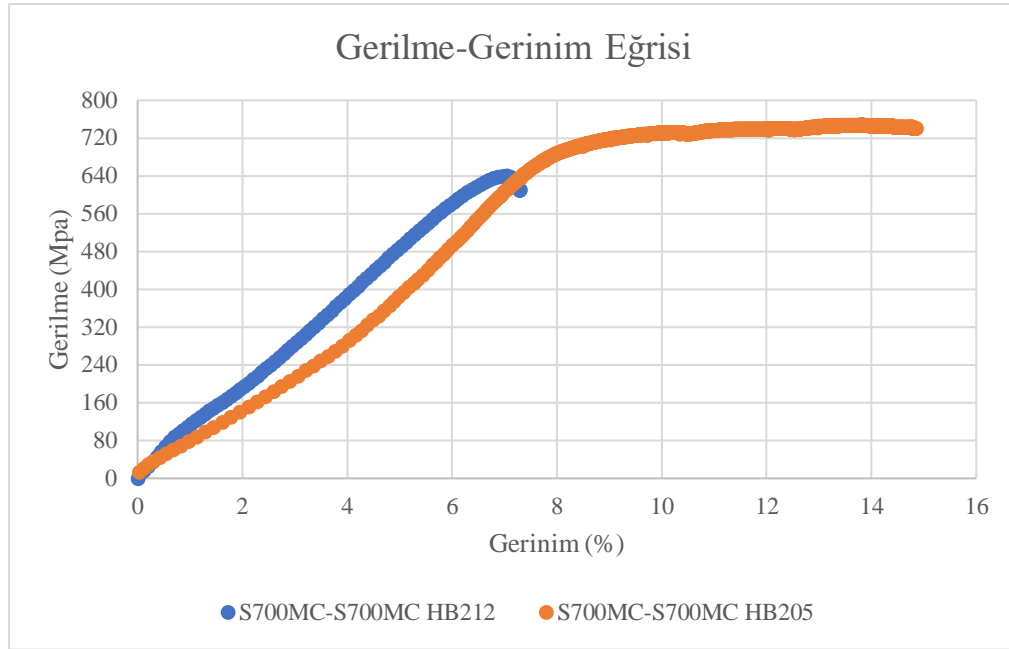
HB212 karışım gazıyla kaynatılan çekme çubuklarının akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve gerinim değerleri, HB205 karışım gazıyla kaynatılan numunelere bakıldığında da düşüktür ve buna bağlı olarak da daha gevrek bir yapı olduğu görülmüştür. HB212 karışım gazının yüksek oranda içerdiği CO₂, düşük kalınlıktaki sac metalin yapısında sertliği arttırarak daha gevrek bir malzeme elde edilmesine sebep olmuştur.

S355JR ile S700MC yapı çeliğinin HB205 karışım gazıyla kaynağından elde edilen numunelerin ortalama akma gerilmesi 350 MPa, çekme gerilmesi 490 MPa ve yüzde uzama %27 olduğu saptanmıştır. HB212 karışım gazıyla kaynatılan çubuklardan elde edilen değerlere bakıldığında ise nispeten daha düşüktür; akma gerilmesi 270 MPa, çekme gerilmesi 450 MPa ve yüzde uzama %24,7'dir (Şekil 7.22).



Şekil 7.22. Kaynaklı S355JR-S700MC çeliğinin gerilme-gerinim değerleri

S700MC yapı çeliğinin birbiri ile kaynağında da diğer numunelerde olduğu gibi HB212 karışım gazıyla kaynak yapıldığında daha düşük değerler elde edildiği görülmüştür. HB205 ile kaynaklı çekme çubuklarının akma ve çekme gerilmesi ile yüzde uzama değerleri sırasıyla, 700 MPa, 740 MPa ve %15 iken; HB212 kaynaklı numunelerinki ise, 610 MPa, 640 MPa ve %7,3'tür (Şekil 7.23).



Şekil 7.23. Kaynaklı S700MC-S700MC çeliğinin gerilme-gerinim değerleri

HB212 ile kaynaklı numunelerin kaynağının, S700MC çeliklerinin TS EN 10149-2 standardına göre belirlenen 700 MPa akma dayanımı, 750-949 MPa çekme dayanımı ve minimum %12 yüzde uzama değerlerine sahip olması gereklilikleri göz önünde bulundurularak uygun olmadığı görülmüştür (Ulaştı, 2018). HB205 ile kaynaklı numunelerin test sonuçları bu değerler içinde kalsa da kopma bölgeleri sebebiyle kaynaklarının uygun olmadığı saptanmıştır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

HB 205 ve HB 212 karışım gaz altında MAG kaynağı ile kaynatılan S355JR ve S700MC yapı çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelemesi için yapılan deneysel çalışmaların sonuçları aşağıda verilmiştir.

Mikroyapı incelemelerine göre;

- Tane boyutu üzerinde kullanılan gazın kimyasal bileşim oranının etkili olmadığı görülmüştür.
- S355JR çeliğinde ITAB ve kaynak bölgesinde tane boyutlarının büyüdüğü ve eş eksenli tane yapısının dentritik kollara dönüştüğü görülmüştür.
- S700MC çeliğinde ise ITAB ve kaynak bölgesinde tane irileşmesine ve kaynak ısı girdisinden dolayı S355JR çeliğinde oluşan dentritik yapıya rastlanmıştır.
- İki metalin birleşiminde ise tane boyutunda irili ufaklı daha düzensiz dentritik bir yapı görülmektedir.

Mikro Vickers sertlik deneyi sonuçlarına göre;

- S355JR çeliğinde kaynak bölgesine doğru gidildikçe tane boyutu küçüldüğünden sertlik değeri artmıştır. HB 205 karışım gazında HB 212 karışım gazına nispeten daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir.
- S700MC çeliğinde ise sertlik tam tersine kaynak bölgesine doğru gidildikçe azalmıştır. HB 212 karışım gazında HB 205 karışım gazına göre daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir.
- S700MC ve S355JR çeliklerinin birbiri ile kaynağında iki farklı koruyucu gaz altında sertlik değerleri hemen hemen birbirine yakındır. S355JR çeliğinden kaynak metaline geçişte S355JR çeliğinin birbiri ile kaynağına göre daha yüksek sertlik değerleri; S700MC çeliğinde ise birbiri ile kaynağına göre daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir.

- İki metalin de ITAB ve kaynak metalindeki sertlik değerlerinin olması gereken maksimum sertlik değerlerini aşmadığı görülmüştür.

XRD analiz sonuçlarına göre;

- XRD analiz sonuçları incelendiğinde, malzemelerin tamamında faz analizi neticesinde en şiddetli temel pikin demir (Fe) fazını sergilediği tespit edilmiştir.
- XRD analizinde ana malzemelerin ve kaynak bağlantılarının mikroyapısında α ferrit fazından ortaya çıktığı belirtilebilir.

Çekme testi sonuçlarına göre;

- Malzeme kalınlığının az olması sebebiyle soğuma hızı yüksek olduğu için, kaynak sonrası artık gerilmeler fazla olsa da S355JR çeliği HB205 karışım gazı ile kaynatıldığında iyi mekanik özelliklere sahiptir. Uzama ve çekme dayanımı malzeme sertifikasında belirtilen değerleri sağlamaktadır. HB212 karışım gazındaki yüksek CO₂ oranı daha gevrek bir yapıya sebep olmuş; sünekliği azaltmıştır.
- HB205 karışım gazı test sonuçlarına bakıldığında S700MC çeliğinde her ne kadar daha iyi sonuçlar verse de malzemenin kırılma bölgesine bakıldığında kaynaklı bölgeden gevrek bir kopma gerçekleştiği görülmüştür. Bu da ısıl işlemin gerekliliğinin kaçınılmaz olduğunu göstermiştir.
- S355JR ve S700MC birleşimi nispeten S700MC çeliğinin birbiri ile birleşiminden daha iyi mekanik özelliklere sahip olsa da düşük mekanik özelliklere sahiptir. Çekme testinde kopma, mukavemet değeri daha düşük olan S355JR çeliğinden gerçekleşmiştir.

8.2. Öneriler

- S700MC çeliğine sert yapısı sebebiyle kaynaklı metalinde daha iyi mekanik sonuçlar elde edilebilmesi için ısıl işleme tabi tutulmalıdır. Ancak birçok firma maliyet ve zaman kaybı nedeniyle bu işlemi önemsememektedir. Bu nedenle oluşabilecek öngörülen olumsuz mekanik özellikler bu çalışmayla ortaya konulmuştur.
- S355JR ve S700MC yapı çeliğinin birbiri ile kaynağında farklı kalınlık ve kaynak pozisyonlarında kaynak yapılarak birleşimlerinde oluşan değişimler daha detaylı incelenebilir.

- Deneyleerde kullanılan sac levhaların 4 mm olması nedeniyle hızlı soğuma gerçekleşmiş ve bu da kaynak metalindeki sertliği etkilemiştir. Soğuma hızı optimum seviyeye getirilerek sonuçlar yeniden değerlendirilebilir.
- S355JR çeliği kaynak sonrası oluşan artık gerilmelere rağmen iyi sonuçlar göstermiştir. Ancak ısı işleme tabi tutularak daha iyi mekanik özellikler elde edilebilirliği üzerine bir çalışma da yapılabilir. Elde edilen sonuçlar sadece mekanik özellikler açısından değil maliyet açısından da değerlendirilmelidir.
- HB212 karışım gazında yüksek orandaki CO₂, mikroyapıda belirgin bir değişiklik göstermese de sac kalınlığının ince olması sebebiyle sertlik ve çekme testi sonuçlarına bakıldığında düşük mekanik özellikler göstermektedir. Bunun kalınlıkla ilgisini daha detaylı incelemek için farklı kalınlardaki saclara aynı gazın etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Al-Helli, A. S. M., 2013, Microstructural analysis of pulse gas tungsten arc welding (GTAW) in Ti-6Al-4V alloy, M. Sc. Thesis, *University of Gaziantep Graduate School of Natural & Applied Sciences*, Gaziantep.
- Anık, S., 1991, Kaynak tekniği el kitabı, Gedik Eğitim Vakfı, İstanbul, 12-16.
- Anık, S., Tülbentçi, K., & Kaluç, E., 1991, Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı, Gedik Eğitim Vakfı, İstanbul, 5-10
- Ayan, İ. B., 2010, Kaynaklı imalat yapan işletmelerde uluslararası sertifikasyon sistemleri, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İzmir.
- Ayyıldız, E. A., 2022, Aşınmaya dirençli HBW450 Hardox çeliği ve S355J2 yapı çeliğinin robotik gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve metalurjik özelliklerinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Ceran, Y. S., 2019, Sinerjik darbeli akım üreteçli gazaltı kaynak makinelerinde farklı kaynak parametreleri ile elde edilen kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Çetin, V., 2019, Treyler şaselerinde kullanılan S700 MC çelik saclarının elektrik direnç nokta kaynağında mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya.
- ChnÇelik, 2023, *Guide to citing Internet sources* [online], <https://www.chncelik.com.tr/teknik-dokumanlar/st-52-s355jr-celik-ozellikleri/> [Ziyaret Tarihi: 24 Aralık 2023]
- Demirci, D., 2010, Muhtelif kaynak yöntemlerinde doğru akımlı kaynakta kutuplamanın kaynak dikiş formuna etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Dikeç, S., 2020, *Erdemir Test Sertifikası*, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş., Zonguldak.
- Dündar, B., 2010, Tozaltı kaynak yönteminde altlık olarak kullanılan kaynak yöntemlerinin kaynak yeterliliklerinin ve maliyetlerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Durmuşoğlu, Ş., 2006, Gazaltı kaynağında kaynak kalitesine tesir eden parametrelerin mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- Ekici, M., 2009, MIG/MAG ve elektrik ark kaynağı ile birleştirilmiş mikro alaşımlı çeliklerin mekanik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.

- Ekinci, Ö., & Balalan, Z., 2019, Microhardness and microstructure of fiber laser welded S960 and S700 steels. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3, 15–21.
- Eleman, B., 2022, Yeni nesil (invertör) ve geleneksel MIG/ MAG kaynak makinaları ile kaynaklanan S355 kalite çeliğin kaynak dikişlerinin makro yapı ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Eryürek, B., Sevük, A., & Odabaş, A., 2007, Kaynak teknolojisi, Askaynak, İstanbul, 56-120.
- Eski, Ö., 2001, Kaynak ısı girdisinin soğuk şekillendirilmiş S700MC çeliğinin mekanik özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Geçmen, İ., 2006, Çeliklere gazaltı kaynağının uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Górka, J., & Stano, S., 2018, Microstructure and properties of hybrid laser arc welded joints (laser beam-MAG) in thermo-mechanical control processed S700MC steel, *Metals*, 8(2), 132.
- Gudadhe, N., Teferi, A. B., Rao, P. N., Rao, S. S., Polayya, C., & Balachandar, K., 2023, Influence of shielding gas variation and welding parameters on the microstructure and microhardness of SAE 1035 steel welded by the MAG process, *Materials Today: Proceedings*.
- Günaydın, B., 2022, Orta ölçekli bir organize sanayi bölgesinin kaynaklı imalat işlerinde iş sağlığı ve güvenliği analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Çorum.
- Gür, Y., 2022, MIG/MAG kaynağı ile birleştirilen S700 MC yüksek dayanımlı yapı çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Kalemtaş, A., 2023, *Guide to citing Internet sources* [online], https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/metalurji/Dosyalar/Ayse_Kalemtaş_Malzeme_Bilimi_X6.pdf [Ziyaret Tarihi: 24 Aralık 2023]
- Karagöz, A., 2010, Ark kaynağında akım türü ve kutup farklılığının kaynak dikiş geometrisine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Karakoç, S., 2012, Çeliklere gazaltı kaynağının uygulanması ve kaynağa etki eden parametreler, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay.
- Katherasan, D., Sathiya, P., & Raja, A., 2013, Shielding gas effects on flux cored arc welding of AISI 316L (N) austenitic stainless steel joints, *Materials & Design*, 45, 43–51.
- Kaya, Y., Çayırhan, G., Bökü, M., & Kahraman, N., 2020, Paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çelik malzemelerin MIG kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin incelenmesi, *NWSA Academic Journals*, 15(2), 89-99.

- Koç, M., 2009, Elektrik ark kaynağında kaynak gazı ve dumanının kaynak parametrelerine göre analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Kul, A., 2009, Endüstriyel kaynak robotlarında kullanılan kaynak parametrelerinin kaynak kalitesine ve nüfuziyetine etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- Küpeli, G., 2008, Alaşımız çeliklere robotik gazaltı kaynağının uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Li, D., Yang, D., Luo, X., & Zhang, G., 2018, Effects of shielding gas on GMAW of 10Ni5CrMoV HSLA steel using high Cr-Ni austenitic wire, *Journal of Materials Processing Technology*, 259, 116–125.
- Liao, M. T., & Chen, W. J. (1998). The effect of shielding-gas compositions on the microstructure and mechanical properties of stainless steel weldments, *Materials Chemistry and Physics*, 55(2), 145–151.
- Liu, Z., Fan, C., Yang, C., Ming, Z., Lin, S., & Wang, L., 2023, Dissimilar welding of high nitrogen stainless steel and low alloy high strength steel under different shielding gas composition: Process, microstructure and mechanical properties, *Defence Technology*, 27, 138–153.
- Mercan, E., Ayan, Y., & Kahraman, N., 2020, Gazaltı metal ark kaynak (GMAK) yöntemiyle birleştirilen AA5754 ve AA6013 alüminyum alaşımlarının mikro yapı ve mekanik özellikleri, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 82–87.
- Özkan, E., 2019, Kaynak sonrası S355J2N yapı çeliğinde oluşan gerilmeleri gidermek için uygulanan ısıtma işleminin etkilerinin tahribatlı-tahribatsız muayene yöntemleriyle belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ.
- Özturan, A. B., 2022, Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerinin gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne.
- Şenöz, K. M., 2015, Gemi inşaatında kullanılan 316L paslanmaz çeliklerin metal ark kaynağındaki duman emisyonlarının hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Şık, A., 2002, Otomobil saclarının MIG/ MAG kaynağında gaz karışımlarının bağlantının mekanik özelliklerine etkisi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Şık, A., 2007, MIG/MAG kaynağı ile kaynatılan çelik yapılarda koruyucu gaz karışımlarının mekanik özelliklere etkilerinin araştırılması*, *Tuys Trakya Univ J Sci*, 8(1), 55–60.
- Şık, A., 2007, MIG/MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen çelik malzemelerde ilave tel türleri ve koruyucu gaz karışımlarının eğmeli yorulma ömürlerine etkilerinin araştırılması, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 22(4), 769–777.
- SSAB, 2023, *Guide to citing Internet sources* [online], <https://www.ssab.com/tr-tr/markalar-ve-urunler/strenx/urun-teklifi/700/mc-d-e> [Ziyaret Tarihi: 24 Aralık 2023]

- Tao, Y., Liu, Y., Liu, Y., Ren, H., Zhao, J., & Sun, Q., 2023, A novel approach to optimize weld formation and regulate interfacial microstructure in TC4/304SS dissimilar arc welding by active hybrid shielding gas, *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 1193–1207.
- Toprak Şenol, H., 2020, Zeki sistemler ile ark kaynağı elektrotlarındaki kaynak parametrelerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Muğla.
- Türk, M., 2021, S355J0 çeliğinin MAG yöntemiyle birleştirilmesinde koruyucu gaz ve kaynak telinin mukavemete, dikiş geometrisine etkisi ve mikroyapı karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya.
- Ulaştı, E., 2018, Termomekanik haddeleme ile S700MC kalite çeliklerin üretimi ve üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Ünlütürk, G. F., 2023, S700 MC çeliğinin robotik kaynak sistemleriyle uygun ısı girdilerinin hesaplanarak mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi ve otomasyona uyarlanması, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak.
- Uzun, Y., 2014, Konvansiyonel ve sinerjik kaynak makinaları ile masif ve özlü tel ile kaynak edilmiş St 37 çeliğin kaynak dikişlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- Yegen, E., 2023, *AS SG2 Deney Raporu*, Askaynak Kaynak Tekniği Sanayi, Kocaeli.
- Yüksekkaya, U., 1996, Çeliklerin kaynağında kaynak kabiliyeti- ısı işlem ilişkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Zhao, Y., Shi, X., Yan, K., Wang, G., Jia, Z., & He, Y., 2018, Effect of shielding gas on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 262, 382–391.