



**ASTAR KAPLAMA UYGULAMALARININ S235 JR MALZEMELERİN KAYNAK
KABİLİYETİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ali AKAY

**DOKTORA TEZİ
METAL EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ali AKAY

25 / 08 / 2021

ASTAR KAPLAMA UYGULAMALARININ S235 JR MALZEMELERİN KAYNAK KABİLİYETİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Ali AKAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2021

ÖZET

Bu çalışmada farklı kalınlıklarda kaplamalı (imalat ön astarı) ve kaplamasız S235JR yapı çeliğinin robotik MAG ve tozaltı kaynak yöntemleri ayrı ayrı olarak uygulanmış ve bu uygulamaların malzemelerin mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Deney çalışmaları esnasında birinci grup malzemeler olduğu gibi, ikinci grup malzemeler Sa 2 ½ derecesinde kumlanmış, diğer gruptaki malzemelerde 25 µm, 50 µm ve 75 µm kaplama uygulanmıştır. Yüzey durumları ve kaplama kalınlığı değişken parametreler olarak seçilmiştir. Radyografi filmleri incelemeleri sonrası yüzey durumlarının kaynak bağlantısı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Araştırma sonunda değişen kaplama kalınlıklarının kaynakta hatalara sebep olduğu görülmüştür. Kaplama kalınlıklarının, mekanik özellikler üzerinde kısmen etkili olduğu ve numunelerin tümünde sertlik değerleri en yüksek kaynak bölgesinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Çekme ve eğme sonuçlarında, sadece 75 µm kaplama uygulanmış, robotik MAG ve tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılmış malzeme gruplarının bazılarında da uygun olmayan sonuçlara rastlanmıştır. Çentik testinde ise sadece 75 µm kaplama uygulanmış, tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılmış malzeme gruplarında uygun olmayan benzer sonuçlarla karşılaşmıştır. Yapılan kopma yüzeyi, SEM ve EDS çalışmalarıyla sonuçlar desteklenmiştir.

Bilim Kodu : 91511
Anahtar Kelimeler : Kumlama, yüzey kaplama, MAG kaynağı, tozaltı kaynağı,
Sayfa Adedi : 199
Danışman : Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA

THE INVESTIGATION OF INFLUENCES ON PRIMER COATING PROCESSES ON
WELDABILITY OF S235 JR MATERIAL

(Ph. D. Thesis)

Ali AKAY

GAZI UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2021

ABSTRACT

In this study, robotic MAG welding and submerged arc welding methods were separately applied for coated (shopprimer) and uncoated S235JR structural steel with different thicknesses and the effects of these applications on the mechanical and microstructure properties of the materials were investigated. In the experimental studies, the first group materials were used as they are, second group materials were sandblasted at Sa 2 ½ degree, to the materials they are in the other group 25 µm, 50 µm and 75 µm coatings were applied. Surface conditions and coating thicknesses were selected as the variable parameters. With the examination of the radiography films, it was observed that the surface conditions affects the weld joint. As a result of the study, it was observed that altered coating thicknesses caused defects in the welding zone. It was determined that the coating thicknesses partially affect the mechanical properties and the highest hardness values occur in the weld metal zone in the all samples. According to the tensile and bending test results, unsuitable results were just obtained in the material groups coated as 75 µm thickness and welded by MAG and submerged welding methods. As a result of the impact tests unsuitable results were just obtained in material groups welded by submerged arc welding method and coated as 75 µm thick. The results were verified by the surface fracture, SEM and EDS studies.

Science Code : 91511

Key Words : Sanding, surface coating, MAG welding, submerged arc welding,

Page Number : 199

Supervisor : Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA

TEŞEKKÜR

Bu doktora tezi büyük güçlüklerle uzun bir sürede tamamlandı. Bunun için öncelikle, bu önsözün satırlarını yazmama katkı sağlayan herkese teşekkür ediyorum.

Kendisiyle çalışmaya başladığımızdan beri, bana her konuda destek olan, örnek kişiliği ve son derece mütevazı tavrı ile hocam Sayın Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA'ya derin teşekkürlerimi arz ederim.

Doktora eğitimim süresince, her türlü yardımını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan, arkadaşlarım Dr. Uğur ARABACI, Doç.Dr. Hanefi ÇİNİCİ ve Doç.Dr. Hakan GÜRÜN'e teşekkürlerimi sunarım.

Yönlendirmeleriyle daima yol gösteren Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e ve tezimin ortaya çıkmasında çok büyük katkısı ve emeği olan her türlü yardımı yönlendirmeyi esirgemeyen çok kıymetli hocam Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a teşekkürlerimi arz ederim.

Malzeme temini ve çalışmalar konusunda desteklerini esirgemeyen çalıştığım BİRİKİM MÜHENDİSLİK VE ENDÜSTRİYEL YÜKLENİM LTD ŞTİ ailesine ve Genel Müdürümüz Atilla ATASOY'a teşekkürlerimi arz ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, manevi desteklerini her zaman hissettiğim aileme, hayatımı anlamlandıran kızım Neris'e sonsuz teşekkür ederim. Son olarak çok sevgili eşim Nuran'a gönülden teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. Kaynağın Tanımı ve Sınıflandırılması.....	5
2.1.1. Kaynağın tanımı.....	5
2.1.2. Kaynağın tarihçesi.....	5
2.1.3. Kaynağın sınıflandırılması.....	6
2.2. Gazaltı Kaynağı.....	8
2.2.1. Yöntemin tanımı ve tarihçesi	8
2.2.2. Yöntemin avantajları.....	9
2.2.3. Yöntemin olumsuz yönleri.....	9
2.2.4. Yöntemin sınıflandırılması	10
2.2.5. Uygulama bakımından sınıflandırma.....	10
2.2.6. Kaynak donanımı	11
2.2.7. Yöntemin Çalışma Prensibi	21
2.3. Kaynak Yöntemlerinde Otomasyon ve Mekanizasyon.....	40

Sayfa

2.3.1. Kaynak makinelerinde mekanik ve elektromekanik donanımlar.....	40
2.3.2. Kaynak robotları	41
2.3.3. Manuel ve robotik kaynak usullerinin mukayesesi.....	43
2.3.4. Robotik kaynak ekonomisi.....	44
2.4. Tozaltı Kaynağı.....	44
2.4.1. Tozaltı kaynak yönteminin özellikleri	45
2.4.2. Yöntemin çalışma prensibi.....	46
2.4.3. Avantajları.....	46
2.4.4. Dezavantajları	46
2.4.5. Uygulama alanları.....	47
2.4.6. Çalışma tekniği	47
2.4.7. Tozaltı kaynak metodu çeşitleri	49
2.4.8. Tozaltı kaynağında dikişin formunu etkileyen faktörler.....	52
2.4.9. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan ilave teller.....	53
2.4.10. Tozaltı kaynağındaki kaynak tozları	53
2.5. Kaynak Hataları	54
2.5.1. Çatlaklar.....	55
2.5.2. Gözenekler	57
2.5.3. Yanma oluşu-Kenar yanığı (Undercut)	59
2.5.4. Yetersiz ergime	60
2.5.5. Nüfuziyet azlığı.....	61
2.5.6. Kalıntılar	62
2.5.7. Sıçramalar	63
2.5.8. Hatalı kaynak boyutu ve şekli.....	64

	Sayfa
2.6. Yüzey ve Kaplama Uygulamaları	64
2.6.1. Kumlama	66
2.6.2. Boya	77
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	93
3.1. Malzeme	93
3.2. Kumlama İşlemleri	94
3.3. İmalat Ön Astar İşlemleri	95
3.4. Kaynak İşlemleri	97
3.4.1. MAG kaynağı	97
3.4.2. Tozaltı ark kaynağı	100
3.5. Karakterizasyon İşlemleri	103
3.5.1. Görsel muayene	103
3.5.2. Radyografik muayene	103
3.5.3. Makro/Mikroyapı incelemeleri	104
3.5.4. SEM/EDS incelemeleri	105
3.5.5. Sertlik çalışmaları	106
3.5.6. Çekme testi	107
3.5.7. Eğme testi	108
3.5.8. Darbe testi	109
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR	111
4.1. Görsel Muayene	112
4.1.1. MAG kaynaklı numunelerin görsel muayenesi	112
4.1.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin görsel muayenesi	113
4.1.3. Görsel muayene genel değerlendirme	114

	Sayfa
4.2. Makroyapı İncelemeleri	116
4.2.1. MAG kaynaklı numunelerin makroyapı incelemeleri	116
4.2.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin makroyapı incelemeleri	117
4.2.3. Makroyapı genel değerlendirme	118
4.3. Mikroyapı Çalışmaları	118
4.3.1. MAG kaynaklı numunelerin mikroyapı çalışmaları	120
4.3.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin mikroyapı çalışmaları	129
4.3.3. Mikroyapı genel değerlendirme	137
4.4. SEM, EDS Çalışmaları	139
4.4.1. MAG kaynaklı numunelerin SEM, EDS çalışmaları	140
4.4.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin SEM, EDS çalışmaları	142
4.4.3. SEM ve EDS genel değerlendirme	143
4.5. Radyografik Muayene	144
4.5.1. MAG kaynaklı numunelerin radyografik muayenesi.....	144
4.5.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin radyografik muayenesi.....	147
4.5.3. Radyografik muayene genel değerlendirme	149
4.6. Sertlik Testi	151
4.6.1. MAG kaynaklı numunelerin sertlik testi.....	151
4.6.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin sertlik testi.....	153
4.6.3. Sertlik testi genel değerlendirme.....	154
4.7. Çekme Testi	155
4.7.1. MAG kaynaklı numuneleri çekme testi	156
4.7.2. Tozaltı kaynaklı numuneleri çekme testi	162
4.7.3.Çekme testi genel değerlendirme	169

	Sayfa
4.8. Eğme Testi	171
4.8.1. MAG kaynaklı numunelerin eğme testi	171
4.8.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin eğme testi	173
4.8.3. Eğme testi genel değerlendirme	174
4.9. Çentik Darbe Testi	175
4.9.1. MAG kaynaklı numunelerin çentik darbe testi	175
4.9.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin çentik darbe testi	177
4.9.3. Çentik darbe testi genel değerlendirme	180
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	183
5.1. Sonuçlar	183
5.2. Öneriler	185
KAYNAKLAR	187
ÖZGEÇMİŞ	198

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Gazaltı kaynağının sınıflandırılması.....	10
Çizelge 2.2. Uygulama bakımından sınıflandırma	11
Çizelge 2.3. Su ve hava soğutmalı torçların avantajları ve dezavantajları	14
Çizelge 2.4. Gaz karışım çizelgesi	21
Çizelge 2.5. Ark çeşitleri ve damlacık geçişi.....	26
Çizelge 2.6. MIG/MAG kaynağında metal transferlerine genel bakış	31
Çizelge 2.7. MIG/MAG temas tüpü ölçüleri	34
Çizelge 2.8. Koruyucu gazın etkileri	37
Çizelge 2.9. Karbon çeliği MAG ark kaynağında gaz seçimi.....	39
Çizelge 2.10. Tozaltı kaynağında işlem parametrelerinin dikiş boyutuna etkisi	49
Çizelge 2.11. Kumlama dereceleri.....	69
Çizelge 3.1. S235 JR malzemesinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi.....	93
Çizelge 3.2. Kumlama yüzey pürüzlülük dereceleri.....	95
Çizelge 3.3. Teorik imalat ön astar kimyasal kompozisyonu (%)	96
Çizelge 3.4. İmalat ön astar kalınlık değerleri	97
Çizelge 3.5. MAG robot kaynak makinesi özellikleri	97
Çizelge 3.6. Kullanılan kaynak teli özellikleri.....	98
Çizelge 3.7. Kaynak parametreleri.....	98
Çizelge 3.8. Kaynak sarf malzemesi.....	98
Çizelge 3.9. Tozaltı kaynak makinesi özellikleri.....	100
Çizelge 3.10. Tozaltı kaynak tozu özellikleri	100
Çizelge 3.11. Tozaltı kaynak teli özellikleri	101
Çizelge 3.12. Tozaltı kaynak parametreleri	101
Çizelge 4.1. MAG kaynağı ile kaynatılan numunelerin çekme sonuçları	157

Çizelge**Sayfa**

Çizelge 4.2. Tozaltı kaynağı ile kaynatılan numunelerin çekme sonuçları	163
---	-----



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Karbon arkı ile yapılan kaynaklar.....	5
Şekil 2.2. Çıplak elektrot ile yapılan kaynaklar	5
Şekil 2.3. MIG/MAG kaynağının çalışma prensibi	11
Şekil 2.4. MIG/MAG kaynak donanımı alt parçaları	12
Şekil 2.5. Çeşitli MIG/MAG kaynak donanımları.....	13
Şekil 2.6. MIG/MAG kaynak torcu	13
Şekil 2.7. MIG/MAG kaynak torcu uç kısmı.....	14
Şekil 2.8. Torç boyları	15
Şekil 2.9. Tel sürme tertibatı.....	16
Şekil 2.10. Tel sürme tertibatı.....	16
Şekil 2.11. Tel sıkışması	16
Şekil 2.12. Sabit akımlı güç ünitelerinde gerilim-akım ilişkisi	17
Şekil 2.13. Sabit gerilimli güç ünitelerinde, gerilim-akım ilişkisi.....	18
Şekil 2.14. Şamandıra ile gaz miktarı ayarı	19
Şekil 2.15. Manometre ile gaz miktarı ayarı.....	19
Şekil 2.16. MIG/MAG kaynağının çalışma prensibi	22
Şekil 2.17. Yüzey gerilim kuvvetinin şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.18. Anod-Katod elektron hareketi	23
Şekil 2.19. Tel elektrotta oluşan metal damlasını etkileyen kuvvet ve yönleri	24
Şekil 2.20. Damlacık kopuşunun (pinch-effect) temsili gösterimi	25
Şekil 2.21. Damlacık çeşitleri	26
Şekil 2.22. Kısa ark metal iletimi.....	27
Şekil 2.23. Kısa ark çalışma aralığı	27
Şekil 2.24. Uzun ark çalışma aralığı	28

Şekil	Sayfa
Şekil 2.25. Sprey ark çalışma aralığı	29
Şekil 2.26. Darbeli akım ile damla oluşumu ve damların kaynak banyosuna geçişi.....	29
Şekil 2.27. Darbe frekansının dikiş profiline etkisi	30
Şekil 2.28. Kutuplamanın dikiş formuna ve kaynak özelliklerine etkileri.....	32
Şekil 2.29. Ark boyunun değişimi	33
Şekil 2.30. Kaynak hızının kaynak dikişine etkisi	33
Şekil 2.31. MIG/MAG temas tüpü.....	34
Şekil 2.32. Temas tüpünün kaynağa etkileri.....	35
Şekil 2.33. Torç hareket ve çalışma açısı.....	35
Şekil 2.34. Torç ilerletme yöntemleri	36
Şekil 2.35. Pozisyonlar ve ilerlemede torç hareket şekilleri.....	36
Şekil 2.36. Gazların miktarını belirleme.....	38
Şekil 2.37. Farklı gazların nüfuziyet üzerine etkisi	38
Şekil 2.38. MAG tellerinin kesit görünüşü	40
Şekil 2.39. Robot ark kaynağı istasyonu.....	43
Şekil 2.40. İnce saclar için birleştirme biçiminden örnekler	49
Şekil 2.41. Band tozaltı kaynak usulü.....	51
Şekil 2.42. Kızgın tel ile tozaltı kaynak usulü	52
Şekil 2.43. Tozaltı kaynak dikiş kesitinin tetkiki ve iç-dış formu	53
Şekil 2.44. Çatlaklar.....	55
Şekil 2.45. Gözenekler.....	57
Şekil 2.46. Yanma olukları (under cut).....	59
Şekil 2.47. Ergime yetersizlikleri.....	60
Şekil 2.48. Ergime yetersizlikleri.....	61

Şekil	Sayfa
Şekil 2.49. Kalıntılar	62
Şekil 2.50. Sıçrantılar	63
Şekil 2.51. Çeşitli kaynak hataları	64
Şekil 2.52. Manuel kumlama	67
Şekil 2.53. Yüzey pürüzlülüğü	70
Şekil 2.54. Yaş ve kuru film kalınlığı (% 60 hacimsel katıya sahip bir boya için)	85
Şekil 2.55. Çapraz kesme testi	89
Şekil 3.1. MAG ile kaynatılan numune ölçüleri	99
Şekil 3.2. Tozaltı kaynak numunesi ölçüleri.....	102
Şekil 3.3. Kaynak numunesi ara açıklık ölçüsü ve seramik altlık	102
Şekil 3.4. TS EN ISO 4136'ya göre çekme numunesi ölçüleri	107
Şekil 3.5. TS EN ISO 5173'e göre eğme numunesi ölçüleri	108
Şekil 3.6. TS EN ISO 9016'ya göre çentik testi numunesi ölçüleri	109
Şekil 3.7. TS EN ISO 9016'ya göre çentik testi numunesi ölçüleri	110
Şekil 4.1. Mikroyapı fotoğraflarının çekildiği noktalar	119
Şekil 4.2. SEM fotoğraflarının çekildiği nokta.....	140
Şekil 4.3. M1 numunesine ait kaynak metali genel EDS grafiği.....	141
Şekil 4.4. M5 numunesine ait kaynak metali genel EDS grafiği.....	141
Şekil 4.5. T1 numunesine ait kaynak metali SEM fotoğrafı.....	143
Şekil 4.6. Kaynak metali kesiti üzerindeki sertlik ölçümlerinin alındığı noktalar.....	151
Şekil 4.7. M grubu numunelerine ait sertlik grafiği.....	152
Şekil 4.8. T grubu numunelerine ait sertlik grafiği.....	153
Şekil 4.9. M grubu numunelerine ait çentik darbe sonuçları	176
Şekil 4.10. T grubu numunelerine ait çentik darbe sonuçları	178

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Tozaltı kaynak makinası	45
Resim 2.2. Tandem tozaltı	50
Resim 2.3. Paralel tozaltı	50
Resim 2.4. Otomatik kumlama	68
Resim 2.5. Shot ile kumlama ile oluşan yüzey	71
Resim 2.6. Grid ile kumlama ile oluşan yüzey	71
Resim 2.7. Çelik bilye ve Grit	72
Resim 2.8. Metalik olmayan aşındırıcılar	73
Resim 2.9. Yüzey pürüzlülüğü karşılaştırma plakası.....	74
Resim 2.10. Yüzey pürüzlülük derinlik ölçüm cihazı.....	75
Resim 2.11. Replika band ile yüzey pürüzlülük ölçümü	75
Resim 2.12. Toz ölçüm kiti.....	76
Resim 2.13. Kumlanmış yüzeyde tuz ölçümü	76
Resim 2.14. Boya uygulama alet ve makinaları	80
Resim 2.15. Örtücülük testi örnek uygulama.....	84
Resim 2.16. Grindometre aparatı	85
Resim 2.17. Yaş film tarağı	86
Resim 2.18. Spektrofotometre	86
Resim 2.19. Glossmetre	87
Resim 2.20. Sertlik ölçme cihazı	87
Resim 2.21. Kalem ile sertlik ölçümü.....	88
Resim 2.22. Yapışma Testi-Pull Off.....	88
Resim 2.23. Çapraz kesme testi	89
Resim 2.24. Konik bükme	90

Resim	Sayfa
Resim 2.25. Pig (Took) cihazı	91
Resim 2.26. Boya ölçüm cihazları	91
Resim 2.27. Kıvılcım (holiday) test ekipmanı	92
Resim 3.1. Kumlanmış malzeme fotoğrafları, a) iğne uçlu ile kumlama ölçümü, b) kumlama mukayese plakası, c) yüzey pürüzlülük ölçümü, d) kumlama yüzey mukayese fotoğrafı	94
Resim 3.2. a) Malzemelerin astar uygulaması sonrası, b) Uygulama sonrası astar kalınlık ölçüm fotoğrafı	96
Resim 3.3. Numunelerin MAG kaynak uygulaması öncesi ve sonrası fotoğrafları	99
Resim 3.4. Numunelerin tozaltı kaynak uygulaması öncesi ve sonrası fotoğrafları.....	102
Resim 3.5. Eresco 42 MF2 radyografi cihazı	104
Resim 3.6. Leica DM 4000 M optik mikroskobu	105
Resim 3.7. Jeol 6064 LV SEM cihazı.....	106
Resim 3.8. Novotest sertlik cihazı	106
Resim 3.9. Alşa 30 ton MCK üniversal çekme cihazı	108
Resim 3.10. Alşa 30 ton MCK eğme test cihazı	109
Resim 3.11. Darbe test cihazı	110
Resim 4.1. S235 JR yapı çeliğinin robotik MAG kaynak sonrası kep ve kök fotoğrafları	113
Resim 4.2. S235 JR yapı çeliğinin tozaltı kaynağı sonrası kep ve kök fotoğrafları	114
Resim 4.3. Robotik MAG kaynak yöntemi ile kaynatılmış parçaların makroyapı fotoğrafları a) M1, b) M2, c) M3, d) M4, e) M5 numuneleri	116
Resim 4.4. Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılmış parçaların makro fotoğrafları a) T1, b) T2, c) T3, d) T4, e) T5 numuneleri	117
Resim 4.5. S235 JR yapı çeliğine ait ana malzeme mikroyapı fotoğrafı	119
Resim 4.6. M1 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge.....	120

Resim	Sayfa
Resim 4.7. M2 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge.....	122
Resim 4.8. M3 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge.....	124
Resim 4.9. M4 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge.....	126
Resim 4.10. M5 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge.....	128
Resim 4.11. T1 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge.....	130
Resim 4.12. T2 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge.....	131
Resim 4.13. T3 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge.....	133
Resim 4.14. T4 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge.....	134
Resim 4.15. T5 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge.....	136
Resim 4.16. S235 JR yapı çeliğine ait ana malzeme SEM fotoğrafı	139
Resim 4.17. M1 numunesine ait kaynak metali SEM fotoğrafı.....	140
Resim 4.18. T1 numunesine ait kaynak metali SEM fotoğrafı.....	142
Resim 4.19. Robotik MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi radyografi fotoğrafları a) M1, b) M2, c) M3, d) M4 ve e) M5.	145
Resim 4.20. Tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak beölgesi radyografi fotoğrafları a) T1, b) T2, c) T3, d) T4 ve e) T5.	148
Resim 4.21. Ana malzeme a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri	156
Resim 4.22. M1 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi	158
Resim 4.23. M2 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi	159

Resim	Sayfa
Resim 4.24. M3 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi	160
Resim 4.25. M4 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi	161
Resim 4.26. M5 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi	162
Resim 4.27. T1 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi	164
Resim 4.28. T2 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi	165
Resim 4.29. T3 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi	166
Resim 4.30. T4 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi	167
Resim 4.31. T5 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi	168
Resim 4.32. M grubu numunelerine ait eğme test sonucu	172
Resim 4.33. T grubu numunelerine ait eğme test sonucu	173
Resim 4.34. M grubu numunelerine ait çentik darbe testi kırılma görüntüsü.....	177
Resim 4.35. T grubu numunelerine ait çentik darbe testi kırılma görüntüsü.....	179

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

A	Amper
Ar	Argon
C	Derece
cm	Santimetre
CO₂	Karbondioksit
CO	Karbonmonoksit
Dak	Dakika
Fe	Demir
He	Helyum
I	Akım
Lt	Litre
Kg	Kilogram
m	Metre
m²	Metrekare
m³	Metreküp
mm	Milimetre
O₂	Oksijen
V	Volt
µm	Mikrometre
µs	Mikronsimens
J	Joule

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASTM	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
ATÜ	Atmosfer Teknik Üst Basınç
AWS	Amerikan Kaynak Standartları

Kısaltmalar**Açıklamalar**

EN	Avrupa Standartları
ISO	Uluslararası Standartlar Örgütü
MAG	Metal Aktif Koruyucu Gazlı Elektrik Ark Kaynağı
MIG	Metal Asal Koruyucu Gazlı Elektrik Ark Kaynağı
PA	Yatay ve Oluk Pozisyonu
PB	Yatay Köşe Pozisyonu
RAL	Renk Eşleştirme Sistemi
TIG	Tungsten Asal Koruyucu Gazlı Elektrik Ark Kaynağı
TS	Türk Standartları
ITAB	Isıdan Etkilenen Bölge

1. GİRİŞ

İmalat sanayinde kaynak yöntemleri ile birleştirilen malzemelerde kaynak sonrası kaynağın TS EN ISO 5817 kabul standartlarını karşılayacak şekilde kaynatılabilmesi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler, kaynakçı, kaynak yöntemi, malzeme, kullanılan ilave malzeme, soğuma hızı, üst yüzey durumu vb bağlıdır. Bu çalışmada üst yüzey işlemlerinin kaynak kalitesine etkisi araştırılacaktır.

Malzemenin üretimi sırasında yüzeyde meydana gelen hadde artıkları ve yine malzemenin üretim sonrası taşıma ve depolama esnasında oluşan korozyon, imalatla yapılacak olan kaynakları olumsuz etkilemektedir. Bu etkiyi en az seviyeye indirmek için kumlama ve ön imalat astar boya (shopprimer) uygulamaları yapılmaktadır.

İmalat ön astarlarının uygulanma amacı, çelik malzemelerin üretim aşamasında ve ilk boya sistemi uygulanmadan önce depolama esnasında yapısal bileşenleri korumaktır. Bir imalat ön astarının film kalınlığı normal olarak 20 - 25 μm 'e olmalıdır. Bu kalınlık düzgün test panelleri için belirtilmiştir. Ön imalat astarı ile kaplanmış çelik malzemeler ve yapısal parçalar kaynak yapılabilmektedir [1].

A. M. Berendsen çalışmasında ön imalat astarlarının uygulanması gerektiren durumları aşağıda sıralamıştır.

- Geminin inşası veya açık denizde yapılan imalatlar sırasında korozyona karşı yeterli koruma sağlar.
- 6-9 aylık dönemler boyunca imalat sırasında açıkta malzemelerin tam korunması, ancak çinko bakımından zengin prefabrik astarların kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir.
- Kaynak ve kesme hızı üzerinde çok az etkiye sahip veya hiç etkisi yoktur ve tercihen otomatik kaynak işlemleri için uygundur.
- Kaynakların homojenliği ve mukavemeti üzerinde çok az etkisi vardır veya hiç etkisi yoktur.
- Çeliğin bükülmesi dahil sert kullanımlara dayanabilir.
- Kaynak ve alevle kesme sırasında zararlı veya zehirli dumanlar oluşturmaz.
- Son boya sistemi için temel olarak uygun olur [2].

Yapılan bu uygulamaların bir takım olumsuz etkileri olmasına rağmen bunlar;

- Uygun kalınlıkta astar boya uygulanamaması,
- İmalatların nihai işlemleri sonrası kaynak bölgelerinin tekrar kumlanmasına ihtiyaç duyulması,

İmalat esnasında yapılan kaynakların içerdikleri kusur miktarlarının az olmasından dolayı yukardaki kısıtlamalar görmezden gelinmektedir.

Konuyla ilgili daha önce benzer paydada buluşabilecek çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, Richard Boekholt, Ön İmalat Astarlarının Mekanize veya Otomatik Kaynak İçin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkisi araştırılmıştır. Çalışmasında ön imalat astarlarının üretim jenerasyonlarından ve dezavantajlarından bahsetmiştir [3].

Blasko ve arkadaşlarının portatif kaynak robotları çalışmasında ön imalat (20 ± 2 mikron kalınlık) ile kaynakları gözlemlendi. Ön imalat astarlı malzemelerin robot ile kaynak yapılırken daha yavaş kaynak hızları ve salınım hareketinin gerekli olduğu kaydedildi. Malzeme üçten fazla kaynak tabakası gerektirmedikçe, pasolar arası temizlik gerekli olmayacağını belirtti [4].

T. Solic ve arkadaşları Shopprimerin Etkilerinin Kaynak Bağlantıları Üzerine Etkilerinin Testleri hakkında yapılan çalışmalarda kaynağın mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin test edilmesini sağlamak için yapı çeliklerinin yüzeyinin hazırlanması ve iki bileşenli epoksi ön imalat astarına atıfta bulunarak, geçici korumanın uygulanması işlemini sunmaktadır. Kaynak sonrası kaynakların mekanik özelliklerinin test edilmesi, koruyucu kaplamanın kaynaklı eklemin kalitesi üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığını ifade etmiştir [5].

Ancak astar boya uygulamaları sonrası yapılan kaynaklarda görülen aşağıdaki kusurlar, astar boyalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Gözenek
- Sıçranti
- Nufuziyet azlığı

Bu konudaki şüpheleri destekleyecek bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, D'Addona ve arkadaşları, gemi inşa endüstrisi için demir plakaların kaynak işlemi öncesinde astarın lazerle çıkarılması çalışmasında kaplamaların çıkarılma sebebi ve yönteminden bahsetmiştir [6].

Ahsan ve arkadaşları, soğuk metal transferi çinko kaplamalı çelikten GMAW kaynağı çalışmasında ısı girdisine bağlı olarak kaynakta oluşan gözeneklerden bahsetmiştir [7].

Bu kusurlar yapılan kaynaklı imalatın mukavemet değerlerini olumsuz etkilemekte olup, yapılan tahribatlı ve tahribatsız testler ile tespit edilen kusurlar ilave işlemlerle ortadan kaldırılmakta ve kaynağın talep edilen mukavemet değerlere ulaşması sağlanmaktadır.

İmalat öncesi malzemeler üzerinde bulunan hadde artıkları ve korozyonun uzaklaştırılarak, malzemenin kaynak uygulamalarına uygun hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Kumlama ile kaynak uygulamalarına uygun gelen malzemenin imalat süresince bu özelliklerinin korunması istenmektedir. İmalat süresinin uzun sürmesi ve atmosferik ortamın korozyonu desteklemesinden dolayı kumlanmış malzemelerin korunması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla kumlamanın hemen sonrasında uygulanan imalat ön astarları (shopprimer), malzemenin korozyona uğramasını engellemektedir. Ancak imalat ön astarlarının MAG ve Tozaltı kaynak kabiliyeti üzerine etkileri yapılacak deneysel çalışmalarla ortaya konulacaktır. Deneysel çalışma sonucunda, imalat ön astarlarının etkileri bilimsel yönden araştırılarak sonuçları değerlendirilecektir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kaynağın Tanımı ve Sınıflandırılması

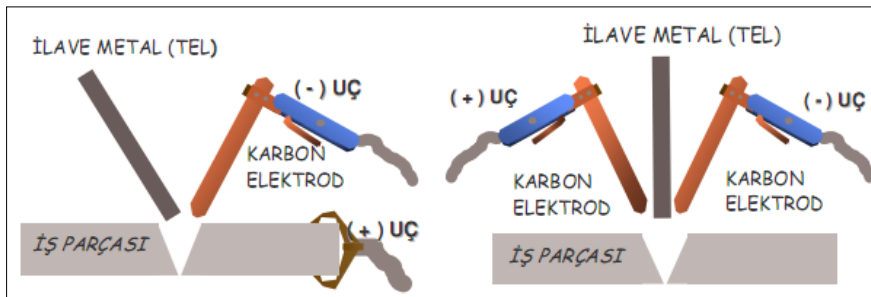
2.1.1. Kaynağın tanımı

Kaynak birleştirilecek malzemelerin türüne dikkate alınarak, metal ve plastik malzemelerin kaynağı olarak ikiye ayrılır.

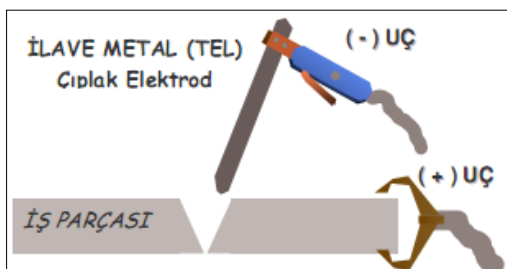
Metalik malzemeleri ısı, basınç ve yahut her ikisini birden kullanılmasıyla ve benzer türden ve ergime sıcaklıkları benzer veya yakın olan, bir malzeme ilave ederek veya etmeyerek yapılan birleştirme işlemine kaynak adı verilir. İki parçanın birleştirilme esnasında ek bir malzeme kullanılırsa, bu malzemeye ilave metal denmektedir [7].

2.1.2. Kaynağın tarihçesi

Kaynak, 1880-1885 yıllarında Coffin, Bernardo tarafından karbon elektrotların kullanılması ile oluşturulan ark sayesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.1. Karbon arkı ile yapılan kaynaklar



Şekil 2.2. Çıplak elektrot ile yapılan kaynaklar

1890–1892 yılları arasında Coffin ve Slavianoff örtüsüz tel metal ark yöntemini keşfetmişlerdir. Buradaki problem ergimiş metal havzunun, atmosferin zararlı yönlerinden korumayı, elde edilen kaynak metalinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin istenen değerlerde olmamasına sebep olmasıdır.

Günümüzde kullandığımız örtülü elektrot kaynağının icadı Oscar Kjellberg tarafından 1907’de örtülü elektrot icat etmesi gerçekleşmiştir. 1909’da Arthur Strohmenger’in mavi asbestli kaynakta kullanılan ilave tel üzerine kaplaması ile yarı ark elektrotu üretilmesi, bu alandaki ilerlemeyi hızlandırmıştır [8, 9].

2.1.3. Kaynağın sınıflandırılması

Kaynak yöntemlerinin en basit haliyle sınıflara ayırmak mümkündür. Bu sınıflama, kaynaklanacak malzemelerin türüne, kaynak esnasında uygulanacak işlemlere ve kaynağın amacına göre yapılır.

Kaynağın uygulandığı malzeme türüne bakılarak yapılan sınıflandırma

Malzeme türüne bakılarak kaynak "Metal Kaynağı" ve "Plastik Malzeme Kaynağı" olarak ikiye gruba alınır.

Kaynağı amacına göre sınıflandırma

Kaynağın yapılış amacına göre, kaynak "Birleştirme Kaynağı" ve "Doldurma Kaynağı" şeklinde ikiye sınıfa ayrılır.

Birleştirme kaynağı

İki ve yahut daha fazla malzemeyi ayrılmaz şekilde bir bütün haline dönüştürmek amacıyla yapılan kaynaktır.

Doldurma kaynağı

Bir parçanın hacmindeki noksanlığı gidermek, hacmini büyütmek ya da aşındırıcı tesirlere karşı korumak amacıyla üzerine kaynak ile ilave malzeme ekleme işlemidir.

Kaynağın uygulanması bakımından sınıflandırılması

Kaynak uygulaması dört gruba ayrılmakta olup bunlar el kaynağı, yarı mekanize kaynak, tam mekanize kaynak ve otomatik kaynaktır.

El yapılan kaynak

Kaynak, sadece el vasıtası ile yönlendirilen bir kaynak aletiyle yapılır.

Yarı mekanize kaynak

Kaynak, el yerine kısmen mekanize olarak imal edilmiş aparatlarla yapılmasına denir.

Tam mekanize kaynak

Kaynak, tümüyle mekanize edilmiş bir alet ile gerçekleştirilir.

Otomatik kaynak

Kaynak uygulaması ve kaynatılacak iş parçasının değiştirilmesi gibi tam olarak mekanize edilmesi ile gerçekleştirilir.

Kaynağı işlemin türüne göre sınıflandırma

Ergitme kaynağı

Ergitme kaynağı, metalik malzemeyi sadece sıcaklığın etkisi ile bölgesel olarak ilave kaynak metali ile birlikte eritilmesi ile birleştirmesine denir [10].

Basınç kaynağı

Malzemenin, genellikle ilave metal kullanılmadan basınç altında local bir alanda ısıtılarak birleştirilmesi işlemidir [11].

Plastik malzemelerin kaynağı

Benzer ya da farklı türden sertleşmeyen termoplastik parçaları, ısı ve basınç kullanılması suretiyle benzer türden plastik ilavesi yaparak veya yapmadan birleştirilmesidir.

Lehimleme

Metalik malzemeleri eritmeden ve ergime derecesi daha düşük ek bir metalin yardımıyla birleştirilme işlemine lehimleme denir [8].

2.2. Gazaltı Kaynağı

2.2.1. Yöntemin tanımı ve tarihçesi

Kaynak bölgesine ilave gaz gönderilerek, gaz atmosferi oluşturulması sonucu yapılan ergitme kaynağı yöntemlerine gazaltı kaynak yöntemi denir [12].

Gazaltı kaynağı, birleştirme veya doldurma amacıyla yapılan kaynak için gerekecek ısıнын, ilave bir tel elektrot ile parça arasında oluşturulan ark ile yapılan bir kaynak usulüdür. Kaynak yapılan bölgeye sürekli olarak gönderilen masif haldeki ilave tel ve ana malzemenin ergimesiyle kaynak metalini oluşturulmaktadır. Kaynak banyosunu atmosferin olumsuz yönlerinden kaynak torcundan gelen gaz veya gaz karışımları ile korunmaktadır [9].

Gazaltı kaynak yönteminde koruyucu gaz ilk kez 1926'da Alexander yönteminde, kaynak dikişi metanol gaz ile korunmuş, daha sonra 1928 yılında geliştirilen ve hem bir elektrot hem de oksii-asetilen alevinin birlikte kullanıldığı Arcogen usulünde ise kaynak dikişinin havanın tesirinden korunması üfleçten çıkan alev ile sağlanmıştır.

Koruyucu gaz olarak soy bir gazın kullanımı fikri 1920'li yıllarda düşünölmeye bağlanmasına rağmen yaygın biçimde kullanıma geçilmesi 1930'lu yılları bulmuştur. O yıllarda örtölü elektrotlardaki büyük gelişmeler, uygulama kolaylığı, çeşitlilik ve örtölü elektrot yönteminin endüstri talep ve gereksinimlerini karşılaması, pahalı soy gaz korumalı gazaltı kaynak yöntemlerinin gelişmesini önlemiştir. Ancak, 1930 yılında ABD'de Henry M.Hobart ve Philip K.Dewers koruyucu gaz olarak soy bir gazın kullanımı patentini almış ve ilk defa 1940'da "Nortrop Aircraft Company Inc." firması tarafından uçak yapımında magnezyum ve alaşımlarının kaynağında helyum gazı kullanılmıştır. İnert gazlardan başka kaynak yerinden aktif bir koruyucu gazın kullanılması çalışmaları 1952 senesinde CO₂ gazının kullanımı ile başlamış olup günümüzde çeşitli inert ve aktif gazların kullanıldığı, donanım olarak benzer, fakat gaz karışımı olarak birbirinden ayrı gazaltı kaynak usulleri vardır [12].

2.2.2. Yöntemin avantajları

Gazaltı kaynak uygulmasının yaygın olarak kullanılmasının sebebi, sağladığı avantajlardan dolaydır.

Bu avantajlar aşağıda verilmiştir:

- Ergiyen elektrotla, metal ve alaşımların birçoğunun kaynağında kullanılan kaynak usulüdür.
- Sınırlı uzunlukta elektrod kullanımı gibi sınırlarlandırması olan elektrik ark kaynağındaki problemi ortadan kaldırmıştır.
- Tozaltında yöntemi ile kaynak yapılamayan pozisyonlarda, kaynak sağlanır.
- Elektrik ark kaynağına nazaran kaynak esnasında yığılan metal hızı oldukça yüksektir.
- Kaynak hızı elektrik ark kaynağına göre daha çok fazladır.
- Tel beslenmenin sürekli olarak yapılması sebebiyle ara vermeden uzun kaynak dikişleri elde edilebilir [13].

2.2.3. Yöntemin olumsuz yönleri

Bütün kaynak yöntemlerinin üstünlükleri ve kısıtlamalarının olması gibi gaz altı kaynak yönteminin de bir takım kısıtlamaları vardır. Bazı çok önemli dezavantajlara rağmen gazlatı

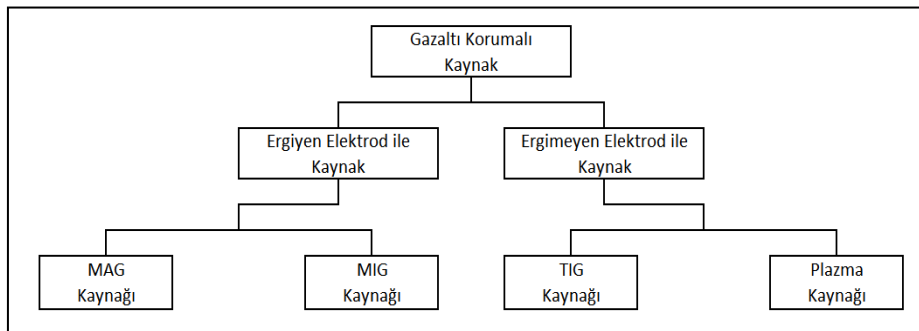
kaynak yöntemi tercih sebebi olabilmektedir. Kısıtlamaların başlıcaları aşağıda sıralanmıştır:

- Elektrik arka kaynak usûne nazaran kaynak donanımı daha kompleks, fiyatı daha yüksek ve bir yerden başka bir yere taşınıp kullanılması daha güçtür.
- Gazaltı kaynak torcunun daha büyük ve ağır oluşu sebebiyle ulaşılması sıkıntı doğrabilecek yerlerde kullanımı zor olmaktadır.
- Kaynak esnasında kullanılan koruyucu gazın kaynak bölgesine sürekli sevk edilmesi gerektiği için açık alanlarda ve hava akımı olan yerlerde kaynak yapma problemi olur [10].

2.2.4. Yöntemin sınıflandırılması

Gazaltı kaynak yöntemleri çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılabilir. Çizelge 2.1’de gazaltı kaynak yönteminin bölümlendirilmesi görülmektedir. İlk bölümlendirme, kullanılan elektrot cinsine göre yapılmıştır. Burada yöntem, ergiyen ve ergimeyen elektrod olarak yapılabilir. Ergimeyen elektrotlar tungsten kullanılarak yapılır ve bu kaynak yöntemi Gazaltı Tungsten Ark Kaynağı olarak adlandırılır. Ergiyen elektrotlar arkı taşımalarının yanısıra ilave kaynak metali görevini de yapmaktadırlar. Genellikle kaynak yapılacak ana metal ile aynı kimyasal özelliklere sahip olmasından dolayı, bu yönteme Gazaltı Metal Ark Kaynağı denir [14].

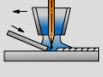
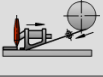
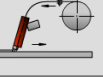
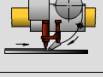
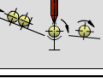
Çizelge 2.1. Gazaltı kaynağının sınıflandırılması



2.2.5. Uygulama bakımından sınıflandırma

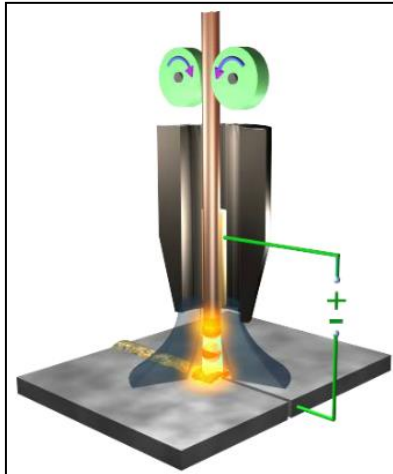
Kaynak sırasında kullanılan kaynak makinasının mekanize durumuna göre dörde ayrılır. El kaynağı, yarı mekanize kaynak, tam mekanize kaynak ve otomatik kaynak şeklinde bir ayırım yapılmaktadır.

Çizelge 2.2. Uygulama bakımından sınıflandırma

Terim Sembol	Örnekler Gaz korumalı ark kaynağı		Hareket çeşidine göre		
	Gaz korumalı tungsten ark kaynağı TIG (141)	Gaz korumalı metal ark kaynağı MSG (13)	Torklama / iş yönlendirme	Dolgu metal besleme	İşleme tarzı
Manuel kaynak		-	Manuel	Manuel	Manuel
Kısmi-mekanize kaynak			Manuel	Mekanize	Manuel
Tam mekanize kaynak			Mekanize	Mekanize	Manuel
Otomatik kaynak			Mekanize	Mekanize	Mekanize

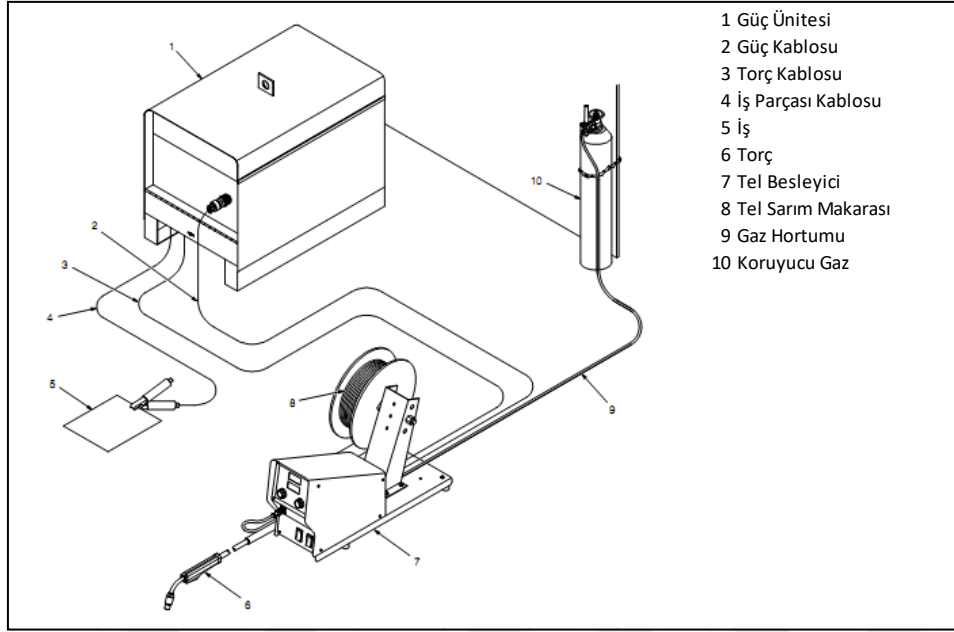
2.2.6. Kaynak donanımı

Gaz metal ark kaynağındaki elektrotlar hem ark için hem de malzeme yığmak için kullanılır. Ark alanı, (dolgu malzemesi ve ergiyik metal havuzu) aktif ve asal gazlar yardımıyla havanın olumsuz etkilerinden korunur. Çelik ve demir dışı metallerin kullanım yelpazesi, tel ve koruyucu gaz kombinasyonlarının seçimini belirler. Çelik kaynağında sadece aktif gazlar, demirdışı metallerin kaynağında ise genelde asal gazlar kullanılır [15].



Şekil 2.3. MIG/MAG kaynağının çalışma prensibi

MIG/MAG kaynak donanımını oluşturan bölümleri Şekil 2.4 'de gösterilmiştir [13].



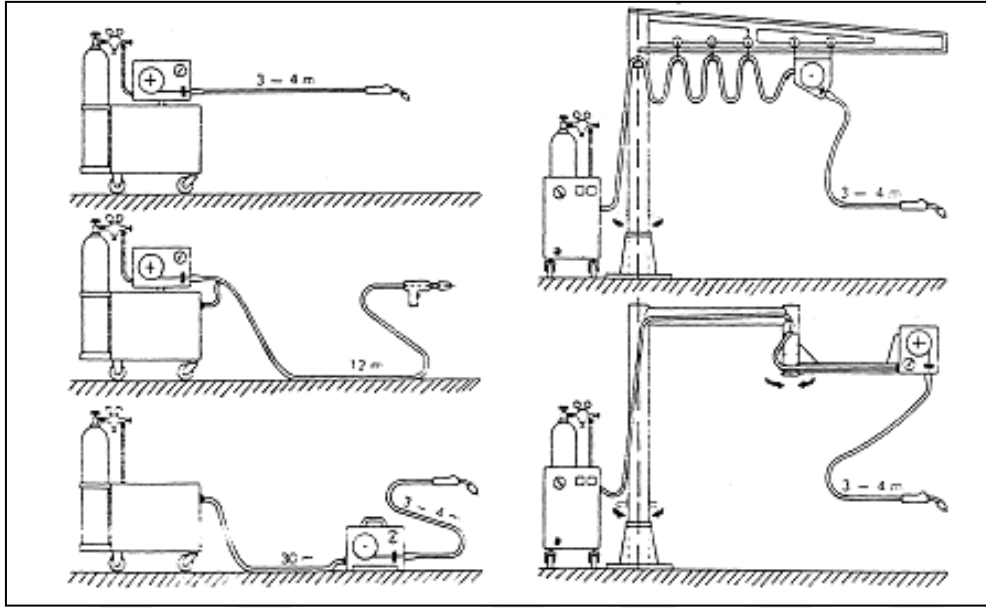
Şekil 2.4. MIG/MAG kaynak donanımı alt parçaları [16]

Genel olarak MIG/MAG kaynak donanımı 6 temel aksam üzerinden ayrımı yapılmaktadır.

- Kaynak yapmayı sağlayan kaynak torcu.
- Tel elektrodu ve muhafazası, kumanda ve kaynak kabloları, koryucu gaz hortumunu bir arada tutan metalden yapılmış spiral takviyeli torç bağlantı paketi.
- İlave telin hareketini sağlayan makara tertibatı.
- Kaynak akımının iletimin yapan, torcun soğutma suyunu devreye alan, kullanılan koruyucu gazın akışını sağlayan ve telin devinimini kontrol eden kumanda tertibatı.
- Kullanılan akım üretici.
- Koruyucu gaz basıncını düşürme ventili ve basınç ölçme aparatı bulunan koruyucu gaz tüpü [17].

Kaynak torçları

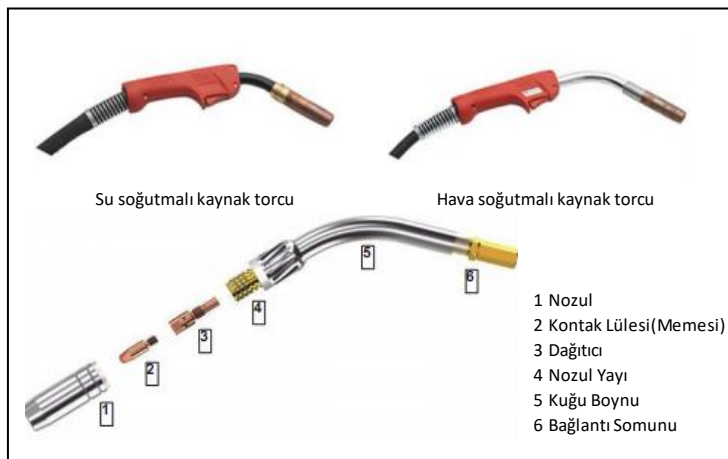
Gazlı kaynak yönteminde kullanılan tel elektrottan akımın geçirilmesi ve ark bölgesine koruyucu gazın sevk edilme görevi torcundur.



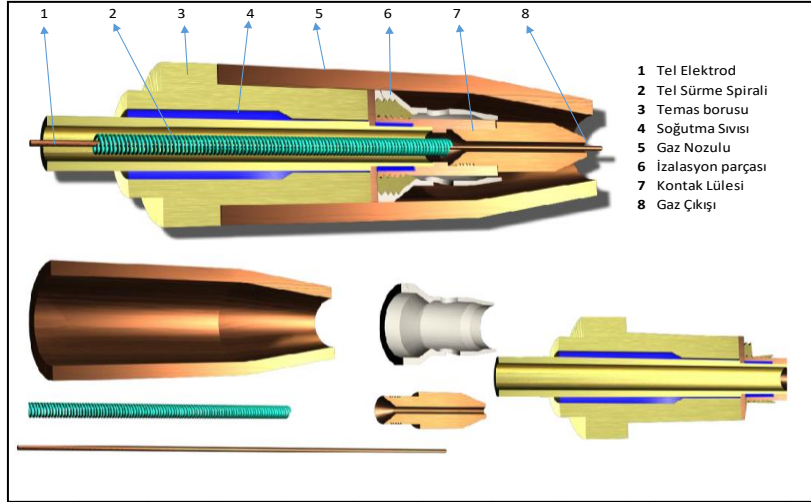
Şekil 2.5. Çeşitli MIG/MAG kaynak donanımları [18]

Kaynak esnasında meydana gelen ark sıcaklığından etkilenen torcun soğutulma işlemi mutlaka gerekir. Çok düşük akım şiddetleri ile yapılan kaynak uygulamalarında koruyucu gaz, akım için gerekli soğutmayı yapmaktadır. Kalın kesitli elektrotlar ile yüksek akım şiddetlerinde kaynak yapılması halinde ($I=250\text{ A}$) su soğutma sistemi kullanılmak zorundadır [17].

Aşağıda Şekil 2.6’da kaynak torcu ve bölümleri verilmiştir.



Şekil 2.6. MIG/MAG kaynak torcu [19]



Şekil 2.7. MIG/MAG kaynak torcu uç kısmı [15]

Hava soğutmalı torçlardaki ısıyı ortamdan uzaklaştırmak için koruyucu gazdan faydalanılır. Su soğutmalı torçlarda ise bu işlem radyatörden pompalanan bir soğutma sıvısı ile soğutma işlemi gerçekleştirilir.

Aşağıda Çizelge 2.3’de hava su soğutmalı torçların avantajları ve dezavantajları verilmiştir.

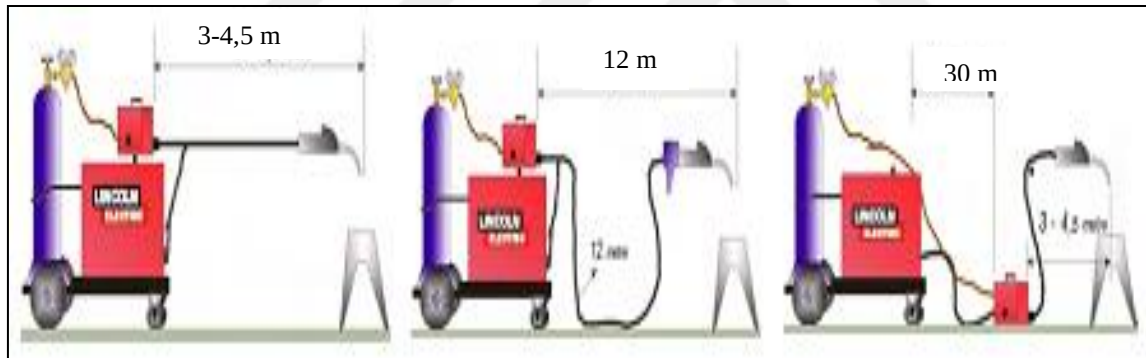
Çizelge 2.3. Su ve hava soğutmalı torçların avantajları ve dezavantajları [19]

Durumlar	Hava Soğutmalılar	Su Soğutmalılar
Artılar	– Daha Düşük maliyet – Yüksek portatiflik – Düşük bakım gereksinimleri	– İyi soğutma işlemi – Aynı amper için hafiflik – Yüksek hareket kabiliyeti – Kullanıcı ergonomisi
Eksiler	– Daha düşük soğutma verimliliği – Aynı amper için daha ağır – Uzun çalışma dönemlerinde daha fazla ısınma – Düşük manevra kabiliyeti – Daha yüksek operatör yorgunluğu – Daha düşük operatör ergonomisi	– Daha yüksek başlangıç maliyeti – Daha yüksek proses maliyetleri – Daha yüksek bakım gereksinimleri – Düşük portatiflik – Doğru şekilde bakım yapılmadığın da su ile ilgili ekipman hasarı riski veya güvenlik tehlikeleri
İdeal oldukları durumlar	– Düşük amperli uygulamalar – Daha kısa çalışma zamanları	– Yüksek amperli uygulamalar (Alüminyum) – Daha uzun çalışma zamanları

MIG/MAG kaynak yönteminde torç bağlantı paketi

MIG/MAG kaynak yönteminde kullanılan torçların içinde tel kılavuzu, akım taşıyıcı kablosu, kullanılan koruyucu gazın hortumu ve gerekli durumlarda soğutma su hortumlarını bir arada olmalarını sağlayan metalden yapılmış spiral takviyeli ve kalın hortum tertibatı olup buna torç bağlantı paketi adı da verilmektedir [17].

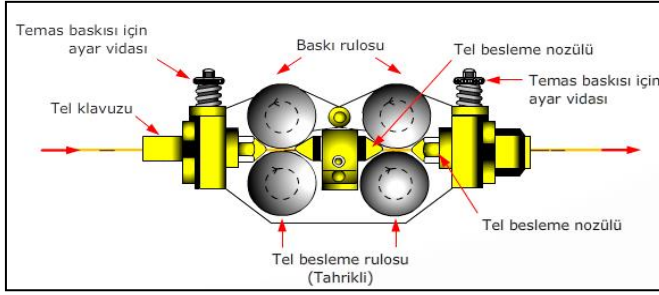
MIG/MAG kaynağında ergiyen tel elektrot, kaynak bölgesine tel sürme mekanizması ile spiral içinden iletilme işleminin doğru olarak yapılabilmesi için torç boyunun belli sınırlar içerisinde tutulması zorunludur. Karbonlu, paslanmaz ve alaşımlı çeliklerin kaynaklarında kullanılan masif ve özlü tel elektrodlar için, torç boyunun 4,5 metreyi aşmaması tavsiye edilir. Torç boyu alüminyum ve alaşımlarının kaynaklarında ise kısa 1,5-2 metre civarında olmalıdır. Ancak torç boyu uzunlukları itme ve çekme sistemli paketleri ile 12 metreye kadar rahatlıkla kullanılabilir [9].



Şekil 2.8. Torç boyları

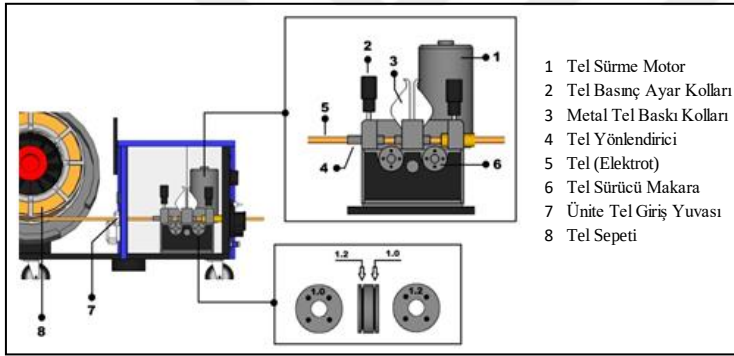
Tel sürme tertibatı

Tel elektrot besleme ünitesi elektrik motoru, elektrot sevk makaraları, elektrot doğrultusunu ve basıncı ayarlayan parçalardan oluşmaktadır. Tel besleme ünitelerinde iki makara veya dört makara kullanılabilir. Aşağıda dört makaralı elektrot besleme ünitesi Şekil 2.9'da verilmiştir [13].



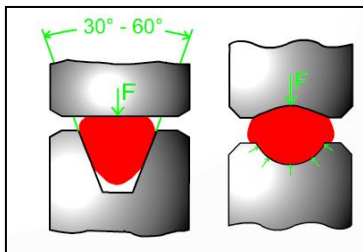
Şekil 2.9. Tel sürme tertibatı [15]

Kaynakta kullanılması gereken tel çapına ve türüne göre kanalları uygun makaralar seçilmelidir. İlave çelik tel elektrodlar için “V” kanala sahip tel sürme, alüminyum, bakır benzeri yumuşak gaz altı kaynak ilave telleri için yuvarlak kanallı tel sevk etme makaraları kullanılmalıdır [20].



Şekil 2.10. Tel sürme tertibatı

Yumuşak malzemelerden üretilmiş kaynak elektrodları ile özlü tel elektrotlar dört rulodan oluşmuş tel sürme tertibatlarının kullanılması çok iyi sonuçlar vermektedir. Kullanılan ruloların profili ve rulo baskı ayarı da büyük bir ehemmiyet gerektirmektedir [17]. Telin sıkışmaması için, yumuşak (alüminyum) ve örtülü telerde az miktarda baskı kullanılır. Dörtlü rulo, tel çarpıklıklarının önlenmesi için önemlidir.



Şekil 2.11. Tel sıkışması [15]

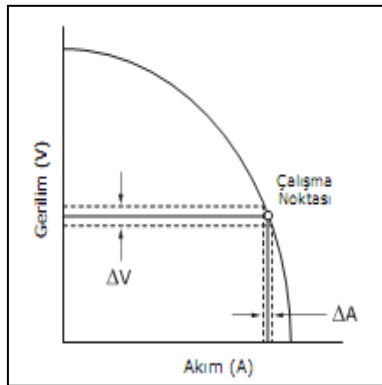
Kumanda tertibatı

Kumanda tertibatının esas görevi, elektrot besleme motorunun hızını ayarlamak ve böylece elektrot besleme hızı artırılarak kaynak akımı arttırılabilir. Tel elektrot besleme hızının azaltılması, otomatik olarak kaynak akımının da azalmasına sebep olacaktır. Torç üzerindeki kontrol tertibatı ile elektrot beslenmesinin başlamasını veya durdurulmasını da sağlayabilmektedir. Bu tertibat, kaynak işlemine başlamadan önce gaz akışının başlamasına ve kaynak bittikten bir süre sonrada gaz akışının devam etmesini sağlamaktadır. Böylece egrimiş kaynak banyosunun atmosferin olumsuz etkilerinden korunması sağlanır [13].

MIG/MAG kaynağı akım üreteçleri

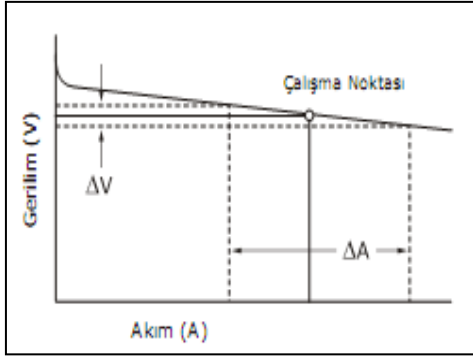
MIG/MAG kaynağının çoğunlukla tel elektrodun pozitif kutupta bağlı olduğu doğru akım ile kaynak yapılır. Budan dolayı güç ünitesinin pozitif ucu torca, negatif ucu kaynatılacak ana malzemeye bağlanmaktadır.

MIG/MAG kaynağının çok eski kaynak uygulamalarında sabit akımlı güç üniteleri kullanılmaktaydı. Bu güç üniteleri, kaynak sırasındaki akım şiddeti ve ark uzunluğundaki değişimlerden bağımsız olarak sabit tutardı (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Sabit akımlı güç ünitelerinde gerilim-akım ilişkisi

MIG/MAG kaynağı uygulamaları arttıkça ve gelişen teknoloji sayesinde sabit gerilimli güç ünitelerinin çok iyi çalışma şartları sağladıkları görülmüştür. Bu güç üniteleri, sabit hızdaki elektrot besleyicileri ile birlikte kullanılmalarında, gerilimin kaynak işlemi esnasında sabit kalmasını sağlayarak kaynak yapılmasına imkan tanır. Şekil 2.13 'de sabit gerilimli güç ünitesinin akım ve gerilim eğrileri verilmiştir.



Şekil 2.13. Sabit gerilimli güç ünitelerinde, gerilim-akım ilişkisi

Sabit gerilimli güç üniteleri ile yapılan kaynak uygulamalarında kaynatılan iş parçası ile temas tüpünün ucu kısmı arasındaki mesafe değişiklikleri, kullanılan kaynak akımını ani arttırarak veya düşürerek dengelemektedir [13].

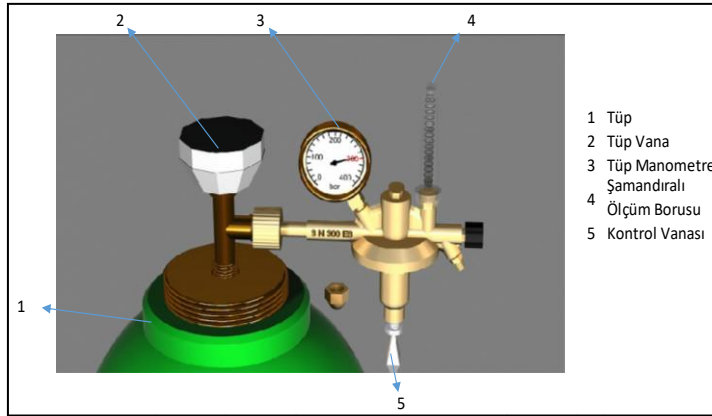
Koruyucu gaz ve tertibatları

Ülkemizde MIG/MAG tüpü olarak 40 litre hacime sahip, 150 Atü basınç değerinde tüpler kullanılır. Tüp çıkışlarına gaz basınç ayar ventili ve bir tertibat takılır. Bu düzenek üzerinde tüpe yakın olan manometre tüp basınç değerini, diğeri ise gaz basıncını gösterir [17].

Genelde iki basınç düzenleme sistemi kullanılır.

a. Bir şamandıra ile gaz miktarı ayarı

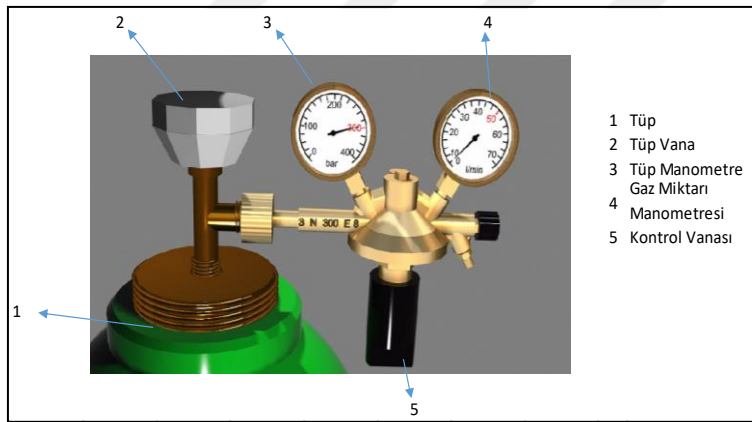
- Basınç azaltması sabit olarak ayarlıdır.
- Akış kesit alanını ayarlayarak bir kontrol vanası gaz akışını düzenler.
- Debi, gaz çekimi yapılırken, konik bir ölçüm borusundaki top şekilli şamandıra ile gösterilir.



Şekil 2.14. Şamandıra ile gaz miktarı ayarı

b. Bir manometre ile gaz miktarı ayarı

- Koruma gaz nozülünde, bir kısma nozülü, gaz basıncına bağlı olarak debiyi kontrol eder.
- Gaz basıncı, bir basınç düzenleme vidası ile ayarlanır.
- Gaz miktarı manometresi, akan gaz miktarını gösterir.



Şekil 2.15. Manometre ile gaz miktarı ayarı [15]

Koruyucu gaz

Kaynak uygulamalarında kullanılan bütün koruyucu gazların kaynak banyosunu tamamen örtmesi ve atmosferin zararlı tesirlerinden koruması gerekmektedir [21].

MIG/MAG kaynak yöntemi için gaz seçiminde bir takım faktörlerin göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlar;

- Kaynatılacak metal ve alaşımın türü,
- Kaynak metalin damla geçişi,

- c. Kaynak hızı,
- d. Kaynatılacak malzeme kalınlığı, istenen nüfuziyet ve kaynak dikişinin formu,
- e. Kullanılacak gazın ekonomik durumu,
- f. Elde edilen kaynak dikişinden beklenen mekanik özellikler [29].

Belirli bir uygulama için doğru koruyucu gazın seçimi, bitmiş kaynağın kalitesi için kritik öneme sahiptir. Seçim yapmak için kullanılan kriterler aşağıdakileri içerir, ancak bunlarla sınırlı değildir:

- Tel elektrot alışı
- İstenilen kaynak metalinin istenen mekanik özellikleri
- Malzeme kalınlığı ve kaynak ağı tasarımı
- Malzeme durumu; hadde artığı, korozyon, kaplamalar ve yağ
- Metal transfer modu
- Kaynak konumu
- Birleştirme koşulları
- İstenilen penetrasyon profili
- İstenilen kaynak dikiş görünümü
- Maliyet [22].

MIG/MAG ark kaynak yönteminde kullanılan bütün koruyucu gazlar, TS EN ISO 14175'de standartlaştırılmıştır. Çizelge 2.4 bu standarda göre koruyucu gazların sınıflandırılmasını vermektedir.

Çizelge 2.4. Gaz karışım çizelgesi [15, 23]

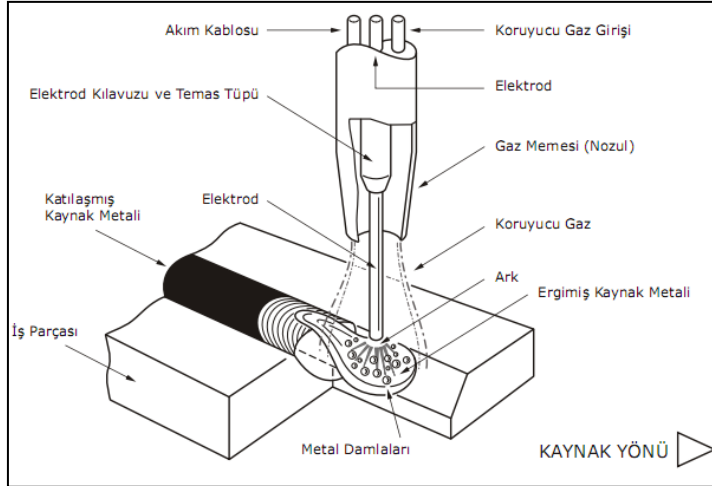
TS EN ISO 14175							
Sembol		% Hacim Cinsinden Bileşenler (Nominal)					
Ana Grup	Alt Grup	Oksitleyici		Soy		İndirgeyici	Az Reaktif
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂
I	1			100			
	2				100		
	3			Kalan	0.5 ≤ He ≤ 95		
M1	1	0.5 ≤ CO ₂		Kalan ^a		0.5 ≤ H ₂ ≤ 5	
	2	0.5 ≤ CO ₂		Kalan ^a			
	3		0.5 ≤ O ₂ ≤	Kalan ^a			
	4	0.5 ≤ CO ₂	0.5 ≤ O ₂ ≤	Kalan ^a			
M2	0	5 < CO ₂ ≤		Kalan ^a			
	1	15 < CO ₂		Kalan ^a			
	2		3 < O ₂ ≤	Kalan ^a			
	3	0.5 ≤ CO ₂	3 < O ₂ ≤	Kalan ^a			
	4	5 < CO ₂ ≤	0.5 ≤ O ₂ ≤	Kalan ^a			
	5	5 < CO ₂ ≤	3 < O ₂ ≤	Kalan ^a			
	6	15 < CO ₂	0.5 ≤ O ₂ ≤	Kalan ^a			
	7	15 < CO ₂	3 < O ₂ ≤	Kalan ^a			
M3	1	25 < CO ₂		Kalan ^a			
	2		10 < O ₂ ≤	Kalan ^a			
	3	25 < CO ₂	2 < O ₂ ≤	Kalan ^a			
	4	5 < CO ₂ ≤	10 < O ₂ ≤	Kalan ^a			
	5	25 < CO ₂	10 < O ₂ ≤	Kalan ^a			
C	1	100					
	2	Kalan	0.5 ≤ O ₂ ≤				
R	1			Kalan ^a		0.5 ≤ H ₂ ≤ 15	
	2			Kalan ^a		15 < H ₂ ≤ 50	
N	1						100
	2			Kalan ^a			0.5 ≤ N ₂ ≤ 5
	3			Kalan ^a			5 < N ₂ ≤ 50
	4			Kalan ^a		0.5 ≤ H ₂ ≤ 10	0.5 ≤ N ₂ ≤ 5
	5					0.5 ≤ H ₂ ≤ 50	Kalan
O	1		100				
Z	: Bu bileşenlere sahip olmayan gaz karışımları veya bileşimleri verilen aralığın dışına çıkan gaz karışımları ^b						

^a Bu sınıflandırmalar için argon kısmen veya tamamen helyum gazı işe değiştirilebilir.

^b Aynı Z gösterimine sahip iki koruyucu gaz karışımı birbirleri ile değiştirilemez.

2.2.7. Yöntemin Çalışma Prensipleri

MIG/MAG kaynak usulünde dışarıdan kaynak bölgesine gönderilen koruyucu gazla korunan ve otomatik olarak sürekli beslenen ve ergiyen tel elektrot kullanılmaktadır (Şekil 2.16).

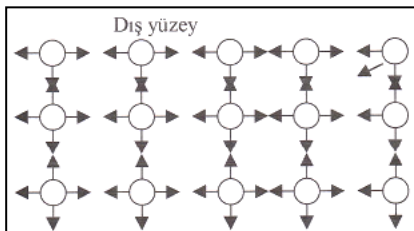


Şekil 2.16. MIG/MAG kaynağının çalışma prensibi

Kaynakçı tarafından gerekli donanım seçilmesi, uygun parametre ayarları yapıldığında ark boyu ve akım şiddeti yani tel besleme hızı kullanılan kaynak ekipmanı tarafından otomatik olarak sabit değerde tutulmaktadır [13].

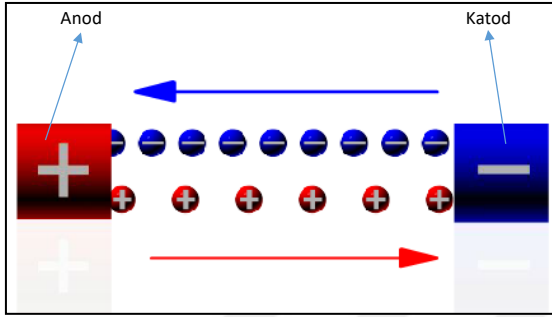
Arkta kaynak metali taşınımı

Doğadaki tüm canlı cansız maddeler sürekli en küçük enerji konumun halini almak ve en az enerji tüketimi ile mevcudiyetlerini sürdürmek, dengede kalmak istemektedirler. Tüm maddeler için en küçük enerji durumu da en küçük dış yüzey ile sağlanmakta olup en küçük dış yüzey biçimi ise küresel şekil ile elde edilmektedir. Bu şartlarda en küçük enerji konumu da küre şeklindeki yüzeylerde sağlanmaktadır. Yine küçük kütlelerin büyük kütlere katılma eğilimi olup bu en az enerji prensibinin bir gereği olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2.17’de görüldüğü üzere bir malzeme içerisindeki moleküller birbirlerine uyguladıkları kuvvetler olarak eşit olduğu varsayılmaktadır. Malzeme yüzeyi kuvvetleri tek taraflı ve içe doğru olup malzeme yüzeyindeki moleküllerin içe doğru olan kuvvetlerine yüzey gerilim kuvveti denir.



Şekil 2.17. Yüzey gerilim kuvvetinin şematik gösterimi [10]

MIG/MAG kaynağı için gereken ısı enerjisi, ana malzeme ve ergiyen tel elektrodun arasında oluşturulan arkta elde edilmektedir. Eksi kutup olan katottan elektronlar büyük bir hız ile artı kutup olan anoda doğru ilerlerler. Elektronların hızlı hareket enerjisi, ısıya dönüşür. Böylece hızlı hareket eden elektronların çarptıkları noktalar aşırı ısınarak, malzeme ergir ve kısmi olarak buharlaşır. Elektronlar yaptıkları hızlı hareketlerinde atomların dış kabuklarına çarparak ve o bölgelerden elektronların kopmasına sebep olurlar. Kopma sonucu elektron kaybeden atom ise nötr olmaktan çıkarak, pozitif yüklü iyon haline gelir ve yükünden dolayı hızla eksi kutup olan katoda doğru ilerler ve o bölgenin ısınmasına sebep olur ve böylece ergime ve buharlaşma sürekli olarak meydana gelir.



Şekil 2.18. Anod-Katod elektron hareketi [15]

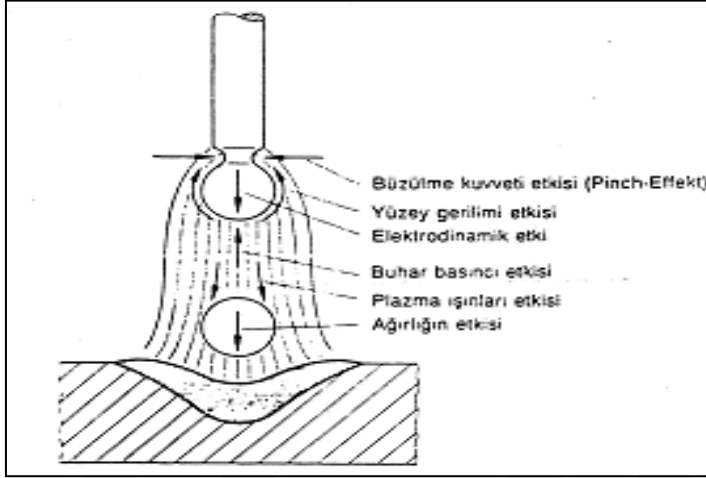
Elektronların ve iyonların elektrik alanı içerisindeki hareketlerinin bir sonucu olarak bir ark sütunu oluşturulur ve bu plazma olarak adlandırılır. Meydana gelen iyonların çok azı kaynak esnasında kullanılan koruyucu gaza aittir. Kullanılan koruyucu gaz atomlarının iyonlaşma sürecine katılmamalarına karşın, gaz türü ve gaz bileşimi kaynak dikişinin formuna ve ark içerisindeki metali transferine etkilemektedir.

Akım şiddeti ve kullanılan ark geriliminin üzerinde Pinch-Effekt yani büzülme kuvveti çok şiddetlenir, tel elektrodun ucunu sivrileştirir ve uzatır, damlacıklar meydana gelir gelmez ilave metalden ayrılarak kaynak yapılan malzemeye transfer olur [17].

Kaynak arkı içinde metal taşınım türü aşağıda sıralanmış olan bir dizi faktörün etkisi altındadır. Bunlar;

- Kullanılan akım şiddeti,
- Kullanılan ilave tel elektrod çapı,
- İlave metalin bileşimi,
- Serbest tel uzunluğu,

- Koruyucu gaz cinsi,



Şekil 2.19. Tel elektrotta oluşan metal damlasını etkileyen kuvvet ve yönleri [18]

Damla iletimi mekanizmaları

Ergiyen elektrotlarla kaynak yapıldığında, malzeme transferi genellikle damlacıklar şeklinde meydana gelir. Damlacıkların oluşumu, boyutu ve eriyik kaynak banyosuna transferi, fiziksel ve elektromanyetik kuvvetler tarafından kontrol edilir.

Viskozite ve yüzey geriliminin etkisi;

Viskozitenin azalması veya sıcaklığın artması yüzey gerilimini düşürür. Bunun sonucunda daha küçük damlacıklar oluşur. Demir malzemelerin içerisinde yüksek oranda Oksijen bulunması da aynı sonucu doğurur. Bu etki özellikle yüksek Oksijen içeriğine sahip örtülü çubuk elektrotlarda (asidik veya rutil tip) kendisini gösterir. Bunlar ince damlacıklı malzeme transferine neden olurlar.

Genleşen gazların malzeme kopmasına etkisi;

Ark başlangıç noktasında oluşan damlacıklar, sıcaklık arttıkça daha fazla miktarda gaz absorbe ederler. Bunun sonucunda damlalar patlama benzeri bir etki ile elektrottan koparlar ve patlarlar. Çubuk elektrotlarda, damlacık içerisinde genleşen CO_2 gazı damlacık geçişi için önemli bir mekanizmadır.

Kısa devre sırasında malzeme transferi;

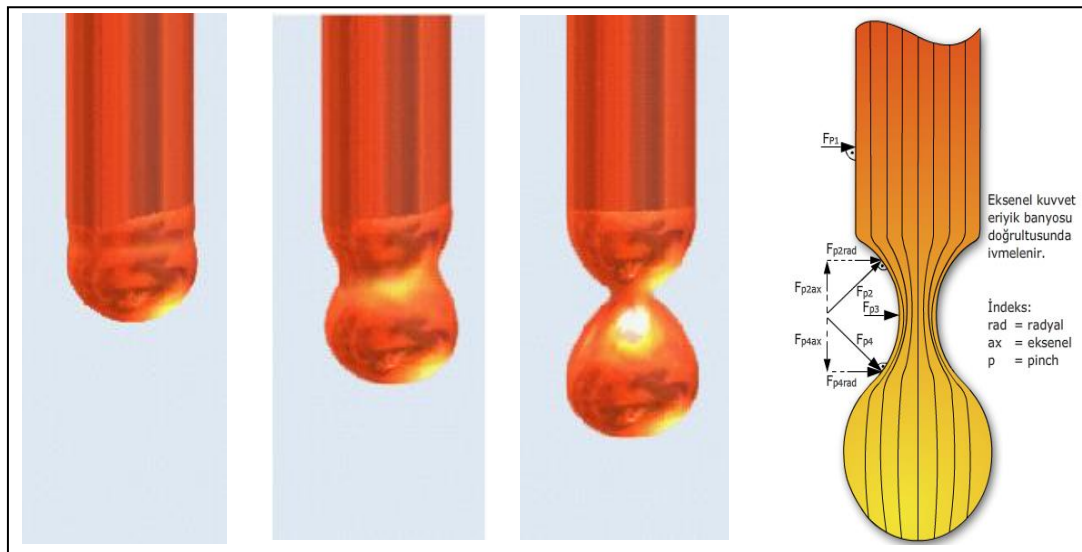
Damlacık, herhangi bir mekanizma ile serbest kalmadığında büyüyerek, elektrot ve iş parçası arasında kısa devreye neden olur. Bu durumda eriyik kaynak banyosu, damlacığı kendisine doğru çekerek elektrot ucundan koparır.

Pinch etkisi ile malzeme transferi etkisi;

İçerisinden akım geçirilen her iletkenin çevresinde bir manyetik alan bulunur. Manyetik alan nedeniyle iletken üzerinde, onu sıkan radyal kuvvetler ortaya çıkar. Bu "Lorenz-kuvveti" (kaynak tekniğinde "pinch-kuvveti") olarak adlandırılır ve akım yoğunluğu artışının karesiyle doğru orantılıdır ($F_{Pinch} = \text{akım}^2 / \text{kesit alanı}$). Bu kuvvet sonucunda iletken (kaynak teli) tam bir daralma olur ve damlacık tamamen serbest kalır.

Yüksek akım yoğunluklarında, artan pinch etkisi nedeniyle elektrot ucu kalıcı olarak sivri bir hal alır. Bunun sonucunda elektrottan kopan damlalar iyice küçülür ve damlacık geçişi hızlanır (sprey ark).

Damlacıkların sıkılması sonucunda ayrıca ekstenel kuvvetler ortaya çıkar. Bu kuvvetler damlacığın karşı kutba doğru hareket etmesini sağlar.



Şekil 2.20. Damlacık kopuşunun (pinch-effect) temsili gösterimi

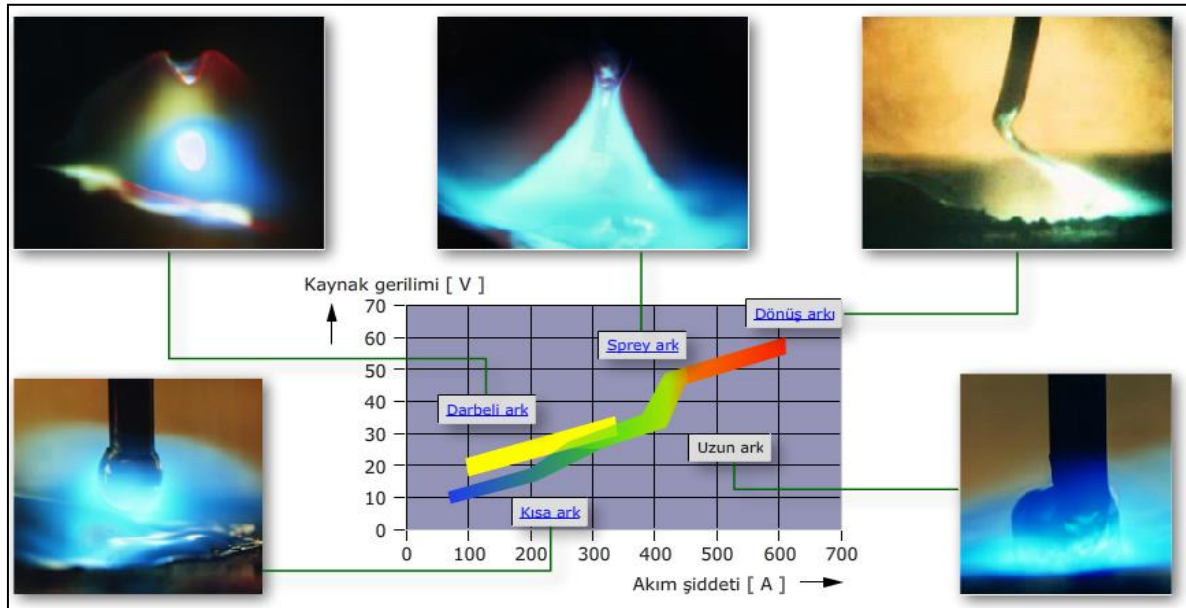
MIG/MAG ark kaynağının komplike alanlarda kullanılmasına olanak veren nedenlerden biri, ark kaynağının geniş kullanım alanıdır. Koruma gazına ve ark verimine bağlı olarak değişik ark geçiş çeşitleri tanımlanmıştır.

MIG/MAG kaynağında metal damlalar elektrodan is parçasına dört şekilde taşınırlar:

- Kısa ark
- Uzun ark
- Sprey ark
- Darbeli ark
- Geçiş arkı

Çizelge 2.5. Ark çeşitleri ve damlacık geçişi [15]

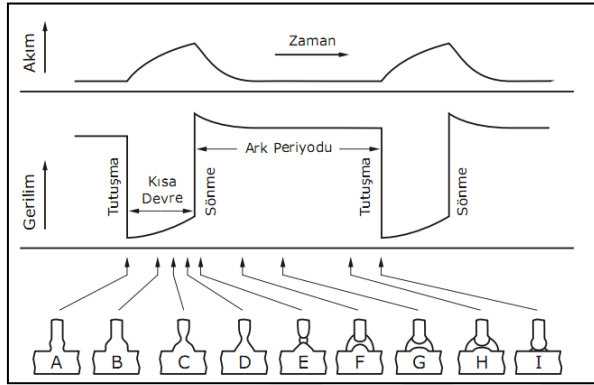
Adlandırma	Gaz koruma kaynağı yapılırken metal geçişi ve bu geçiş sırasında meydana gelen geçici sonuçlar
Kısa ark ile kaynak	Sadece kısa devre, küçük damlacıklar
Geçiş arkı ile kaynak	Kısmi kısa devre, küçük ve iri damlacıklar
Sprey ark ile kaynak	Kısa devresiz, çok küçük damlacıklar
Uzun ark ile kaynak	Dengesiz kısa devre, iri damlacıklar
Darbeli ark ile kaynak	Kısa devresiz, düzenli bir ritm ile darbeler, küçük damlacıklar



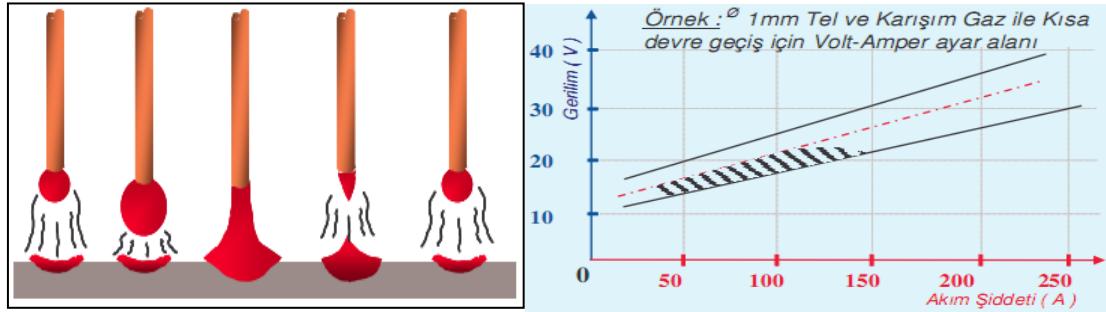
Şekil 2.21. Damlacık çeşitleri [15]

Kısa ark

Kısa ark, MIG/MAG kaynağında kullanılan en düşük kaynak akımlarında ve en küçük tel çaplarında meydana gelmektedir. Kısa devre iletimi ince kesitlerin malzemelerin ve büyük kök açıklıklı malzemelerin kaynaklı birleştirmelerine elverişli olup küçük ve hızlı katılaşılan kaynak havuzu oluşturmak amacıyla kullanılır. Metal transferi ve bu esnadaki gerilim akım değeri Şekil 2.22 'de verilmiştir [13].



Şekil 2.22. Kısa ark metal iletimi



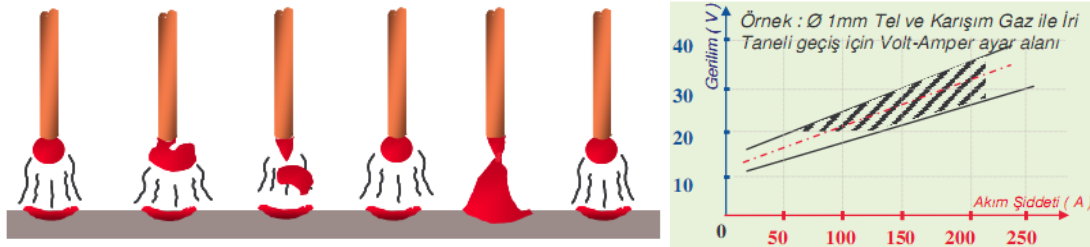
Şekil 2.23. Kısa ark çalışma aralığı

Avantajları;

- Damla geçişi kısa devre şeklinde olur.
- Saniyede damlaların geçişi yaklaşık 70 damladır.
- 16 - 22 V arasındaki düşük gerilim altında gerçekleşir.
- 30 - 200 A arasındaki akım şiddetlerindeki düşük ısı girdisi sağlanır.
- İnce kesitlerin birleştirilmesi için uygundur.
- Zor pozisyonlarda ve büyük kök açıklıklarının kapatılmasında kullanılır [9].

Uzun ark (İri damla iletimi)

Kaynak akım şiddetinin ve ark geriliminin yüksek olması durumunda küresel damla geçişi şeklinde metal transferi gerçekleşir. İri damla transferi, kaynak metali damlalar şeklinde kaynak banyosuna transfer olur ve elde edilen kaynak dikişinin nüfuziyet derinliği oldukça azdır. CO₂ gazının, koruyucu gaz olarak kullanıldığında birçok kaynak uygulamalarında iri damlalı küresel metal transferi gerçekleşir. İri damlalı küresel metal aktarımlarında, kullanılan koruyucu gaza O₂ ilavesi edilmesi küresel damlacığın yüzey gerilimini azaltarak tel elektrottan damlanın kolayca ayrılmasını sağlar [10].



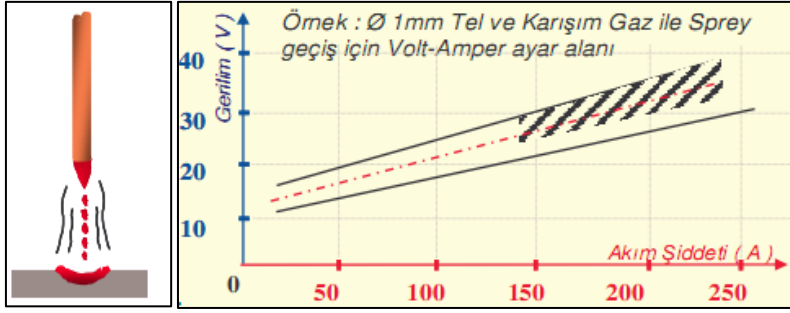
Şekil 2.24. Uzun ark çalışma aralığı

Avantajları;

- Damla geçişi kaba taneli şeklinde gerçekleşir.
- Damlanın çapı kullanılan tel elektrod çapından büyüktür.
- Saniyede damla geçişi yaklaşık 100 damla'dır
- 20 ile 25 V arası yüksek gerilim altında gerçekleşir.
- Malzeme kalınlığı 2 mm'den fazla olan parçaların kaynağında, oluk pozisyonunda ve iç köşe kaynağını yapmaktaki kullanılır [9].

Sprey ark

Kullanılan ilave telin kaynak yapılan ana malzemeye duşlama şeklinde geçişine spreay ark metal transferi denir. İlave metalin kaynak bölgesine bu biçimde transferi tel elektrodun ucunun sivrileşmesi ve bu sivrileşmiş ucun ayrılarak kaynak yapılan malzemeye çok küçük damlalar halinde transferi ile meydana gelir. Damlacık ebatı kullanılan tel çapından çok küçüktür. Sprey ark, argon veya argonca zengin koruyucu karışım gazlarının yüksek akım şiddeti ve ark gerilimi kullanıldığında kaynak uygulamalarında oluşmaktadır [17].



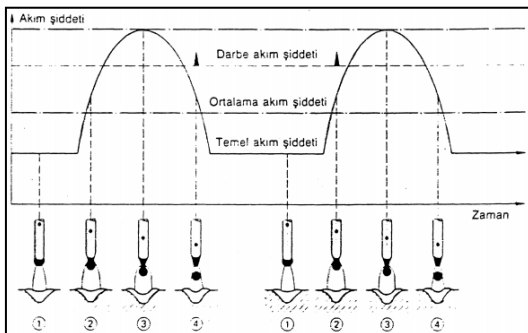
Şekil 2.25. Sprey ark çalışma aralığı

Avantajları;

- Saniyede damla geçişi yaklaşık 100-300 damla'dır.
- 25 V ve üstü yüksek gerilim altında meydana gelir.
- Argon veya argon oranının yüksek olduğu koruyucu karışım gazı kullanıldığında meydana gelir.
- Oluk pozisyonlarda ve kalın kesitli malzemelerin kaynağında kullanılır [9].

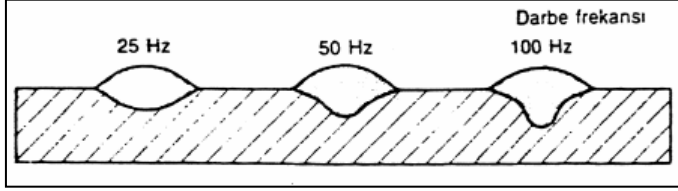
Darbeli ark

Darbeli arkın uygulanabilmesi için darbeli kaynak akımını üreten özel kaynak akım üreteciye ihtiyaç duyulmaktadır. Bahsi geçen darbeli doğru akım ile alternatif akımı birbirlerinden ayırt edilebilmelidir. Darbeli doğru akımda şiddeti, belirlenmiş iki ayar arasında seçilmiş olan frekansta aralığında değişkenlik göstermektedir. Darbeli ark yöntemi ile istenen çalışma değerlerinde kısa devre oluşmasına izin vermeden kaynatılmak istenen malzemeye çok az bir ısı girdisi tatbiki ile çalışılabilmektedir. Çalışma frekansı istenen ayarlara getirilerek istenen sayıda ve büyüklükte ergimiş metal damlacıklarının kaynakılacak malzemeye transfer gerçekleştirilir [18].



Şekil 2.26. Darbeli akım ile damla oluşumu ve damların kaynak banyosuna geçişi

Kaynak esnasındaki darbe akımı, kısa devresiz damla transferi ancak darbe akımının belirli bir değere ulaşması ile gerçekleşir ve bu değer ilave metal ile koruyucu gazın cinsine ve tel çapına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [18].



Şekil 2.27. Darbe frekansının dikiş profiline etkisi

Darbeli akımın avantajları;

- Yüksek ergime gücüne sahip
- Sıçrama yok denecek kadar az
- Kalın malzemelerin kaynak işlemi için çok uygun[9]

Geçiş arkı

Düzensiz metal geçişinden dolayı (yüksek sıçrantılı damlalar) geçiş arkı kullanılmaması gereken bir bölge olmasına rağmen, koruma gazının ayarına bağlı olarak orta kalınlıkta parçalarda PA ve PB pozisyonlarında kullanılabilir.

Gazlatı kaynak yönteminde kullanılan ark türlerinin kullanım alanları Çizelge 2.6'da topluca özetlenmiştir [17].

Çizelge 2.6. MIG/MAG kaynağında metal transferlerine genel bakış

Ark türü	Kullanımı	Malzeme transferi	Sıçranta oluşumu	Koruma gazı		Not
				MIG-kaynağı	MAG-kaynağı	
MIG/MAG kısa ark	İnce sacdar, zorunlu pozisyonlar, kçk paso kaynağı	Her zaman kısa devre ile	Uygun bir akım üretici kullanımı ile düşük	Argon ve Argon/helyum karışımı	CO ₂ ve karışım gaz	Düşük ısı girdisi, düşük yığma miktarı
MIG/MAG kısmi kısa devreli (orta kısıllıkta) ark	Orta sac kalınlıkları, zorunlu pozisyonlar	Kısmi kısa devre	İş parçası üzerinde kısmi yapışkan sıçrantılar	Argon ve Argon/Helyum karışımı	CO ₂ ve karışım gaz	Orta verim
MIG/MAG sprej ark	Orta kalınlıkta ve kalın sacdar	Sprej şeklinde transfer, kısa devresiz	Düşük	Argon ve Argon/Helyum karışımı	Karışım gaz	Yüksek yığma hızı
MAG uzun ark	Orta kalınlıkta ve kalın sacdar	Kısmi kısa devre	İş parçası üzerinde kısmi yapışkan sıçrantılar		Saf CO ₂ veya karışım gaz içerisinde çok yüksek CO ₂ yüzdesi	Yüksek yığma hızı
MIG/MAG darbeli ark	Geniş çalışma aralığı	Kısa devresiz. Doğru ayarlandığında her darbede bir damlacık geçişi.	Çok düşük	Argon ve Argon/Helyum karışımı	En fazla % 20 CO ₂ içeren karışım gaz	Düşük veya yüksek yığma oranı ayarlanabilir. Isı girdisi diğer akım türlerine oranla daha düşüktür.

Kaynak değişkenleri

Yapılan kaynağın nüfuziyetini, dikişin formunu ve elde edilen kaynak kalitesini etkileyen değişkenleri aşağıda verilmiştir:

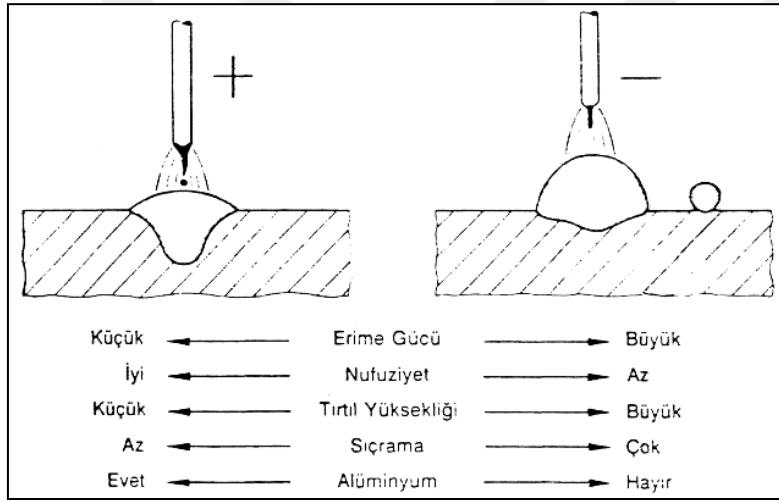
- Kullanılan kaynak akımı ve tel besleme hızı
- Kutuplama şekli
- Ark boyu veya gerilimi
- Yapılan kaynağın hızı
- Serbest tel (ilave metal) uzunluğu
- Torç açıları
- Kaynağın pozisyonu
- Kullanılan koruyucu gazlar
- Tel çapı [13].

Kaynak akımı

Kaynak akım şiddeti, kaynatılacak iş parçasının ergime derecesine, kaynak dikiş formuna, ölçülerine ve elde edilen nüfuziyete olan etkisi diğer parametrelerden çok daha fazladır. Sabit gerilim özelliğine sahip gazlatı kaynak makinalarında, kaynak akımı tel ilerletme butonundan ayarlanabilmektedir. Telin ilerleme hızı yükseldikçe, doğru orantılı olarak kullanılan kaynak akımı da artmış olur [10].

Kutuplama

MIG/MAG kaynak yönteminde diğer kaynak yöntemlerindeki gibi doğru akımın kullanılmasında tel elektrod pozitif veya negatif kutba bağlanabilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının kaynaklarında, malzeme üzerindeki oluşan oksit katmanının yüzeyde parçalanması için tel elektrodun mutlaka pozitif kutba yani ters kutuplama yapılması gerekir. Metal ve alaşımların ve özellikle çeliklerin kaynağında her iki kutuplama uygulanabilmesine karşın, derin bir nüfuziyetin gerekli olduğu uygulamalarda ters kutuplama genellikle tercih edilir. Nüfuziyetin çok az olmasının istendiği durumlarda doğru kutuplama kullanılır.

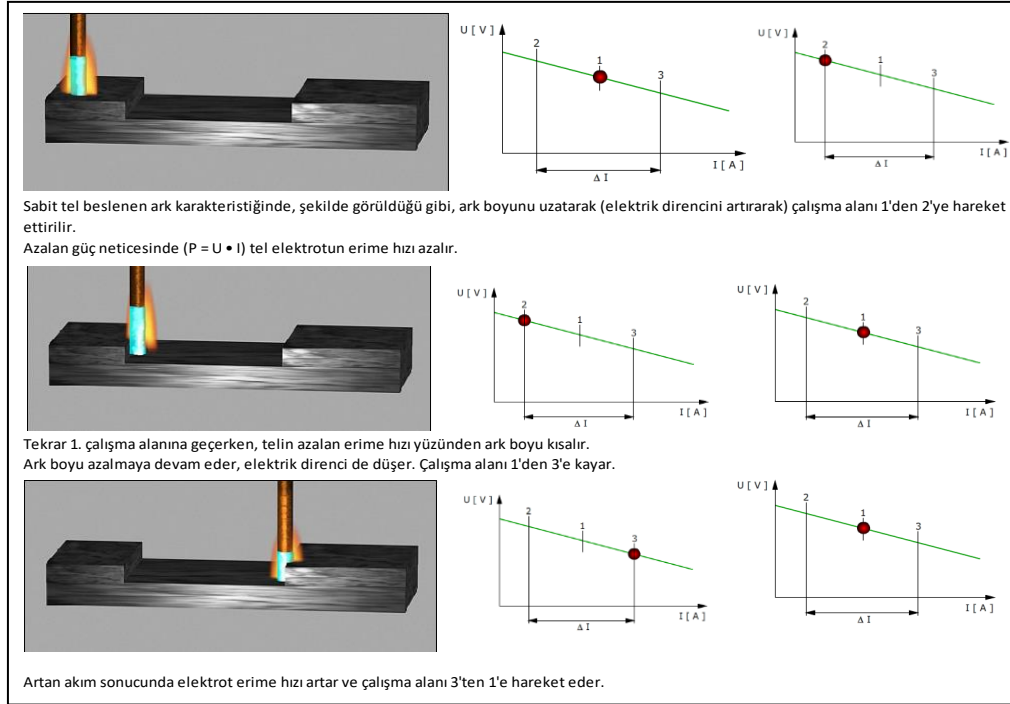


Şekil 2.28. Kutuplamanın dikiş formuna ve kaynak özelliklerine etkileri[18].

Ark gerilimi (ark boyu)

Yarı ve tam mekanize kaynak yöntemlerinde örneğin metal, koruyucu gaz ve tozaltı ark kaynağı gibi- kaynak parametreleri, akım ve ark gerilimi sabit kalmak zorundadır. Bunun için, ark boyunun da aynı seviyede kalması gerekir. Gaz metal ark kaynağı için ayarlama yapmanın tek yolu ark boyunun düzenlemesidir.

Bu düzenlemenin etkileri aşağıda verilmiştir. Kaynak işleminin, şekilde görüldüğü gibi bir kademe (basamak) üzerinden geçilerek yapılmaktadır [15].

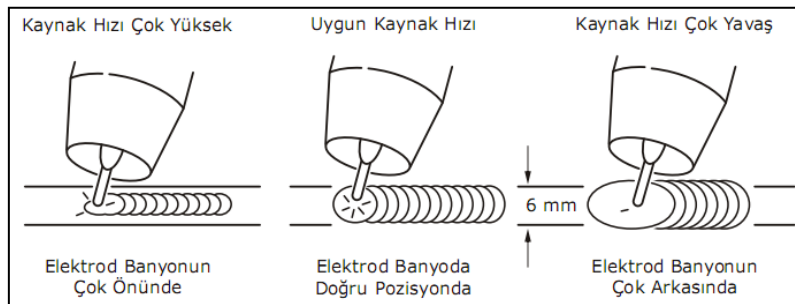


Şekil 2.29. Ark boyunun değişimi

Kaynak hızı

Kaynak hızı, arkın kaynak uygulaması süresince ilerleme hızı olarak tanımlanır. Diğer bütün parametreler sabit tutulduğunda, orta değerlerliklerdeki kaynak hızında nüfuziyeti en fazla olur (Şekil 2.30). Kaynak hızı düşürüldüğü durumlarda, iş parçası üzerine yığılan kaynak metali miktarında artış olmaktadır.

Düşük kaynak hızları ile yapılan kaynaklarda, kaynak arkı iş parçası yerine ergimiş kaynak havuzu üzerinde yanar ve bu sebepten dolayı nüfuziyet kabiliyeti düşük olur. Ancak bu esnada geniş bir kaynak dikişi elde edilmiş olur.

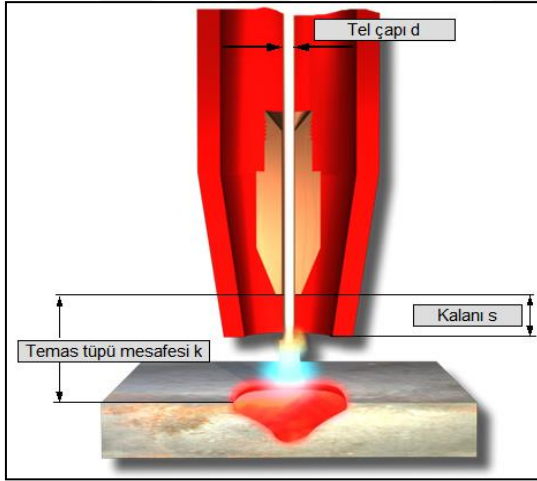


Şekil 2.30. Kaynak hızının kaynak dikişine etkisi [13]

Serbest elektrod uzunluğu

Temas tüpü mesafesi, temas tüpünün ucu ile iş parçası yüzeyi arasındaki mesafe olarak tanımlanmaktadır. Şekil.2.31’de ölçüm noktaları gösterilmektedir. Bu mesafe tam olarak ifade edilemez zira kaynak havuzu yüksekliği ve ark uzunluğu tam olarak ölçülemez.

Temas tüpü mesafesinin tam değeri, temas tüpü ve kaynaklanan yüzey üzerinde arkın tabanı arasında ölçülür. Uygulamada, düşük akım aralığı için daha küçük mesafeler (yaklaşık 15-20 mm) ayarlanır ki böylece temas tüpü ve gaz nozülü ısıl olarak rahatlatılmış olur. Temas tüpünün ark türüne göre mesafesine dair rehber bilgiler Çizelge 2.7’de yer almaktadır.

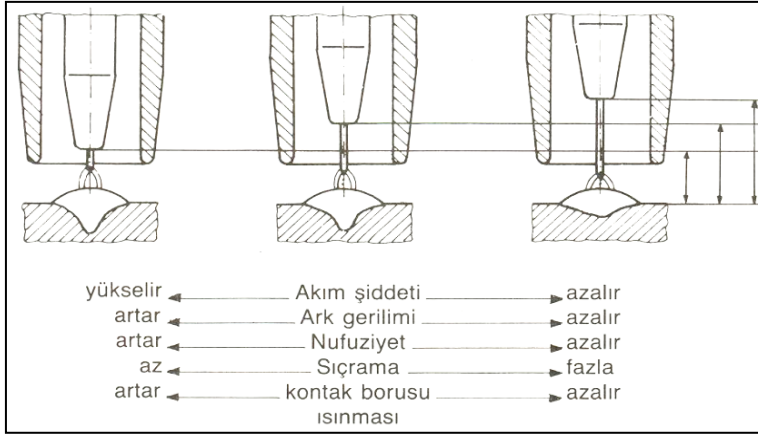


Şekil 2.31. MIG/MAG temas tüpü [15]

Çizelge 2.7. MIG/MAG temas tüpü ölçüleri

Ark türü	Temas tüpü mesafesi k [mm]	Kalanı s [mm]
Kısa ark	yaklaşık 10 * tel çapı	0 - 3
Uzun ark	yaklaşık 8-12 * tel çapı	2 - 5
Sprey ark	yaklaşık 12-16 * tel çapı	5

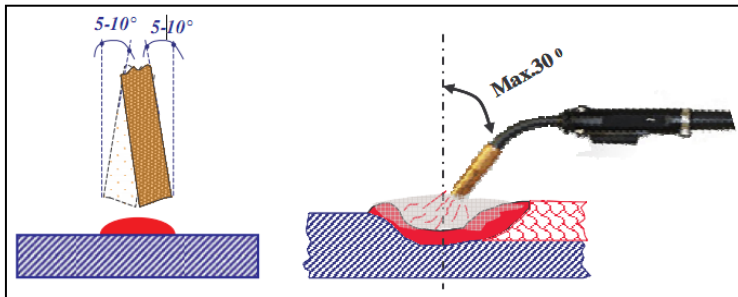
Aşağıda Şekil 2.32’de temas tüpünün kaynak havuzuna olan mesafesinin değişimi ile yapılan kaynak elde edilen sonuçlara etkileri görülmektedir.



Şekil 2.32. Temas tüpünün kaynağa etkileri [24]

Torç açıları

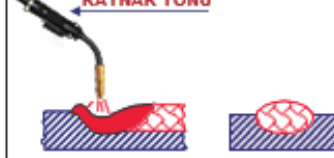
Kaynak torcunun kaynatılacak malzemeye göre konumlandırması ve kaynak esnasındaki hareketi kaynak dikişinin formunu etkileyen parametrelerdendir. Bu konumlandırma esnasında oluşan açılar, çalışma ve hareket açıları olarak adlandırılır. Çalışma açısı, 90^0 etrafında yapılan $5^0 - 10^0$ derece arasında sarkaç hareketi yapılması ile oluşur. Hareket açısı, dik eksenden max. 30^0 derecelik yani yataydan 60^0 derecelik ilerlemede torca kaynak dikişi eksenine paralelinde verilen açıdır. Hareket açısının 30^0 'yi aşmadığı müddetçe, oluşan ark banyosu kaynakçı tarafından kolayca kontrol altına alınabilir. Kaynağı yapan uygulamacı kaynak banyosunu ve tel ucunun ergimesini kolaylıkla görmesinden dolayı kaynak dikişin kalitesi yüksek olur ancak bu değer aşıldığında nüfuziyet azalma olur.



Şekil 2.33. Torç hareket ve çalışma açısı

Kaynak sırasında torcu ilerletme pozisyonu ise üç konumda seçilebilir. Bunlar; saplama, sürükleme ve dikey pozisyonlardır. Saplama pozisyonunda torç ucu sürekli soğuk bölgeye doğru tutulurken, saplama pozisyonunda torcun ucu sürekli erimiş ve katılaşmaya başlayan

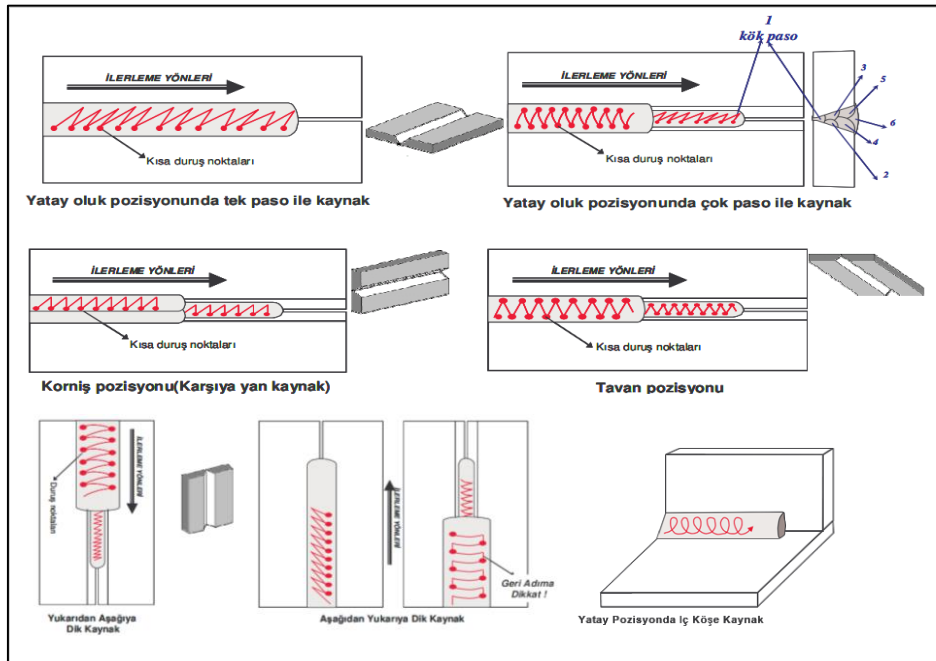
kaynak metaline doğru tutulmaktadır. Dikey pozisyon manuel kullanımlarda uygun değildir. Çünkü kaynakçı kaynak banyosunu görmekte zorlanacaktır[9].

 SAPLAMA KAYNAK Aralık doldurma : İYİ Ark kararlılığı : KÖTÜ Nüfuziyet (yanma): KÜÇÜK Sıçrama : FAZLA	 SÜRÜKLEME KAYNAK Aralık doldurma : KÖTÜ Ark kararlılığı : İYİ Nüfuziyet (yanma): DERİN Sıçrama : AZ	 DIKEY KAYNAK Aralık doldurma : ORTA Ark kararlılığı : ORTA Nüfuziyet (yanma): ORTA Sıçrama : ORTA
---	--	--

Şekil 2.34. Torç ilerletme yöntemleri

Kaynak pozisyonları

Torcun hareketi, çalışma pozisyonu ile işin form ve bulunduğu konumuna göre belirlenir. Örneğin, oluk pozisyonunda ve yan yani korniş kaynaklarında torcu zig-zag hareketleri ile iç köşe dikisinde dairesel hareket ettirmek gibi.



Şekil 2.35. Pozisyonlar ve ilerlemede torç hareket şekilleri

Koruyucu gazlar

MIG/MAG'ta kullanılan koruyucu gazlar, tel ve kaynak banyosunu atmosferin olumsuz etkilerine karşı muhafaza etmek amacıyla asal, aktif veya her ikisinin karışımıyla oluşan gazlardır. Koruyucu gazların bu görevinin yanı sıra kaynak süresince aşağıdaki özellikleri de belirlerler:

- Ark karakteristiği,
- Metal transfer biçimi,
- Nüfuziyeti ve kaynak dikiş formu,
- Kaynak hızları,
- Kaynak metalinin mekanik özelliklerini belirlerler [10].

Koruyucu gazlar ve özellikleri Çizelge 2.8'de görülebilir.

Çizelge 2.8. Koruyucu gazın etkileri [24]

ETKİSİ	ARGON	KARIŞIM GAZI	KARBONDİOKSİT
Eriyikle Reaksiyon	Yok	Zayıf	Kuvvetli
İyonizasyon		Çok İyi	İyi
Dikiş Taşkınlığı ve Nüfuziyet			
Dikiş Görünümü	Düz	Hafif Tırtıllı	Kaba Tırtıllı
Siçrama Oluşumu	Çok Düşük	Düşük	Daha Yüksek
Hava Girişine Duyarlılık	Çok Fazla	Fazla	Orta

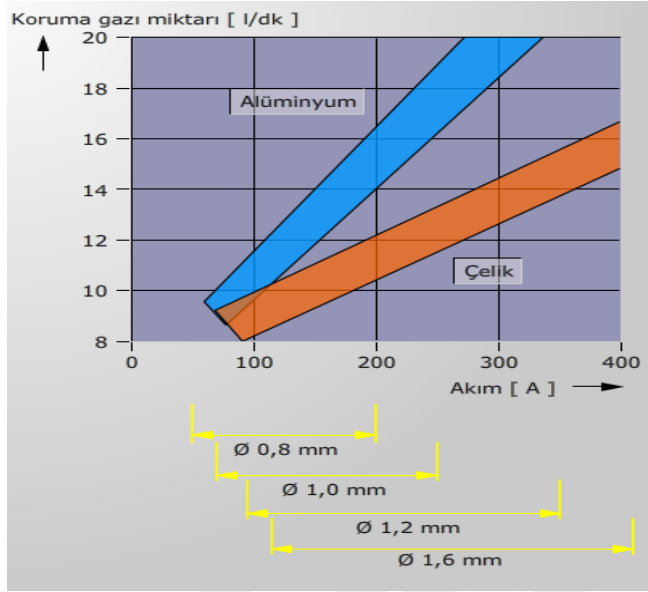
Yukarıdaki çizelgeden de anlaşılacağı gibi koruma gazı çok önemli olup, gereken koruma gazı miktarı, aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Koruma gazı türü
- Gaz nozülü çapı
- Ark türü
- Kaynak türü
- Malzeme türü

Kaynak esnasında koruma gazı miktarı, çelik malzemelerin kaynağı için, aşağıdaki genel kural kullanılabilir:

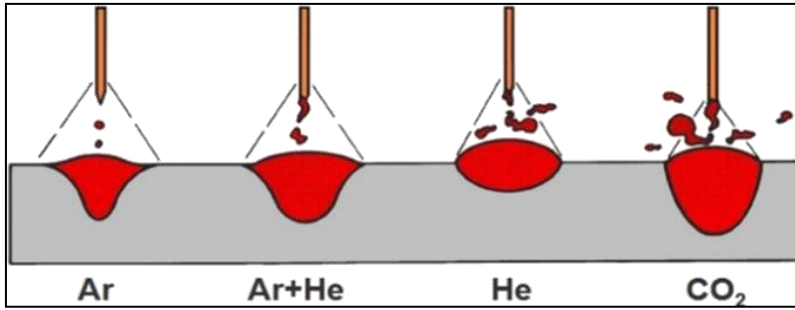
$$\text{Gaz miktarı [lt/dk]} = 10 \cdot \text{tel elektrot çapı [mm]} [15]$$

Gereken gaz miktarını daha doğru bir şekilde tespit etmek için, aşağıdaki diyagrama bakınız:



Şekil 2.36. Gazların miktarını belirleme [15]

Ayrıca koruyucu gazın dikiş formuna etkisi:



Şekil 2.37. Farklı gazların nufuziyet üzerine etkisi [24]

Aşağıda Çizelge 2.9'da bazı malzemeler için uygun gaz karışımlarını ve avantajları görülebilir [54].

Çizelge 2.9. Karbon çeliği MAG ark kaynağında gaz seçimi

Metal Tipi	Malzeme Kalınlığı	Transfer Modu	Önerilen Koruyucu Gaz	Üstünlükleri
Karbon Çeliği	Maks. 2 mm	Kısa Devre	Ar+CO ₂ / Ar+CO ₂ +O ₂	Yeterli nüfuziyet ve distorsiyon kontrolü.
	2 mm-3,2 mm	Kısa Devre	Ar+8-25 % CO ₂ Ar+He+CO ₂	Yüksek metal yığıma hızı. Düşük distorsiyon ve sıçrama. İyi banyo kontrolü.
	3,2 mm'den fazla kalınlıklar	Kısa Devre	CO ₂ Ar+15-25 % CO ₂	İyi nüfuziyet ve banyo kontrolü. Pozisyon kaynağına uygunluk.Yüksek kaynak hızı.
		Kısa Devre / Küresel	Ar+25 % CO ₂	Yüksek akım ve hızlı kaynaklara uygun.
		Kısa Devre	Ar+50 % CO ₂	Pozisyon kaynaklarında iyi, derin nüfuziyet, düşük sıçrama, yüksek ilerleme hızı.
		Kısa Devre + Küresel (gömülü ark)	CO ₂	Derin nüfuziyet ve en yüksek ilerleme hızı ancak malzemeyi delme riski var
		Sprey Geçiş	Ar+1-8 % O ₂	O ₂ miktarı arttıkça daha akışkan kaynak banyosu oluşur. Dikiş formu ve görüntüsü iyi. İyi banyo kontrolü.Ark kararlılığı yüksek.
		Sprey Geçiş	Ar+5-20 % CO ₂	CO ₂ oranı arttıkça esas metalin oksidasyonu ile cüruf ve tufal oluşumu artar. Kararlı ark, sağlam kaynak metali ve artan dikiş genişliği. Banyo akışkandır.
		Kısa Devre Sprey İletim	Ar+CO ₂ +O ₂ Ar+He+CO ₂ He+Ar+CO ₂	Kısa devre ve sprej iletim transferlerine uygun. Geniş kaynak akımı aralığı ve iyi ark performansı. İyi banyo kontrolü ve düzgün dikiş formu.
		Yüksek Akım Yoğunluğu	Ar+He+CO ₂ +O ₂ Ar+CO ₂ +O ₂	Yüksek metal yığıma hızları sağlanır (3.5-7 kg/saat). Bu değerlere erişmek için özel ekipman ve kaynak teknikleri gerekebilir.

MIG/MAG tel elektrod çapı

MIG/MAG kaynağında ince çaplı tel elektrodlar ince kesitli malzemeler için, kalın tel elektrodlar ise kalın kesitli malzemeler için kullanılır [10].

Dolgu malzemeleri kaynak işlerinde aşağıdaki isteklere karşılık vermelidir.

- Kaynak dolgusunu oluşturma
- Birleştirme kaynağı
- Farklı ana malzemeler

Tel elektrotları seçerken kullanıcı değişik standartlar arasından masif ve özlü tel grupları arasından seçim yapabilir. Standart çaplar aşağıdaki ölçülerde mevcuttur:

- 0,6- 0,8 – 0,9 – 1,0 – 1,2 – 1,4 – 1,6 – 2,0 – 2,4 (3,2) mm

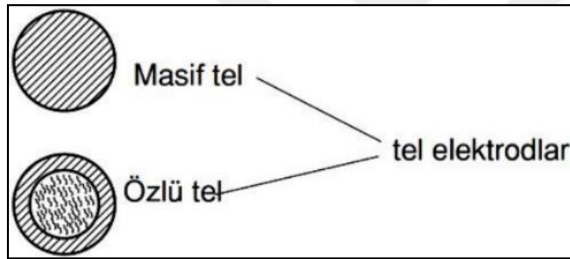
MIG/MAG kaynağında kullanılan elektrotlar aşağıda sınıflandırılmıştır.

- Masif tel elektrotlar

EN ISO 14341'a göre tanımlı bu elektrotlar alaşımsız, düşük alaşımlı ve mikro alaşımlı çeliklerin kaynağı için kullanılmaktadır. Paslanmaz ve ısıya karşı dirençli çelikler için gruplandırma EN ISO 14343'e göre koşullandırılmaktadır.

- Özlü tel elektrotlar

Bu tip dolgu malzemeleri EN ISO 17632'de yer almaktadır. Bu standartta rutil ve bazik örtünün ayrıt edilmesinin yanında metal özlü dolgu malzemelerinden de bahsedilir [15].



Şekil 2.38. MAG tellerinin kesit görünüşü [24]

2.3. Kaynak Yöntemlerinde Otomasyon ve Mekanizasyon

Hızlı artan nüfusun çağımızda ve ekonomik gelişmenin doğal bir neticesi olarak ürünlere ihtiyaç artmaktadır. Bir taraftan artış gösteren işçilik ücretleri ve üretim girdilerinin zamanla artması karşımıza çıkmaktadır. Bir taraftan da pazar şartlarının getirdiği rekabete dayanmak, diğer taraftan da artan ihtiyaçlara cevap karşılayabilmek için imalatın artırılması ancak otomasyonu uygulamakla mümkündür. Kaynak Teknolojisi de gelişimlere cevap vermek zorundadır.

2.3.1. Kaynak makinelerinde mekanik ve elektromekanik donanımlar

Temel itibarıyla yarı otomatik bir kaynak usulü olan MIG/MAG için önceleri çevriciler yani pozisyonierler kullanıma sokularak bazı işleri yapan otomatlar geliştirilmiştir. Bunların ilk

uygulamaları tozaltı yönteminde olduğu gibi, dairesel iş parçalarının çevresel kaynak dikişlerini ve bu parçalardaki boyuna kaynak dikişleri gerçekleştiren mekanik aparatlar oluşturmuştur.

MIG/MAG kaynak usulünde, tel sürme ve kullanılan kaynak ark boyu kaynak makinesi tarafından ayarlanabilmesi otomasyona geçişte kolaylık sağlamıştır [17].

2.3.2. Kaynak robotları

Büyük küçüklü bütün imalatçı firmalar uluslararası pazarda rekabet edebilecekleri bir nokta yakalayabilmek adına robotik imalata bağlı kaynak yöntemlerini tercih etmektedirler. Bu tercihi yapan imalatçılar kaynak kalitesini, esnekliğini ve verimliliği geliştirmek ve alıcıların değişen taleplerini giderme gerekliliğini dikkat etmektedirler.

Robot kullanımı ile elde edilen kaynaklar dikkate alındığında, robotik kaynak sistemleri, kullanılan kaynak tel çapının 1,5 katı kadar kaynak kalitesini yinelenabilir hassasiyette parçaları kapsar. İş parçaları belirtilen aralıkta tekrarlanabilir nitelikte kaynaklar yapılamaz ise Touch Sensor olarak adlandırılan dokunma sensörü veya herhangi bir dikiş izleme sistemi olan Seam Tracker veya ark sensörü yani Arc Sensor kullanımı gerekmektedir. Ark sensörü ile sürekli olarak kaynak yapılacak çizgi izlenirken çalışılan imalat malzemesinin imalinde oluşan hataları, ısı gerilmeler yüzünden oluşabilecek kusurlar engellenebilir. Touch sensörü vasıtasıyla kaynak başlangıç noktası en uygun olarak tespit edilir.

Kaynak robotu tercihinde bir diğer önemli ön adım ise doğru kaynak yöntemi ve uygulama ekipmanlarını belirlemektir. Kaynak yöntem tercihi kaynağın görünüşünü, kaynak genişliğini, imalat kapasitesini, ilerleme hızını ve kaynaklanacak malzeme kalitesini etkilemektedir. Manuel olarak yapılan kaynaklar zaman zaman kaynak robot sistemi tarafından yapılamamaktadır. Kullanılan robot kaynatılacak parçalara göre değişiklik yapmazken kaynakçılar bunu yapmaktadırlar. Robot genellikle bir manuel çalışan bir kaynakçıdan iki hatta dört kat hızlı şekilde kaynak yapabilmekte ve tekrarlı sonuçlar elde edebilmektedir.

Netice olarak hangi parçaların kaynak robotu ile kaynaklanması gerektiğine karar kılmak gerekmektedir. Şayet kaynatılacak malzeme listesi çok kapsamlı olursa buda yüksek

maliyetli bir kaynak robotu sisteminin gerekliliğini ortaya çıkartır. Alınacak kaynak robotunun oluşan maliyeti ve sonradan basit yöntemlerle sisteme eklenecek ilave parçalarla oluşturulacak optimum tercih etmek gerekmektedir.

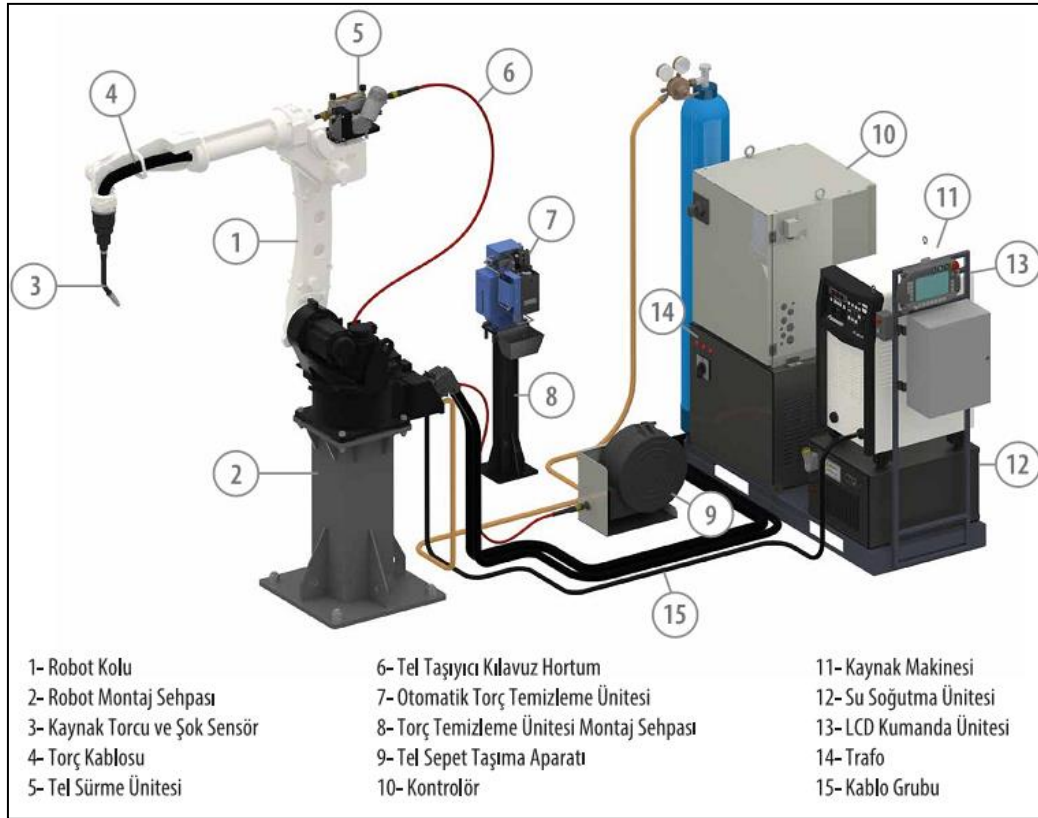
Kaynak robot sistemi kurulması ve alınmasına karar vermek birçok etmene bağlıdır.

Bunlar;

- Kaynak robotu bilgisi ve tecrübesi
- Robotu kullanacak operatör
- Sahip olunan finansal bütçe

Sonuçta, daha çok performans elde edilecek kaynak robot sisteminin gereksinimi, çok daha fazla ekonomik yük oluşturacaktır. Üretim ihtiyaçlarına cevap verebilmek için riski, iş gücünü, oluşan maliyeti ve performansı değiştirmeyecek çözümler bulunmaktadır [25].

Ark kaynak yöntemlerinden olan, kaynak uygulamasının sürekli olarak yapıldığı MIG-MAG ve TIG kaynak usulleri endüstriyel kaynak robotları vasıtasıyla çok iyi gerçekleştirilmektedir. Bu kaynak usulleri çağımızda, operatörler vasıtasıyla yarı otomatik çok kolay yapılan usuller olmasına karşın, operatörler çoğu kez sıcaklık ve bazen de tehlikeli çalışma şartlarında bu işlemleri yerine getirmek durumunda olurlar. Daha önceden de ifade edildiği üzere, olumsuz şartlar kaynak robotlarının ön çıkmasına ve gün geçtikçe artan oranlarda uygulamaya girmesinde etkili olmuşlardır [17].



Şekil 2.39. Robot ark kaynağı istasyonu [26]

2.3.3. Manuel ve robotik kaynak usullerinin mukayesesi

Kaynak robotlar vasıtasıyla gerçekleştirilecekse, iş parçalarının bağlandığı sıkma aparatlarıyla donatılmış bir dönel kaynak tezgahına ihtiyaç vardır. Operatörler, tezgahın bir tarafında, kaynatılacak malzemeleri sıkma aparatlı fikstürlere bağlarlar. Tezgahın diğer tarafında ise robot, parçaların kaynağını gerçekleştirir. Tezgahın iki tarafı bir panel veya paravan ile bölünmüş ve operatör kaynak arkından rahatsızlık duymaz. Manuel kaynakçı ancak dakikada 70 cm hızla kaynak yapabilirken aynı malzemeyi robotun hızlı ve düzgün hareketiyle, yüksek akımlarda çalışarak, 270 cm/dakika hızda kaynak yapabilmektedir. Kaynak robotunun kaynatılan parçadaki kaynak hattını düzgün takip etmesi için geliştirilen sensörler, doğrusal tarama yapabilen kızılötesi bir ışın ile parçanın şeklini algılayabilmektedir. Böylece parçanın uygun olarak kaynaklanması için başlangıç ve bitiş noktalarının 1,5 mm'lik toleransla ayarlanması yeterli olmaktadır.

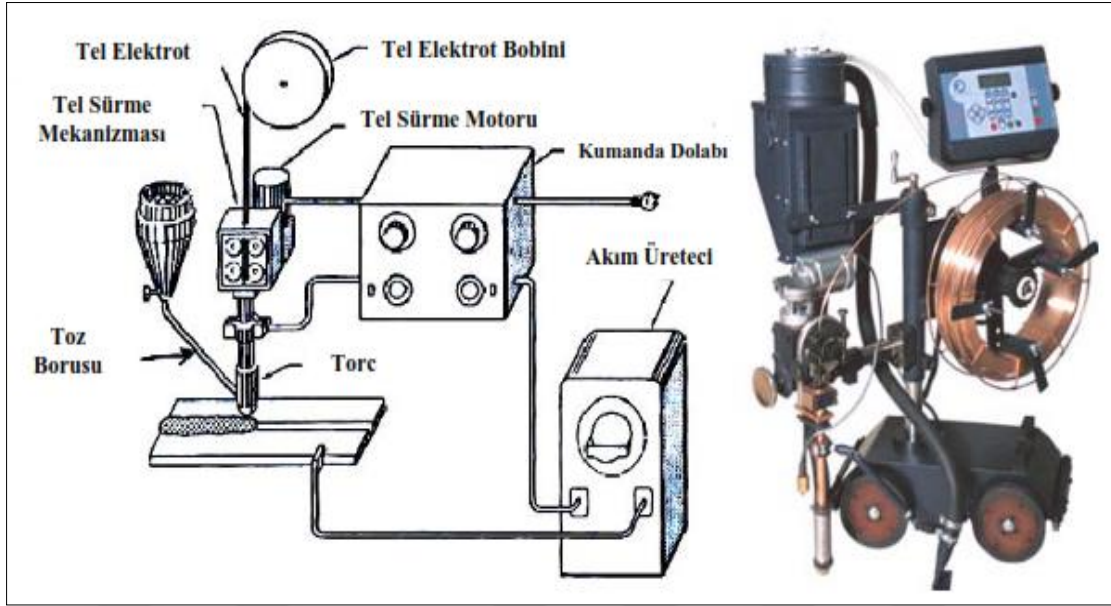
Bir firmada bilgisayar şasesi üretmek için gereken 35-70 adet arasındaki kaynağı, el ile 42 dakikada kaynatılırken, robot her biri 50 mm uzunluktaki 44 kaynağı yalnızca 12 dakikada bitirmektedir [27].

2.3.4. Robotik kaynak ekonomisi

Toplam kaynak maliyetleri analizi yapılmadan, üretim yöntemleri, mevcut üretim gereklilikleri ve parça tasarımı analizleri olmadan yeni bir robot almak, finansal ve üretim felaketi haline gelebilir. Tersine, doğru planlama ile kullanıcı verimliliği % 50–400 oranında artırabilir. Birçok kullanıcı, yatırımlarını bir veya iki yıl içinde amorti edebilir. Bir robotik kaynak sisteminin toplam sermaye maliyeti çeviriciler, taşıma ekipmanları aksesuar ve aletler dahil robotun maliyetinin iki veya üç katı olabilir. Bunun nedeni, en etkili robot operasyonu için tasarlanan çevresel ekipmanların maliyetidir. Örneğin, zayıf kaynak ağız çatım problemleri, yetenekli bir kaynakçının genellikle ayarlayabileceği bir problem, ancak bir robot kendi başına çözemez. En iyi ihtimalle, zayıf kaynak ağız çatım problemleri, düşük kaynak hızı gerektirir. En kötüsü, eksik kaynaklar anlamına gelebilir. Kaynakla birleştirmede kaynak torcu ve elektrodunun erişebilirliği, kaynakta bir tasarım konusudur. İnsanlar kötü tasarımı, sıra dışı becerilerle telafi edebilirler. Robotlar bunu yapamaz, ancak kaynak birleştirme tasarımı ve parça toleransları doğruysa, iş uygun şekilde konumlandırılır ve program iyi tanımlanmışsa, robotlar kaynak kalitesini sürekli olarak artırabilir. Kötü kaynakların maliyeti aşırı olabilir. Kaynak kalitesini tek başına artırmak bazı robotik kaynak sistemleri için yeterli olabilir. Örneğin, Amerika’da, ağır kaynaklı plakadaki bir kaynak onarımı; ilk kaynak, muayene, X-ışını, kötü kaynağı temizleme, yeniden bağlama ve yeniden inceleme için her 30 cm için 400 ila 4000 ABD Doları arasında bir maliyete mal olabilir. Kötü bir kaynak çok daha pahalıya mal olabilir ve bazen yaşamlara, yine kaynaklı parça çalışırken arızaya neden olur [27].

2.4. Tozaltı Kaynağı

Esasında bir elektrik ark yöntemi olan tozaltı kaynak yöntemi, tel sürme mekanizması vasıtasıyla otomatik olarak kaynak noktasına sevk edilen çıplak tel ile kaynaklanacak malzeme arasında ark oluşturularak yapılır. Bu esnada, kaynak bölgesine sürekli olarak bir koruyucu toz dökülerek ark, üzerine dökülen tozun altında yanmaktadır. Bundan dolayı, bu kaynak yöntemi “Tozaltı Kaynak Yöntemi” olarak isimlendirilmiştir (Resim 5.1).



Resim 2.1. Tozaltı kaynak makinası

Tozaltı kaynak yönteminde oluşturulan ark, dökülen toz örtünün altında kaldığı için etrafa ışıyım yapmaz ve ark enerjisinin yaklaşık % 68'i yani çoğunluğu doğrudan yapılan kaynak için harcanmış olup kullanılan koruyucu toz kaynak havuzunu atmosferin zararlı tesirinden korumaktadır [28].

2.4.1. Tozaltı kaynak yönteminin özellikleri

Bu kaynak yönteminde akım, kaynak ark voltajı, tel ilerleme hızı ve kaynak hızı gibi parametreleri iyi ayarlandığı sürece kusursuz kaynak dikişler yapılır. Örtülü elektrotla yapılan kaynağa nazaran bu usulde aynı çap tel ve yüksek kaynak akımı kullanılmasıyla, daha büyük kaynak banyosu oluşturulduğundan nufuziyetin derinliği daha fazla olmaktadır.

Tozaltı kaynak yöntemi, yarı ve tam otomatik kaynak tatbikine uygun olması sebebi ile, çağdaş kaynak uygulamaları olarak sanayide ilerlemiş devletlerde genel bir kullanım alanı bulmuştur. Sonuç itibariyle toz altı kaynak yöntemi:

- Hızlı ve sürekli kaynak
- Harcanan işçilikte maliyet
- Kaynak dikişleri derin nufuziyetli olan bir kaynak usulüdür [29].

2.4.2. Yöntemin çalışma prensibi

Tozaltı kaynak yöntemi otomatik bir kaynak yöntemi olmasıyla birlikte, yüksek akım güçlerine sahip olup tek paso ile 85 mm, çift paso ile 180 mm ve çoklu paso ile 300 mm kalınlığa kadar malzemelerin kaynakları yapılabilir. Kaynaklanabilecek en ince kesitli malzeme kalınlığı ise, 1,2 mm'dir [8].

2.4.3. Avantajları

- Tozaltı kaynağı ile 200 ile 5000 Amper akım şiddeti ve 6 ile 300 m/saat kaynak hızlarında kaynak yapılabilir.
- Tozaltı kaynağında elde edilen kaynak metalinin 2/3'ünü ana metal ve 1/3'ü ise ilâve metal oluşmakta olup bu özelliğinden dolayı ilâve metal tüketimi azdır.
- Tozaltı kaynağında toz hunisi, tel sürme mekanizması, ayar ve kumanda tertibatları hızı, ayar yapılabilen veya sabit tutulan bir arabaya adapte edildiğinden, sürekli olarak kaynak uygulamaları imkânı sağlanır. Yetkin operatör kullanım şartı oluşmamaktadır.
- Kaynağın toz ve cürufle örtülmesi, yavaş soğumayı sağlamakta olup kaynak kusurlarının oluşmasını düşürmektedir.
- Kaynak arkı koruyucu toz tarafından iyi bir şekilde örtülmesinden dolayı, arkın enerji çok düşük olur.
- Kullanılan tozun kaynak arkını korumasından dolayı, ultraviyole ışınlardan ve oluşan gazlardan korunmak için özel gereksinimlere ihtiyaç yoktur [29].

2.4.4. Dezavantajları

- İlk yatırım masrafları yüksek olup pahalı makinalardır.
- İnce saçların kaynağında kullanılması ekonomik değildir.
- Tavan ve düşey pozisyonda kaynak yapılamaz.
- Kısa boylu kaynak ve karışık şekilli dikişler için uygun değildir.
- Bazı parçaların kaynaklarında ekonomik bir kaynak yapılamamaktadır.
- Kaynak tozu iyi muhafaza edilmediği takdirde nem kapacağından dolayı yapılan kaynak dikişinde hataya yol açma olasılığı vardır. Bu sebepten bazik karakterli kaynak tozlarının kullanılmadan önce kurutulmasında azami dikkat göstermek gerekir.
- Kaynak tozunun tekrarlı kullanımlarında nemlenmekte ve kalitesi düşmektedir.

- h. Yüksek akım şiddeti ile çalışılmasının bir sonucu olarak oluşan yüksek sıcaklıklar nedeniyle kaynak metalinde ve ITAB'da arzu edilmeyen içyapı değişimleri olabilmektedir. Ancak gerekli tedbirlerin alınmasıyla bu ihtimaller en az seviyeye düşürülebilir [30].

2.4.5. Uygulama alanları

Tozaltı kaynak yöntemi birleştirme kaynakları yanı sıra kaplama ve dolgu kaynak uygulamalarında da başarıyla uygulanan bir usuldür. Birleştirme usulü olarak tozaltı kaynağının kullanıldığı alanlar:

- Basınçlı tanklar
- LPG tüpler
- Spiral kaynaklı borular
- Çelik konstrüksiyon imalatlarında
- Yapma profil imalatında
- Otomotiv ve lokomotif sektöründe
- Gemi imalat ve inşaa alanında

Dolgu uygulamaları kullanım alanları:

- Makinelerin aşınan parçalarının dolgu kaynağında
- Aşınma ve darbe karşı mukavemetli sert dolgu kaynaklarında

Kaplama uygulama alanları:

- Oksidasyon ve korozyona dirençli kaplama kaynaklarında [28].

2.4.6. Çalışma tekniği

Toz altı kaynak yöntemi otomatik olarak uygulanabilen bir yöntem olması yanında, kaynak akımı, kaynak voltajı, ilave tel çapı, tel ilerleme hızı, kaynak hızı, kutuplama ve serbest tel uzunluğu gibi değiştirilebilen kaynak parametreleri dikiş biçiminin oluşumu üzerinde büyük oranda etkilidir.

İnce kesitli malzemelerin kaynağında dikkat edilmesi gerekenler

Toz altı kaynak usulünün en önemli avantajlarından biriside elde edilen yüksek ergime verimi ile elde edilen nüfuziyet derinliğidir. Kaynak yöntemin bu özelliği sebebiyle malzeme kalınlığı 4 mm'den ince olan parçaların kaynağında bazı problemeler meydana gelebilmektedir.

Bu kalınlıklardaki parçaların kaynağında:

- Toz yastık kullanılması
- Bakır altlık kullanımı
- Kaynak akım ve ark voltajının düşük değerlerde tutulması
- Kaynak esnasında yüksek hızlarda çalışılması
- Kaynak teli elektrod çapının maksimum 2,0 mm olması
- Pozitif kutuplama ile çalışılması

Kalın kesitli malzemelerin kaynağında dikkat edilmesi gerekenler

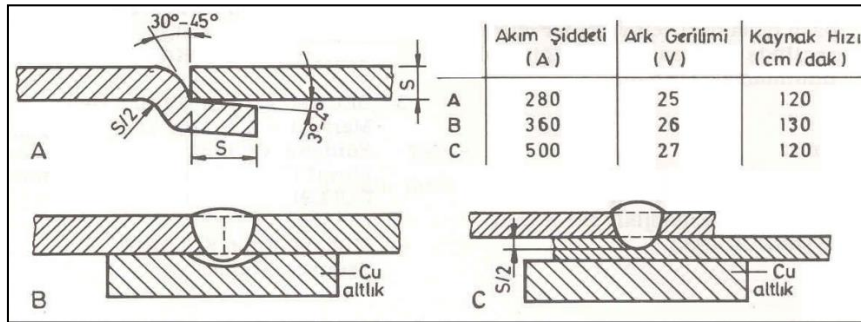
Kalın parçaların tozaltı kaynak yöntemi ile kaynaklı birleştirmelerinde, ana malzeme kimyasal kompozisyonunda homojenlik olmaması şartlarında çeliklerin kaynağında sıcak çatlama riski bulunmaktadır. Kök pasoda elde edilen banyonun büyüklüğündeki etkisi ile esas metalde ergime miktarının artması bu riskin oluşumuna katkı vermektedir. Bu problem ark voltajının yüksek olduğu kök paso kaynaklarda görülmekte olup, akımının düşük tutulması icap etmektedir.

Kaynak uygulamalarında tel çaplarına göre verilen akım miktarları alt sınırlarınada tutulmasında fayda vardır. Çizelge 2.10'da bu amaca göre belirlenen değerler örnek oluşturması için verilmiştir.

Çizelge 2.10. Tozaltı kaynağında işlem parametrelerinin dikiş boyutuna etkisi

DEĞİŞİMLER	Boyutlar		
	t	b	h
I_k (A)	↗	↗	↗
U_k (V)	↘	↗	↘
V_k (cm/dak.)	↘	↘	↘
α_1 (°)	↗	↘	↗
α_2 (°)	↘	↗	↘
α_3 (°)	↘	↗	↘
β (°)	→	↗	↘
a (mm)	↗	↗	↘
KA (mm)	↘	↗	↗
Toz d_t (mm)	↘	↘	↘
Kutuplama	—	↘	↘
	+	↗	↗
Kaynak teli d_t (mm)	↘	↗	↗

↗	Artıyor	↘	Azalıyor
↗↗	Daha çok artıyor	↘↘	Oldukça azalır
↗↗↗	Çok az artar	↘↘↘	Çok az azalır
→	Değişmiyor		



Şekil 2.40. İnce saclar için birleştirme biçiminden örnekler (Sac kalınlığı 3 mm, tel çapı 2,00-2,50 mm, doğru akım pozitif kutuplama) [29]

2.4.7. Tozaltı kaynak metodu çeşitleri

Tandem tozaltı kaynak metodu

Bu usul aynı yönde birbirini izleyen iki elektrot kullanılmasıyla yapılan bir kaynaktır.

Tandem kaynak usulünün avantajları;

- Hızlı kaynak,

- Kaynakta gözenek oluşma riski düşük olur,
- Kaynak dikişinin çatlama ihtimali düşüktür,
- Elde edilen kaynak kalitesi yüksektir.

Bu avantajları sebebi ile bu usülle doldurma kaynak uygulama ihtiyacı olan yerlerde ve oksit kaplanmış yüzeylerin kaynaklarında kullanılır [8].



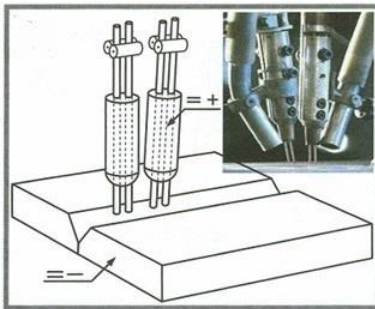
Resim 2.2. Tandem tozaltı

Paralel tozaltı metodu

Paralel tozaltı kaynağı yönteminde, birbirine paralel iki ilave tel kaynak yapılacak parçaya dikey olarak gelmektedir. Teller aynı kaynak kafasına bağlanır ve beraber hareket ederler.

Bu metodun avantajları;

- Nüfuziyeti derinliği kontrol altına tutulabilir.
- Kaynak arkının parçayı delme ihtimali düşüktür.
- Kaynatılacak parçalar arasındaki mesafeyi 1,5 mm ye kadar açmaya imkanından dolayı kaynak uygulaması sırasında parçalar arasında köprü kurabilme imkanı sağlar.
- Kaynak dikiş yüksekliği ve nüfuziyet derinliği ayarlanabilir.



Resim 2.3. Paralel tozaltı

Seri tozaltı kaynak metodu

Bu kaynak metodu ile yapılan kaynak dikişlerin nüfuziyeti ve ana malzeme karışım oranı düşüktür. Bu özellikleri sebebi ile özellikle doldurma kaynağında uygulamalarında kullanım alanı daha geniştir. Yöntemin adında da anlaşılacağı gibi, arklar seri olarak bağlanmış iki ayrı kaynak kafası kullanılarak yapılır. Kaynak akım üreticinin her bir ucuna bir tele bağlanmıştır ve parçaya ilave bir bağlantıya gerek yoktur.

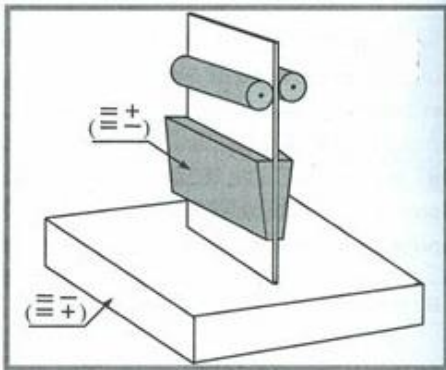
Bu kaynak yönteminin avantajları;

- Ergime gücü oldukça yüksektir.
- Toz sarfiyatı daha düşüktür.
- Dikişin çatlama ihtimali azalır,
- Nüfuziyeti derinliği az olduğundan ince kaynağı için elverişlidir [31].

Band tozaltı kaynak metodu

Bu metotta tel halindeki elektrotun yerini, band şeklinde şerit elektrot almıştır. Şerit elektrotla yapılan kaynak uygulamalarında diğer yöntemlerde yapılan kaynaklarda olduğu gibi benzer fiziksel ve metalurjik olaylar meydana gelir. Şerit elektrotla yapılan tozaltı kaynağının avantajları [10].

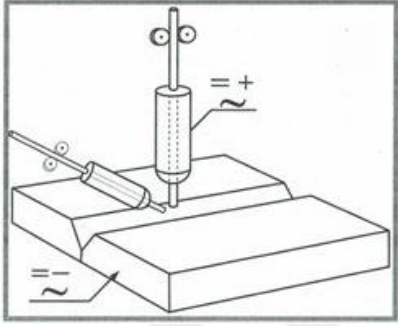
- Ergime gücü çok yüksektir.
- Nüfuziyet derinliği daha düşüktür.
- Gözenek bakımında kaynak dikişi oldukça yüksek bir emniyete sahiptir.
- Uygun bir maliyet sağlar [31].



Şekil 2.41. Band tozaltı kaynak usulü

Kızgın tel ile tozaltı kaynak metodu

Kızgın tel ile tozaltı kaynak metodu, tandem kaynak usulünün bir alternatifi olarak kullanılmaktadır. Kullanılan tel elektrodlardan bir tanesi elektrik ile ısıtılarak kaynak havuzuna gönderilir ve böylece elektrik enerjisinden tasarruf sağlanmış olur [31].



Şekil 2.42. Kızgın tel ile tozaltı kaynak usulü

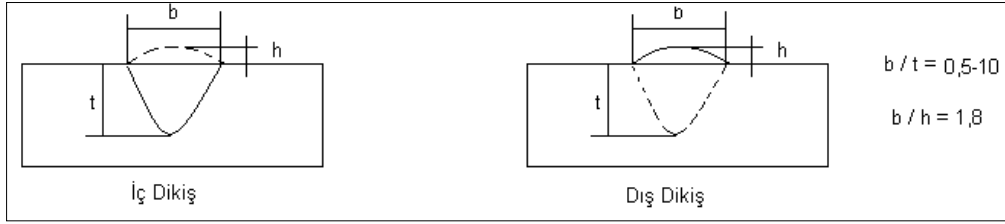
2.4.8. Tozaltı kaynağında dikişin formunu etkileyen faktörler

Tozaltı kaynağında dikişin şekil ve formu etkileyen faktörler:

- Kullanılan ark gerilimi
- Akım şiddeti
- Kaynak hızı
- Akımın yoğunluğu
- Kaynak ağız biçimi ve hazırlanma şekli
- Parçanın konumu
- Akım cinsî ve kutup durumu
- Serbet tel uzunluğu

Tozaltı kaynak yöntemi ile elde edilen dikişin kesiti incelendiğinde, bir iç ve bir de dış dikiş biçimi olmak üzere iki farklı biçimin, varlığı söz konusudur.

Nüfuziyet derinliği t ile ergime genişliğini b ile ve dikiş yüksekliğini ise h ile gösterilirse; iç dikiş formu b/t ve dış dikiş formu da b/h biçiminde tarif edilir. ($b/t = 0,5-10$ ve $(b/h) = 1,8$ arasında değişiklik gösterir.



Şekil 2.43. Tozaltı kaynak dikiş kesitinin tetkiki ve iç-dış formu

2.4.9. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan ilave teller

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan yüksek kaliteli çelik tellerin çapları 1,2 ile 12 mm arasında değişir. Kullanılan ilave tellerin yüzeyleri tamamen düz, pürüzsüz, yağ, pas ve pislikten arındırılmış olaması gerekir. Kullanılan tellerin oksitlenmesini engellemek ve kaynak sırasında akım geçişini kolaylaştırmak için kaynak tellerinin üzerine bakır kaplama yapılır.

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan tel elektrodlar içerdikleri manganez miktarlarına bağlı olarak düşük, orta ve yüksek manganezli teller olarak sınıflandırılır. İçerdikleri manganez oranları aşağıdaki gibidir:

- % 0,30 - 0,60 Mn, düşük manganezli
- % 0,90 - 1,25 Mn, orta manganezli
- % 1,75 - 2,25 Mn, yüksek manganezli

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan tel elektrodları fosfor ve kükürt içerikleri her birinin % 0,03'ün altında olması gerekmektedir. Kullanılacak tozaltı kaynak telinin seçiminde, koryucu kaynak tozunun özelliklerinin dikkate alınması gerekliliği unutulmamalı olup bu çok önemlidir.

2.4.10. Tozaltı kaynağındaki kaynak tozları

Tozaltı kaynak tozları, manuel olarak yapılan ark kaynak yönteminde kullanılan elektrod örtüsünün görevini üstlenir.

Bu görevler;

- a. Atmosferin zararlı etkilerinden kaynak banyosunu koruma,

- b. Dikişinin şeklini belirleme,
- c. Elde edilen kaynak dikişinin yavaş soğumasının sağlanması,
- d. Kaynak tozu, kaynak banyosuna ilâve ettiği elementlerin yanma kaybını ortadan kaldırarak dengeleme yapar [30].

2.5. Kaynak Hataları

Bütün kaynak kusurları yapılan kaynak dikişinde zayıflama ve süreksizlik oluşturdıkları için kaynak bağlantının çalışması sırasında hasarlara ve bazı durumlar da telafisi olmayan kazalara sebep olmaları dolayısıyla kaynaklı bağlantıların kusursuz olması istenir. Birçok kaynak yönteminde en çok karşılaşılan kusur cinsleri ve nedenleri aşağıda verilmiştir [18].

- a. Çatlaklar
- b. Gözenekler
- c. Kenar Yanığı (Undercut)
- d. Yetersiz Ergime
- e. Nüfuziyet Azlığı
- f. Kalıntılar
- g. Film Türü Kalıntılar
- h. Sıçramalar
- i. Hatalı Kaynak Şekli Ve Boyutu [32]

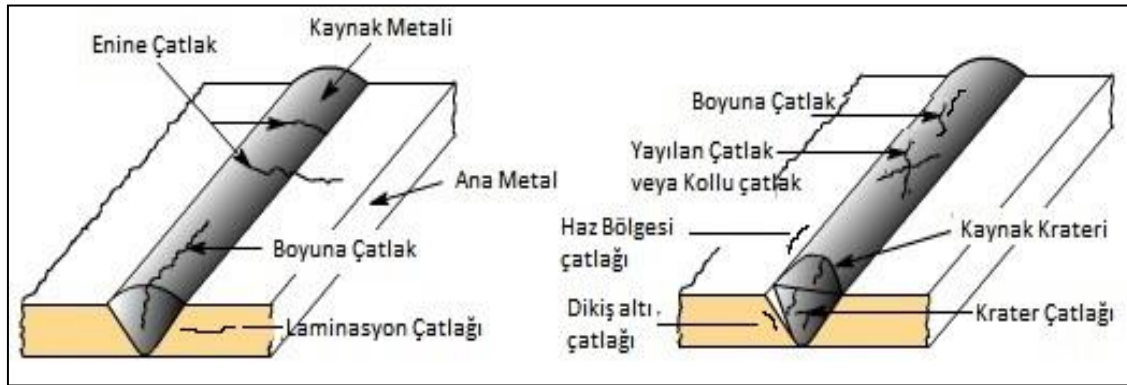
Eriyen elektrod ile yapılan MIG/MAG kaynağında TS EN 6520-1’de ise hatalar altı ana başlık altında toplanmıştır.

- a. Çatlaklar-No:100
- b. Gözenekler-No:200
- c. Katı Kalıntılar-No:300
- d. Ergime ve Nüfuziyet Eksiklikleri-No:400
- e. Kusurlu Şekil ve Boyut-No:500
- f. Çeşitli Kusurlar-No:600 [33]

2.5.1. Çatlaklar

Kaynak kusurları arasında en tehlikeli olanlar çatlaklar olup bünyesinde çatlak barındıran kaynaklı bir bağlantının gerek dinamik ve gerekse statik zorlanmasına asla müsaade edilmez [17].

MIG/MAG ve diğer kaynak yöntemlerinde farklı şekillerde çatlaklara rastlanmaktadır. Bir çatlağın konumu, oluşma nedenini hakkında bilgi vermektedir [14].



Şekil 2.44. Çatlaklar [32]

- Mikro çatlaklar-No:1001
Sadece mikroskop altında görünen bir çatlaktır.
- Boyuna Çatlaklar- No:101
Kaynak doğrultusu boyunca oluşan çatlaklar.
- Enine Çatlaklar- No:102
Kaynak doğrultusuna dik yönde oluşan çatlaklar.
- Yayılan Çatlaklar- No:103
Ortak bir noktadan yayılan çatlaklar.
- Krater Çatlaklar- No:104
Kaynak bitiş noktalarında görülen çatlaklar.
- Dallanmalı Çatlaklar- No:106
Bağılantısız bir çatlak grubundan (105) ve yayılan çatlaklar (103) ayırt edilebilen bir çatlaklar[33].

Kaynak metalinde çatlak

Olası nedenleri

- Hatalı kaynak ağzı seçimi
- Çok yüksek olması kaynak dikiş derinliği/genişliği oranı,
- Özellikle köşe ve kök kaynaklarında küçük dikiş,
- Yüksek ısı girdisi sebebi ile distorsiyona oluşması,
- Kaynatılan malzemelerin sıcak çatlamaya olan yatkınlığı
- Rijit parçaların birleştirilmesi,
- Kaynak sonrası hızlı soğuması

Çözümler

- Kaynak ağzı gözden geçirilerek yeterli dolgu metali yığılması,
- Gerilimi artırınız ya da akımı azaltınız, dikişi genişletmek veya nüfuziyeti azaltmak için,
- Distorsiyona neden olan yüksek ısı girdisi azaltılarak paso sırası değiştirilir.
- Ön tavlama yapılır.
- Soğuma esnasında kaynak dikişine etkileyen, malzemenin kendini çekmesini azaltmak için kaynak paso sırası değiştirilebilir.
- Yığılan ilave metalin miktarını artırmak için ilerleme hızını azaltılır.
- Yüksek manganı tel kullanılır.
- Krateri düzgün biçimde doldurmak için kaynak sonunda, krateri doldurmak için bir süre beklenir [34].

ITAB'taki çatlaklar

Olası nedenleri

- ITAB'ta sertleşme,
- İç gerilmelerin çok yüksek olması
- Hidrojen gevrekleşmesi,

Çözümler

- Ön tavlama ile soğuma hızını azaltılır.
- Kaynak sonrası gerilme giderme ısıtıl işlemini kullanılır.
- Ana metaldeki kirler temizlenerek kaynak yapılır [13].

Esas metalde çatlak

Olası nedenleri

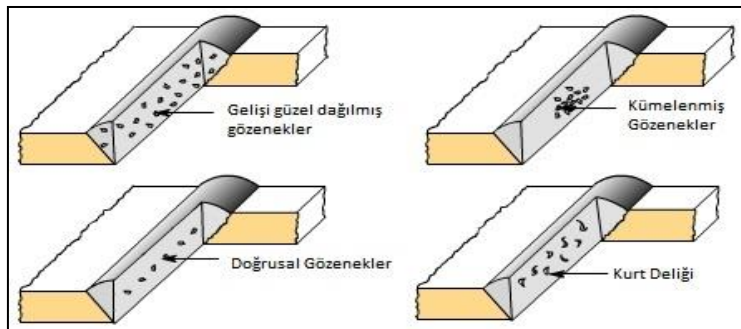
- Esas metalin bileşimi
- Soğuma hızı
- Çekme gerilmeleri

Çözümler

- Gerilme giderme ısıtıl işlemini kullanılmalı
- Esas metalin kimyasal ve mekanik özelliklere uygun kaynak yönteminin belirlenmesi
- Dizayn seçimine dikkat edilmesi[34].

2.5.2. Gözenekler

Gözenekler kaynak esnasında, kaynak banyosunda hapsolan gazların oluşturdukları boşluklardır. Gözenekler, gaz kabarcığı denilen tek tek yuvarlak veya gaz kanalı diye isimlendirilen boylamasına boşluklar şeklinde kaynak metalinde oluşur [17].



Şekil 2.45. Gözenekler [32]

- Gaz boşluğu- No:201
Kaynak metalinde kalan gazların oluşturduğu boşluklar.
- Düzgün dağılmış gözenekler- No:2012
Kaynak metali boyunca esasen homojen bir şekilde dağılmış gaz gözeneklerinin sayısı; doğrusal gözeneklilik (No:2014) ve kümelenmiş gözeneklilik (No:2013) ile karıştırılmamalıdır.
- Kümelenmiş gözenekler- No:2013
Rastgele bir geometrik dağılıma sahip gaz gözenekleri grubudur.
- Doğrusal gözenekler- No:2014
Kaynak eksenine paralel yerleştirilmiş gaz gözenekleri sırası.
- Uzmanmış gözenekler- No:2015
Yaklaşık olarak kaynağın eksenine paralel, büyük ve küresel olmayan boşluklar.
- Solucan Deliği- No:2016
Elde edilen kaynak metalinin katılaştıran kristalleri arasında gazların hapsolması nedeniyle meydana gelir. Bu gazlar, kaynak yapılacak yüzeylerin kirli olarak kaynatılmasıyla da ortaya çıkar [35].

Olası nedenleri

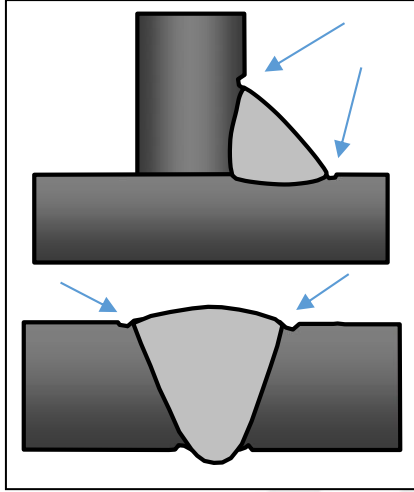
- Gaz korumasının yetersiz olması
- Temiz gaz kullanılmaması
- İlave metalin ve esas metalin yüzeyinin kirli olması
- Yüksek gerilim
- Nozul ve iş parçası arasındaki mesafenin çok fazla olması,

Çözümü

- Kaynak bölgesindeki havanın tümünü uzaklaştırmak için gaz debisi artırılmalı
- Gaz seçimi doğru yapılmalı,
- Uygun ilave tel kullanılmalı,
- İş parçası yüzeyinden tüm yabancı maddeler uzaklaştırılmalı,
- Kaynak bölgesinde ve kaynakta gerilim azaltılmalı,
- Serbest tel boyu uygun olmalı [34].

2.5.3. Yanma oluğu-Kenar yanığı (Undercut)

Yanma olukları, kaynak için gerekli akımı gerektirdiğinden daha hızlı kaynak yapılması sonucu, kaynak dikişinin kenarında oluk biçiminde oyuk oluşur. Bunlar yanma oluğu olarak isimlendirilir [14, 18].



Şekil 2.46. Yanma olukları (under cut) [36]

Olası nedenleri

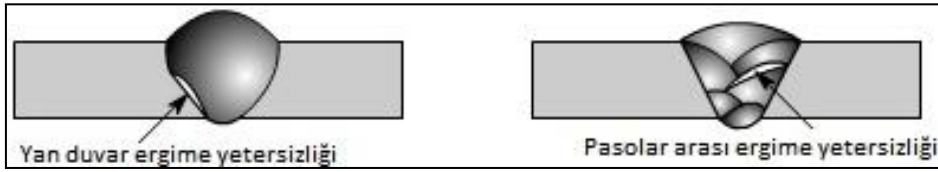
- İlerleme hızının yüksek olması
- Kaynak geriliminin yüksek olması
- Kaynak akımının aşırı yüksek olması
- Bekleme süresinin kısa olması
- Torcun açısı

Çözümler

- İlerleme hızı düşük tutulur.
- Gerilim azaltılmalı
- Tel besleme hızı düşürülmeli
- Ergimiş kaynak banyosunun bekme süresi artırılır (özellikle kenarlarda)
- Torç hareketi yapılır [34].

2.5.4. Yetersiz ergime

Kaynak metali ile esas malzeme veya üst üste atılan kaynak pasoları arasında birleşmeyen bölgelerin bulunması neticesinde ortaya çıkan bir hatadır. Kaynak kesitindeki birleşme yetersizliği, statik ve dinamik zorlamalarda kaynaklı kaynak bağlantısının mukavemetini düşürmektedir [18].



Şekil 2.47. Ergime yetersizlikleri [32]

Olası nedenler

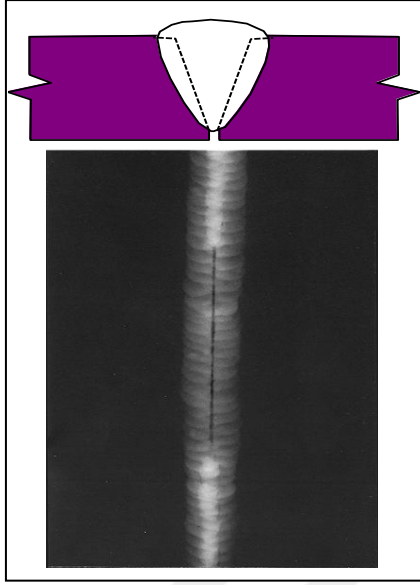
- Kaynak yapılan yüzeylerde kaplama veya aşırı oksit tabakasının bulunması
- Kaynak banyosunun büyük tutulması
- Isı girdisinin yetersiz olması
- Hatalı kaynak tekniği
- Hatalı birleştirme
- İlerleme hızının çok yüksek olması

Çözümler

- Gerlim ve tel besleme hızı artırılır.
- Serbest tel boyunu ayarlanır.
- Kaynatılacak parça ağız yüzeylerinin tufal ve oksitleri temizlenmelidir.
- Kaynak banyosunun kolay kontrol için aşırı salınımlı kaynaktan kaçınılmalıdır.
- İlerleme hızı düşürülür.
- Kaynak dikişinin kenarlar bölgelerinde biraz beklenir.
- Torç açısı iyi ayarlanmalıdır.
- Tel besleme hızını düşürülür [34].

2.5.5. Nüfuziyet azlığı

Kaynak esnasında çok düşük kaynak akımı, yetersiz nüfuziyete sebep olur. Arttırılan kaynak akımı nüfuziyetin derinliğini arttırdığı gibi, kaynak hızının çoğaltılması ise nüfuziyet sağlanamadığının işaretidir [14].



Şekil 2.48. Ergime yetersizlikleri [36]

Olası nedenler

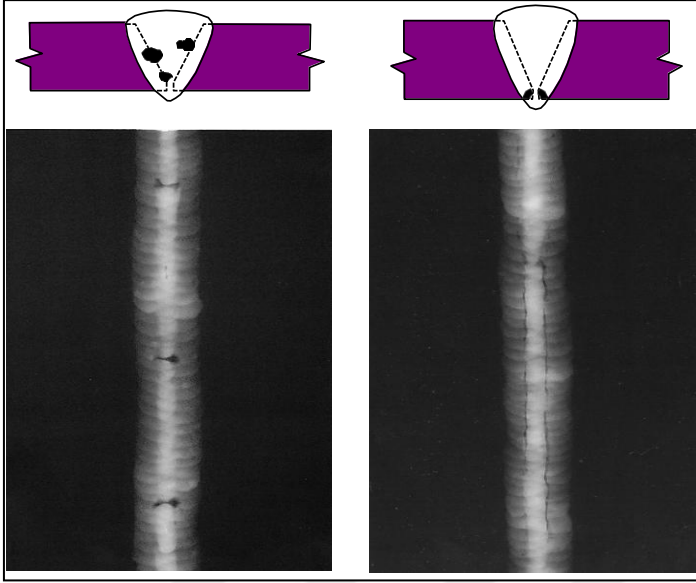
- Hatalı ağız birleştirme
- Kaynak tekniği hatası
- Düşük akım şiddeti ve ısı girdisi

Çözümler

- Köke ulaşabilmek için, uygun serbest tel boyu ve ark karakteristiğini sağlamak koşuluyla, birleştirme tipi ve hazırlığını gözden geçirilmelidir.
- Kök açıklığını alın birleştirmelerinde artırılır ya da arkadan yarma işlemi yapılır.
- Tel besleme hızını artırılarak ama serbest tel boyunu değiştirilmez [34].

2.5.6. Kalıntılar

Çok pasolu kaynaklarda pasolar arasındaki cürufların ve diğer yabancı maddelerin tam olarak ortamdan uzaklaştırılmaması, kalıntılara neden olur. Kaynaktaki cüruf kalıntıları, kaynatılmış malzemedeki dayanımı düşürür ve çatlakların oluşmasına neden olur [8,18].



Şekil 2.49. Kalıntılar [36]

Olası nedenler

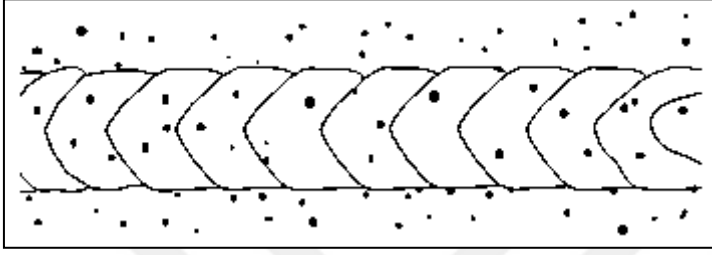
- Kaynak banyosuna cürufların karışması
- Torç memesindeki sıçramalar kaynak banyosuna düşmesi,
- Torcun hatalı sevk edilmesi
- Pasolar arasında düzgün temizlik yapılmaması

Çözümler

- Temizlikler çok iyi yapılmalıdır.
- Torcun temizlikleri uygun zaman aralıklarında yapılmalı
- Torcun kontrolü doğru şekilde yapılmalı [14].

2.5.7. Sıçramalar

Kaynak sırasında çeşitli sebeplerden dolayı oluşan patlamaların etkisiyle ortaya çıkan minik metal parçacıkların çevreye sıçraması ve yayılmasıdır. Bunlar yapılan kaynak dikiş ve ana metal yüzeyinden mutlaka uzaklaştırılması gereken küresel kabarcıklar şeklinde oluşmaktadır [14].



Şekil 2.50. Sıçrantılar [37]

Olası nedenler

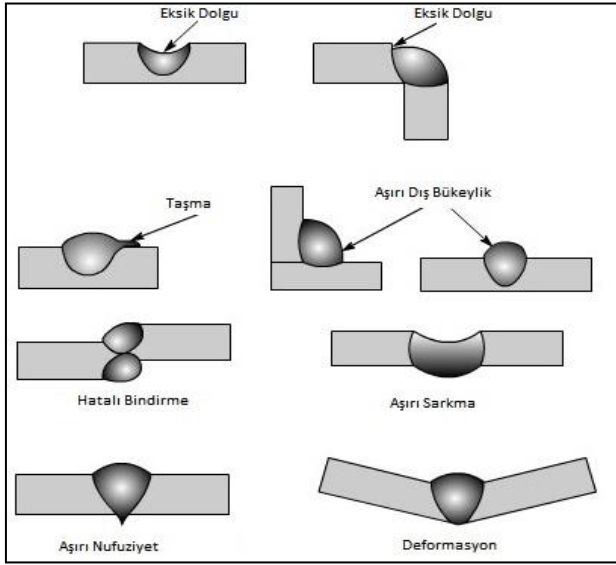
- Elektrodun iş parçasına değmesi ile kısa devre oluşması,
- Koruyucu gaz olarak CO₂ kullanılması,
- Yüksek kaynak akımı çok yüksek,
- Ark boyunun çok uzun tutulması,
- Yanlış kutuplama,
- Yetersiz koruyucu gaz [34].

Çözümler

- Ark boyu kısaltmak,
- Doğru kutuplama,
- Yeterli koruyucu gaz oranı ile çalışmak,
- Ark gerilimini azaltılır yahut tel besleme hızını artırarak sıçramalar azaltılabilir.
- Ark gerilimini arttırılarak kaynak makinasındaki indüktans artırarak akım artışı kısıtlanır.
- Sprey iletim moduna çalışmak [34,37].

2.5.8. Hatalı kaynak boyutu ve şekli

Çoğunlukla, diğer kusurları içermeyen, lakin kaynak dikişinin biçimi ve boyutu açısından farklı olan kusurlar bu grupta değerlendirilir. Bu kaynaklardaki kusurlar, kaynak sonucu elde edilen dikiş arzu edilen biçim ve boyutlara uymamaktadır. Bu kusurlar, aşırı içbükey veya dışbükey, görünüm bozukluğu, ölçüsel sapmalar ve eşit olmayan kanak dikiş uzunluğu biçiminde olabilmektedir.



Şekil 2.51. Çeşitli kaynak hataları

Kaynaklı imalatlarda, kaynak dikişlerinin kalınlığının düşük veya fazla olmasına aşağıdaki faktörler sebep olmaktadır:

- Hatalı bir çalışma tekniği,
- Kaynak ağız hazırlığının iyi yapılmamış olması,
- Elektrod ve tel çapının seçiminin doğru olmaması,
- Hatalı seçilen akım,
- Atılan pasoların sayısı,
- Yapılan kaynağın hızı [32]

2.6. Yüzey ve Kaplama Uygulamaları

Bir malzemenin yüzeyi, kendisini çevreleyen çevreyle ilişkide olan bölgeleri olup, malzemenin temasta olduğu çevreyle olan sınırı olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir

deyişle yüzey, malzemeyi çevreleyen ve şeklini oluşturan yine malzemenin kendisi tarafından oluşturulan bir zarf tabakaya denir. Malzemenin çevreyle olan bütün etkileşimi yüzey ile meydana gelmektedir.

Malzemelerin yüzeyi tarafından belirlenen bazı özellikler:

- Korozyon davranışları
- Dış görünüm ve renkleri
- Kullanım ömrü

Bahsi geçen özellikleri açısından değerlendirildiğinde malzemenin davranışı, malzeme yüzeyinin davranışı vasıtasıyla belirlenmiş olur. Bu durumdan anlaşıldığı üzere, bu tür özelliklerin sağlanması istenen malzemelerin tümünü iyileştirmek yerine yalnızca malzeme yüzeyini iyileştirmek kafi olacaktır. Bu duruma örnek, malzeme görünümü ve korozyon riskine karşı korunması gayesiyle malzemenin yüzeylerinin boyanması olarak verilebilir [38].

Korozyon tanımı, malzemenin çevresi ile etkileşimi boyunca değişime uğraması ve işlevini yitirmesidir. Yapı çelikleri dış ortamlardan korunmadığı takdirde, korozyona uğrayarak sahip olduğu özelliklerini yitirir.

Yapı çelikleri, korozyona uğramaya olan yatkınlığına karşın basit bir şekilde ulaşılabilmesi ve basit yöntemlerle işlenebilmesinin yanında, kullanılan koruyucu boyalarla korozyondan korunabilmesi kolaylığı ile yaygın olarak kullanımda olan bir yapı malzemesidir.

Çeliklerin korozyona uğramalarını azaltmak için birçok farklı teknik ve uygulama geliştirilmiştir. Koruyucu boyaların; uygun ve yeterli performansları, kolay uygulanabilirliği ve çeşitli ürün türlerinin yanında dekoratif görüntü elde edilmeleri sebebi ile geniş kullanım alanı vardır [39].

Boya ve kaplamalar, uygulandıkları malzeme yüzeyi üzerinde gerçekleşen korozyonu dört farklı mekanizma ile engellemektedirler.

- Ortamdaki oksijeni, oluşturulan boya filminin bağlayıcı yapısı ve bileşenleri vasıtasıyla metal yüzeyi etkilemesini engellerler.

- Ortamdaki bulunan suyu metalin yüzeyine ulaştırmazlar.
- Uygulanan boya filmi içerisindeki anti korozif bileşenleri sayesinde uygulandığı yüzeye suyun ve oksijen metalin yüzeyine ulaşması engeller.
- Çinko içeriği bakımından zengin boyalarda, boya filmi içinde bulunanlar çelik yüzeye göre daha korozyona daha yatkındırlar [40].

2.6.1. Kumlama

Çelik malzemeye uygulanan boya ve ilgili malzemelerin koruyucu kaplama olarak performansı, çelik malzemenin boyamadan hemen önceki durumundan önemli ölçüde etkilenir.

Performansı etkilediği bilinen başlıca faktörler şunlardır:

- Pas ve hadde curufunun bulunması,
- Malzeme yüzeyinde tuz, toz, gres, yağ, kir bulunması,
- Yüzey profili [41].

Malzemeler için uygun yüzey hazırlığı, koruyucu boya uygulamanın başarısı için ön koşul oluşturmaktadır. Metal yüzeyinde bulunan yağ, gres, hadde tufalı, pas, galvaniz ve çinko tuzları kaplamanın uygulanmasının öncesinde giderilmek zorundadır [40].

Bir boya tabakasının sağlam ve dayanıklı olması için boyanın malzeme yüzeyine yapışması gerekmekte olup bu ise yüzey temizliği ile sağlanır. Metalin yüzey temizliği kaplama kalitesinin temel esasını oluşturmaktadır [42].

Boya tabakasının metal yüzeye uygun olarak tutunmaması durumunda yüzeyden penetre olan nem buralarda birikebilir ve boyanın koruyucu etkisini azaltarak korozyona sebep olur. Kumlama, çelik, tuğla, çimento ve beton gibi yüzeyleri temizlemek, genellikle koruyucu bir kaplama uygulamadan önce kir, pas, eski boya veya diğer maddeleri temizlemek için kullanılır [43].

Kumlama işlemleri çok çeşitli olabilir. Bunlar;

- Manuel kumlama

- Otomatik kumlama

Kullanılan ekipmana göre kumlama çeşitleri

Manuel kumlama

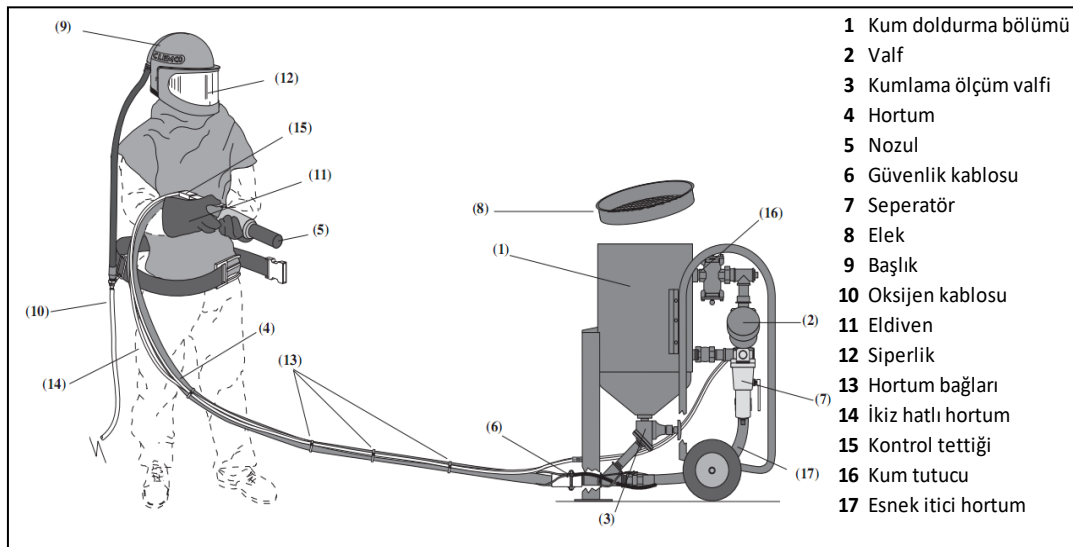
Manuel kumlama, yüksek basınçlı hava üreten bir kompresör, kumlama makinası, hortumlar vb. donanımlarla her yerde yapılabilir ve her tür malzemeye özellikle büyük ebatlı malzemelere uygulanabilir. Manuel kumlamanın dezavantajı ortama aşırı toz yaymasıdır. Toz çıkışı olmadan, yani tozsuz kumlama yapabilmekte olup toz çıkışı olmadan kumlama yapabilmek için, sulu yani ıslak kumlama yapılmalıdır [44].

Avantajları;

- Karmaşık parçaların kumlanması için uygundur.
- Kumlanmamış yüzey kalmaz.
- Tank, çelik köprü, konteynır vb malzemelerin kumlanması yapılabilir.

Dezavantajları;

- Çok zaman alıcı bir işlemdir.
- Aynı yüzey pürüzlülük değerini sağlamak zordur.
- Çalışanın sağlık önlemlerine dikkat etmesi gerekir.



Şekil 2.52. Manuel kumlama [45]

Otomatik kumlama

Genelde henüz bir imalat sürecine dahil edilmemiş çelik konstrüksiyon parçaların yahut belli ölçülerde kesme ve kaynak uygulamaları yapılmış çelik malzemelerin kumlanması, otomatik makinalarda yapılmaktadır.

Avantajları;

- Seri şekilde üretim yapılabilir.
- Yüzey temizleme derecesi farklılık göstermez.
- Yüzey pürüzlülük profili daha dengeli olur [44].

Dezavantajları;

- Kumlama makinasını malzeme giriş yönüne dikey konumdaki malzemelere erişim sağlanamıyor. Bu yüzeyler için tekrar kumlama yapmak gerekir.
- Büyük malzemelerin kumlaması yapılamaz [44].



Resim 2.4. Otomatik kumlama

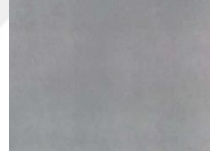
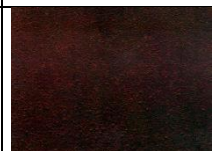
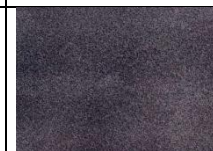
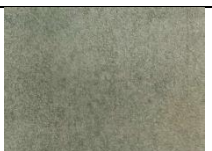
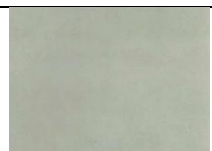
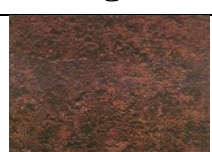
Kumlamanın derecelendirilmesi

Kumlama dereceleri temizleme işleminden sonra temsili fotoğraf örnekleri ile birlikte yüzey görünümünün yazılı açıklamaları ile belirtilmiştir. Her bir hazırlama derecesi, kullanılan temizleme metotlarının tipini belirtmek için uygun büyük harflerle “Sa” gösterilmiştir. Harflerden sonra rakam varsa, temizleme derecesinin, hadde cürufu pas veya önceki kaplamadan mı olduğunu gösterir.

Fotoğraf, temizleme ve hazırlama derecesinin kısa gösterilişinden önce orijinal pas dereceleriyle gösterilmiştir [41].

Kumlama işlemi ile metal yüzeyinde istenmeyen oluşumların hangi ölçüde giderildiğine ve yüzeyin ne kadar aşındırıldığına göre derecelendirme yapılmaktadır. Kumlama uygulamalarında birçok standart sınıflandırması kullanılmaktadır. Türkiye’de “Swedish Standards For Ground Vibrations And Airblast” İsveç standardı kullanılmakta ve Sa 1, Sa 2, Sa 2 ½ ve Sa 3 derecelendirmesi yapılmaktadır. Bu sınıflandırma değerleri TSE kurumunca 08.04.1999 tarihinde TS EN ISO 8501-1 olarak geçerli kılınmıştır.

Çizelge 2.11. Kumlama dereceleri

	Uygulanamaz	Uygulanamaz		
A	A Sa 1	A Sa 2	A Sa 2 ½	A Sa 3
				
B	B Sa 1	B Sa 2	B Sa 2 ½	B Sa 3
				
C	C Sa 1	C Sa 2	C Sa 2 ½	C Sa 3
				
D	D Sa 1	D Sa 2	D Sa 2 ½	D Sa 3

Yukarıdaki resimlerde belirtilen kumlamaların tarifleri aşağıda verilmiştir [44].

Sa 1: Hafif kumlama temizliği. Gevşek hadde atığı, pas ve yabancı madde uzaklaştırılmalı. Görünüm, Sa 1 olarak belirtilen resimlere karşılık gelmelidir.

Sa 2: Kapsamlı kumlama temizliği. Hemen hemen tüm hadde atığı, pas ve yabancı maddeler giderilecektir. Son olarak, yüzey bir elektrikli süpürge, temiz kuru basınçlı hava veya temiz bir fırça ile temizlenir. Rengi grimsi olmalı ve Sa 2 olarak belirtilen resimler gibi görünmelidir.

Sa 2½: Çok kapsamlı kumlama temizliği. Hadde atığı, pas ve yabancı madde hepsi uzaklaştırılmalı, geriye kalan izler, lekeler veya çizgiler halinde hafif lekeler olacak şekilde görülmelidir. En sonunda olarak yüzey, temiz kuru basınçlı hava veya temiz bir fırça ile temizlenir. Görünüş *Sa 2½* olarak belirtilen resimlere karşılık gelir.

Sa 3: Malzeme saf metale temizlenmeli. Hadde atıkları, pas ve yabancı maddeler tamamen giderilmelidir. En son, yüzey temiz kuru basınçlı hava veya temiz bir fırça ile temizlenir. Yüzey, düzgün bir metalik renge sahip olmalı ve *Sa 3*'te belirtilen resimdeki görünüşe karşılık gelmelidir[46].

Yüzey profili

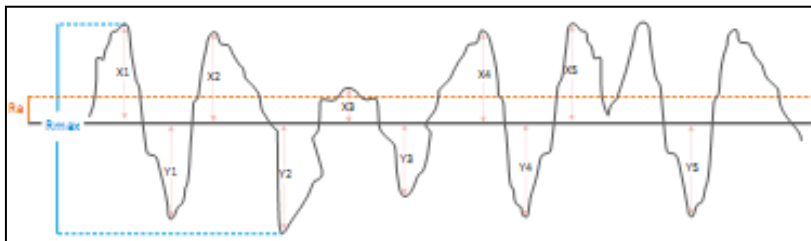
Kumlama ile metal yüzeyinde oluşturulacak yüzey profili, aşındırıcıya ve kullanılan havanın basıncına bağlıdır. Elde edilen yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmek için R_z , R_{max} ve R_a değerleri kullanılır.

R_z : Tepe noktası ve dip nokta arasındaki uzaklık esas alınarak beş tepe noktası ve beş dip noktası mutlak uzaklıklarının ortalamasıdır.

R_{max} : Ölçülen en yüksek tepe ve dip nokta arasındaki mesafedir.

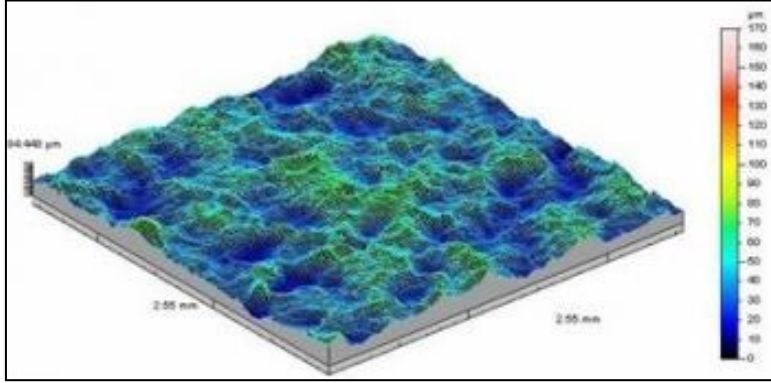
R_a : Belirlenmiş bir ölçüm uzunluğunda mutlak değerlerin ortalamasıdır.

Kumlamada istenen değerin üzerinde profil derinliği, elde edilen yüksek tepe noktalarının boyanamamasına ve bu noktalarda boyanın görevini erken yitirmesine sebep olmaktadır. İstenen değerin altındaki profil derinliği ise, boyanın yüzeye uygun şekilde bağlanmasını ve görevini erken yitirmesine sebep olabilir.

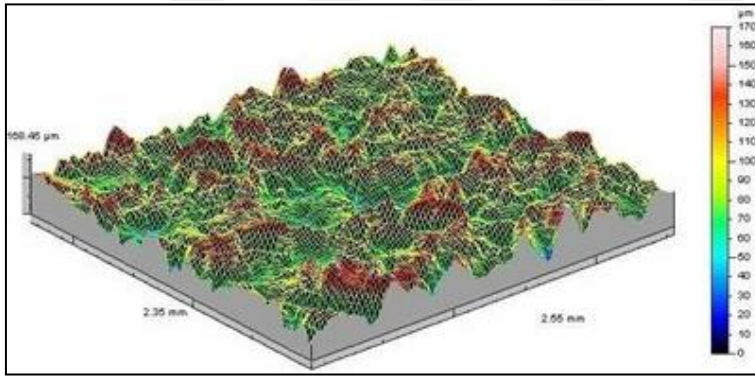


Şekil 2.53. Yüzey pürüzlülüğü [47]

Yüzey pürüzlülük değerleri kullanılan aşındırıcılara bağlı olarak değişmektedir [48]. Resim 2.5 ve 2.6 kullanılan aşındırıcıya bağlı olarak yüzey profilleri verilmiştir.



Resim 2.5. Shot ile kumlama ile oluşan yüzey



Resim 2.6. Grid ile kumlama ile oluşan yüzey

Kumlama işleminde kullanılan aşındırıcılar

Aşındırıcıyı seçmeden önce, aşındırıcıların özelliklerini ve bunların malzeme üzerinde bıraktığı etkiyi bilmemiz gerekir. Her bir aşındırıcının özelliği, yüksek temizleme işlemini ve nihai sonuçları etkileyecektir [49].

Kumlama temizliği ile bağlantılı olarak kullanılan en yaygın aşındırıcılar, metalik ve metalik olmayan aşındırıcılar olarak iki gruba ayrılabilir.

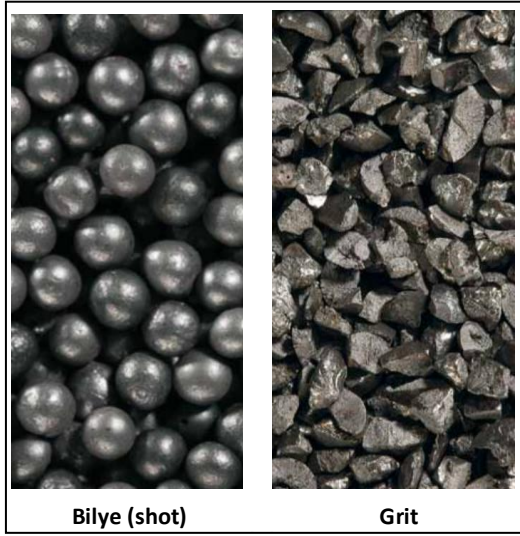
Metalik aşındırıcılar

Metalik aşındırıcılar genellikle geri kullanma imkan veren ekipman ve tesislerde yüzey temizlemek için kullanılır [50].

Kullanım amaçları;

- Boya çıkarma
- Pas çıkarma
- Kabuk, hadde çıkarma
- Yüzey pürüzlendirme [51]

Başlıca metalik aşındırıcı resimleri aşağıda verilmiştir.



Resim 2.7. Çelik bilye ve Grit

Metalik olmayan aşındırıcılar

Metalik olmayan aşındırıcılar genellikle geri kullanma imkanı az olan bir veya iki defa yüzey temizlemek için kullanılır. Metalik aşındırıcılara göre ucuzdur. Başlıca metalik olmayan aşındırıcılar;

- Cam küresi
- Ceviz Kabuğu
- Garnet
- Plastikler
- Silika Kum
- Olivin
- Seramik [51]



Resim 2.8. Metalik olmayan aşındırıcılar

Silika kum, içerdiği tehlikeli ağır metaller ve insan sağlığına tehlikeye sokan etkenlerden dolayı birçok ülkede kullanımı yasaklanmıştır.

Çinko, alüminyum ve paslanmaz çeliklerin kumlanması metalik olmayan aşındırıcılar ile yapılır. Çünkü metalik aşındırıcılar bu malzemelerin yüzeyinde bulunan korozyona dirençli yapıyı bozarlar [50].

Kumlama işleminde yapılan ölçümler

Herhangi bir koruyucu kaplama işlemi için bir kalite kontrol sisteminin gerekliliklerine uygun olarak, hazırlanan yüzeylerin kontrolünde aynı dikkatin gösterilmesi esastır.

Düzgün işlem görmüş kumlanmış bir yüzeyin kontrol edilmemesi, sonraki işlemlerin yani boya uygulamalarının değerini düşürür. İyi yüzey hazırlığı dayanıklılığın temelidir ve hafife alınmamalıdır [51].

Bunun için bir takım testlerin yapılması zorunludur bunlar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

Yüzey temizlik kalitesi

Görsel olarak ISO 8501-1 göre yapılmaktadır. Çelik malzeme yüzeyi üzerine uygulanan koruyucu boyaların performansı boya öncesi çelik yüzeyin boyaya hazırlanması ile doğrudan ilişkilidir.

Bu performansı etkileyen temel faktörler;

- Yüzeydeki pas ve tufal oluşumu
- Yüzeydeki tuzlar, yağ ve gres gibi yüzey kirleticileri
- Yüzey profili

Uluslararası ISO 8501, ISO 8502 ve ISO 8503 standartları yukarıda belirtilen bu faktörlerin değerlendirilmesi amacıyla hazırlanmıştır.

Kumlanmış yüzey, iyi bir gün ışığında veya uygun şekilde aydınlatılmış ortamda normal bakma ile çelik malzeme yüzeyini incelenerek ve Çizelge 5,1'deki fotoğraflarla kıyaslanır. Uygun bulduğunuz fotoğrafı, değerlendirilecek çelik malzeme yüzeyine koyarak değerlendirme işlemi yapılır [52, 53].

Yüzey pürüzlülüğü

Görsel olarak ISO 8503 ve ASTM D 4417 göre aşağıdaki ölçü aletleri kullanılarak yapılmaktadır.

- Komparator - Metot A

Kullanılan aşındırıcıya (bilye veya grid) bağlı olarak iki tipi vardır. ISO 8503-1 standardında belirlenmiş olan bu usül ile Ry değeri, daha önce kumlanmış standart plakalar vasıtasıyla mukayese yapılabilir. Plaka üzerinde yer alan 4 farklı bölge, dört farklı yüzey profilini ifade etmektedir. Aşağıda Resim 7.6'da bu komparatörlerin görselleri verilmiştir.



Resim 2.9. Yüzey pürüzlülüğü karşılaştırma plakası [52].

- Dijital yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı - Metot B

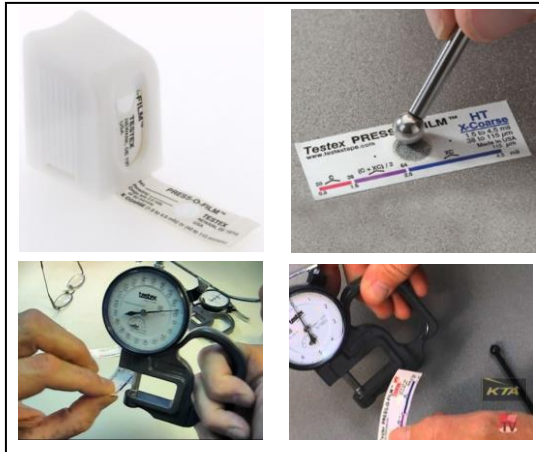
Metot B Yöntemi, kumlama yüzey profili derinlikölçeri olarak da adlandırılır. Cihaz ucundaki sivri uc kullanarak oyukların tepe noktalarına göre derinliğini ölçer. Resim 5.7’de ölçü aleti görünmektedir [53].



Resim 2.10. Yüzey pürüzlülük derinlik ölçüm cihazı

- Film replika band - Metot C

Replika Band kumlanmış yüzeyden profil kalınlığı elde edilmesinde kullanılan özel bir band'tır. Kumlanmış yüzey profilinin basit, doğru ve hassas bir metotla ölçülmesini sağlamaktadır. Ancak bunun için ayrıca film kalınlığı ölçüm cihazına da gereksinim vardır.



Resim 2.11. Replika band ile yüzey pürüzlülük ölçümü

Yüzeyde toz kontrolü

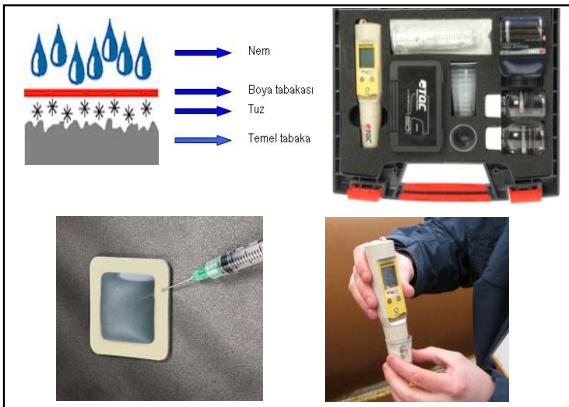
Toz test kiti ile TS EN ISO 8502-3'e uygun olarak boyama öncesinde kumlanmış yüzeyde bulunan toz partiküllerinin miktarı ve boyutunun değerlendirilmede kullanılır. Kumlama sonrası yüzey üzerindeki bulunan toz, boyanın tutunabilirliğini düşürebilir.



Resim 2.12. Toz ölçüm kiti [54].

Yüzeydeki çözünebilir tuzların tayini

Kumlanmış malzeme yüzeyindeki çözünür tuzların (çoğunlukla klorürler ve sülfatlar) mevcudiyetinin kaplama ömrü üzerinde zararlı bir etkisi olduğu bilinmektedir. Bu ortam kirlenmesi, püskürtülen yüzeylere aktarılabilir, korozyonu hızlandırabilir (ASTM D4940) ve katastrofik arızalara neden olabilir. Boya tabakası altına hapsedilen tuz, higroskopik / nem çekici özelliği dolayısıyla, havanın nemini çekerek boya tabakası içinde korozyon ve temel tabakaya doğru küçük korozyon gözenekler oluşturur.



Resim 2.13. Kumlanmış yüzeyde tuz ölçümü [55, 56].

2.6.2. Boya

Korozyonu önlemek için kullanılan en basit yöntem olan ve geçirimsiz bir kaplama ile metal yüzeyinin çevrenin temasını kesme işlemidir.

Boyanın görevleri

Boyalar üç şekilde korozyonu önleme görevini yerine getirir.

- Bütün boyalar, metalin çevre ile temasını önleyerek metalin çevresi ile etkileşime girmesini engeller.
- Bazı tür boya içerisinde bulunan inhibitör etkisi yapan pigmentler metal yüzeyinin pasifleşmesine ve korozyon hızının azalmasına sağlarlar.
- Bazı boyalar içerisinde dolgu maddesi olarak bulunan çinko tozu galvanik etki yaparak metali katodik olarak korur [51].

Boyanın yapısı

Boya bir bağlayıcı içerisine katılmış farklı maddelerin bir araya gelmesiyle oluşan bileşik bir koruyucu malzemedir. Boya bağlayıcı, pigment, solventler ve diğer katkı malzemelerinin karışımıyla oluşturulur [52].

Boya;

- Bağlayıcı (Binder)
- Pigment
- Katkı maddesi,
- Çözücünden oluşur [53, 54].

Boyanın sınıflandırması

Sanayide çok sayıda reçine boya olarak uygulanmaktadır. Reçinenin kimyasal yapısına bazı yeni gruplar katılarak boyanın fiziksel özelliklerinde iyileştirmeler sağlanmaktadır. Bu yolla aynı isim altında çok sayıda boya tipleri elde edilmiştir. Burada endüstride çok kullanılan yedi boya grubunun temel özelliklerini kısaca verilmiştir.

Alkid boyalar

Endüstride genel amaçlar için en çok kullanılan boya tipidir. Alkit boyalar adı yağlı boyanın modifiye edilmiş şeklidir. Genel olarak alkit boyalar atmosferde ve şiddetli olmayan korozyif ortamlarda kullanılır.

Vinil boyalar

Vinil boyalar asitlere, alkalilere ve kimyasal tesirlere son derece yüksek direnç gösterir. Su absorpsiyonu ve geçirimsiliği düşük sebebi ile deniz ortamlarında ve su altı yapılarda kullanımı çok fazladır.

Epoksi boyalar

Epoksi reçineler temel itibariyle bisfenol-A ile epikloridrin bileşiklerinin kondensasyon reaksiyonu ile meydana gelen polimerlerdir. En çok kullanılan epoksi boyalar, epoksi poliüretan, epoksi poliamit, coaltar epoksi ve epoksi ester tipinde olanlardır. Bütün bu boyaların ortak özelliği yüzeye çok iyi yapışmaları ve her çeşit kimyasal etkiye dayanıklı oluşlarıdır. Bunların içinde coal tar epoksi suya karşı en dayanıklı olanıdır.

Klor kauçuk boyalar

Doğal kauçuk klorlanarak sert bir reçine elde edilebilir. Ancak bu reçine ile üretilen boyalar kullanışlı değildir. Endüstride sentetik klor kauçuk boyalar tercih edilir. Doğal kauçuğun temel bileşeni olan izopren, alkit ile modifiye edilerek buhara ve güneş ışınlarına dayanıklı bir boya elde edilir. Bu boyanın diğer bir üstün özelliği de eskiyen boya tabakasının, aynı boya kullanılacak kolayca tamir edilebilmesidir.

Poliüretan boyalar

Bir izosiyanat ile bir alkolün polimerleşmesi sonucu poliüretan reçinesi elde edilir. Bu reçine solvent içinde çözülerek doğrudan kullanılabilirdiği gibi, izosiyanat ve alkol bileşenleri uygulama sırasında karıştırılarak iki bileşenli boya olarak da kullanılabilir. En çok

kullanılanlar, alkit, akrilik, epoksi ve vinil poliüretanlar çeşitleridir. Ayrıca su ile kürlenebilen propolimer poliüretanlar da mevcuttur.

Organik çinko tozlu boyalar

Çinko tozlu boyalar galvanik etkileri nedeniyle genellikle astar boya olarak kullanılırlar. Astar doğrudan çelik ile temas ettiğinden boyanın galvanik etkisi daha yararlı olur. Galvanik etkinin gerçekleşmesi için boya içinde çok yüksek oranlarda (yaklaşık %90) çinko tozu bulunması gerekir. Çinko tozlu boyaların en büyük dezavantajı, bu boyaların kuvvetli asit ve alkalilere dayanıksız olmasıdır. Ayrıca bu tip boyalar yüzey temizliğine son derece duyarlıdır. Yüzeylerin ileri derecede temiz olması gerekir.

İnorganik çinko boyalar

İnorganik çinko kaplamalar iki bileşenli olup içeriklerinde asgari %80 çinko tozu bulunduran, inorganik etil silikat esaslı özel kaplamalar olarak adlandırılır [51].

Boya sisteminin belirlenmesi

Farklı korozyon şartları için geliştirilmiş boya sistemleri arasından en uygun olanının seçimi bir uzmanlık alanıdır. Boya sistemi belirlemede;

- Malzemenin bulunacağı ortam koşulları,
- İstenen ömür,
- İnsanın yaşamı için önemli olan sağlık, güvenlik, çevre etkileri,
- Malzeme yüzeyine uygulama kolaylığı,
- Ekonomiklik, gibi birçok faktör göz önüne alınmaktadır.

Uluslararası bir standart olan ISO 12944-Çelik Yapıların Koruyucu Boya Sistemleriyle Korozyona Karşı Korunması, doğru boya sistemini belirlemede, bir dizi yönergeler halinde kullanıcıya yardımcı olmaktadır [39].

Koruyucu boya sisteminin ilk uygulama sonrası niteliğini koruması beklenen süreler aşağıda sınıflandırması ISO 12944-1'de üç aralıkla belirtilmiştir:

- Az-L : 2–5 Yıl arası
- Orta-M : 5–15 Yıl arası
- Çok-H : 15 Yıl ve üzeri

Atmosferik aşındırma ve özel korozyon gerilimleri, yapının korozyon koruma boyasının dayanıklılığını ve boya işinin planlanmasını önemli bir şekilde etkiler. ISO 12944-2'ye göre, atmosferik aşındırma altı kategoriye ayrılmıştır:

- C1: Çok düşük
- C2: Düşük
- C3: Orta
- C4: Yüksek
- C5-I: Çok yüksek
- C5-M çok yüksek [50, 57, 58].

Boyanın uygulanması

Boya ilk olarak, doğru hazırlanmış bir yüzeye doğru uygulandığında korozyon önleyici olarak değerli hale gelir. Uygulama yöntemi ve prosedürü sonuç için çok belirleyici olabilir.

Boya, doğru uygulama teknikleri ve çok uygun ekipmanlarla uygulanabilir. Uygulama yöntemleri aşağıda verilmiştir.

- Fırça
- Boya eldiveni
- Rulo
- Havasız sprey
- Konvansiyonel sprey,



Resim 2.14. Boya uygulama alet ve makinaları [59]

Boyanın uygulanmasına göre sınıflandırması

Ön imalat astarı (Shop primer)

Yaygın olarak yapısal çelik imalat sektöründe, mekanik imalatı bitirilmiş çeliklerin kumlanmasında yaşanan kısıtlamaların ortadan kaldırılması için imalat başlamadan önce otomatik veya manuel kumlama işlemini tabi tutulmaktadırlar. Yapılan kumlama işleminden sonra metal yüzeylerinin imalat esnasında korozyonu önlemek için çok kısa sürede kuruyabilen imalat ön astarları kullanılmaktadır.

İmalat ön astarları;

- Yapılan kaynağın kalitesine zarar vermez.
- Çeliği, uygulanan 15-25 mikron kuru film kalınlığı ile 4-6 ay korozyona karşı korur.
- Kesme, ve presleme gibi mekanik imalat sırasında çeliğin zarar görmesini engeller.
- Otomatik veya manuel yöntemlerle kolay uygulanabilir [1].

Astar boya

Bir astar, bir yüzeye uygulanan ilk kattır. Genel işi korozyona maruz kalmak ve astarlanmış yüzeye uygulanan sonraki kaplamaların yapışmasını arttırmaktır. Astar da kullanılan bağlayıcı, alt tabaka ve ikinci kat ile uyumlu olmalıdır. Astar boya kalınlığı kalınlığı tipik olarak 25–75 μm 'dur. Metaller için astarlar genellikle bir solvent reaksiyon mekanizması ile sertleşen alkid sistemlerdir. Son yıllarda, epoksi modifiye alkid bağlayıcıların astar olarak kullanılması yönünde bir eğilim olmuştur. Bu reçineler geleneksel alkitten daha iyi yapışma ve korozyon direncine sahiptir [60].

Ara kat boya

Ara kat boyalar, yapışmayı arttırmak için astar ile son kat arasında uygulanan boya filmleridir. Astar ve son kat farklı yapışma, ısı genleşme veya darbe dayanımı özelliklerine sahipse, bu genellikle gereklidir. Astar ve son kat arasındaki ara yüzey gerildiğinde, katmanlar bazen ayrılır ve son kat daha sonra çatlama veya kırılabilir. Ara kat boyaları, ayrıca astar ile son kattaki çözücü arasında bir bariyer kat sağlamak için de kullanılır.

Astardaki düzensizlikleri doldurmak için kullanılan bir kaplamadır. Ara kat boya kalınlığı kalınlığı tipik olarak 25–90 μm 'dur.

Son kat boya

Son kat boya, gerekli görünümü sağlayan ve performansı artıran katmandır. Son kat, tek kat halinde uygulanabilir veya son katın elde edilmesi için birden fazla kat halinde uygulanabilir. Son kat, yüzeye istenen renk, parlaklık, aşınma dayanımı ve hava geçirgenliği sağlar. Genellikle, son katın korozyon direnci minimumdur. Uygulama kalınlığı, istenilen korozyon direncine bağlı olarak değişkenlik gösterir [61].

Boya testleri

Bir boya uygulamasında kaplamanın performansı, bileşimine bağlıdır. Bununla birlikte boya uygulamasına, ön hazırlığına ve kurumasına da bağlıdır. Boya testleri, boya kaplama kalitesini doğrulamak için kaplama kullanıcısı tarafından kullanılabilecek bazı yaş ve kuru kaplama özelliklerinin testlerini ve ölçümlerini içerir. [1].

Boya testleri, boya öncesi, boya sırasında ve boya sonrasında olmak üzere 3 gruba ayrılır.

Boya öncesi testler

Gözle inceleme

Gözle inceleme kaymaklaşma, jel oluşumu, faz ayrışması, çökme ve yabancı madde kontrolü şeklinde beş gruba ayrılır.

- Kaymaklaşma

Boyanın ambalajı içerisinde yüzeyinde kaymak tabakası oluşup olmadığı, varsa bu tabakanın kalınlığı, sertliği veya yumuşaklığı belirlenmelidir. Eğer kaymak tabakası varsa ve kalınlığı fazla değilse bu tabaka bozulmadan alınmalı ve boya süzme işlemine tabi tutulduktan sonra kullanılabilir.

- Jel oluşumu

Boyanın kıvamı tespit edilerek jel oluşumu olmadığı kontrol edilip sonra jelleşme ile akışkan olmayanı kısımları birbirinden ayırmak gerekir. Jelleşme meydana gelmiş bir boya karıştırarak akıcı hale getirilip kullanmak doğru değildir.

- Faz ayrışması

Boya içerisinde özellikleri birbirinde farklı birçok maddelerin bulunduğu bilinir. Bunların fazlar halinde birbirlerinden ayrışıp ayrışmadıkları kontrol edilir.

- Çökme

Ambalajı açılan bir boyada çökme olup olmadığı spatula ile tespit edilir. Eğer bir çökme var ise çökmenin sert veya yumuşak olup olmadığı adlandırılır. Çökme meydana gelmiş bir boyanın, çöken kısmı uygun bir şekilde karıştırılıp homojen edilmeden kullanmak uygun değildir. Karıştırma işlemi sırasında yine çökmenin özelliğinin kolay karıştırılabilir, zor karıştırılabilir veya karıştırılamaz şeklinde sınıflandırılabilir.

- Yabancı maddeler

Boya uygulama tabancası gibi uygulama aparatı ile yapılan uygulama neticesinde yüzeyde gözlenen yabancı taneciklere bakarak boya içerisinde yabancı madde olup olmadığı ve süzme işleminin yapılıp yapılmayacağı kontrolü yapılır [62].

- Viskozite

Boyanın akışkanlık niteliği ve sıcaklığı uygulama esnasında çok önemli bir rol oynamaktadır. Viskozite kontrolünde Krebs cihazı yahut Din kapları kullanılabilir. Din kapları farklı delik çap ölçülerine sahiptirler. Boyanın görsel kontrollerinden sonra uygun din kabı seçilir. Seçilen kap boyayla doldurularak kronometre ile boyanın akma süresi tespit edilir [63].

- Yoğunluk

Ağırlık ve hacim arasındaki bağıntıyı gösteren bu değer, boyanın fonksiyonel nitelikleri arasına girmemekle beraber boya sarfiyatının hesaplanabilmesi için gereklidir. Ancak boyanın formülü, ambalaj büyüklüğü ve tip seçimi esnasında gerek hammaddelerin, gerekse bitmiş boyanın yoğunlukları önemlidir.

- Katı madde miktarı

Katı madde miktarı, boya içindeki uçucu bileşenler dışında kalan katı bileşenlerin oranıdır. 3-4 gr boya, darası alınmış bir plaka yüzeyine dökülür ve TSE ve ISO'nun standartlarına göre kontrol edilir. Kapağın ağırlığı tekrar tartılarak katı madde oranı hesaplanmış olur.

- Örtme gücü

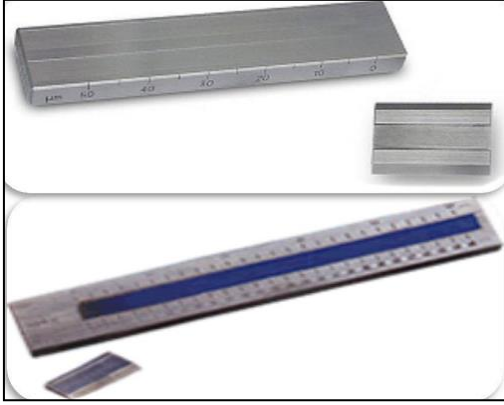
Boyaların örtücülüğü, uygulandıkları yüzeyi tamamen kapatma gücü olarak ifade edilmekte olup boyanın yüzeyi tamamen kapatma gücü olarak tanımlanır. Kullanılan boyanın örtücülük niteliği içerisindeki dolgu maddeleri ve pigmentlerden oluşmaktadır. Örtücülüğüne kontrol edilmek istenen boya için aplikatör kullanılarak damalı kağıda uygulanarak tespit edilir.



Resim 2.15. Örtücülük testi örnek uygulama

- Ezilme inceliği

Ezilme inceliği tespiti için boya içindeki katı maddelerin uygun bir sıvı taşıyıcı içerisinde daha küçük parçalara ayrılarak ezilmesi ile yapılır. Boyanın grindometre olarak adlandırılan aparat üzerine çekilmesi ile ölçme işlemi gerçekleştirilir. Grindometre üzerine çekilen boyanın mikron türünden partikül yoğunluğuna bakılarak tanecik boyut tespiti yapılır.



Resim 2.16. Grindometre aparatı

- Akma – Sarkma limitinin belirlenmesi

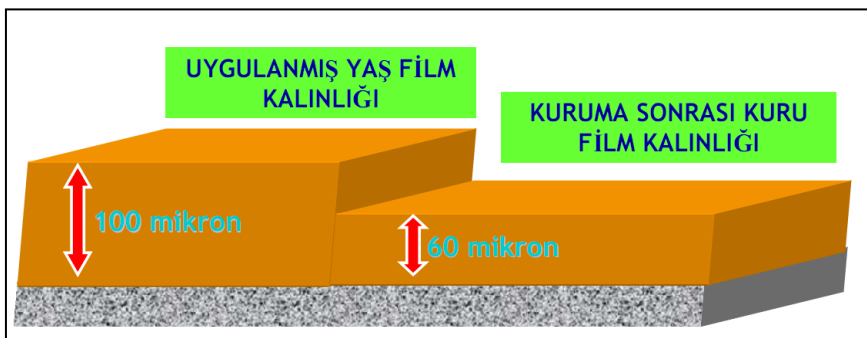
Bu yöntem uygulaması ile uygulaması yapılan her cins boyanın akma ve sarkma sınırlarını tespit etmek için kullanılır.

Boya sırasındaki testler

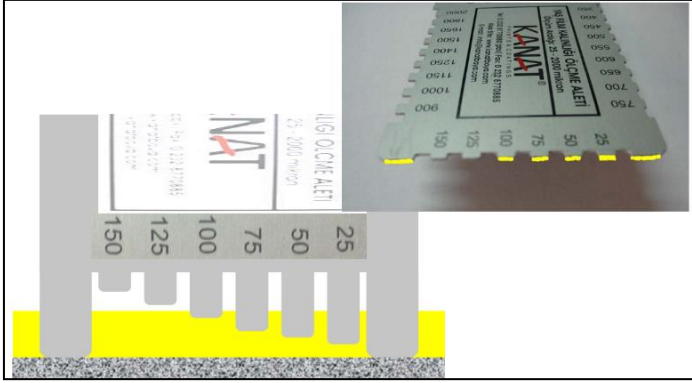
Boya uygulaması sırasında yapılan testler kastedilmektedir. Yaş boya uygulaması sırasında yalnızca yaş boya ölçümü yapılır.

Yaş boya ölçümü

Boya uygulamasını yaparken atılan boyanın kalınlığı yaş film tarağı ile ölçülerek boyanın kuruması sonrası istenen kalınlığın elde edilmesi sağlanır. Ölçüm çok kesin olmasa da, uygulamadan sonraki yaş kaplamanın film kalınlığını ölçebilirsiniz.



Şekil 2.54. Yaş ve kuru film kalınlığı (% 60 hacimsel katıya sahip bir boya için)



Resim 2.17. Yaş film tarağı [64]

Bu, yaş tarak veya tekerlek olan ıslak film mastarı ile yapılır. Islak film tarağı, her birinin kenarında ayarlanmış çentikler bulunan yassı alüminyum, plastik veya paslanmaz çelik bir levhadır [63].

Boya sonrası testler

Boya üreticisinin belirttiği şartlarda ve süre sonunda boya kurumasının gerçekleşmesi sonrası istenen boya uygulamasının sağlanıp sağlanamadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bunun için aşağıda açıklamaları verilen ölçümler yapılmaktadır.

Renk kontrolü

Boya kullanıcısı boyanan malzemenin türüne göre belirli bir renk talep eder. Bunun için boya üreticisi boya rengini özellikle tüm dünyada kabul görmüş standartlaştırılmış renkleri RAL cinsinde çok net bir şekilde tarif etmelidir. Daha sonra spektrofotometre vasıtasıyla standartlar karşılaştırılarak aradaki uyumsuzluklar giderilir ve işlem tamamlanır.



Resim 2.18. Spektrofotometre [62].

Parlaklık

Yüzeyin üzerine düşen ışığı geri yansıtması şeklinde ifade edilme, parlaklığın ölçüsü olup bir kaynaktan yüzeye gelen ışınlar sonucu yüzeyde oluşan görüntünün netlik sınıfı şeklinde tanımlanır. Parlaklık, bir ışık kaynağından belirli açıyla boyanmış yüzeye gönderilen ışığın geri yansıma oranıdır. Bu Glossmetre ile ölçülmekte olup 20°, 60° ve 85° derece biçiminde ölçümler yapılır.



Resim 2.19. Glossmetre [62].

Sertlik

Malzeme yüzeyine uygulanan kurumuş boya filminin sertliği, boya filmine dışarıdan gelen fiziksel şartlara karşı gösterdiği mukavemettir. Boyaların sertlikleri Pendulum veya kalem ile tespit edilir.



Resim 2.20. Sertlik ölçme cihazı [62].

Kalem sertliği, 7B'den 5H'ye kadar olan özel bir aparata bağlanmış ve kendi ağırlığı yönüne bırakılmış kalemler ile boyanan yüzeyi sırasıyla çizilir ve silinir. Boyanan yüzeyin, ilk çizmeye başlayan kalem üzerindeki harf ve rakam boyanın sertliğini tanımlar.



Resim 2.21. Kalem ile sertlik ölçümü [25].

Yapışma

Yüzeye güçlü bir şekilde bağlı olmayan bir kaplama çoğu uygulamada çok az kullanılır veya hiç kullanılmaz. Çok katlı boya uygulama sistemler için farklı katmanlar birbirine yapışmalıdır. Bu yapışmaya genellikle katlar arası yapışma denir. Bu yapışmada çeşitli yöntemlerle ölçölür. Bunlar boya kaldırma, tarama ve çapraz kesme testleridir [63].

Kaldırma testleri (Pull Off)

Boya sistemlerinde, boyanın yüzeye ve/veya boya katlarının birbirine ne kadar iyi yapıştığını tespit edebilmek için yapılan bir testtir.



Resim 2.22. Yapışma Testi-Pull Off

Tarama testi (Cross cut)

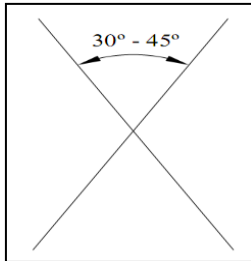
Boyanın uygulandığı yüzeye yapışmasını ölçen testtir. Yapışma testi için yüzeye uygulanmış olan boya filmi özel bir araçla 1'er mm veya 2'şer mm lik bıçak aralıkları ile 25 kareye bölünür. Bu kareler üzerine bant yapıştırılarak hızlı ve kuvvetli bir şekilde bir defada çekilir. Yüzeyden kalkan kare sayısına göre hangi boyama katında zafiyet olduğu tespit edilir.



Resim 2.23. Çapraz kesme testi

Çapraz kesme testi (X cut)

Çapraz kesme testi için yüzeye uygulanmış olan boya filmi özel bir bıçak ile aralarında 30° - 45° açı bulunan 2 çapraz çizgi çizilerek, elde edilen sonuçlar değerlendirilir.



Şekil 2.55. Çapraz kesme testi

Elastikiyet

Boyalar için elastikiyet, boya filminin herhangi bir hasar görmeden bükülebilmesi ve uzayabilmesi olarak ifade edilir. Elastikiyet ölçümünde konik bükme ve silindirik bükme gibi usüllerde faydalanılır.



Resim 2.24. Konik bükme [62]

Darbe direnci

Malzeme yüzeyine uygulanmış kuru boya filminin üzerine uygulanan kuvvetlere karşı boyanın gösterdiği mukavemete denir. Darbe testi, test plakası cihazın ağırlığının düşürüleceği plaka üzerine boyalı yüzey üste tarafa gelecek biçimde konumlandırılır. Parça üzerine düşürülecek ağırlık, darbe test standardının belirttiği yüksekliğe kadar kaldırılarak parça üzerine düşürülür. Test plakası üzerinde test aletinin çapı ölçüsünde açılan çukur üzerinden değerlendirme yapılabilir.

Kalınlık

Boya kaplamanın tek bir tabakasının kalınlığı ya da çoklu kat sistemindeki her tabakanın kalınlığını, boya sistemi performansı açısından kritik öneme sahiptir. Eğer boya çok ince ise altındaki tabakaları ya da yüzeyi yeterli şekilde korumayacaktır. Eğer boya çok kalınsa çözücüler sıkışmaya neden olacak şekilde boya yüzeyi kurumadan önce filmde buharlaşamayacaktır. Ayrıca çok kalın uygulanırsa boya çatlayabilir ya da tamamen kürlenmeyebilir. Bu yüzden boya kalınlıklarının ölçülmesi gerekmektedir.

Boya kalınlığı belirlemede iki farklı metod kullanılmaktadır.

- Tahribatlı ölçüm metodu
- Tahribatsız ölçüm metodu

Tahribatlı ölçüm metodu

Keskin uçlu bir aletle ile kuru film kalınlığına kesik açılarak ve büyüteç yardımıyla kuru film kalınlığı belirlenebilir. İşlem tek katlı değil çok katlı boyaların ölçümlerinde de

kullanılabilir. Ölçüm sonrası zarar gören boyanın onarılması gerekmektedir. Kullanılan cihaz PIG (Took) olarak adlandırılır.



Resim 2.25. Pig (Took) cihazı [64]

Tahribatsız ölçüm metodu

Uygulanan boya kalınlığını tahribatsız olarak yani kuruyan boyaya zarar vermeden yapılan kalınlık kontrollerinin hepsi tahribatsız boya ölçüm metodu olarak adlandırılır.

Film sertleştikten sonra kuru film kalınlığı ölçülür. Değişik ölçüm yöntemleri bulunmaktadır.

- Manyetik Ölçme Cihazı
- Mikrometre



Resim 2.26. Boya ölçüm cihazları [64]

Kıvılcım (Holiday) testi

Basitçe, kıvılcım veya gözeneklilik testi, kaplama veya kaplama sistemindeki alt tabakaya giden boşlukları aramaktadır.

Kıvılcım testinin çalışması için iki koşul gerekir:

1. Kaplama sistemi iletken olmamalıdır.
2. Yüzey iletken olmalıdır.

Yüzeye uygulanan elektrik akımı iletken olmayan boya kaplamasının olmadığı yerlerde ses uyarı ile birlikte kıvılcım çıkartarak boyanın tam olarak yüzeyi kapladığını gösterir [65].



Resim 2.27. Kıvılcım (holiday) test ekipmanı [64]

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, endüstriyel üretimde birçok alanda kullanılan S235 JR yapı çeliklerine, farklı kalınlıklarda uygulanan imalat ön astarlarının MAG ve tozaltı kaynak yöntemleri ile yapılan kaynaklardaki etkileri incelenmektedir. Malzemelerin bir kısmı olduğu gibi diğer bir kısmına ise kumlama yapılmış daha sonra farklı kalınlıklarda imalat ön astarı uygulanmıştır. Bu uygulamalar sonrasında malzemeler MAG ve tozaltı kaynak yöntemleriyle birleştirilmiştir. Öncelikle kaynak bölgesini doğru anlayabilmek için kaynaklı numunelere gözle muayene, makro, mikroyapı, SEM ve radyografi testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerdeki amaç kaynak bölgesinde (kaynak metali ve ITAB) meydana gelen içyapı, şekil ve yüzey kaynak hataları ile metalurjik dönüşümleri incelemektir. Kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek için ise hem MAG hem de tozaltı kaynaklı numunelere mekanik testler (sertlik, çekme, eğme ve darbe testi) uygulanmıştır.

3.1. Malzeme

Bu çalışmada endüstride konstrüksiyon imalatında sıklıkla kullanılan S235 JR yapı çelikleri seçilmiştir. Çekme mukavemetine göre adlandırılan yapı çelikleri, öncelikli akma sınırı değerleri göz önüne alınan, çelik konstrüksiyon, çelik köprü imalatı ve makine imalatlarında tercih edilmektedirler. Bu tür çelik tipleri genellikle alaşımsız çelik olarak adlandırılır, karbon miktarına bağlı olan mekanik özellikler değişkenlik gösterir. Bu deneyler için seçilen malzemenin mekanik ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Deneysel çalışmalar için kullanılan numune ölçüler 4x150x350 mm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. S235 JR malzemesinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi

C	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Ti
0,09	0,53	0,018	0,011	0,008	0,037	0,025	0,002
Akma Dayanımı (MPa)			Çekme Dayanımı (MPa)			Uzama (%)	
285			388,1			40,1	

3.2. Kumlama İşlemleri

Kaynatılacak S235 JR malzemesi 4x150x350 mm ölçülerine getirildikten sonra her gruptan 3 adet olmak üzere toplam 30 adet parça deneyler için seçilmiştir. İmalat ön astarı uygulanacak malzemeler yüzeyinde herhangi bir yabancı madde kalmaması ve boyanın yüzeyi tutunumunu artırmak için TS EN ISO 8501-1 göre Sa 2 ½ olarak kumlanmıştır. Resim 3.1’de kumlanmış malzemenin fotoğrafı ve Çizelge 3.2’de ise kumlama sonrası yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları verilmiştir.



Resim 3.1. Kumlanmış malzeme fotoğrafları, a) iğne uçlu ile kumlama ölçümü, b) kumlama mukayese plakası, c) yüzey pürüzlülük ölçümü, d) kumlama yüzey mukayese fotoğrafı

Kumlama derinlik ölçümü, Positector 6000 model cihaz ile gerçekleştirilirken, yüzey pürüzlülük ölçümleri ise Mahr PS1 model cihaz ile yapılmıştır.

Çizelge 3.2. Kumlama yüzey pürüzlülük dereceleri

S.N.	PARÇA NO	KUMLAMA DERİNLİK ÖLÇÜMÜ											YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK
		1	2	3	4	4	6	7	8	9	10	MAX	Rz
1	M1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	M2	77	132	93	107	135	111	105	96	76	105	137	75
3	M3	108	89	100	95	93	102	66	85	85	127	127	61
4	M4	68	70	58	83	73	80	100	53	86	97	100	72
5	M5	87	68	114	77	120	133	118	125	108	105	133	69
6	T1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	T2	113	99	123	92	106	98	78	118	80	108	123	63
8	T3	63	123	144	97	94	96	101	100	114	130	144	76
9	T4	86	119	106	133	99	99	100	109	84	138	138	67
10	T5	114	95	73	122	117	115	95	101	83	101	117	72

3.3. İmalat Ön Astar İşlemleri

Çalışmada kullanılan S235 JR malzemeler imalat sektöründe genellikle imalat ön astarı uygulanarak korozyon dayanımı artırılarak kullanılmaktadır. İmalat süreci yapılan işin hacmine göre uzun zamanlar alabilmektedir. Bu esnada malzemede herhangi bir problemin oluşmaması istenmektedir. Numunelerde kullanılan imalat ön astarı, çelik sac ve yapısal çeliklerin istiflenmesi, imalatı ve inşası sırasında, korozyona karşı korunma sağlamaktadır. İmalat ön astarları, pas önleyici olarak kullanılan çinko fosfat pigment içeren, iki komponentli epoksi poliamidlerdir. Aşağıda, deneysel çalışmalarda kullanılan imalat ön astar malzemenin genel özellikleri verilmiştir.

Fiziksel Değerler:

- Renk tonu/Renk : Kırmızı
- Hacimce katı madde,(%) : 26 ± 1
- Parlama noktası : 4 °C
- Sert Kuruma : 6 dakika, 20° C
- Uygulama yöntemi : Havasız spre / Havalı spre / Fırça (rötuş)

- Tiner (maks. hacimce) : % 20
- Film kalınlığı, kuru : $20 \mu\text{m} \pm 5$

Çizelge 3.3. Teorik imalat ön astar kimyasal kompozisyonu (%)

Hidrojen	Fosfor	Kalsiyum	Magnezyum	Alüminyum
5,8	1,5	5	3,3	0,2
Krom	Çinko	Silisyum	Oksijen	Karbon
0,8	3,8	3,2	35,6	43,8

Astarlama işlemleri havalı sprey makinesi ile manuel olarak uygulanmıştır. Uygulama sonrası fotoğraflar Resim 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.2. a) Malzemelerin astar uygulaması sonrası, b) Uygulama sonrası astar kalınlık ölçüm fotoğrafı

Astar uygulaması yapılan numelerin yüzeylerinden ölçülen imalat ön astar kalınlıkları Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. İmalat ön astar kalınlık değerleri

S.N.	PARÇA NO	İSTENEN BOYA KALINLIĞI	KAPLAMA			
			ORT	MAX	MİN	SAYI
1	M1	-	-	-	-	-
2	M2	-	-	-	-	-
3	M3	25 $\mu\text{m} \pm 5$	26,2	30	16	5
4	M4	50 $\mu\text{m} \pm 5$	50,4	55	46	5
5	M5	75 $\mu\text{m} \pm 5$	73,8	79	70	5
6	T1	-	-	-	-	-
7	T2	-	-	-	-	-
8	T3	25 $\mu\text{m} \pm 5$	27,8	30	21	5
9	T4	50 $\mu\text{m} \pm 5$	53,6	53	52	5
10	T5	75 $\mu\text{m} \pm 5$	77,9	80	72	5

3.4. Kaynak İşlemleri

Endüstride kullanılan S235 JR yapı çeliklerinin kaynağında bazı avantajlarından dolayı en çok kullanılan kaynak yöntemleri MAG ve tozaltı kaynak yöntemleridir. Bu kaynak yöntemleri, tel elektrodun kaynak bölgesine sürekli gönderilmesinden dolayı uygulayıcı örtülü elektrod ile ark kaynak usulündeki gibi tüketilen ilave metali değiştirmek için kaynağı durdurmak zorunda kalınmadığından dolayı zaman kaybı daha azdır. Örtülü elektrod kaynağına nazaran küçük çaptaki elektrodların kullanılmasından dolayı, eş akım değerlerinde yüksek metal yığıma hızlarına ulaşılmaktadır. Ayrıca MAG ve tozaltı kaynağında derin nüfuziyet sağlanabilmektedir.

3.4.1. MAG kaynağı

Robotik uygulamaları yaygın olarak kullanılan MAG kaynağının tercih edilmesinin sebebi, kaynağı doğrudan etkileyebilecek insan faktörünü ortadan kaldırmak için tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan MAG robot kaynak makinesinin özellikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. MAG robot kaynak makinesi özellikleri

Kaynak Robotu	FANUC 100iC/8L
Kontrollör & El terminali	Mate CABINET
Kaynak Makinesi	LINCOLN DIGIWAVE III 520
Su Soğutma Ünitesi	SAF FRO
Tel sürme Ünitesi	SAF FRO
Kaynak Torç	TBI Robot Torch

MAG robotik kaynak makinası ile kullanılan kaynak teli ve özellikleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kullanılan kaynak teli özellikleri

Klasifikasyonu		
TS EN ISO 14341-A	G42 3CM G3Si1	
AWS A5.18	ER70S-6	
EN ISO 14341-A	G42 3CM G3Si1	
Kimyasal Analizi (%) – (Tipik)		
C	Si	Mn
0,08	0,85	1,50
Kaynak Metalinin Mekanik Özellikleri (Tipik)		
Akma Dayanımı (N/mm ²)	440	
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	540	
% Uzama	30	
Darbe Dayanımı (J)	60 (-30 °C)	

Yapılan kaynak işlemlerinde deney süresince sabit tutulan kaynak parametreleri Çizelge 3.7’de verilmiş olup, kaynataki ısı girdisi aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$J\left(\frac{\text{joule}}{\text{mm}}\right) = \eta \frac{I(\text{Amper}) \times U(\text{Volt})}{V\left(\frac{\text{mm}}{\text{saniye}}\right)}$$

Enerji verimlilik faktörü (η), MAG kaynağı için 0,8 olarak alınmıştır.

Çizelge 3.7. Kaynak parametreleri

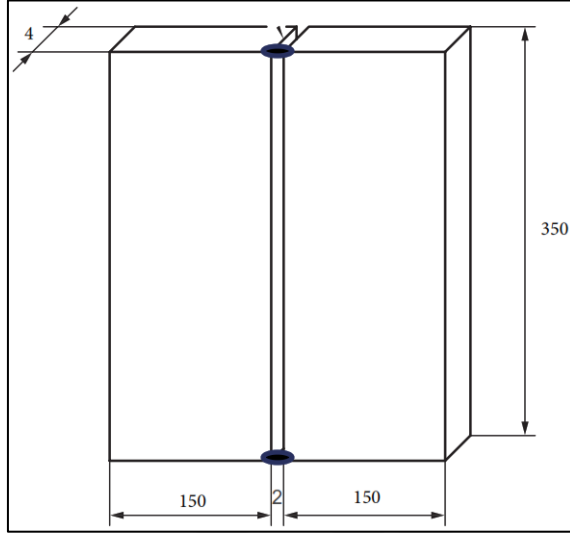
Kaynak Yöntemi	Amper (A)	Voltaj (V)	İlerleme Hızı (cm/dk)	Gaz Basıncı (Bar)	Isı Girdisi (kJ/mm)
MAG	215-220	22	44	19-21	5,2

Aşağıda Çizelge 3.8’de kaynak sarf malzemeleri ticari ismi, gaz türü ve basınç değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.8. Kaynak sarf malzemesi

Kaynak Yöntemi	Gaz Basıncı (Bar)	Gaz Türü	Tel	Tel Çapı (mm)
MAG	19-21	M24	SG2	1,2

Kaynak esnasında kullanılan numune ölçüleri ve puntalama aralığı Şekil 3.1'de görüldüğü gibi seçilmiş ve numuneler kaynak öncesi her iki uçtan puntalanmıştır.



Şekil 3.1. MAG ile kaynatılan numune ölçüleri

Aşağıda Resim 3.3’de görüleceği gibi numunelerin kaynak esnasında herhangi bir problem yaşanmaması için özel aparat yapılarak kaynak gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.3. Numunelerin MAG kaynak uygulaması öncesi ve sonrası fotoğrafları

3.4.2. Tozaltı ark kaynağı

Endüstride kendisine birçok kullanım alanı bulan tozaltı kaynağı, robotik MAG kaynağında olduğu gibi kaynak kalitesi üzerindeki insan faktörünü en aza indirmek için tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan tozaltı kaynak makinesinin özellikleri Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Tozaltı kaynak makinesi özellikleri

Marka	NURİŞ 1000 B
Giriş Gücü (KVA)	63
Giriş Akımı (A)	95
Akım Ayar Sahası (A)	25-1000
Açık Devre Voltajı (V)	51
Voltaj Ayar Sahası (V)	15-45
Çalışma Rejimleri (40 °C)	1000 A
Soğutma	Fan
Akım Tipi	DC
Akım Ayar Şekli	Thyristor
Kaynak Teli Çapı (mm)	2-6

Tozaltı kaynak makinasında kullanılan ilave kaynak tozu ve teli özellikleri Çizelge 3.10 ve 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.10. Tozaltı kaynak tozu özellikleri

Klasifikasyonu			
TS EN ISO 14341-A		SA AB 1 68 AC H5	
AWS A5.17		F6A2-EL12 / F7A4-EM12 / F7A2-EM12K / F7A4-EH12K	
Kimyasal Analizi (%) – (Tipik)			
C	Si	Mn	Cu
0,07	0,35	1,50	-

Alüminat-bazik algomere tip kaynak tozudur. Yapı çelikleri, gemi çelikleri, kazan sacları, sıcağa dayanıklı çelikler ve ince taneli çeliklerin tek veya çok pasolu alın ve köşe kaynakları için kullanılabilir. Kullanılan tozun kullanılmadan önce 300-350°C’de 2 saat kurutulmalıdır.

Çizelge 3.11. Tozaltı kaynak teli özellikleri

Klasifikasyonu			
TS EN ISO 14341-A	S2		
AWS A5.17	EM 12		
EN ISO 14341-A	S2		
Kimyasal Analizi (%) – (Tipik)			
C	Si	Mn	Cu
0,12	0,10	1,00	<0.30
Kaynak Metalinin Mekanik Özellikleri (Tipik)			
Akma Dayanımı (N/mm ²)	460		
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	525		
Uzama (%)	30		
Darbe Dayanımı (J)	55 (-30 °C)		

Yapılan kaynak işlemlerinde deney süresince sabit tutulan kaynak parametreleri Çizelge 3.12’de verilmiştir. Kaynataki ısı girdisi aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır.

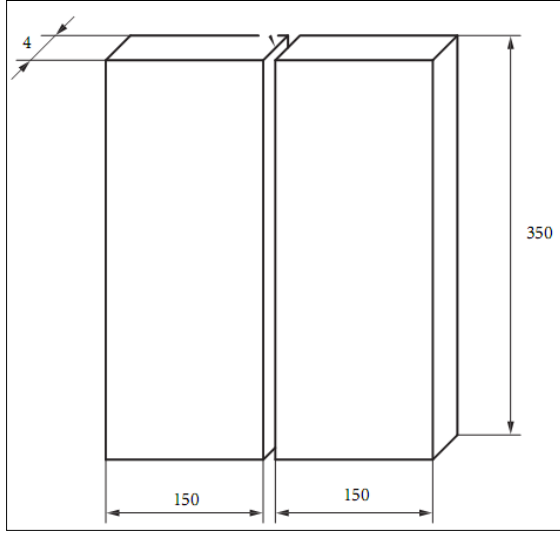
$$J\left(\frac{\text{joule}}{\text{mm}}\right) = \eta \frac{I(\text{Amper}) \times U(\text{Volt})}{V\left(\frac{\text{mm}}{\text{saniye}}\right)}$$

Enerji verimlilik faktörü (η), Tozaltı kaynağı için 1,0 olarak alınmıştır.

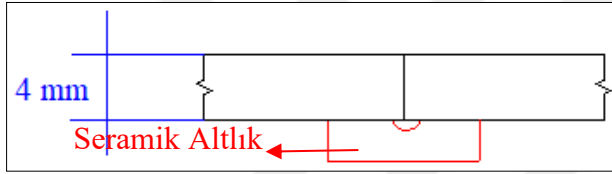
Çizelge 3.12. Tozaltı kaynak parametreleri

Kaynak Yöntemi	Amper (A)	Voltaj (V)	İlerleme Hızı (cm/dk)	Gaz Basıncı (Bar)	Isı Girdisi (kJ/mm)
Tozaltı	480-490	30	123	-	7,1

Kaynatılan numune ölçüleri Şekil 3.3’de verilmiş olup, kaynak ağzındaki açıklık ve seramik altlık gösterimi ise Şekil 3.4’de verilmiştir. Tozaltı kaynak yönteminde ağız açıklığı bırakılmamış olup, seramik altlık ile kaynatılmıştır.

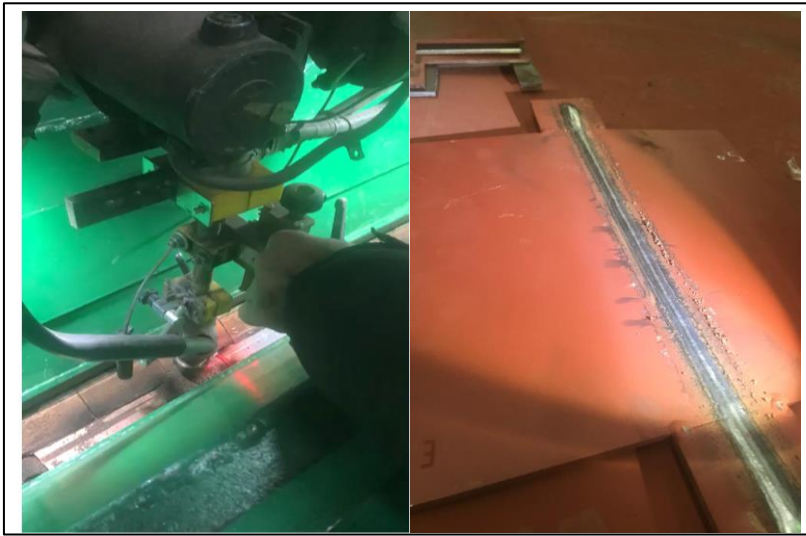


Şekil 3.2. Tozaltı kaynak numunesi ölçüleri



Şekil 3.3. Kaynak numunesi ara açıklık ölçüsü ve seramik altlık

Resim 3.4’de numunelerin tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılması esnası ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



Resim 3.4. Numunelerin tozaltı kaynak uygulaması öncesi ve sonrası fotoğrafları

3.5. Karakterizasyon İşlemleri

Kaynak yapılan numunelere kaynak bölgesinin özelliklerini belirlemek için öncelikle gözle muayene yapılmış ve radyografi testi uygulanmıştır. Ayrıca kaynaklı numunelerin kaynak metallerinin kimyasal bileşimlerini belirlemek için SEM ve EDS testler uygulanmıştır. Son olarak kaynaklı M ve T grubu test parçalarının mekanik özelliklerini belirleyebilmek için çekme, eğme ve darbe testleri uygulanmıştır.

3.5.1. Görsel muayene

Görsel muayene kaynakları yapılmış M ve T grubu numunelerin kaynaklarındaki yüzey süreksizlikleri, yapısal kusurları, yüzey durumu gibi kaliteyi olumsuz şekilde tesir eden parametrelerin optik bir yardımcı aparat kullanarak veya kullanmaksızın muayene edilmesidir. Muayene, TS EN ISO 17637 ergitme kaynaklı birleştirmelerin gözle muayenesi standardında belirtilen esaslara göre yapılıp, kabul kriterleride EN ISO 5817 kusurlar için kalite seviyeleri standardına göre kabul veya red durumlarına karar verilmiştir.

3.5.2. Radyografik muayene

Radyografi muayene yöntemi MAG ve tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin içindeki görünmeyen süreksizlikleri veya numune yüzeyine açık süreksizlikleri tespit etmek için kullanılmıştır.

Radyografik muayene yönteminde kısa dalga boylu nüfuz edici radyasyon kullanılmıştır. TS EN ISO 17636 göre yapılan muayene, S235 JR içerisinden geçen radyasyonun, numune parçalarındaki yoğunluk veya kalınlık farklılıklarından ötürü farklı oranlarda soğurulmuştur. Numunenin arka yüzeyinden yayılan radyasyon film üzerine kaydedilmektedir. Film üzerine kaydedilen görüntü gerçekte numunelerin gölge görüntüsüdür. Radyografi muayenede kullanılan ekipman bilgileri aşağıda verilmiş olup, ekipmanın fotoğrafı Resim 3.5’de verilmiştir.

Ekipman bilgileri;

Radyografi Ekipman Markası : Eresco 42 MF2 (220 Kv)

Sensör İsmi : DeReO WA

Kullanılan Film Ölçüsü	: 40x40 Xris Flat Panel
Çekim Mesafesi	: 700 mm
Çekim Parametreleri	: 160 Kv, 4 mA



Resim 3.5. Eresco 42 MF2 radyografi cihazı

3.5.3. Makro/Mikroyapı incelemeleri

MAG ve tozaltı kaynak yöntemleri ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilmiş olan kaynaklı parçaların her birinden makro ve mikroyapı çalışmalarında kullanılmak üzere 1'er adet numune hazırlanmıştır. Kaynaklı birleştirmelerden alınan numuneler makro ve mikroyapı incelemeleri için öncelikle sırasıyla 380, 400, 800, 1200, 1500 ve 2000 nolu su zımparaları ile her defasında 90⁰ döndürülerek zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler 1 µm olan parlatma keçesinde ve 1 µm'lik bir elmas pasta kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuş daha sonra % 2 Nitrik asit, % 98 Etanol çözeltisiyle dağlanmıştır. Dağlanan bu numunelerin öncelikle makro yapı daha sonra ise mikro yapı fotoğrafları LEICA DM 4000 M model optik mikroskop yardımıyla çekilmiştir. Makro ve mikroyapı çalışmaları Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendiliği Laboratuvarında yapılmıştır.



Resim 3.6. Leica DM 4000 M optik mikroskobu

3.5.4. SEM/EDS incelemeleri

Merkezlenmiş bir elektron demeti ile numunelerin yüzeyi taranarak görüntü elde edilmesinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM, scanning electron microscope), bir elektron mikroskobu çeşididir. Çekim esnasında elektronların numunede bulunan atomlarla etkileşime girerek numunelerin yüzeyindeki topografi ve kompozisyonları hakkında ayrıntılı bilgiler içeren farklı sinyaller üretmektedir. Kullanılan elektron demeti raster tarama ile numune yüzeyi taranarak ve elektron demetinin konumu, tespit edilen sinyalle eşleştirilerek görüntüyü oluşturmaktadır. Makro ve mikro incelemeler için hazırlanan numunelerin kaynak metalinde SEM ve EDS incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca çekme testi sonucu oluşan kopma yüzeylerinde SEM incelemeleri yapılmıştır. SEM uygulaması Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendiliği Labaratuvarında, Jeol 6064 LV cihazı ile yapılmıştır. Aşağıda Resim 3.6'da kullanılan cihazın fotoğrafı verilmiştir.



Resim 3.7. Jeol 6064 LV SEM cihazı

3.5.5. Sertlik çalışmaları

Sertlik ölçümü, MAG ve tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılan numunelerin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasında bir ilişki kurabilmek için yapılmıştır. Sertlik ölçümleri için ise her bir parametredeki deney numunelerinin üzerindeki 5 ayrı noktadan sertlik değeri alınmış ve bu değerlerin ortalamaları sonucunda sertlik şekilleri çıkarılmıştır. Sertlik ölçümleri kaynak metali, iri taneli bölge ve ana malzemeden yapılmıştır. Yapılan sertlik ölçümleri NOVOTEST TB-MCV-10 cihazı ile yapılmıştır.

Cihaz özellikleri ve test parametreleri;

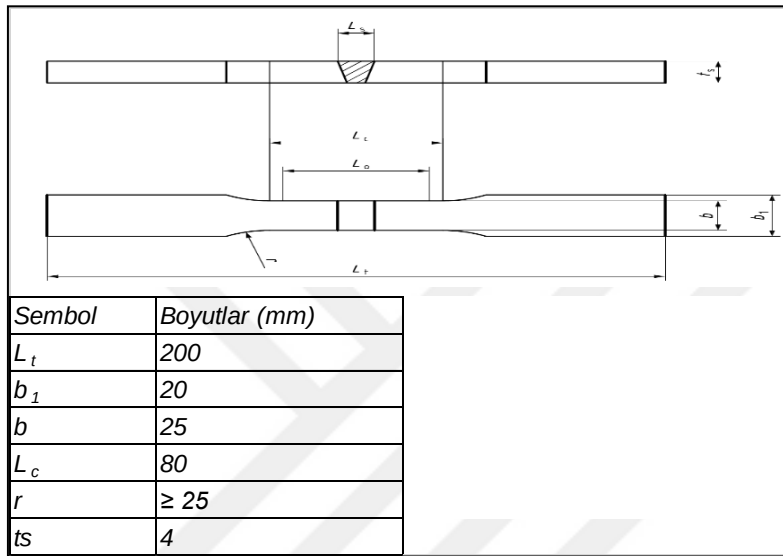
Marka	: NOVOTEST TB-MCV-10
Test yükleri (kgf)	: 10
Ölçüm Yöntemi	: Vickers
Uygulama Süresi (sn)	: 10
Test Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	: +20



Resim 3.8. Novotest sertlik cihazı

3.5.6. Çekme testi

Çekme deneyi MAG ve tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılan numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Çekme deneyi ile numunelerin statik ve yavaş uygulanan bir yüke karşı dayanımı ölçülmüştür. Numuneler, TS EN ISO 4136 standartlarına uygun olarak CNC tezgahlarında çekmeye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.4. TS EN ISO 4136'ya göre çekme numunesi ölçüleri

Standart da göre hazırlanan çekme numunelerinin çekme testleri ALŞA 30 TON MCK cihazı ile yapılmıştır.

Cihaz özellikleri ve test parametreleri;

Marka : ALŞA 30 TON MCK

Çekme Hızı (mm/dk) : 15

Düşme Açısı ($^{\circ}$) : 160

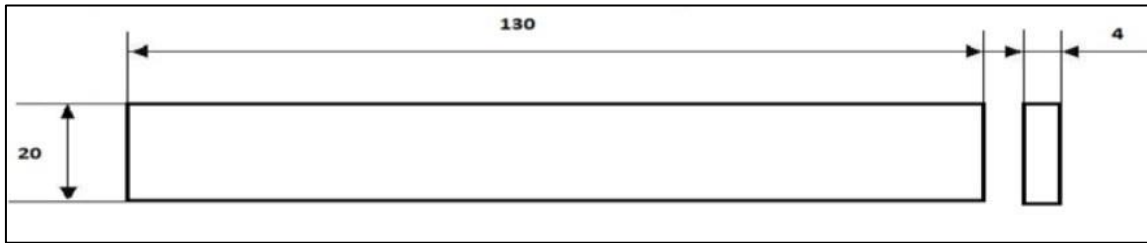
Test Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) : +20



Resim 3.9. Alşa 30 ton MCK üniversal çekme cihazı

3.5.7. Eğme testi

Eğme testi test numunelerine yapılan alın kaynaklarındaki sünekliği, kaynak ve esas malzeme arasındaki süreksizliklerin tespitinde kullanılmıştır. Eğme testleri kök ve kep eğme olarak yapılmıştır. Kep eğme testinde kaynağın kep tarafı gerilme etkisinde bırakılırken kök eğmede kaynağın kök tarafı gerilme etkisinde bırakılır. Deneyler TS EN ISO 5173 standardına göre yapılmıştır.



Şekil 3.5. TS EN ISO 5173'e göre eğme numunesi ölçüleri

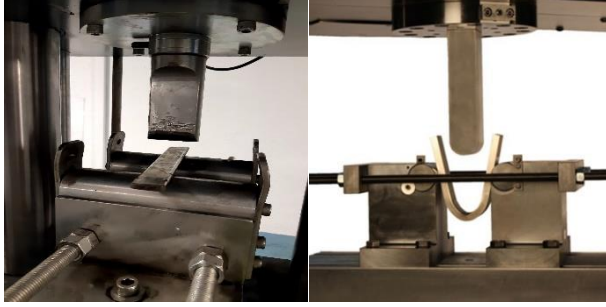
Hazırlanan deney numunelerinin eğme testleri ALŞA 30 TON MCK cihazı ile yapılmıştır.

Cihaz özellikleri ve test parametreleri;

Marka : ALŞA 30 TON MCK

Eğme Hızı (mm/dk) : 10

Test Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) : +20

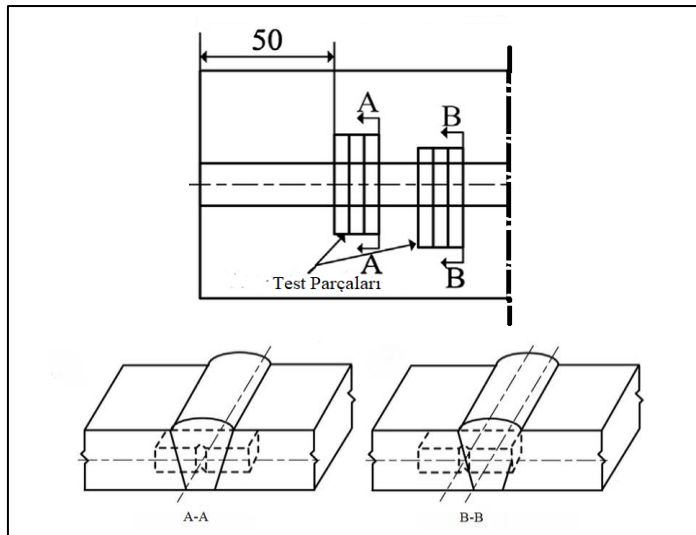


Resim 3.10. Alşı 30 ton MCK eğme test cihazı

3.5.8. Darbe testi

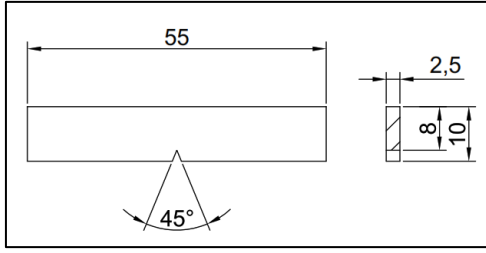
Çentik darbe testi malzemelerin geçiş sıcaklıklarında, süneklik ve gevrekliklerinin tespiti için yapılan bir testtir. Belirtilen sıcaklıkta, malzemenin kırılmaya karşı dayanımını Joule cinsinde bulmak için uygulanan bir yöntemdir. M ve T grubu kaynaklı numunelerine test yapılmasının amacı ise yapılan kaynağın ana malzemeye uyumluluk tespiti olup beklenti kaynak metalinin ve ısıdan etkilenmiş bölgenin çentik darbe dayanımı sonuçları en az ana malzeme seviyesinde olmasıdır.

Deneylerde kullanılan test parçalarının, kaynaklı numunelerin nerelerinden çıkarıldığı Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.6. TS EN ISO 9016’ya göre çentik testi numunesi ölçüleri

Kaynaklı numunelerde hazırlanan çentik test parçalarının ölçüsü TS EN ISO 9016 standardına göre hazırlanmış olup ölçüleri Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.7. TS EN ISO 9016'ya göre çentik testi numunesi ölçüleri

Deneyler resimde görülen ALŞA 300-400 JOULE Darbe Test Cihazı ile yapılmıştır. Testler TS EN ISO 148-1 standardına göre yapılmıştır.

Cihaz özellikleri ve test parametreleri;

Marka	: ALŞA 300-400 JOULE
Çekiç	: Charpy
Çekiç Ağırlığı (kg)	: 20
Düşme Hızı (m/s)	: 5,5
Düşme Açısı ($^{\circ}$)	: 160
Test Sıcaklığı ($^{\circ}$ C)	: +20



Resim 3.11. Darbe test cihazı

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada robotik MAG ve tozaltı kaynak yöntemleri ile birleştirilen S235 JR malzemelerin, kaynak sonrasındaki mekanik ve mikroyapılarında meydana gelen değişiklikler ve bu değişikliklerin oluşmasında yüzey hazırlama ve imalat ön astar kaplama kalınlığının etkileri araştırılmıştır.

Kaynak uygulamaları başlangıcında, kaynak esnasında ve kaynak sonrasında gözlemler yapılmış olup sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Kaynak başlangıcında, test numunelerinde arkı başlatmak, kumlanmış numunede çok kolay gerçekleşmiştir. Çünkü ana malzeme üzerinde elektrik geçişini engelleyecek yabancı bir madde kalmamıştır. Olduğu gibi kullanılan malzemede ise arkı başlatmak kısmen kolay bir şekilde gerçekleşmiştir. Malzeme yüzeyinde bulunan hadde artıkları ve tufaller elektrik akımının geçişini kısmi olarak engellemişlerdir. Kaplama uygulanmış malzemelerde ise özellikle imalat ön astar kalınlığı artıkcı kaynak arkı başlatılamamış ve sonrasında özel önlemler alma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Kaynak deneyleri ilk aşamasında kaplamasız başlangıç bitiş plakası kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Sonrasında, MAG kaynak yöntemi için geliştirilen özel kalıp sayesinde deney malzemeleri olduğu gibi sonrasında kumlamalı ve imalat ön astar kaplamış malzemeleri bitişik ve sıralı olarak kalıba bağlanarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu durumda herhangi bir ark başlatma problemi yaşanmamış olup kaynaklar yapılmıştır. Tozaltı kaynak yönteminde ise böyle bir problemle karşılaşılmamıştır. Bunun da sebebinin yüksek akım şiddetlerindeki çalışmadan kaynaklandığı düşünülmüştür. Kaynak esnasında yapılan gözlemlerde, kapsam aralığındaki imalat ön astar kalınlığı artıkcı kaynak sırasındaki duman çıkışı artmış olup, bunun nedeni yüzeydeki imalat ön astar kaplamanın yanmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Kaynak işlemi esnasında oluşan ark, kaynatılacak malzemenin çok yüksek sıcaklıklarda ergimesine neden olmaktadır. Ergimiş halde bulunan kaynak banyosu havadan oksijen ve azot absorbe ederek soğumuş kaynak metalinde yeni bileşikler oluştururlar. Kaynak uygulaması esnasında duman ve gazlar ortaya çıkar ve operatör duman ve gazlara maruz kalır. Kaynak dumanı, esas metal üzerinde bulunan kir, pas, boya, galvaniz ve yağ gibi kaplamalardan açığa çıkan taneciklerden oluşmaktadır. Meydana gelen bu gazların bileşimi kaynak yöntemine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Genel olarak oluşan bu duman ve gazlar; solunum güçlüğü, kanser, kronik bronşit, baş ağrısı, akciğer ödemi, metal dumanı ateşi, ağız ve burun mukozasında tahrişler,

kan yapıcı sistem ve kemik yapısı üzerinde çeşitli hastalıklara sebep olur. Bu tehlikeyi önlemek için kaynak yapılan ortamda ortaya çıkan duman ve gazların havalandırması ve emilmesi sağlanarak uzaklaştırılması gereklidir.

Kaynak sonrasında ise, test numuneleri üzerinde yapılan incelemede imalat ön astar bulunan numunelerin kaplama kalınlığı artıkça kaynak dikişi çevresinde ve test parçası arka yüzeyinde kararma ve kirlenme artmıştır. Artan bu kararmanın yüzeyde bulunan kapsam aralığındaki imalat ön astarının yanması sonucu oluştuğu sonucuna varılmıştır. Bu kararmaların sonraki boya uygulamalarına geçmeden önce temizlenmesi gerekecektir. Bu çalışmanın kapsamında olmaması dolayısıyla herhangi bir yüzey temizleme işlemi yapılmadan sonraki adımlara geçilmiştir.

Her iki kaynak yönteminde de yapılan incelemeler sonucunda, yüzey hazırlama ve imalat ön astarlarının kaynak kabiliyetinde değişikliklere sebep olduğu görülmüştür. Isı nedeni ile mikroyapıda meydana gelen bu değişiklikler de kaynaklı bağlantıların mekanik davranışlarında farklılıklar meydana getirmiştir. Özellikle tozaltı kaynak yöntemine kaynak bölgesine giren ısı girdisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır. Isı girdisinde meydana gelen bu değişimler, soğuma hızlarında da farklılıkların oluşmasına neden olmuştur. Soğuma hızındaki bu değişimlerde kaynaklı birleştirmelerin tane yapılarında incelme ya da kabalaşma şeklinde kendini göstermiştir. Mikroyapıdaki tanelerde meydana gelen değişimler birleştirmelerin mekanik karakteristiklerinde de değişimlere neden olmuştur.

4.1. Görsel Muayene

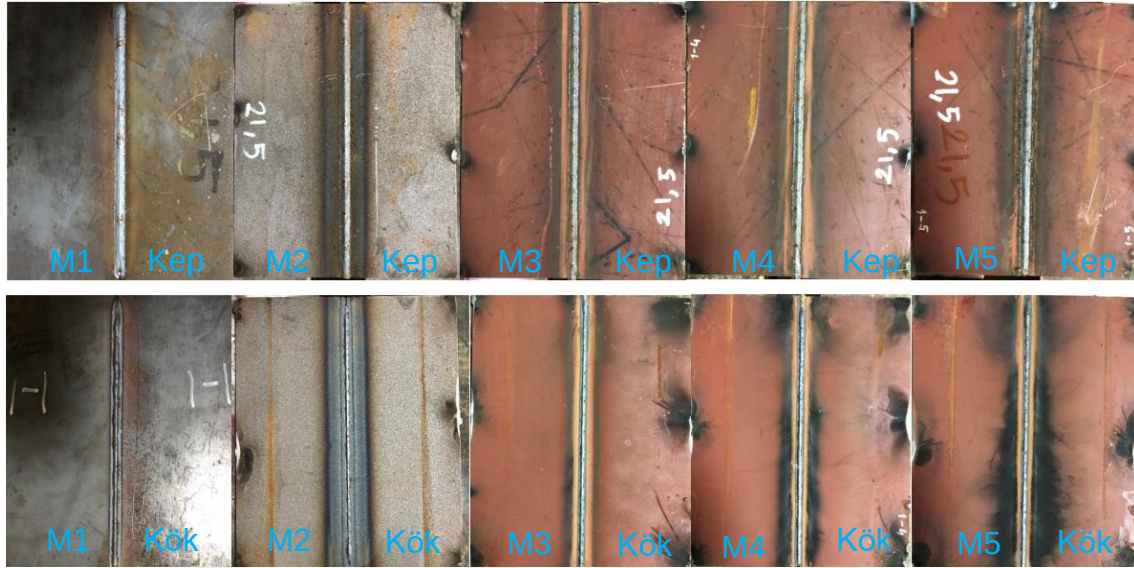
Göz ile muayene yapılmasının amacı, hızlı ve güvenilir bir yöntem olması, diğer tahribatsız test yöntemlerinin uygulanması öncesinde destek sağlaması ve ekonomik olmasında dolayı tercih edilmiştir. Muayene TS EN ISO 17637 kaynaklar için genel kurallar standardının genel şartlarına göre, TS EN 5817 kabul kriterleri standardına göre yapılmış ve değerlendirilmiştir.

4.1.1. MAG kaynaklı numunelerin görsel muayenesi

Göz ile muayene sonucunda, MAG kaynak yöntemi ile kaynatılan numunelerde, kaynak yüzeylerinde yetersiz nüfuziyet, kökte çökme ve çatlak gibi kaynak kusurlarının olmadığı

tespit edilmiştir. Buna rağmen, kısmi yanma olukları ve sıçrantıların oluştuğu, ancak bu kusurların kabul standardının sınırları içerisinde olduğu değerlendirilmiştir.

Resim 4.1’de görüldüğü gibi robotik MAG yöntemi ile kaynatılmış parçaların kaynak kep ve kök fotoğrafları görülmektedir.



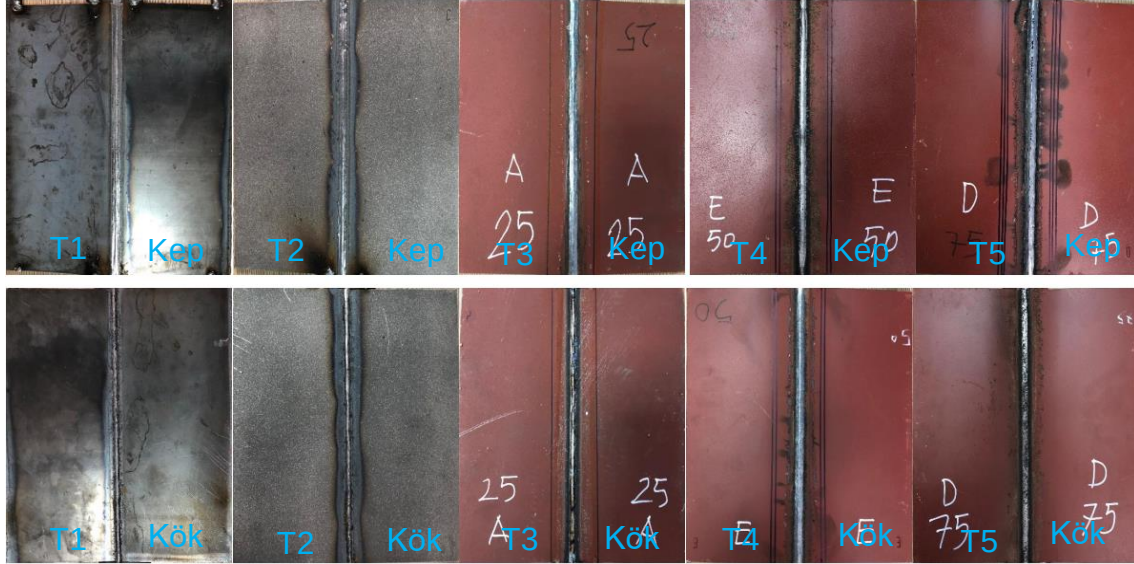
Resim 4.1. S235 JR yapı çeliğinin robotik MAG kaynak sonrası kep ve kök fotoğrafları

4.1.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin görsel muayenesi

Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılan numunelerin görsel muayene sonucunda, T1, T2, T3 ve T4 numunelerinde kaynak yüzeylerinde herhangi bir yetersiz nüfuziyet, kökte çökme ve çatlak gibi kaynak kusurlarının varlığı gözlenmemiştir. Buna rağmen, kısmi yanma oluklarının oluştuğu bu kusurların kabul standardının sınırları içerisinde olduğu tespit edilmiştir. T5 numunesinde sıralı gözenekler ve nüfuziyet eksikliği hataları olduğu tespit edilmiştir.

TS EN ISO 5817’de açıklanan 4021 numarası ile gösterilen tamamlanmamış kök nüfuziyeti açısından yapılan değerlendirmede, T5 numunesi hariç diğerlerinde bir problem görülmemiştir. T5 numunesi kusur sınıfları B, C ve D’ye göre kabul sınırları içerisinde değildir.

Resim 4.2’de görüldüğü gibi tozaltı yöntemi ile kaynatılmış parçaların kaynak kep ve kök fotoğrafları görülmektedir.



Resim 4.2. S235 JR yapı çeliğinin tozaltı kaynağı sonrası kep ve kök fotoğrafları

4.1.3. Görsel muayene genel değerlendirme

Gözle muayene kontrol işlemi, uygulanacak standartlar için gerekli koşulları yerine getiren ortamda ve konusunda uzmanlaşmış bir kontrolör tarafından yapılmıştır.

M3, M4 ve M5 numuneleri kaynakları esnasında yapılan gözlemde kaplama kalınlığı artıkça kaynaktan çıkan duman miktarında artış görülmüştür. Ayrıca kaynak sonrası boyalı malzemelerin arka yüzeylerinde yapılan değerlendirmede boya kalınlığı artıkça numunedeki kararma işlemi daha da artmıştır. T3, T4 ve T5 numuneleri kaynakları esnasında yapılan gözlemde kaplama kalınlığı artıkça kaynaktan çıkan duman miktarında artış görülmüştür. Boya kalınlığı artıkça numunedeki kararma durumu görülmemiştir. Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılan numunelerde sadece T5 numunesinde, nufuziyet sağlanmadığı ve sıralı gözenekler olduğu görülmüştür. Diğer numunelerin kaynaklarında herhangi bir problem görülmemiştir.

TS EN ISO 5817 çelik, nikel, titanyum, ve bunların alaşımlarının bütün tiplerinde ergitme kaynaklı birleştirmelerdeki kusurların kalite seviyelerini anlatan, bu standarta açıklanan 5011 numarası ile gösterilen sürekli yanma oluşu ve 5012 numarası ile gösterilen kesintili

yanma oluğu hatalarına göre değerlendirme yapılmıştır. Burada verilen kalite seviyeleri için kusur sınırları D, C ve B olarak sınıflandırılmıştır. Tüm sınıflara göre yanma oluğu derinliği minimum 1 ile 0,5 mm aralığında olması gerekliliği verilmiştir. MAG ve tozaltı kaynak yöntemi ile numuneler incelendiğinde tespit edilen yanma oluğu ölçüsü 0,5 mm altında olduğu görülmüştür.

Tüm numuneler üzerine yapılan muayeneler sonucunda, kaynak yüzeyinde herhangi bir çatlak ve kökte çökme gibi kaynak kusurlarının olmadığı görülmüştür. Akay ve arkadaşlarının farklı özellikteki malzemelerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin tahribatlı ve tahribatsız muayenesi çalışmalarında, kısmi yanma oluklarının oluştuğu, buna rağmen bu kusurları kabul standardının izin verdiği sınırlar içerisinde olduğu ifade edilmiştir [66].

M ve T grubu numunelerinde herhangi bir çatlak kusur görülmemiştir. Sarıcaoğlu ve arkadaşlarının elektrik ark kaynağı ile ilgili yaptıkları çalışmada, tek ve çok pasolu kaynaklarda kaynak dikişlerinin gözle yapılan muayenesinde gözle görülür cüruf kalıntısı, makro çatlak gibi hatalara rastlanmadığı ifade edilmiştir [67].

T5 numunesinde yetersiz nüfuziyetle birlikte sıralı gözenekler tespit edilmiştir. Boekholt çalışmasında, üçüncü nesil primerler, tersanelerde kaynak yapmadan önce imalat ön astarını ile ilgili başarılı sonuçlar bildirilmiş ve imalat ön astarlarını çıkarmaya gerek kalmadan kaynak yapma fırsatı sunduğunu ifade etmiştir. Bu sadece boya üreticisi tarafından önerilen temel maksimum kaplama kalınlığına sıkı sıkıya bağlı kalındığında mümkündür. Kaynak prosedürünün kendisi, kaynakta gözeneklilik oluşturan bir primerin olasılığı üzerinde bir etkiye sahip olabilir. Özlü tel ve özellikle metal özlü teller, MIG katı tellerden daha az duyarlıdır. Sonuç, mekanize kaynağın yüksek kaynak hızları ve hızla katılan kaynak havuzuna bağlı olarak gözeneklilik riskini artırabileceği açıklanmıştır [3].

Kaplama kalınlığı arttıkça kararma artışı MAG kaynak yöntemi ile kaynatılan numunelerde belirgin olarak görülmektedir. TS EN ISO 1090-2’de belirtildiği gibi kaynak yapılacak tüm yüzeyler kuru olmalı ve kaynakların kalitesini olumsuz etkileyecek veya kaynak işlemini engelleyecek (pas, organik malzeme veya çinko) malzemelerden arındırılmış olmalıdır. EXC1 için prefabrikasyon astarları (ön imalat astarları), ancak kaynak işlemini olumsuz etkilemiyorlarsa kaynak ergime yüzeylerinde bırakılabilir. EXC2, EXC3 ve EXC4 için, EN

ISO 15614-1 veya EN ISO 15613 uyarınca kaynak prosedür testleri bu tür prefabrikasyon astarları kullanılmalarında, prefabrikasyon astarları kaynak ergime yüzeylerinde veya ısıdan etkilenen bölgede bırakılmamalıdır, şeklinde bilgi verilmiştir [68].

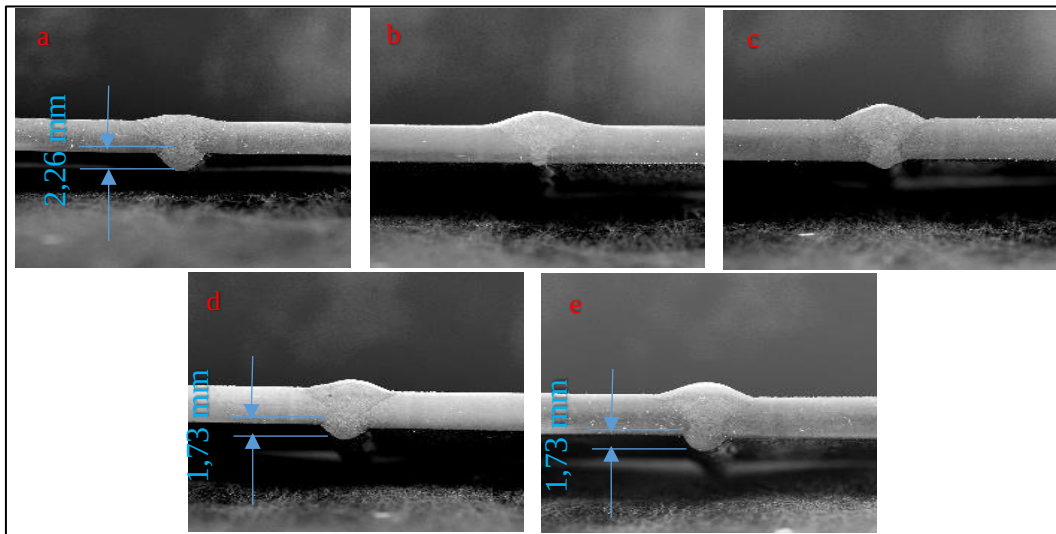
4.2. Makroyapı İncelemeleri

Bu test yöntemi ile alın kaynaklarında nüfuziyet, çatlak, gözenek, ergime noksanlığı gibi süreksizliklerin belirlenebilmesi için makro inceleme çalışmaları yapılmıştır.

4.2.1. MAG kaynaklı numunelerin makroyapı incelemeleri

Robotik MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin incelenen makroyapı fotoğraflarında ITAB görülmektedir. Kaynakların kep tarafındaki görüntüleri yüzey hazırlık işlemine ve imlat ön astar uygulanma durumlarına göre değişkenlik göstermektedir.

Bir kaynaklı bağlantı üç bölgeden oluşmakta olup bunlar kaynak metali, ITAB ve ana malzemedir. Kaynak metali, kaynak esnasında ilave metal ile ana malzemenin karışımından oluşmakta ve ergimiş ve katılaşmış durumdadır. Soğuma durumuna bağlı olarak farklı dönüşümlere maruz kalır. ITAB ise ana malzemenin en yüksek sıcaklığa maruz kalan kısmıdır bu bölgede ergime ve katılaşma olayı söz konusu değildir. Sadece ısınma ve soğuma hızlarına bağlı olarak metalurjik dönüşümlere maruz kalır.

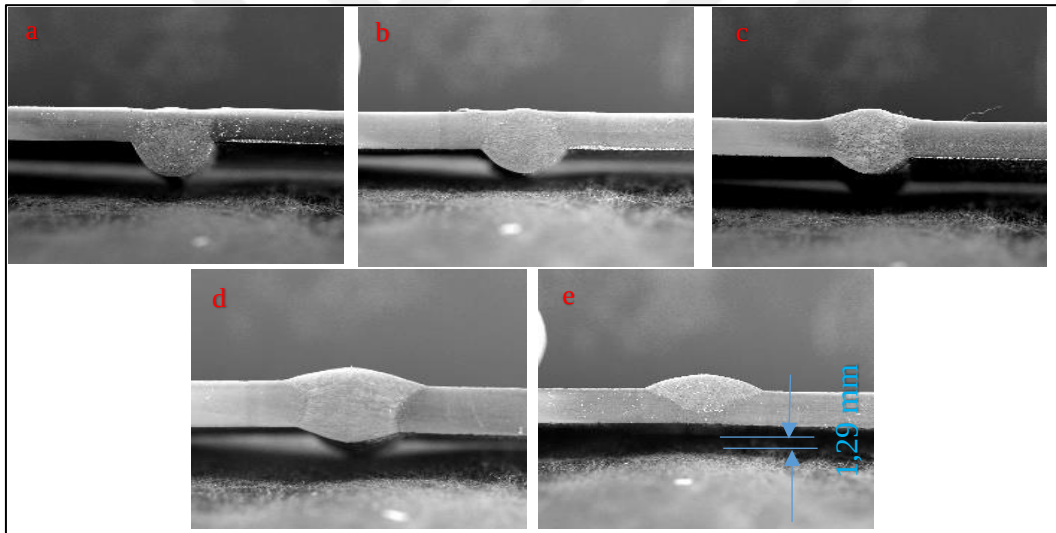


Resim 4.3. Robotik MAG kaynak yöntemi ile kaynatılmış parçaların makroyapı fotoğrafları
a) M1, b) M2, c) M3, d) M4, e) M5 numuneleri

Resim 4.3’de robotik MAG yöntemi ile kaynatılan numunelerin kaynak sonrası yapılan makro inceleme sonrası fotoğrafları görülmektedir. TS EN ISO 5817 standardında açıklanan 504 numarası ile gösterilen aşırı nüfuziyet için verilen maksimum 3 mm olarak verilen değer numuneler üzerinde yapılan ölçümlerde aşılmadığı görülmüştür. M1 numunesinde ölçülen en yüksek değer 2,26 mm olup kabul kriterleri içerisinde yer almaktadır.

4.2.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin makroyapı incelemeleri

Makroyapı inceleme, kaynak metali, ITAB ve devamında esas malzemeyi kapsayacak şekilde kaynak eksenine dik yöndeki numunelere uygulanmıştır. Aşağıda Resim 4.4’de tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılmış test parçalarına kaynak sonrası yapılan makroyapı inceleme sonrası fotoğrafları görülmektedir.



Resim 4.4. Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılmış parçaların makro fotoğrafları a) T1, b) T2, c) T3, d) T4, e) T5 numuneleri

Isı girdisine ve yöntemine bağlı olarak oluşan ITAB genişliğinin toz altı kaynağında daha fazla olduğu görülmektedir. T1 ve T2 numunelerine ait makroyapı fotoğrafında aşırı kök sarkması dolayısıyla meydana gelen yetersiz kep oluşumu hataları görülmektedir. TS EN ISO 5817 standardında açıklanan 504 numarası ile gösterilen aşırı nüfuziyet kaynak esnasında altlık kullanılması sebebi ile değerlendirme dışı tutulmuştur. T5 parçasında ise nüfuziyet sağlanmadığı belirgin olarak görülmektedir. TS EN ISO 5817 standardında açıklanan 4021 numarası ile gösterilen tamamlanmamış kök nüfuziyetine göre yapılan değerlendirmede 1,29 mm eksik nüfuziyet ölçülmüş olup kabul kriterleri içerisinde olmadığı görülmüştür.

4.2.3. Makroyapı genel değerlendirme

Makro inceleme sonucunda numunelerde ergime hatası, nüfuziyet eksikliği (T5 hariç), gözenek, çatlak ve kalıntı tespit edilmemiştir. Paso genişlikleri ve yükseklikleri robotik MAG kaynak yöntemine göre tozaltı kaynak yöntemindeki ısı girdisinin fazla olmasından dolayı daha büyüktür.

İmalat ön astar kaplamama kalınlığı 25 ile 50 mμ olan T3 ve T4 numunelerinde nüfuziyete yönelik herhangi bir kusur görülmemiştir. Solic ve arkadaşlarının yaptığı S235 JR malzemelerin MAG kaynağı yapısal özelliklerin test edilmesi çalışmasında, kaynak bölgesinde, koruyucu kaplama ile kaplanmış örnekler ile referans örnekler arasında makro fotoğraflarda ne görünür kusurların ne de sapmaların olmadığını göstermiştir [5].

İmalat ön astar kaplaması en yüksek olan T5 numunesinde nüfuziyet sağlanmadığı görülmüştür. Altınkök'ün MAG-TIG çalışmasında, ifade edildiği gibi meydana gelen nüfuziyetsizlik kaynak dikişinin mukavemetini etkilemektedir. Kaynakta nüfuziyetin düşük olması kaynak yerinin mukavemetini düşürdüğü bildirmiştir [69].

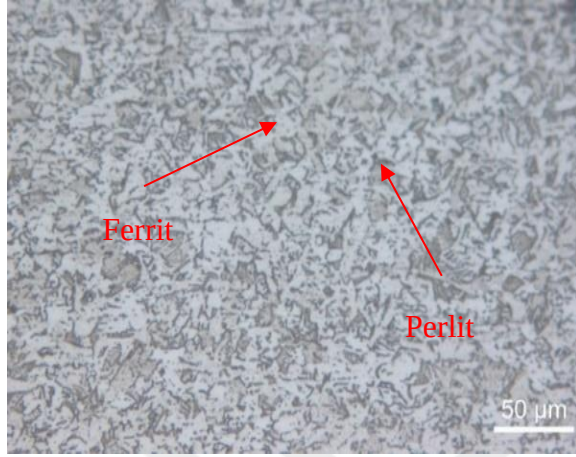
Tozaltı yöntemi ile kaynatılan T grubu numunelerinde ITAB'ın uygulanan kaynak yönteminde ısı girdisinin fazla olması sebebi ile daha geniş olduğu düşünülmektedir. M ve T grubu numuneleri kaynak metalinde tanelerin ısı akış yönüne doğru yönlenmiş olduğu görülmektedir. Apay ve arkadaşları bu konuda yaptıkları çalışmalarında bu durum, birleşim bölgesinde tane yönlenmesinin ısı akış yönüne doğru olduğu ve kaynak nüfuziyetinin uygun olduğu görülmüştür şeklinde açıklanmıştır [70].

Sonuç olarak, sadece tozaltı kaynak yöntemi öncesi numunelere uygulanan imalat ön astar kaplama kalınlığının artışının kaynak kalitesini etkilediği sonucuna varılmıştır.

4.3. Mikroyapı Çalışmaları

Kaynaklı numunelerin kaynak bölgelerinin mikroyapısal olarak farklılık gösterdiği ve bir kaynaklı bağlantıda mikroyapı sonucunda kaynaklı bağlantıların bazı metalürjik özellikleri hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Mikroyapı muayene yöntemi ile tane yapısı, kaynak

ısı girdileri ve soğuma sonucu oluşan faz dönüşümleri belirlenebilir. Resim 4.5’de S235 JR yapı çeliğine ait ana malzeme mikroyapı fotoğrafı verilmiştir.

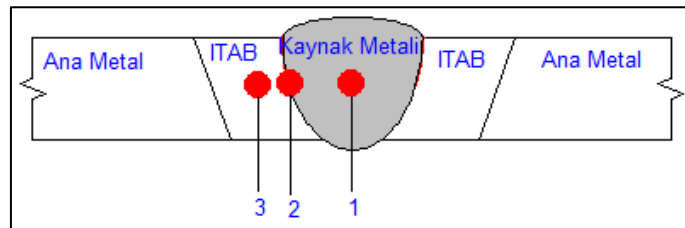


Resim 4.5. S235 JR yapı çeliğine ait ana malzeme mikroyapı fotoğrafı

Resim 4.5’te S235 JR yapı çeliğinin esas malzeme mikroyapı fotoğrafı incelendiğinde ana malzemenin yapısında ferrit ve perlit fazlarının bulunduğu görülmektedir. Mikroyapıda siyah rekte görülen bölgeler perlit, açık renkli olarak görülen bölgeler ise ferriti temsil etmektedir. Karbon oranının düşük olması nedeniyle perlit faz oranının az olduğu, ferrit fazının ise daha fazla olduğu görülmektedir.

Akkaş ve arkadaşları, bu konuda daha önce yaptığı çalışmasında, S235 JR çeliğinin içerdiği karbon miktarına (%0,0902) bağlı olarak açık renkli alanlarında yapının ferrit ve koyu bölgelerin de az bir miktar perlit tanelerinden oluştuğu şeklinde tanımlanmıştır [71].

Şekil 4.1’de mikroyapı fotoğraflarının çekildiği noktalar gösterilmiştir. 1 nolu bölge; kaynak metali, 2 nolu bölge; geçiş bölgesi ve 3 nolu bölge iri taneli bölgedir.

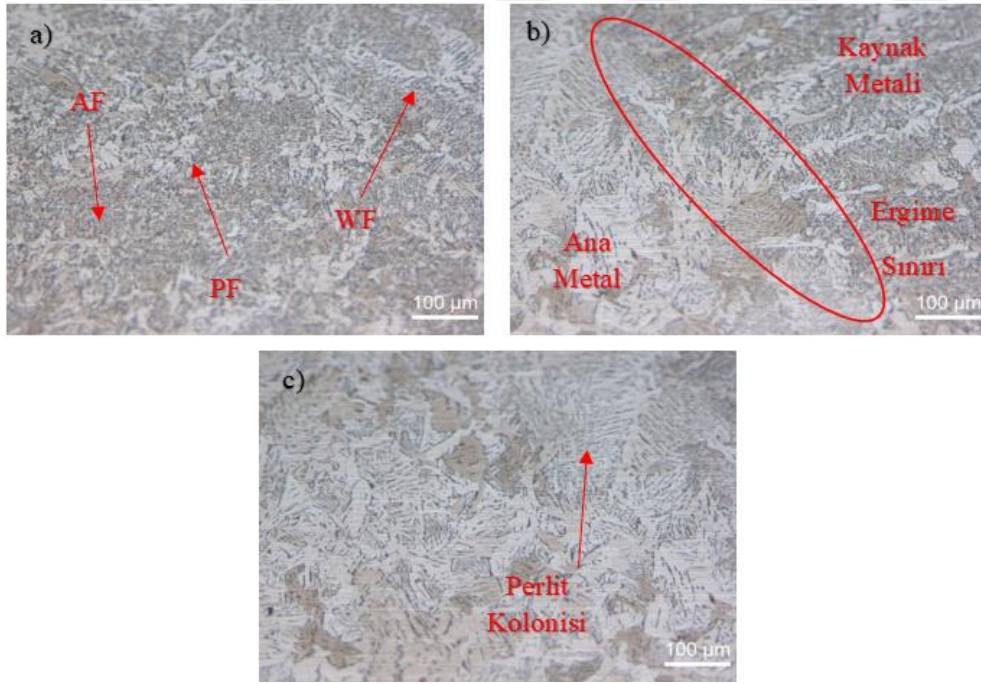


Şekil 4.1. Mikroyapı fotoğraflarının çekildiği noktalar

4.3.1. MAG kaynaklı numunelerin mikroyapı çalışmaları

Yapılan mikroyapı incelemeleri, kaynak işlemlerinden etkilenen malzemelerin, işlem öncesi ve sonrası özellikleri ile performansını ne ölçüde etkilediğini belirleyebilmek için yapılmıştır. Çalışma sonucunda malzeme içerisindeki tane yapısı ve faz yapısı gibi özellikler bu çalışma ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu bölümde robotik MAG kaynağı ile birleştirilen M grubu numunelerine ait sonuçlar bölümler halinde verilmiştir.

Resim 4.6'da herhangi bir işlem yapılmadan doğrudan birleştirilen M1 numunesine ait kaynak metali, ergime sınırı ve iri taneli bölgelere ait mikro yapı fotoğrafları verilmiştir.



Resim 4.6. M1 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge

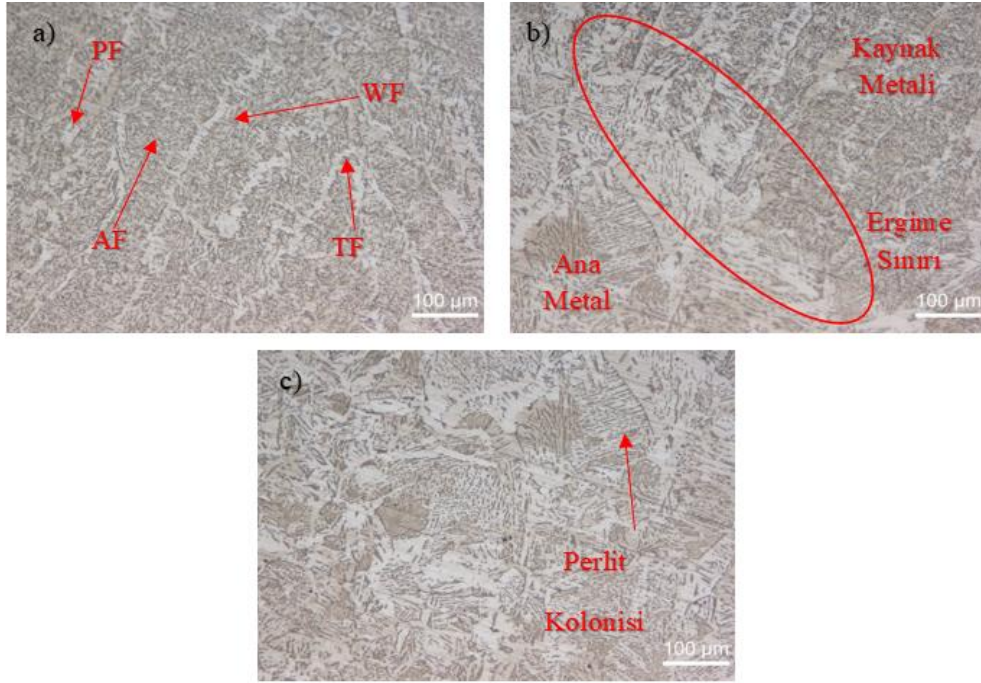
Resim 4.6'daki mikroyapı fotoğrafları, kaynak metali, kaynak metali ile ana malzeme arasındaki ergime sınırından ve kaynak işlemesi sırasında elde edilen ısınn etkisinde kalan iri taneli bölgeden çekilmişlerdir. Vural ve arkadaşları, ergimeli kaynaklı bir birleştirmede oluşan yapı, ergiyen esas metalden, ergiyen ilave metalden ve ana metalin sınırlı bir ısınn tesiri altındaki bölgesinden (ITAB) meydana geldiğini bildirmiştir [72].

Resim 4.6'daki a ile gösterilen resmindeki kaynak metali incelendiğinde AF, WF ve PF ile gösterilen asiküler ferrit, widmanstatten ferrit ve poligonal ferritlerin oluştuğu gözlenmektedir. Düşük karbonlu malzemelerin kaynağında kaynak metalinde görülmesi olası fazlar asiküler ferrit, widmanstatten ferrit ve poligonal ferrittir. Bunlar atmosferik şartlardaki soğumanın ürünüdür. Çeşitli çalışmalarda, belirtilen yapılarla elde edilen sonuçlar ile uyumludur [73,74,75]. Kaya, S235 JR ile S355 JR yapı çeliklerinin özlü tel elektrotla MAG kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması çalışmasında esas olarak tane sınırı poligonal ferrit PF, çokgen ferrit olduğunu belirtmiştir [76].

Resim 4.6'daki b) ile gösterilen ergime sınırına ait resimde, kaynak metali ve ana malzeme arasındaki ergime sınırı belirgin olarak görülmektedir. S235 JR yapı çeliğine ait esas metal görüntüsüyle kıyaslandığında, kaynak metaline doğru yaklaşıldıkça tanelerin büyüdüğü görülmektedir. Çeşitli çalışmalarda, ergime sınırını, benzer kaynak metali incelemelerinde benzer şekilde tarif edilmektedir [66,77].

Resim 4.6'daki c) ile gösterilen M1 işlemsiz S235 JR yapı çeliğine ait ITAB'taki tane değişimi kaynak için elde edilen ısının tesiri ile ana malzemeye doğru ilerledikçe küçüldüğü ve iri taneli bölgede perlit kolonileri bariz olarak görülmektedir. Kaynak metaline yaklaşıldıkça tanelerin irileştiği görülmektedir. Kılıçlı, düşük ve orta karbonlu malzemelerin kaynaklı mikroyapı çalışmalarında tane boyutu değişimlerini benzer şekilde tanımlamış ve göstermiştir [73].

Resim 4.7'de M2 numunesi yüzeyi kumlanarak yabancı maddeler yüzeyden uzaklaştırılmış ve kaynak için ideal hale getirilmiş numunelerinin kaynak metali ve ITAB mikroyapı fotoğrafları verilmiştir.



Resim 4.7. M2 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge

Resim 4.7’de Sa 2 ½ kumlanarak yüzeyde bulunan oksit, hadde artıkları giderilerek kaynatılan M2 numunesine ait fotoğraflarda tane boyutu değişimleri ve ITAB ve alt bölümlerinin oluştuğunu göstermektedir. Literatürde ITAB, kaynak yapılan malzemeye bağlı olarak birkaç alt bölgeye ayırmıştır. Bunlar, ana malzeme, ince taneli bölge, kısmen dönüşmüş bölge, iri tane bölge ve kaynak metali şeklindedir [78]. Bununla birlikte, ITAB’taki değişiklikler aynı zamanda malzemenin önceki termal ve mekanik geçmişine de bağlıdır. Jorge ve arkadaşlarının düşük alaşımlı çeliklerde yaptıkları çalışmada, ısıtma döngüsü sırasındaki yeniden kristalleşme davranışı, orijinal malzemenin kaynak öncesinde soğuk haddelenmiş veya tavllanmış durumda olup olmamasından etkilendiği bildirilmiştir [79].

Resim 4.7’deki a) ile verilen M2 kaynak metalinde widmanstatten ferrit (WF) fazının açık olarak tane sınırlarında olduğu görülmektedir. Jafarlou ve diğerleri widmanstatten ferritin, sıcaklık düştükçe, östenit tane sınırlarında çekirdeklendiği ve östenit tanelerine içine genişlediği yönündeki sonuçlarını çalışmasında bildirmiştir [80]. TF, AF ve PF ile gösterilen yapılar, tane sınırı ferrit, asiküler ferrit ve poligonal ferrit olarak ifade edilmektedir. Asiküler ferrit, östenit taneleri içerisindeki inklüzyonlarda çekirdeklenir. Poligonal ferritler, asiküler ferritler çevrilmiş olarak görünmekte olup boyutu dolayısıyla oluşması arzu edilmez. Tane

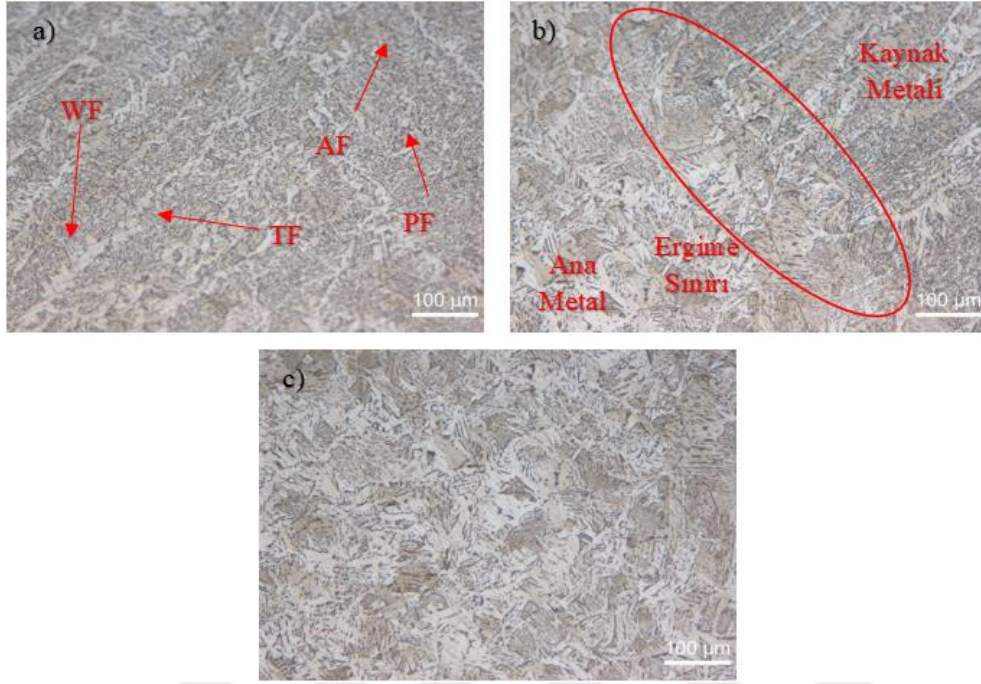
sınırı ferritler östenitik tane sınırı kolay difüzyon yollarına sahip olduğu için tane sınırlarında oluşur. Kaynak metalinde görülen bu mikroyapılar; esas metalin kimyasal kompozisyonu, kullanılan ilave metal, kaynak yöntemi, kaynak hızı ve soğuma hızına bağlı olarak meydana gelmektedir.

Resim 4.7’de b ile gösterilen fotoğrafta görüldüğü üzere kaynak metali ve ana malzeme geçiş bölgesi rahatlıkla görülmektedir. Kaynak metali ve ana malzemenin taneleri bu sınır üzerinde birbirinden ayrılmaktadır. Kaynak metali tanelerin çekirdeklenmesi ergime sınırında meydana gelmektedir.

Resim 4.7’deki c ile gösterilen iri taneli ısıdan etkilenen bölge görülmektedir. Bu bölgedeki ana malzemenin tanelerinin boyutu sıcaklıkla etkişim sonucu oluşmuştur. Oluşan mikro yapıda sementit ve ferritin oluşturduğu lamelli yapı olan perlit ve ferrit mikroyapılarıdır. Güven ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarında, ITAB mikroyapısında ötektoid öncesi ferrit taneleriyle birlikte, perlitler bu dönüşüme (östenite) uğrayacak ve ferritin geri kalanı değişmeden kalacağını rapor etmişlerdir [81].

MAG yöntemi, yüzeyi oksit artıkları ve yabancı maddeler bulunmayan malzemelerin kaynağında daha uygundur. Kumlama işlemi ile malzeme yüzeyinde oksitler ve diğer yabancı maddeler yüzeyden uzaklaştırılması yapılan kaynaklarda arkin kolay başlatılması sağlanmış ancak mikroyapı üzerinde bir etkisi görülmemiştir.

Resim 4.8’de M3 numunesine Sa 2 ½ kumlanarak yüzeyde bulunan oksit, hadde artıkları giderilmiş, sonrasında ortalma 25 µm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası birleştirilen numunenin kaynak bölgesi, ergime bölgesi ve iri taneli bölgesi görülmektedir.



Resim 4.8. M3 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge

Resim 4.8’de M3 numunesi Sa 2 ½ kumlanarak yüzeyde bulunan oksit, hadde artıkları giderilmiş, imalat ön astar ile boyanması sonrası birleştirilen S235 JR yapı çeliklerine ait mikroyapı görüntülerinde tane farklılaşmaları görülmektedir. Ana malzemedeki değişimler ısı girdisine bağlı olarak gerçekleşmiştir. Kaynak bölgesinden uzaklaştıkça ısıdan etkilenen bölgenin alt bölgelere ayrıldığı görülmüştür.

Resim 4.8’de a ile gösterilen resme bakıldığında widmanstatten ferrit, asiküler ferrit, poligonal ferrit ve tane sınırı ferrit oluşumları soğuma, malzemenin karbon içeriğine ve kullanılan kaynak yöntemine bağlı olarak oluşan yapılar görülmektedir. Kaya, yapısal çeliklerin üzerine yaptığı çalışmada, kaynak mikroyapıları ITAB’ın mikroyapısından farklı olduğu belirtilmektedir. Buradaki ilk yapı asiküler ferrittir. Asiküler ferrit kaynak metallerinde temel olarak ferrit oksit inklüzyonların heterojen çekirdeklenmesinin bir sonucu olarak oluşur. Asiküler ferrit genellikle düşük alaşımlı çeliklerin kaynak metalinde soğuma süresince oluşan bir yapıdır. 650⁰ C’nin altındaki soğumalarda meydana gelen bu faz tokluk ve dayanımı arttırdığı için büyük öneme sahiptir. Asiküler terimi iğneye benzer bir şekli ifade etmekte ancak genellikle üç boyutlu mercimek tanelerine benzer levhacıklar algılanmaktadır. Asiküler ferrit çekirdekleri kaynak metalinde östenit taneleri içerisinde bulunan oksit inklüzyonlarında veya TiN gibi çökeltilerde çekirdek teşekkülü ve

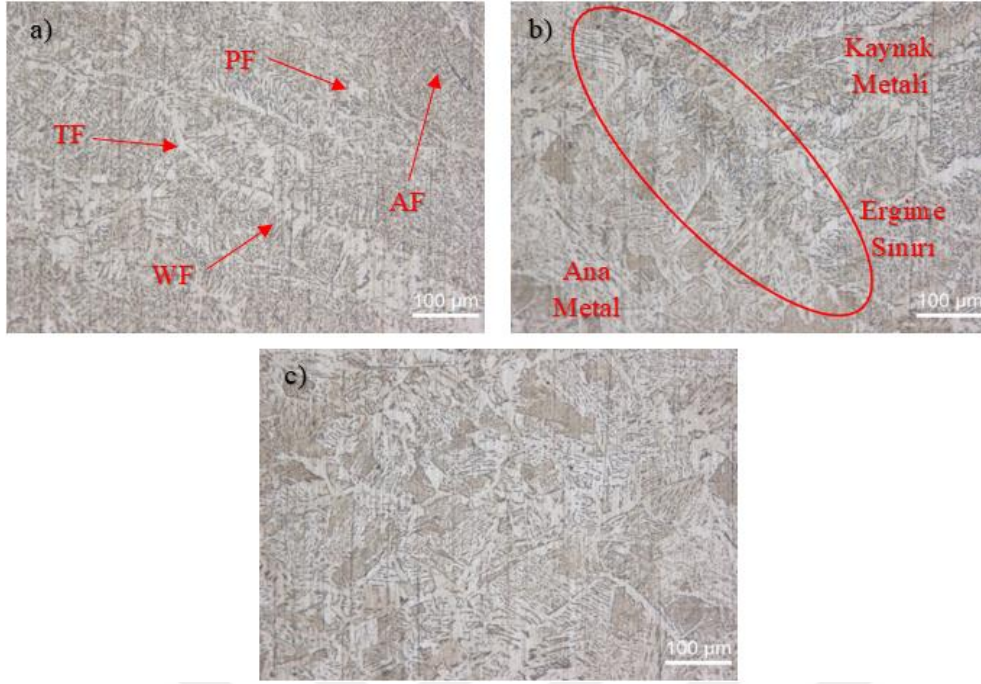
çekirdeklerin büyümesi ile meydana geldiğini bildirmektedir [76]. M3 kaynak metali resmi incelendiğinde görülen asiküler ferrit ile ilgili olarak, asiküler ferritin sıcaklık ve soğuma şartlarına bağlı olarak oluştuğunu açıklayan çeşitli çalışmalar yapılmıştır [82,83].

Resim 4.8’de b ile gösterilen fotoğrafta kaynak metali ve ana malzeme ergime sınırı görülmektedir. Ergime sınırı, yüksek ısı girdisi ile oluşan kaynak banyosu ile kaynak banyosundaki ısının ana malzemeye iletilmesi ile bu bölgedeki tanelerin irileştiği ITAB’ın alt bölümü olan iri taneli bölgeyi birbirinden ayıran sınırdır.

Resim 4.8’de c ile gösterilen açık renkli ferrit ve koyu renkli perlit yapılarının görüldüğü iri taneli ısıdan etkilenen bölge görülmektedir. Kaynak metali katılaşması sırasında yüksek ısı girdisinin esas malzemede taneleri etkileyerek boyutlarının değişmesine neden olmaktadır. Bu ısı ile kaynağa bitişik ana malzemede sırasıyla iri taneli, geçiş ve ince taneli bölgeler oluşmaktadır.

M3 numunesi Sa 2 ½ kumlanarak yüzeyde bulunan oksit, hadde artıkları giderilmiş, sonrasında ortalama 25 µm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası yapılan kaynakların mikro yapılarında kumlama ve imalat ön astarlarının etkisi görülmemiştir.

Resim 4.9’da M4 numunesine Sa 2 ½ kumlanarak yüzeyde bulunan oksit, hadde artıkları giderilmiş, sonrasında ortalama 50 µm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası birleştirilen numunelerin kaynak bölgesi, ergime bölgesi ve iri taneli bölge görülmektedir.



Resim 4.9. M4 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge

Resim 4.9'da M4 Sa 2 ½ kumlanmış, sonrasında ortalma 50 µm imalat ön astar boya ile boyandıktan sonra birleştirilen S235 JR yapı çeliklerine ait fotoğraflarda tane boyutu ve değişimleri görülmektedir.

Kaynaklı bağlantılar başlıca, kaynak metali, ısıdan etkilenen bölgeler ve etkilenmemiş ana metallere oluşur. Her bir kaynak alanının metalurjisi, esas ve kaynak metallerinin bileşimleri, kaynak işlemi ve kaynak şartlarıyla ilgilidir. Jenney ve O'Brien yaptıkları çalışmada kaynak metali, erimiş ana metal ile ilave metalin bir karışımıdır, şeklinde tanımlamalar yapmışlardır [84].

Resim 4.9'da a ile gösterilen resmi incelendiğinde M4 numuneleri kaynak metali resimlerinde görüldüğü gibi kaynak metalinin soğuma hızına, kaynak yöntemine ve ilave tele bağlı olarak değişiklik gösteren tane sınırı ferrit, widmanstatten ferrit (WF), asiküler ferrit (AF) ve poligonal ferrit (PF) oluşumu gözlenmektedir.

Çeşitli çalışmalarda, asiküler ferrit oluşumu genel olarak daha büyük östenit taneleri, asiküler ferrit için daha elverişli olarak görülmektedir. Bununla birlikte, mevcut durumda asiküler ferrit miktarı, östenit tane boyutu ile önemli ölçüde değişmez, şeklinde açıklama

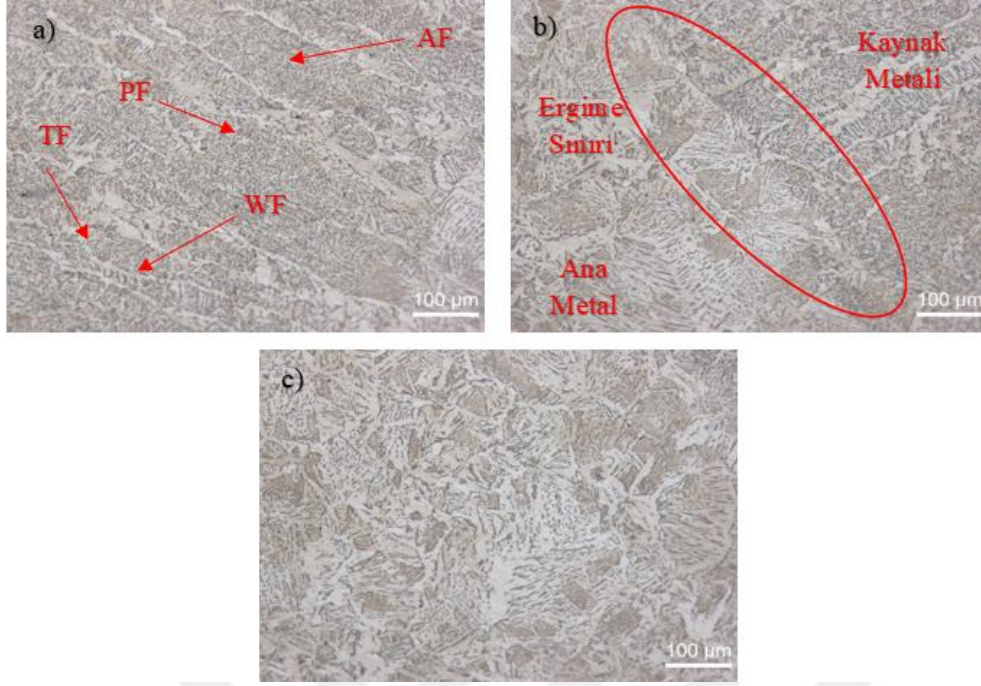
yapılmaktadır [85,86]. Asiküler ferrit oluşumu kaynak metalinin dayanımını artırmasından dolayı isten bir yapı olmasına rağmen widmanstaten ferrit ve poligonal ferrit ve tane sınırı ferritler kaynak metalinin dayanımını düşürdüklerinden dolayı oluşması istenmez.

Resim 4.9'da b ile gösterilen M4 numunesi kaynak metali ve ana malzeme arasında bulunan ergime sınır çizgisi görülmektedir. Ergime sınırı kaynak esnasındaki sıvı kaynak metali ve ana malzemeyi birbirinden ayıran sınır olup katılma başlangıç noktasını göstermektedir.

Resim 4.9'da c ile gösterilen ferrit ve perlit yapılarının görülmekte olup ısıdan etkilenen iri taneli bölge ergime sınırı ile bitişik halde görülmektedir. Bu bölge ITAB'ın farklı bölümlere ayarılabilen alt bölümlerinden birisidir. Diğerleri ise geçiş bölgesi, ince taneli bölge şeklinde meydana gelmekte olup bu bölgelerin tümüne ITAB denilmektedir. Çelik, ITAB ile ilgili yaptığı çalışmada ise ısı tesiri altında kalan bölgede sıcaklıkla ile tane yapısı arasındaki bağıntı tanelerin büyümesi ile açıklamaktadır. Kaynak metali dışında ergime derecesine ulaşamayan alt kritik sıcaklığa kadar inen ($727-723^{\circ}\text{C}$) bir ısı esas metale tesir eder. Kaynak metalini çevreleyen bu bölgeye ITAB adı verilir. Burada, esas metalin var olan taneler yapısı değişerek, yerine şartların oluşturduğu yeni bir yapı doğar, şeklindedir [87].

M4 numunesi Sa 2 ½ kumlanarak yüzeyi ortalama 50 µm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası yapılan kaynakların mikro yapılarında kumlama ve artan imalat ön astar kalınlığının bir etkisi gözlenmemiştir. Artan kaplama kalınlığının mikroyapı üzerine herhangi bir etkisi tespit edilmemiştir.

Resim 4.10'da M5 numunesi Sa 2 ½ kumlanarak yüzeyde bulunan oksit, hadde artıkları giderilmiş, sonrasında ortalama 75 µm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası birleştirilen numunelerin kaynak bölgesi, ergime bölgesi ve iri taneli bölge görülmektedir.



Resim 4.10. M5 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge

Resim 4.10'da a) ile gösterilen görüntüye bakıldığında M5 numunesinde widmanstaten ferrit, tane sınırı ferrit, asiküler ferrit ve poligonal ferrit yapıları oluşmuştur. Kaynak metalinin mekanik özellikleri yalnızca kimyasal bileşime ve saflığa bağlı olmayıp aynı zamanda mikroyapıya da bağlıdır. Numunelerin kaynak metalinden elde edilen asiküler ferrit istenen bir yapı olup kaynak metalinin dayanımını artırmaktadır. Widmanstaten, tane sınırı ve poligonal ferrit yapılar kaynak metalinde istemeyen yapılardır. Çeşitli çalışmalarda, ergimiş ana metal ile ilave metalin bir karışımı olan kaynak metalinde asiküler ferrit, widmanstaten ferrit ve poligonal ferrit görüldüğü yönünde açıklamalar yapılmıştır [73,88]. Silva ve arkadaşlarının yaptıkları araştırmada ise asiküler ferritin doğası ve oluşumu birçok araştırmaya konu olmuş olup faz, iki boyutlu kesitlerde iğne şeklindeki görünüm nedeniyle sivri olarak adlandırılmıştır. Genel olarak, üç boyutta, asiküler ferritin ince, lentiküler (merceksi) plakaya benzer morfolojisine sahip olduğu kabul edilmektedir. Asiküler ferrit plakalar, östenit taneleri içindeki inklüzyonlarda çekirdeklenir. İlk çekirdeklenmeden sonra, başka plakalar otokatalitik olarak çekirdeklenebilir, bu nedenle inklüzyon sayısı ile asiküler ferrit plakaların sayısı arasında bire bir karşılık gelmesi beklenmez, şeklinde bulgulara rastlanmıştır [88].

Resim 4.10'da b) ile M5 numunesinde ısı girdisine bağılı olarak tane boyutu değişen ana malzemenin bir parçası olan ITAB ve ilave tel ile esas malzemenin ergiyerek bunların karışımı ile oluşan kaynak metali sınır çizgisi görülmektedir. Ergime sınırı kaynak metalinin bitiş noktasını göstermekte olup bu sınırdan sonraki alan ana malzemeni ısı ile değişime uğrayan ITAB'ın başlangıç noktasını göstermektedir.

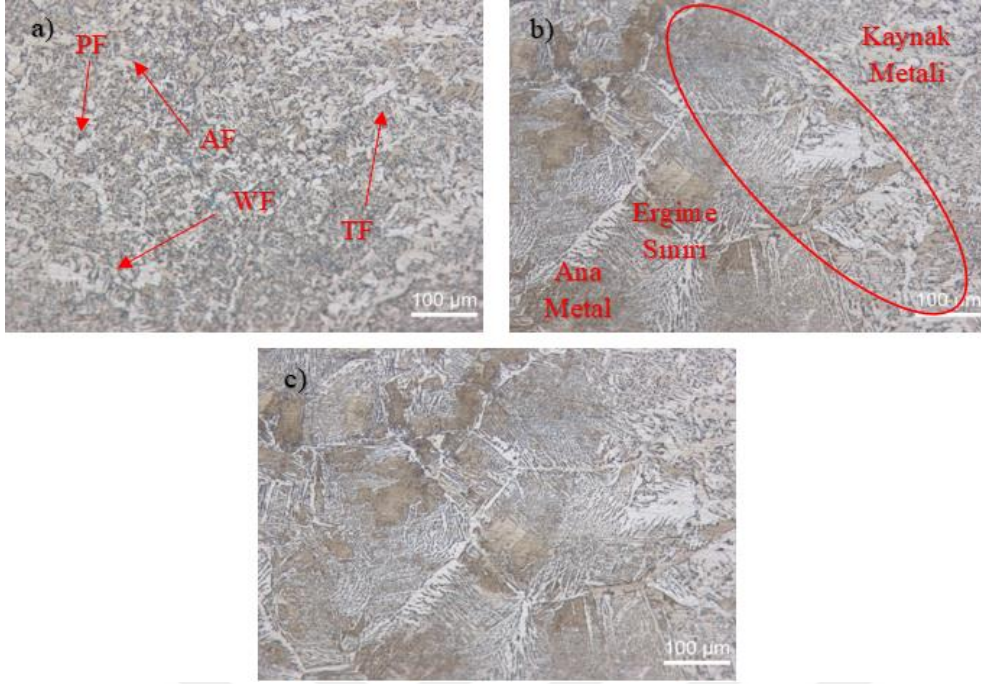
Resim 4.10'da c) ile gösterilen fotoğrafta iri taneli bölgedeki baskın olan ferrit ve geri kalanı lamelli yapı olan perlit görülmektedir. Kaynak esnasında metaller yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki bir sıcaklığa çıktıkları zaman tane büyümesi meydana gelir. Taneler büyüyerek ve tamamen küçük tanelerin yerine geçerek ortalama tane boyutu büyür.

Sa 2 ½ kumlanmış, sonrasında 75 µm kalınlığında imalat ön astar boya uygulaması yapılmış, en yüksek kaplama kalınlığına sahip M5 numunelerinin kaynak metalinde, artan kaplama kalınlığına rağmen mikroyapıdan bir değişiklik görülmemiştir.

4.3.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin mikroyapı çalışmaları

Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin mikroyapı incelemesi kaynaklı birleştirmeden alınan numune kesitinin X100 büyütme ile incelenmesi sonucu elde edilmiştir. Bu bölümde tozaltı kaynağı ile birleştirilen T grubu numunelerine ait sonuçlar bölümler halinde verilmiştir.

Resim 4.11'de herhangi bir işlem yapılmadan doğrudan birleştirilen T1 numunesine ait kaynak metali, ergime sınırı ve iri taneli bölgelere ait mikroyapı fotoğrafları verilmiştir.



Resim 4.11. T1 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge

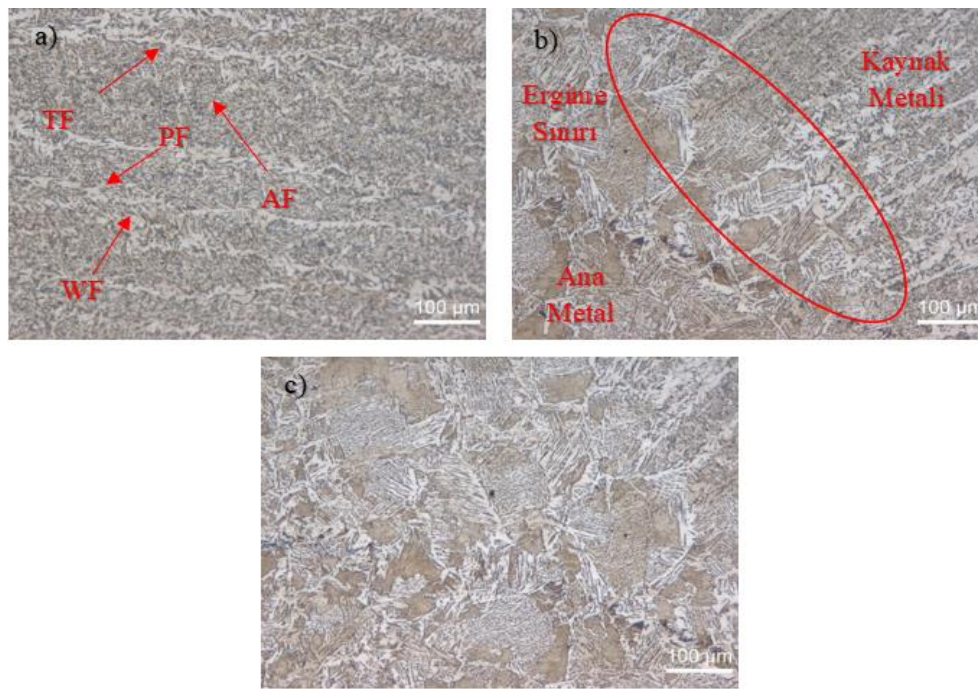
Resim 4.11’de a ile gösterilen T1 kaynak metalinden alınan mikroyapı görüntülerinde iri taneli yapıların ve kenar yüzeylerden kaynak metali merkez noktasına doğru yönelmekte olduğu görülmektedir. Kaynak metalinde ise WF, TF, AF ve PF ile gösterilen widmanstatten ferrit, tane sınırı ferrit, asiküler ferrit ve poligonal ferrit oluşumları gözlenmektedir. Oluşan bu yapılar soğuma hızı ve kimyasal birleşime bağlı olarak oluşmuştur. Çeşitli çalışmalarda düşük karbonlu çeliklerin kaynak metalinde WF, TF, AF ve PF benzer yapıların elde edildiği bildirilmiştir [73,75,89].

Resim 4.11’de b ile gösterilen resimde T1 işlemsiz S235 JR yapı çeliklerine ait ana malzeme ve kaynak metali arasındaki ergime sınırı görülmektedir. Ergime sıcaklığına kadar ısıtılan kaynak bölgesi ile östenit sıcaklığına kadar ısınan iri taneli bölgeler arasındaki ergime sınırı meydana gelmektedir. Kılıçlı’nın mikroyapıyla ilgili yaptığı çalışmalarda, ITAB alt bölümü olan iri taneli bölge mikroyapısında preötektoid ferrit taneleri, önceki östenit tanecik sınırı boyunca dağılarak, tipik morfolojiler olarak tanecik sınırı allotriomorfik ferrit ve poligonal ferrit (PF) de oluştuğu ifade edilmiştir [90].

Resim 4.11’de c ile gösterilen bölgede tek fazlı ferrit ve iki fazlı perlit yapılarının oluştuğu ısıdan etkilenen ITAB’ın altı bölümü olan iri taneli bölge görülmektedir. Ceyhun ve Sönmez

ısıdan etkilenen bölgeye yönelik yaptıkları bir çalışmada, ergitmeli kaynaklı bir birleştirmede gerçekleşen yapı, eriyen esas metalden, eriyen ilave metalden ve ana metalin sınırlı bir ısının etkisi altındaki bölgeden (ITAB) meydana gelir, şeklinde ifadeye rastlanmıştır [91].

Resim 4.12’de T2 numunesi yüzeyi kumlanarak yabancı maddeler yüzeyden uzaklaştırılmış ve kaynak için ideal hale getirilmiş numuneye ait kaynak metal, ergime sınırı ve iri taneli bölge mikro yapı fotoğrafları verilmiştir.



Resim 4.12. T2 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metal, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge

Resim 4.12’de a ile gösterilen T2 kaynak metalinde asiküler ferrit oluşumları gözlenmektedir. Esmailian östenit tane boyutunun östenit ferriti dönüşümleri çalışmasında, kaynak metalinde asiküler ferrit yapısını varlığından bahsetmiştir [92].

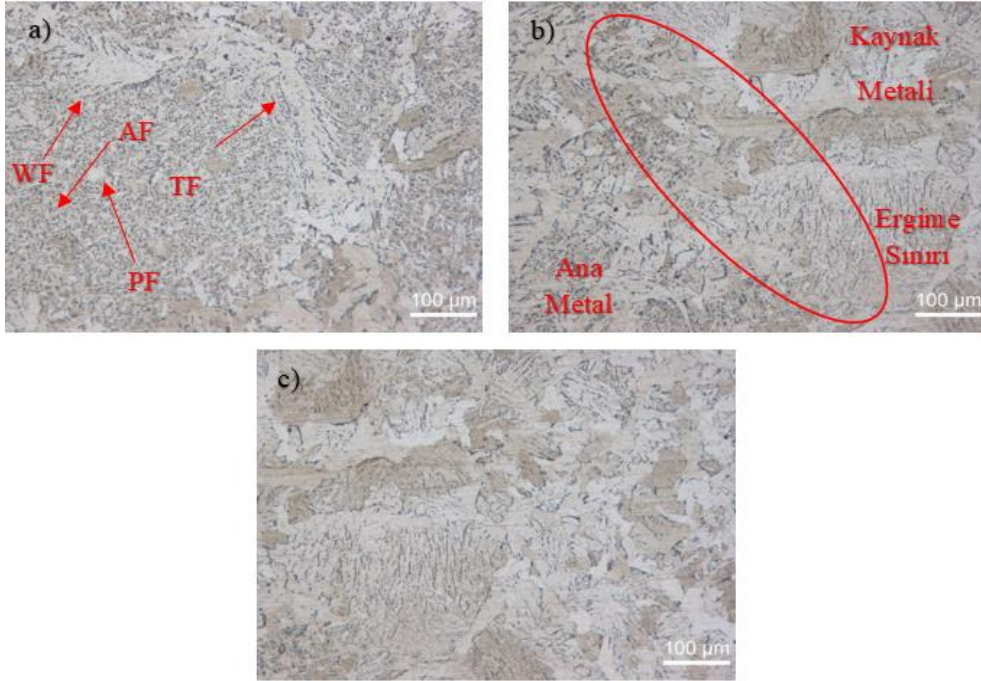
Tane sınırlarında oluşan tane sınır ferrit, poligonal ferrit ve widmanstatten ferritler görülmektedir. Widmanstatten ferritin oluşumu, karbonun difüzyonundan etkilenmez ve budan dolayı büyümesi düşük sıcaklıklarda yavaşlamaz ve yapısının plaka şeklinde olması sebebi ile dönüşümü sırasında karbon tarafından bölünür. Çeşitli çalışmalarda, düşük karbonlu malzemelerin kaynak metalinde widmanstatten ferrit ve poligonal ferrit yapıları, tespit edildiği bildirilmiştir [81,92].

Honeycomb ve Kerry kaynak metali yapısında görülen asiküler ferrit ile ilgili olarak yaptıkları çalışmalarda asiküler ferritin, tipik olarak boyutu 1 ila 3 μm arasında olan ince, lentiküler plakaların morfolojisine sahip üç boyutlu tür olduğu kabul edilir, biçiminde tarif edilmektedir [93].

Resim 4.12’de b ve c ile gösterilen resimler incelendiğinde ITAB ile kaynak metali arasında ergime sınırı ve iri taneli bölgede sementit ve ferritin birleşmesi ile oluşan perlit ve ferrit yapıları görülmektedir. Tozaltı kaynak yönteminde kaynatılan numunelerin ITAB alt bölümü olan iri taneli yapılar, MAG kaynak yöntemine göre büyük oldukları görüşmüştür. Bu büyümenin yüksek ısı girdisi ve yavaş soğumanın bir sonucu olduğu değerlendirilmiştir. Durgutlu ve arkadaşlarının ark kaynağında kaynak hızının nüfuziyete ve mikroyapıya etkisi konusundaki yaptıkları çalışmada tozaltı ark kaynak yöntemiyle yapılan kaynaklarda, kaynak metallerinin mikroyapıları incelendiğinde manuel ve MAG kaynak yöntemine nazaran ısı girdisinin fazla olmasından dolayı daha iri tanelerin olduğu dair açıklamalara yer verilmiştir [94].

T2 numunesi Sa 2 ½ kumlanarak yüzeyde bulunan oksit, hadde artıkları giderilmesi sonrasında yapılan numunelerin kaynaklarının mikroyapılarında kumlamanın herhangi bir etkisinin olmadığı burada da görülmektedir.

Resim 4.13’de T3 numunesine Sa 2 ½ kumlanarak yüzeyde bulunan oksit, hadde artıkları giderilmiş, sonrasında ortalma 25 μm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası birleştirilen numunelerin kaynak metali, ergime sınırı ve iri taneli bölge görülmektedir.



Resim 4.13. T3 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge

Resim 4.13’de a ile gösterilen T3 kaynak metali resimleri incelendiğinde tane sınır ferrit, widmanstatten ferrit, poligonal ferrit ve asiküler ferrit yapıları tespit edilmiştir. Çeşitli çalışmalarda asiküler ferrit, 650 °C sıcaklık aralığında oluşan asiküler ferrit oluşumları kaynak metalinde sıklıkla görüldüğü koyu renkli lamelli bir yapı olarak görüldüğü bildirilmiştir [76, 82]. Kaynak metalinde görülen widmanstatten ve tane sınırı ferritler östenitin A₃ sıcaklığı altına soğutulduğunda östenit tane sınırlarında tane sınırı ferritler daha sonra ferrit ve östenit tane sınırlarında widmanstatten kenar levhaları çekirdeklenmesi ve büyümesi gerçekleşir. Erden ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarında, tane sınırı, poligonal ferrit ve witmanstatten ferrit yapılarının kaynak metali mikroyapısında görüldüğü açıklanmıştır [95].

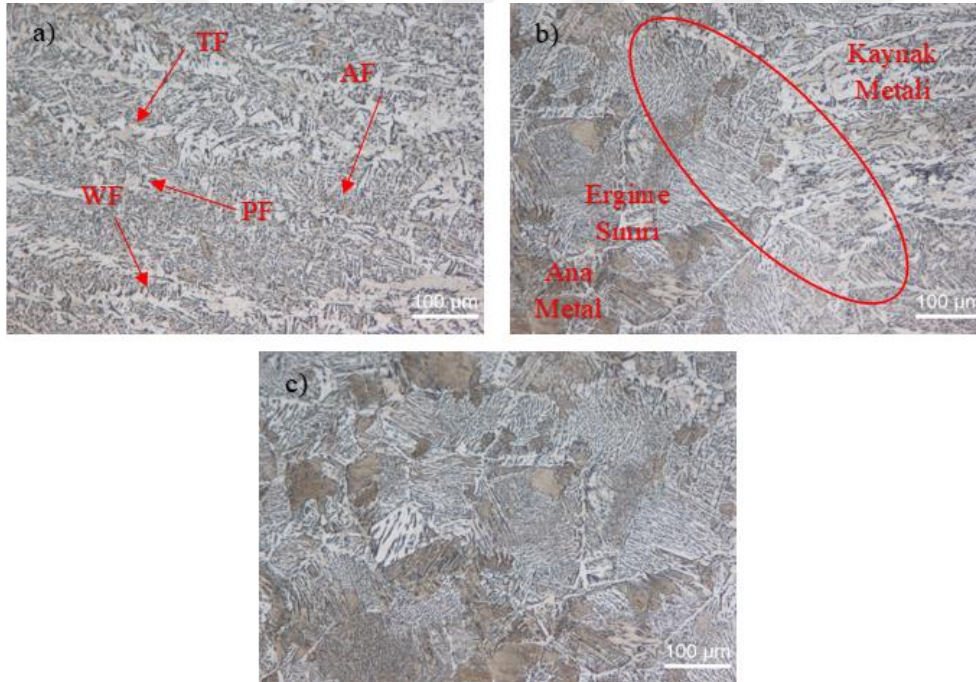
Resim 4.13’de b ile gösterilen T3 resimde, geçiş sınırını gösterir mikro yapı fotoğrafında kaynak metali ve esas malzeme arasındaki ergime sınırı görülmektedir. Bu bölgenin bir ucunda kaynak metali sınırının ve diğer ucunda ana metal mikroyapısının ergimeden etkilenmediği bölgedir.

Resim 4.13’de c ile iri taneli yapı görülmektedir. Kaynak esnasında ana metalin bir kısmı ergir ve kaynak metali banyosuna karışır ve esas metal bölgesel olarak ergime sıcaklığı

üzerine ısınarak ergir. Ergiyen kısma komşu ana metalde aşırı ısınma ile tane irileşmesi meydana gelir. Tozaltı kaynağı yöntemi ile birleştirilen T3 numunesi mikroyapısı incelendiğinde daha önceki T1 ve T2 mikroyapıları benzerlik göstermektedir.

Kaynak öncesi uygulanan ortalama 25 µm kalınlığında imalat ön astarının T3 numunesi kaynak mikro yapısı üzerinde bir etkisi gözlenmemiştir.

Resim 4.14’de T4 numunesine Sa 2 ½ kumlanarak yüzeyde bulunan oksit, hadde artıkları giderilmiş, sonrasında ortalama 50 µm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası birleştirilen numunelerin kaynak bölgesi, ergime bölgesi ve iri taneli bölge görülmektedir.



Resim 4.14. T4 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge

Resim 4.14’de a) ile gösterilen kaynak metali resimlerinde görüldüğü gibi daha önce ifade edildiği gibi widmanstatten ferrit, asiküler ferrit, tane sınırı ferrit ve poligonal ferrit oluşumları gözlenmektedir. Resim, asiküler ferrit yapısının baskın olduğu mikro yapıyı göstermektedir. Tane sınırı ferrit ve poligonal ferrit oluşumları asiküler ferrit oluşumundan az olup widmanstatten ferrit oranından daha fazladır. Kaynak metalinin soğuması esnasında ferrit ve östenit tane sınırlarında widmanstatten kenar levhalarının çekirdeklenmesi ve

büyümesi gerçekleşir. Widmanstatten ferrit fazın büyüme hızı östenitte karbon yayınma hızı ile yakından ilişkilidir. Mikroyapıda widmanstatten ferrit fazının tespiti oldukça zor olmuştur. Küçükömeroğlu ve arkadaşlarının sürtünme karıştırma kaynaklı St 37-St 44 alın bağlantıların içyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi konulu yaptıkları çalışmada, widmanstatten ferrit lamelleri boyunca karışmış olan ferrit+sementit kümesinin ayırt edilebilmesi oldukça güç olduğuna yönelik bilgi verilmiştir [96].

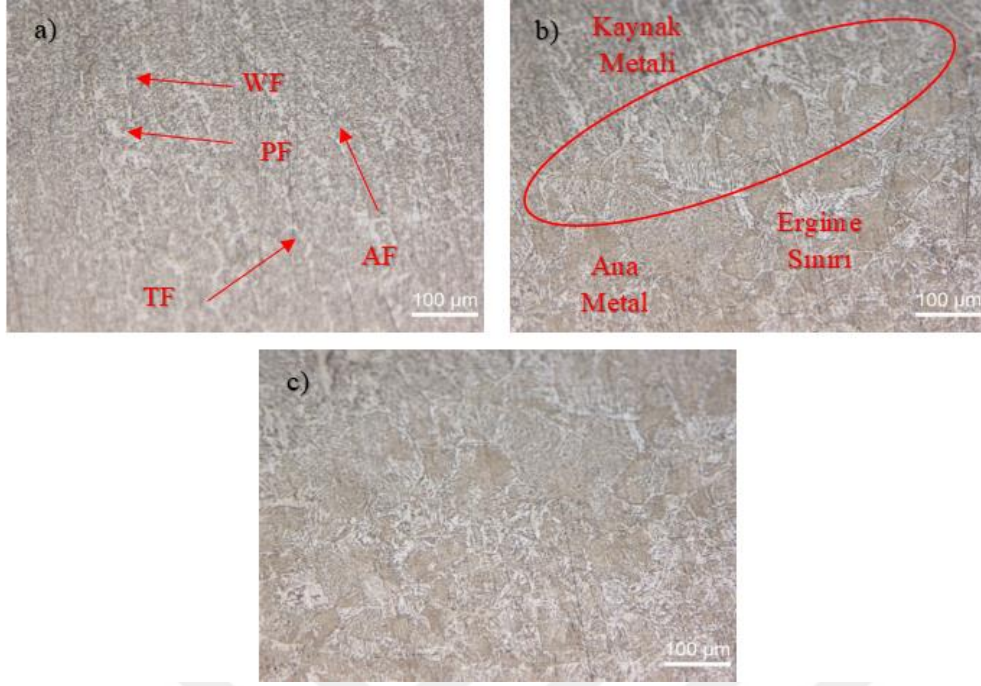
Cvetkovski ve arkadaşları kaynak metalinin mikroyapısı yönelik yapılan bir çalışmada, birincil östenit tanelerinin sınırlarında, daha yüksek dönüşüm sıcaklıklarında ötektoid öncesi ferrit oluşur. Tanelerin içinde asiküler ferrit oluşur. Bu mikro bileşenin, yüksek gerilme özellikleri ve çok iyi darbe dayanıklılığı sağladığına yönelik tespitleri vardır [97].

Resim 4.14'de b ile gösterilen resimde T4 kaynak metali ve ana malzeme arasındaki ergime sınırı belirgin olarak görülmektedir. Ergime sınırı kaynak metali ile ana malzeme arasında sınır bölgesini ifade etmektedir. Ergitme kaynaklarında esas metalin bir kısmı ergiyerek kaynak banyosuna karışır. Ergimeyen kısım ile kaynak metali arasındaki sınır çizgisi ergime sınırı olarak adlandırılır.

Resim 4.14'de c ile gösterilen T4 iri taneli bölgenin mikroyapı fotoğrafında ferrit ve perlit oluşumları mevcut olup iri taneli bölgenin östenit sıcaklığına ulaşması sonrası perlit, ferrit ve seimentitin bir araya gelmesi meydana gelen lamelli bir yapıdır. Kaynak esnasında ergiyen kısma yakın olan esas metalde aşırı ısınmaya bağlı olarak tanelerde irileşme meydana gelir.

T4 numunesi Sa 2 ½ kumlanarak ve yüzeyi ortalama 50 µm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası yapılan kaynakların mikro yapılarında artan imlat ön astar kalınlığının bir etkisi gözlenmemiştir.

Resim 4.15'de T5 numunesine Sa 2 ½ kumlanarak yüzeyde bulunan oksit, hadde artıkları giderilmiş, sonrasında ortalama 75 µm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası birleştirilen numunelerin kaynak bölgesi, ergime bölgesi ve iri taneli bölge görülmektedir.



Resim 4.15. T5 numunesi ait kaynak bölgesi fotoğrafları, a) kaynak metali, b) ergime sınırı, c) iri taneli bölge

Resim 4.15’de a ile verilen kaynak mikroyapısı incelendiğinde poligonal ferrit, widmanstatten ferrit, tane sınırı ferrit ve asiküler ferrit yapıları varolup kaynak metali mikroyapısı ağırlıklı olarak asiküler ferrit oluşumundan meydana gelmektedir. Widmanstatten ferrit ve tane sınırı ferritler dayanımı düşürdükleri için kaynak metalinde arzu edile bir yapı değildir. Ancak asiküler ferrit kaynak metalinde dayanımı artırması dolayısıyla oluşması istenen mercimek görünümündeki sivri görümlü bir yapıdır. Svensson asiküler ferritin doğası ve oluşumu araştırmalarında, iki boyutlu kesitlerde iğne şeklindeki görünüm nedeniyle sivri olarak adlandırılmıştır [98].

Resim 4.15’de b ile gösterilen ergime sınırı görülmekte olup, Resim 4.4’de görülen makro fotoğraftaki kaynak dikişinin tam nufuziyet sağlayamayan alt taraftan alınmıştır. Bu bölgede numune üzerindeki kaplama kalınlığının yüksek olması dolayısıyla kaynak için üretilen ısı ana malzemeyi yeteri kadar ertitmediği için ergime sınırını belirginliği diğer numunelerden daha azdır.

Resim 4.15’de c ile gösterilen iri taneli bölgedeki yapıda tane boyutu diğer numunelerdeki kaynaklarda görülen tane boyutuna ulaşmamıştır. Kaplama kalınlığı, kaynak için oluşturulan ısı ana malzemeye iletilmesine engel olarak, ITAB’ın alt bölümlerinde olan iri taneli

bölgede tanelerin büyümesini meydana gelmemiştir. Svensson'un yine aynı çalışmasında iri taneli bölge ile ilgili olarak, temel problem tane büyümesidir. Düşük ısı girdisiyle, termal döngü, tane büyümesi için sıcaklığın üzerinde yalnızca nispeten kısa bir süre harcanacak şekilde olacaktır. Bunun iki etkisi var. İlk olarak, östenit tane boyutu aşırı büyük olmayacaktır. İkincisi, kaba taneli büyüme bölgesi daha dar olacağına yönelik bilgilere rastlanmaktadır [98].

75 μm kalınlığında imalat ön astar uygulanan T5 numunesinde kaynak sonrası mikro yapı incelenmesinde, kapsam aralığındaki kaplama kalınlığının kaynak mikro yapısı üzerinde etkisi görülmüştür. Yüzeydeki kaplama kalınlığı ısı girdisinin etkisini azaltarak tane büyümesini engel olduğu düşünülmektedir.

4.3.3. Mikroyapı genel değerlendirme

Numunelerin X100 büyütmede yapılan mikroyapı incelemelerinde kaynak metali karakteristik özellikler göstermektedir. Isı tesiri altında kalan bölgede ısınma ve soğumaya bağlı olarak içyapıda kaynak metaline göre değişim tespit edilmiştir.

M ve T grupları kaynak metalinin mikroyapısı, resimlerde gösterildiği gibi benzer bileşime sahip ana metalinkinden belirgin şekilde farklıdır. Mikroyapıdaki farklılık, kimyasal bileşimle değil, ana metal ve kaynak metallerinin farklı termal geçmişleriyle ilgilidir.

MAG ve tozaltı yöntemiyle kaynatılan M ve T grubu numunelerin kaynak metali mikroyapılarında asiküler, widmanstatten, tane sınırı ve poligonal ferrit yapıları tespit edilmiştir. Asiküler ferrit, östenit tanelerinin iç kısmında, inklüzyonlar üzerinde doğrudan çekirdeklenmesi ile oluşmakta olup kaynak metalinde dayanımı ve tokluğu artırmaktadır. Literatüre göre, asiküler ferritin ince tane boyutu ile birlikte birbirine kenetlenen yapı, bölünme yoluyla çatlak yayılmasına karşı maksimum direnç sağlar. Asiküler ferrit, ferrit taneleri arasında yüksek açılı sınırlar ile de karakterize edilir. Bu, bölünme olasılığını daha da azaltır çünkü bu sınırlar çatlak yayılmasını engeller. Çeşitli ferrit morfolojilerinin çekirdeklenmesine metalik olmayan inklüzyonların yardım ettiği bildirilmektedir; özellikle belirli bir tip ve büyüklükteki oksijen bakımından zengin kapanımların, iğnemsî ferritin intragranüler oluşumu ile ilişkili olduğu açıklanmaktadır [37,82]. Poligonal ferrit, östenit taneleri için meydana gelmekte olup yapısı itibarıyla tokluğa zarar vermektedir. Literatürde,

poligonal ferrit önceki östenit tanelerinin içinde kaba ferrit adaları şeklinde oluşur. Poligonal ferrit, tane sınırı ferritine benzer, kaba tane boyutu nedeniyle tokluğa zarar verir [37]. Tane sınırı ferritler östenit tanelerinin sınırlarında soğuma esnasında daha kolay hareket yolları buldukları için oluşurlar. Literatürde, östenitik tane sınırı, daha kolay difüzyon yoluna sahip olduğundan, östenitik tane sınırında ferrit oluşacağı, açıklanmıştır [37]. Widmanstatten ferrit östenit tane sınırlarında oluşup tane içlerine doğru büyümektedirler. İğne şeklinde yapılarıyla oluşan widmanstatten ferritler kaynak metalinin dayanımının düşmesine neden olurlar. Widmanstatten ferrit, 750-650⁰ C sıcaklık aralığında tane sınırı ferrite nazaran daha hızlı soğuma sonucu meydana gelmektedir. Bir fazın öteki fazın yerini alması biçiminde olan dönüşümde yanyana gelen ferrit levhalarının ortaklaşa büyümesi ile gerilme enerjisini azaltacağı bildirilmiştir [82].

Tozaltı kaynak yönteminde robotik MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin kaynak metallerinin mikroyapısından görülen tanelerden daha büyük taneler elde edilmiştir. Bu durum tozaltı kaynak yönteminde ısı girdisinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Durgutlu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarında bu farklılaşmanın sebebini, toz altı kaynak yönteminde ısı girdisinin fazla olmasından dolayı daha iri tanelerin oluştuğu görülmektedir, şeklinde açıklanmaktadır [94].

M ve T grubu numuneleri ergime sınırı ve ITAB incelendiğinde kaynak işlemin doğal sonucu olan ergime sınırı ve ITAB alt bölümlerinden biri olan ferrit ve perlit içeren iri taneli bölgelerin oluştuğu görülmektedir. Kaynak metalinde esas olarak katılaşma ve soğutma ile ilgilenirken, ısıdan etkilenen bölgede tam termal döngü mikroyapının belirlenmesinde etkilidir. Literatürde kaynak yöntemine bağlı olarak ısı girdisinin tane büyüklüğü üzerinde etkisi olduğu bildirilmiştir [82].

Hem MAG kaynağı hem de tozaltı ark kaynağı ile imalat ön astarlı ve imalat ön astarsız malzemeler üzerine farklı parametrelerde yapılan birleştirme işlemleri uygulanmış numuneler üzerinde mikroyapı çalışmaları sonucunda T5 numunesi hariç belirgin bir fark görülememiştir. Bir başka ifade ile gerek MAG kaynağında gerekse tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelerde imalat ön astar kaplamanın T5 numunesi hariç mikroyapıda gözle görülebilir bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Ancak kaynak yöntemlerinin farklı olması ve her bir yöntemin kendine ait özellikleri, ayrıca ısı girdilerinin farklı olması sonucunda tane yapısında farklılıklar olması gayet normal bulunmuştur.

M2 ve T2 numunelerin yüzeylerinin kumlanması sonrası yapılan kaynak işlemi sonrasında kaynatılan parçaların mikroyapı incelemelerinde, kumlamanın olumlu ya da olumsuz bir etkisi gözlenmemiştir.

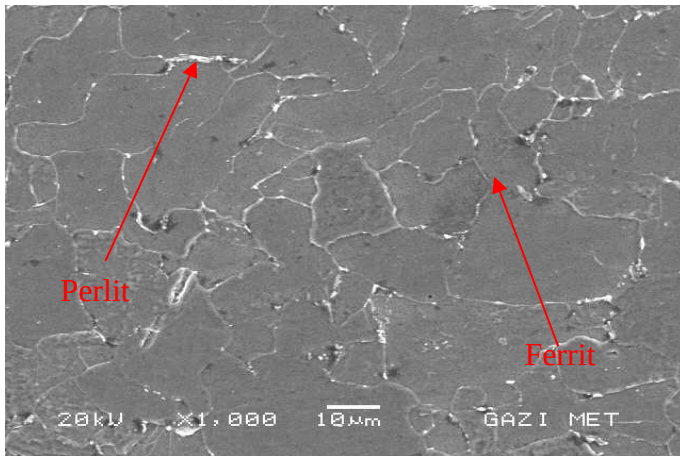
M3, M4, M5, T3, T4 ve T5 numuneleri üzerinde bulunan imalat ön astar kalınlığının 25, 50 ve 75 μm değiştirilerek yapılan kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı incelmelerinde kaplama kalınlığının etkileri sadece T5 numunesi üzerinde görüşmüştür. T5 numunesi iri taneli bölgede taneler diğer numunelerde daha küçüktür. ITAB genişliği diğer numunelerden çok daha dar kaldığı görülmüştür.

4.4. SEM, EDS Çalışmaları

SEM olarak adlandırılan taramalı elektron mikroskobu, yüksek enerjili elektronlar ile incelenecek numune yüzeyinin taranması yöntemiyle çalışır. Elektronların kullanılması ile incelemesi yapılan yüzeyinden yüksek çözünürlüklü görüntü alma işlemi yapan bir sistem olup SEM ile numune yüzeyinden üç boyutlu görüntülerin sağlanması içinde kullanılır.

EDS, taramalı elektron mikroskobunda kullanılan bir yöntemdir ve bir numune üzerinden elementsel kompozisyonu tanımlamak için kullanılan gelişmiş bir uygulamadır. Verilen bu bilgiler ışığında kaynaklı numunelerin kaynak metallerini analiz edebilmek için kaynaklı numunelere SEM ve EDS çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

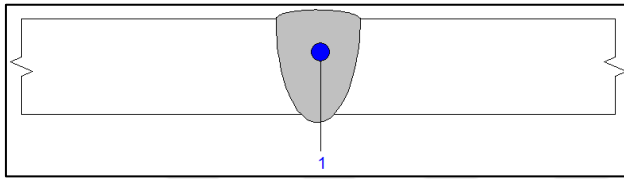
Resim 4.16’da deneyde kullanılan S235 JR yapı çeliğine ait ana malzeme SEM fotoğrafı verilmiştir.



Resim 4.16. S235 JR yapı çeliğine ait ana malzeme SEM fotoğrafı

Resim 4.16’da verilen SEM resmi incelendiğinde gri kısımların ferrit olduğu, parlak kısımların ise perlit olduğu görülmektedir. Ferrit fazının miktarı malzemenin özelliklerine uygun olarak daha fazladır. Resimde görüldüğü gibi normal bir ferrit matrisi ve ikincil bir perlit fazı bulunmaktadır. Çeşitli araştırmalarda S235 JR malzemeleri SEM çalışmalarında, gri kısımlar ferrit, parlak kısımlar ise perlit şeklinde tanımlanmıştır [99-100].

Aşağıda verilen SEM fotoğrafları Şekil 4.2’de belirtilen (kaynak metali) noktadan çekilmiştir.

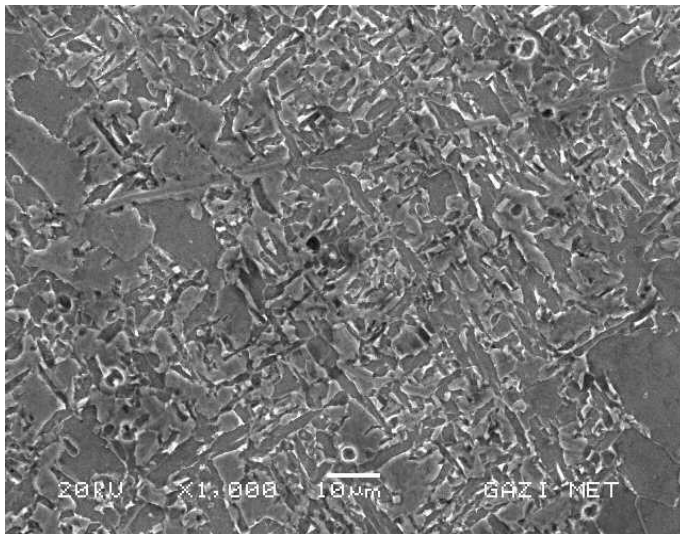


Şekil 4.2. SEM fotoğraflarının çekildiği nokta

4.4.1. MAG kaynaklı numunelerin SEM, EDS çalışmaları

Bu bölümde robotik MAG kaynağı ile birleştirilen M1 ve M5 numunelerine ait SEM ve EDS çalışmaları aşağıda açıklamalarıyla verilmiştir.

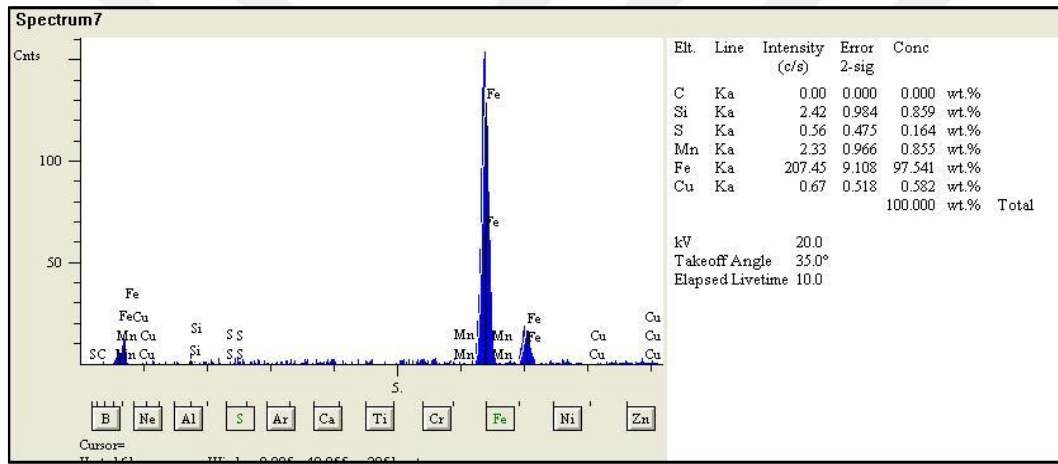
Resim 4.17’de M1 numunesine ait kaynak metali SEM fotoğrafı ve Şekil 4.3’te M1 ve Şekil 4.4’te M5 numunelerine ait EDS analizi sonucu verilmiştir.



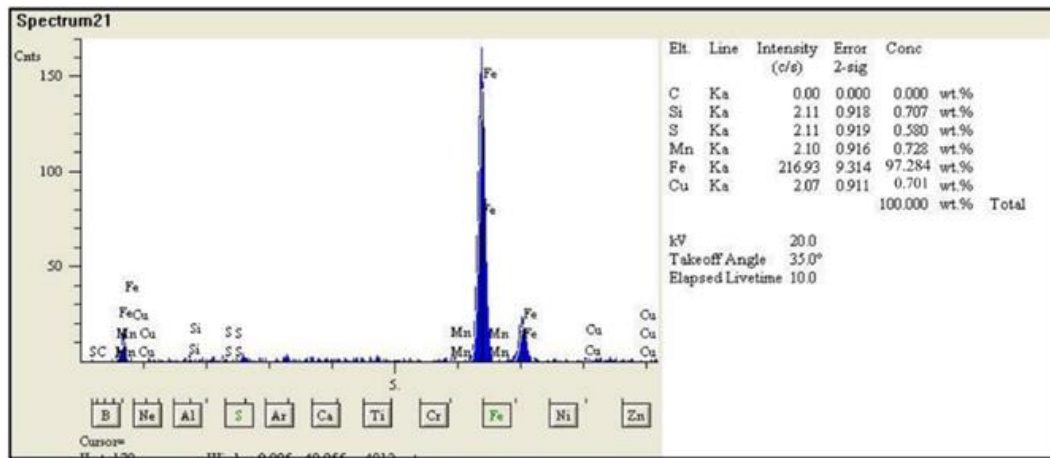
Resim 4.17. M1 numunesine ait kaynak metali SEM fotoğrafı

Resim 4.17'deki kaynak metali SEM görüntüleri incelendiğinde baskın olarak asiküler ferrit ve primer ferrit oluşumları görülmektedir. Çeşitli araştırmacıların yaptığı mikroyapı karakterizasyonu çalışmalarında, kaynak metalinde primer ferrit bulduklarını bildirmişlerdir [79,101-105].

EDS çalışmaları öncelikle MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak metallerine uygulanmış ancak sonuçlar birbirlerine son derece yakın olduğu için burada sadece M grubuna iki adet örnek olarak verilmiştir. Burada kaynaklı numunelerde astarın etkisini görebilmek için M grubu numunelerden M1 ve M5 analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.3. M1 numune grubuna ait kaynak metali genel EDS grafiği



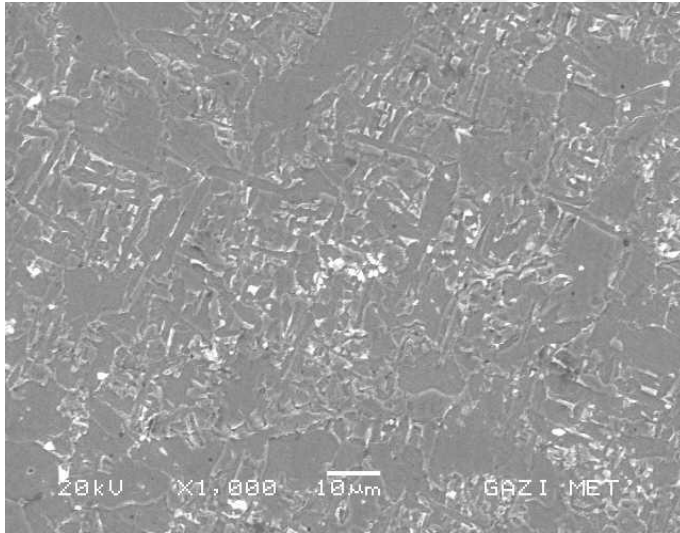
Şekil 4.4. M5 numune grubuna ait kaynak metali genel EDS grafiği

Şekil 4.3’de M1 numunesinden elde edilen veriler % 0,859 silisyum, % 0,164 kükürt, % 0,855 mangan, % 0,582 bakır ve geri kalanı demir’dir. Şekil 4.4’de M5 numunesinden elde edilen veriler % 0,707 silisyum, % 0,580 kükürt, % 0,728 mangan, % 0,701 bakır ve geri kalanı demir’dir. Bu iki sonuç incelendiğinde analiz sonuçlarının birbirlerine yakın oldukları söylenebilir. Bu durumda kaynak öncesi yapılan astar kaplamanın kaynak metali kimyasal bileşimini etkilemediği görülmüştür.

4.4.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin SEM, EDS çalışmaları

Bu çalışmalar ile numunelerin topografi, morfolojik, içyapı ve yüzey element analizleri ile bileşim hakkında bilgi elde edilir. Bu bölümde tozaltı kaynağı ile birleştirilen T1 numunesine ait SEM resmi ve EDS analizi verilmiştir.

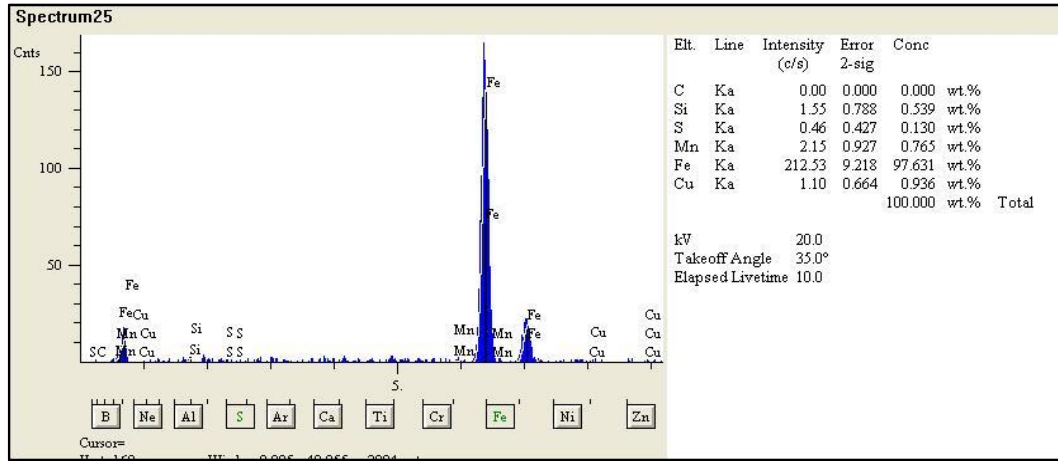
Resim 4.18’de tozaltı kaynak yöntemi birleştirilen T1 numunesine ait kaynak metali SEM resmi ve Şekil 4.5’de bu numuneye ait EDS analizi sonucu verilmiştir.



Resim 4.18. T1 numunesine ait kaynak metali SEM fotoğrafı

Resim 4.27’deki kaynak metali SEM görüntüleri incelendiğinde, asiküler ferrit oluşumları görülmektedir. Zhongzhu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarında benzer sonuçları bulunmuş olup benzer yapılar için aynı adlandırma yapılmıştır [106].

EDS çalışmaları tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak metallerine uygulanmış, sonuçlar birbirlerine yakın olduğu için burada sadece T1 numunesi örnek verilmiştir.



Şekil 4.5. T1 numunesine ait kaynak metali SEM fotoğrafı

Yapılan genel tarama EDS analizi sonuçları Şekil 4.5’de verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ana metal ve kaynak metaline benzer sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen veriler % 0,539 silisyum, % 0,130 kükürt, % 0,765 mangan, % 0,936 bakır ve geri kalanı Fe’den oluştuğu görülmektedir.

4.4.3. SEM ve EDS genel değerlendirme

M ve T grubu numuneleri kaynak metali SEM çalışmalarından benzer sonuçlar elde edilmiş olup elde edilen yapı baskın olarak asiküler ferrit geri kalan polimorfik ferritten oluşmaktadır.

EDS çalışmalarında C elementinin miktarının belirlenmesi esnasında yüksek miktarda C ölçümü görüldüğünden, analiz esnasında C elementi devre dışı bırakılarak diğer alaşım elementlerinin miktarı belirlenmeye çalışılmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında tam olarak bire bir örtüşmemekle birlikte ana malzeme ve ilave metal karışımının kaynak metali sonuçları ile benzer olduğu söylenebilir. Çünkü kaynak metali, esas metal ile ilave metalin bileşiminden oluşmasının doğal sonucudur.

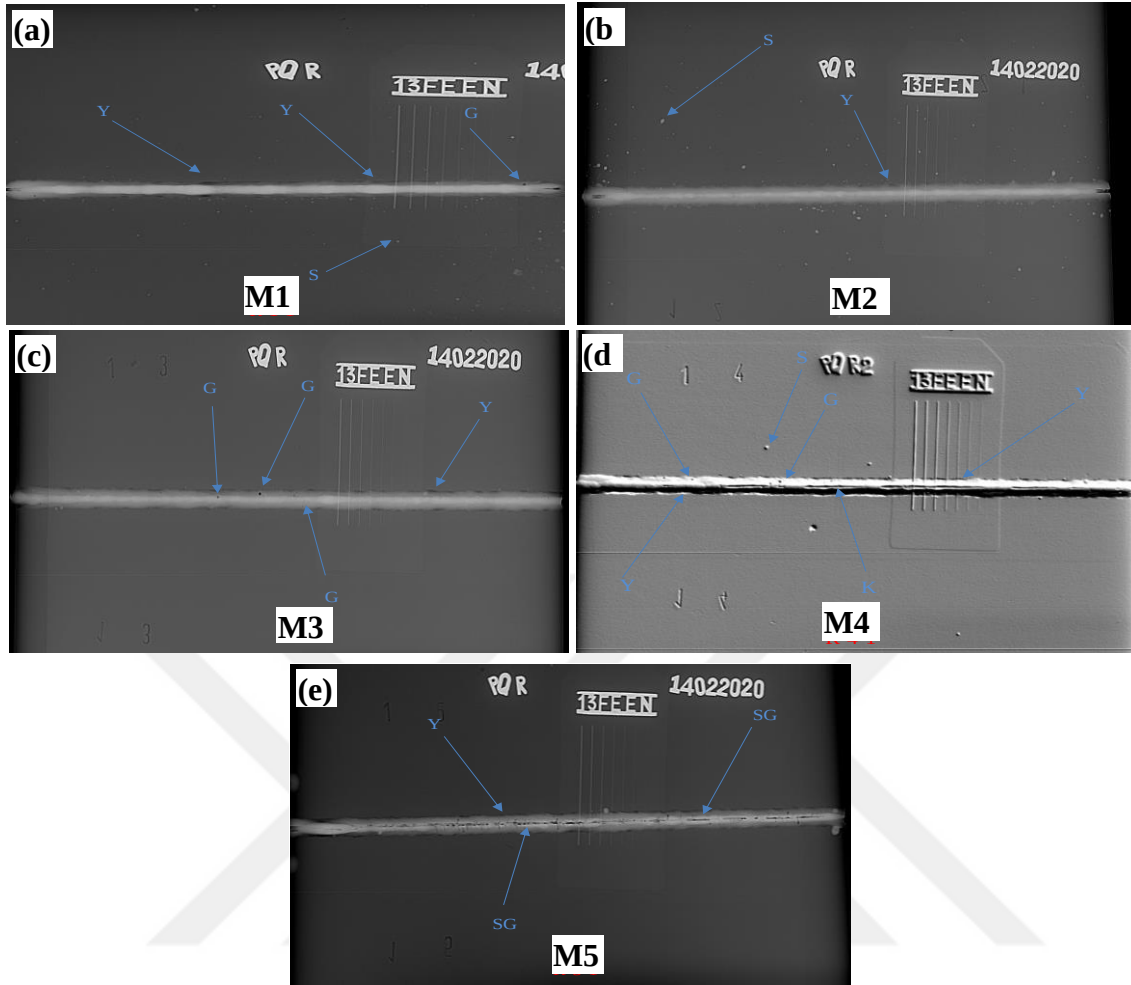
Sonuç olarak M ve T numunelerine uygulanan imalat ön astarlarının SEM, EDS sonuçları üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. İmalat ön astarı ağırlıklı olarak karbon esaslı olmasından dolayı ve kaynak esnasında yüksek ısı girdisinden dolayı yanma sıcaklığı 400 °C olması münasebeti ile imalat ön astarı yanarak kaynak bölgesinden uzaklamıştır. Zhabrev ve arkadaşlarının yaptığı kaplamaların gaz altı kaynak parametreleri üzerindeki etkisi çalışmasında, kaynak işlemi esnasında kaplamaların parçalanmasıyla oksijen ve karbon monoksit oluştuğu bildirilmiştir [107].

4.5. Radyografik Muayene

Radyografi yöntemi metalik olmayan veya metalik tüm malzemelerde oluşan hacimsel ve yüzeysel kusurlarını tespit etmek için kullanılabilir. Radyografi yöntemi ile M ve T grubu numunelerin kaynaklarında gaz boşlukları, cüruf kalıntıları, birleşme eksikliği, çatlaklar, yanma olukları, hatalı ağız birleşmeleri, yetersiz penetrasyon, kökte içbükeylik ve aşırı nufuziyet gibi hataların tespiti için yapıldı. Testler sonrası uzman bir değerlendirici tarafından yapılan değerlendirmelere göre M ve T grubu numunelerin kaynaklarında gaz boşlukları, yanma olukları, kökte içbükeylik ve aşırı nufuziyet gibi hatalar kaynak numuneleri radyografi filmlerinde tespit edilmiştir.

4.5.1. MAG kaynaklı numunelerin radyografik muayenesi

Bu bölümde Resim 4.37’de robotik MAG kaynağı ile birleştirilen M grubu kaynak numunelerinin bölgelerine ait radyografi filmleri verilmiştir. Burada M1 olduğu gibi, M2 yalnızca kumlanmış, M3 25 µm imalat ön astar uygulanmış, M4 50 µm imalat ön astar uygulanmış ve M5 75 µm imalat ön astar uygulanmış şartlarda birleştirilmiş kaynaklı numuneleri ifade etmektedir.



Resim 4.19. Robotik MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi radyografi fotoğrafları a) M1, b) M2, c) M3, d) M4 ve e) M5.

Resim 4.19’da, Y ile gösterilenler yanma oluklarını, G ile gösterilenler gözenek, S ile gösterilenler sıçrantıları, K ile gösterilenler nüfuziyet eksikliğini ve SG ile gösterilenler sıralı gözenekliliği ifade etmektedir.

M grubu tüm numunelerinde görülen kısmi yanma olukları, dinamik kuvvetler altında kaynak dikişlerinde çentik etkisi oluşturarak kırılmalara neden oldukları için tercih edilmezler. Radyografi filmlerdeki yanma oluğu, kaynak görüntüsünün kenarı boyunca daha koyu bir yoğunlukta görülmektedir.

Çeşitli çalışmalarda, radyografi filmlerindeki yanma oluğu yoğunluğu, kaynak yapılan parçaların yoğunluğundan her zaman daha koyu olacaktır. Yanma oluğu bir radyografide kolaylıkla görülebilir ve tanımlanabilir ancak mümkünse boyutları fiziksel olarak ölçülmelidir. Genel olarak yanma oluğu, nispeten sığsa (spesifikasyon gereksinimleri

dahilinde) ve keskin değilse ciddi bir durum olarak kabul edilmez, şeklinde açıklamıştır [108-111].

Kritik öneme sahip yanma oluklarının kabul kriterlerinde olup olmadığı öncelikli olarak görsel muayene yapmak gerekmektedir. Dolayısıyla yapılan görsel muayenelerde TS EN 5817 kabul kriterlerine göre kaynaklı bağlantıyı olumsuz etkilemeyecek ölçülerde olmadığı görülmüştür. TS EN 5817 Seviye B göre yanma olukları derinliği $\leq 0,05 \times t$ mm veya maksimum 0,5 mm geçmesi gerektiğine yönelik bir sınırlama yapılmıştır [112].

M1, M3, M4 ve M5 grubu numunelerinde görülen gözenekler, kaynak esnasında kaynak havuzundaki gazların çıkacak yeterli zamanı bulamamasından ve kaynağın içinde hapsolmesinden kaynaklanmaktadır.

Literatürde, gözenekler yüksek kaynak hızlarında, derin kaynak havuzlarını terk etmek için yeterli zamanı olmayan gaz kabarcıkları, kaynak gözenekliliğine neden olur, şeklinde açıklamıştır [113].

M3, M4 ve M5 numunelerinde yüzeye uygulanmış imalat ön astarının gözenek oluşumunda etki olduğu düşünülmektedir. Gözeneklerin radyografi filmlerinde görüntüsü siyah nokta şeklindedir.

Ceyhun, kaynak metali ve ana malzeme süreksizlikleri çalışmasında, sıkışan gaz genellikle gözenek veya hava delikleri olarak adlandırılan yuvarlak delikler veya boru veya solucan delikleri adı verilen uzun bir şekle sahiptir. Bunlar, gaz oluşumuna kaynak sırasındaki kimyasal reaksiyonlar, plaka ve/veya elektrotta yüksek kükürt içeriği, elektrotta veya ana malzeme kenarlarında aşırı nem, çok kısa ark, yanlış kaynak akımı, yanlış polarite neden olabilir, şeklinde açıklamıştır [114].

M1, M2 ve M3 numunelerinde S ile gösterilen kusurlar kaynak sıçrantılarıdır. Sıçrantılar ergimiş kaynak banyosundan metalin fişkirarak kaynak dikişinin etrafına saçılması ve soğuduktan sonra katı parçacıklar şeklinde iş parçasına yapışması şeklinde ortaya çıkmıştır. Radyografi filmlerinde görüntü gri renkte noktalar halinde ana malzeme üzerinde görülmektedir.

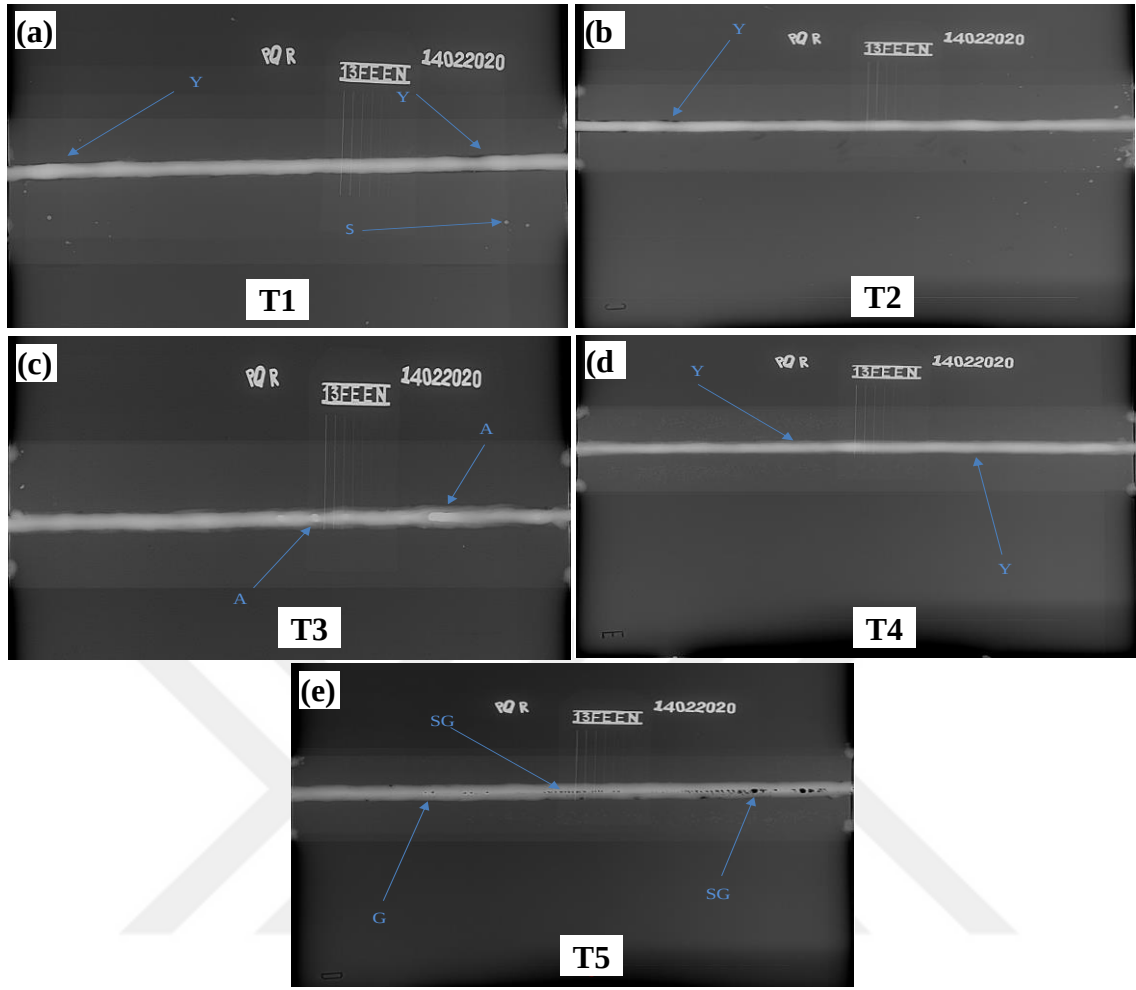
Çeşitli çalışmalarda sıçrantılar, çok yüksek tel besleme hızlarında veya gerilim ayarı ile nozul çıkışında telin çok fazla uzaması sıçramayı artırır. Bu nedenle ayarların düşürülmesi sorunu çözeceğine yönelik açıklamalar yapmıştır [62,115].

M4 numunesi K ile gösterilen kökte içbükeylik olarak ifade etmektedir. İçbükeylik, kök geçişi bırakılırken yetersiz ısı girişinden kaynaklanan kök geçiş yüzeyindeki içbükey bir durumdur. İçbükeylik, kaynağın kalınlığında boyutsal değişime neden olur ve bu gerekli kalınlıktan daha az olabilir. Genellikle kademeli bir boyutsal değişiklik olduğundan, radyografide hafif ve kademeli bir yoğunluk değişikliği olarak gösterir. Literatürde içbükeylikle ilgili olarak, kapsam fiziksel ölçümle belirlenmelidir, ancak yoğunluk ölçümleriyle tahmin edilebilir, şeklinde açıklama yapmaktadır [109].

M5 numunelerine ait filmler incelendiğinde SG ile gösterilen sıralı gözeneklerdir. Gözeneklilik miktarlarının çok fazla ve kaynak dikişi boyunca olduğu görülmektedir. Sıralı gözenekler, imalat ön astar kalınlığı en yüksek olan numunede kaynak esnasında meydana gelen yanma sonucu, gazların oluşması ve kaynak metalinde hapsolması neticesinde olduğu düşünülmektedir. Gözeneklilik genellikle tek tek, kümeler halinde veya sıralar halinde görünen koyu yuvarlak veya düzensiz noktalar veya lekeler olarak görünür. Bu, metal hala sıvı haldeyken gazın kaçmaya çalışmasının sonucudur ve solucan deliği gözenekliliği olarak adlandırılır. Literatürde, sıralı gözenekler için radyografide kaynak görüntüsüne bitişik karanlık, düzensiz bir alan olarak görünen bir yüzey kusurudur ve malzemede bir boşluktur çevresindeki alandan daha yüksek bir yoğunluğa sahip görülecektir, şeklinde açıklanmalar yapılmaktadır [116,117].

4.5.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin radyografik muayenesi

Bu bölümde Resim 4.38’de tozaltı kaynağı ile birleştirilen T grubu kaynak numunelerinin bölgelerine ait radyografi filmleri verilmiştir. Burada T1 olduğu gibi, T2 yalnızca kumlanmış, T3 25 µm imalat ön astar uygulanmış, T4 50 µm imalat ön astar uygulanmış ve T5 75 µm imalat ön astar uygulanmış şartlarda birleştirilmiş kaynaklı numuneleri ifade etmektedir.



Resim 4.20. Tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak beölgesi radyografi fotoğrafları a) T1, b) T2, c) T3, d) T4 ve e) T5.

Resim 4.20’de, Y ile gösterilenler yanma oluklarını, G ile gösterilenler gözenekleri, S ile gösterilenler sıçrantıları, A ile gösterilenler aşırı nüfuziyeti ve SG ile gösterilenler sıralı gözenekliliği ifade etmektedir.

T1, T2 ve T4 numunelerin radyografi filmlerinde yanma oluklarını lokal olarak görülmektedir. Radyografi filmlerdeki yanma oluğu, kaynak görüntüsünün kenarını takip eden düzensiz koyu yoğunluklu bir çizgi olarak görünür.

Literatürde yanma olukları, kaynağın kenarı boyunca plakanın yüzeyinde bir oluk veya kanal şeklinde röntgen filmlerinde belirirler, şeklinde açıklanmıştır [117-119].

Samatas radyografi üzerine yaptığı çalışmalarında, radyografi filmlerinde yanma oluklarını, kaynak görüntüsünün kenarı boyunca düzensiz daha koyu bir yoğunluk şeklinde görülür.

Yoğunluk, kaynak yapılan parçaların yoğunluğundan her zaman daha koyu olacaktır şeklinde açıklama yapmaktadır [120].

T1 ve T2 numunelerinde gri renkte görülen noktalar kaynak sıçrantılarıdır. Sıçrantılar, uygun olmayan uzun arklar kullanılırsa, erimiş metal damlacıklar kaynak bölgesinin etrafına sıçrar. Ancak T1 ve T2 numuneleri fotoğraflarında görülen sıçrantılar kaynak başlangıç bitiş parçalarının kaynatılması esnasında oluştuğu düşünülmektedir.

T3 numunesi kaynak metalinde görülen açık renteki gri bölgeler, A ile gösterilen aşırı nüfuziyeti olan yerleri göstermektedir. TS EN ISO 6520-1 standardı, aşırı nüfuziyeti, bir kaynağın kökünden dışarı taşan aşırı kaynak metalidir, şeklinde tanımlamaktadır [33]. Literatürde, aşırı nüfuziyet, kısa veya aralıklı damlacıklarda aşırı penetrasyon meydana geldiğinde, buz sarkıtları olarak adlandırılabilir ve genellikle kaynak metali içermeyen bir alandan oluşacağına yönelik açıklamaları vardır [109].

T5 numunelerine ait film incelendiğinde gözeneklilik miktarlarının çok fazla olduğu görülmektedir. Gözeneklilik katılaştıran metalde, malzeme yüzeyine uygulanan imalat ön astarının yanması ile oluşan gazların sıvı kaynak metalinde sıkışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde, gözeneklilik radyografide birçok şekil alabilir, ancak genellikle tek tek, kümeler halinde veya sıralar halinde görünen koyu yuvarlak veya düzensiz noktalar veya lekeler olarak görünür. Tüm gözeneklilikler, çevresindeki alandan daha yüksek bir radyografi yoğunluğa sahip görülecektir, şeklinde açıklanmaktadır [116].

4.5.3. Radyografik muayene genel değerlendirme

M ve T grubu numunelerin radyografi filmleri incelendiğinde tozaltı kaynak yöntemiyle birleştirilen numunelerden daha iyi sonuçlar alınmıştır. T grubu numunelerinde sadece T5 numunesinde ve M grubu numunelerinde M5 numunelerini kaynağında mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyecek imalat ön astar uygulanmasının problemlere sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

M1, M2, M3, M4, T1, T2, T3 ve T4 numuneleri radyografik muayene sonucunda, robotik MAG ve tozaltı ark kaynağında oluşabilecek yanma olukları, aşırı nüfuziyet ve gözenek oluşum hataları tespit edilmiş ve tespit edilen hatalar standartlar dâhilinde kabul edilmiştir. Akay ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, radyografik muayene neticesinde, tozaltı ark

kaynağında oluşabilecek nüfuziyet yetersizliği, yanma olukları, gözenek oluşumu, kalıntılar, çatlaklar vb. hatalar gözlemlenmemiş ve gözetilen normlar dâhilinde kabul edilmiştir, şeklinde açıklama yapmışlardır [121].

M3, M4, M5 ve T5 numunelerinde tespit edilen gözeneklerin uygulanan çinko esaslı imalat ön astar uygulamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ahsan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, gözenek oluşumu, büyüme ve kaçış davranışı ile CMT-GMAW'daki kaynak bağlantılarının geniş bir ısı girdisi aralığında (150-550 J/mm) mekanik özellikleri üzerine bir çalışmayla açıklamaktadır. Bu çalışmada, kaynak havuzunun viskozitesi ve çinkonun buhar basıncı kullanılarak gözenek oluşumu, büyüme ve kaçış mekanizmaları açıklanmıştır. Düşük ısı girdileriyle, aralık içindeki kaynak havuzunun daha düşük sıcaklığı, çinkonun düşük buhar basıncı ve kaynak havuzunun yüksek viskozitesi nedeniyle çinko buharı kabarcığı büyüüp yükselemedi. Sonuç olarak, kaynak kökünün yakınında küçük boyutlu gözenekler oluştu ve toplam gözeneklilik miktarı daha azdı. Yüksek ısı girdileri ile kaynak havuzunun yüksek sıcaklığı, en az viskoziteli kaynak havuzu oluşturarak, çinkonun yüksek buhar basıncını koruyarak ve geciktirerek çinko buharı baloncuğunun boyut olarak büyümesine, yükselmesine ve kaçmasına yardımcı olmuştur. Orta ısı girdileriyle, kaynak havuzu sıcaklığının, çinko buharının çıkmasına kadar katılaşmayı geciktirecek kadar yüksek olmadığı kanıtlandı. Bununla birlikte, çinko buharı balonunun büyümesine ve yükselmesine izin vermek için düşük bir viskozite ve yüksek buhar basıncını koruyacak kadar yüksekti. Bu faktörlerin kombinasyonu, bu aralıktaki kaynakta yüksek miktarda gözeneklilik birikimine yol açtığı belirtilmiştir [7].

İmalat ön astarı yapılmış M3, M4, T3 ve T4 numunelerinde hatalar tespit edilmiş olmasına rağmen TS EN ISO 10675-1 kabul kriterleri dahilinde kabul sınırları içinde yer almışlardır. Kabul kriterlerinde belirtilen maksimum 3 mm altındaki gözenek ve sıralı gözenekler kabul kriterleri içerisinde yer almıştır. Blasko ve arkadaşlarının portatif kaynak robotları çalışmasında, özellikle gemi inşası için tasarlanmış inorganik çinko astarı ile yaptıkları çalışmada, kaplama kalınlığının, kaynak parametrelerinin (özellikle kaynak hızının) ve uygun kaynak sarf malzemelerinin seçilmesinin uygun şekilde kontrol edilmesi şartıyla kaynak üzerindeki etkinin küçük olduğu bildirilmiştir. Yatay pozisyonda robotik kaynak dahil olmak üzere otomatik kaynak için, atölye primerinin etkisini en aza indirmek amacıyla CO₂ koruyucu gazla birlikte kesintisiz tipte bir metal özlü tel kullanılabileceğini belirtmişlerdir [4].

Sonuç olarak radyografi filmlerinin değerlendirmelerinde de anlaşılacağı üzere imalat ön astarları kaynak üzerinde olumsuz etkisi vardır. İmalat ön astar kalınlığı artıkça bu etki daha da artmaktadır.

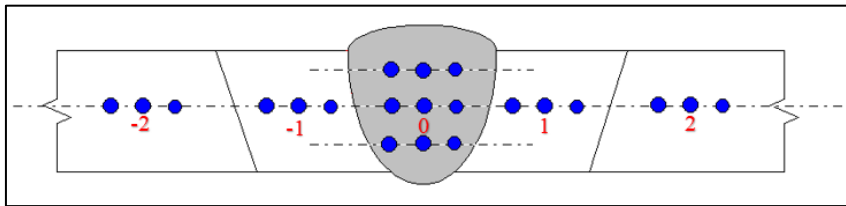
4.6. Sertlik Testi

Sertlik ölçümleri, malzemelerin kaynaklı birleştirmeleri hakkında fikir sahibi olmak ve mekanik özellikleri hakkında bilgi edinmek için yaygın olarak kullanılan basit test yöntemlerinden birisidir. Sertlik göreceli bir kavram olup malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği mukavemet olarakta adlandırılabilir. Sertlik ölçümü, mühendislik alanda kullanılan birçok malzemeye uygulanan bir testtir. Bir malzemenin sertliği ile mekanik özellikleri arasında bağlantı kurulabilir. Mesela, çeliklerde çekme mukavemeti sertlik ile doğru orantılıdır. Bu amaçla tüm M ve T grubu numunelerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır olup MAG ve tozaltı başlıkları altında detaylı olarak verilmiştir.

4.6.1. MAG kaynaklı numunelerin sertlik testi

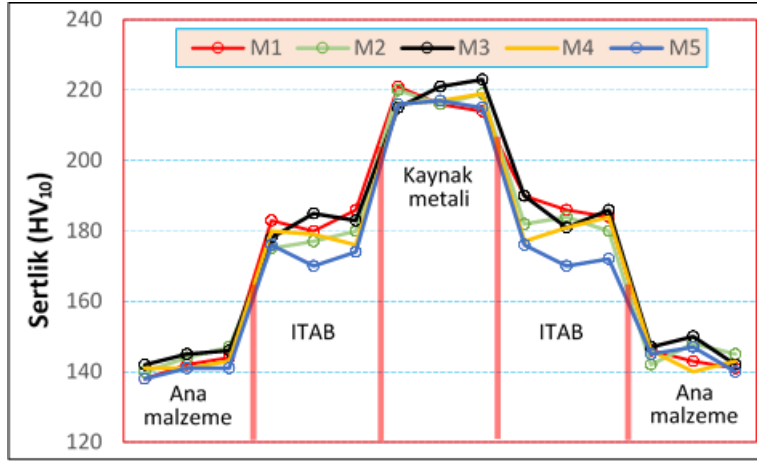
Bu bölümde robotik MAG kaynağı ile birleştirilen M grubu numunelerine ait sertlik ölçüm sonuç grafikleri bölümler halinde verilmiştir.

Şekil 4.6’da kaynak metal kesiti üzerindeki sertlik ölçümlerinin alındığı noktalar gösterilmektedir. Burada (0) kaynak metal, (1) ve (-1) ITAB, (2) ve (-2) ana malzemeyi temsil etmektedir.



Şekil 4.6. Kaynak metal kesiti üzerindeki sertlik ölçümlerinin alındığı noktalar (Burada 0 kaynak metalini ifade etmektedir)

Şekil 4.7’de robotik MAG kaynak yöntemi ile kaynatılan M grubu numuneleri sertlik sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.7. M grubu numunelerine ait sertlik grafiği

Şekil 4.7’de verilen M grubu numunelerine ait sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu görülmektedir. M1 numunesi için kaynak metal sertliği 217 HV, ITAB’ta 183-186 HV ve ana malzemede 141-143 HV’dır. M2 numunelerine ait sertlik eğrisi incelendiğinde en yüksek sertliğin 218 HV, ITAB’ta 177-182 HV ve ana malzemede 143-145 HV’dır. M3 numunesine ait sertlik eğrisi incelendiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu görülmektedir. M3 kaynak metalindeki sertlik ise 219 HV, ITAB’ta 182-185 HV ve ana malzemede 144-146 HV değerindedir. M4 numunelerine ait sertlik eğrisi incelendiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu görülmektedir. Yani ana metalin sertliği kaynak metalinden daha düşüktür. Ana metaldeki sertlik M4 için 141-143 HV, ısıdan etkilenen bölgedeki sertlik 178-180 HV ve kaynak metalindeki sertlik 217 HV olarak ölçülmüştür. M5 numunelerden alınan ölçüm, kaynak metal, ITAB ve esas metalden daha sert olduğu görülmektedir. Esas metalde sertlik 140-144 HV, ITAB’ta 172-173 HV ve kaynak metalinde 217 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak metalinde görülen bu sertlik artışının bir sebebi kullanılan ilave telin katkısından kaynaklandığı diğer sebebi ise termal dönüşümle meydana gelen yapılardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonuçları destekleyecek Başyigit ve Solak tozaltı ark kaynağı ile S235 yapısal çeliğin mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkisi çalışmalarında bunun nedenini, kaynak teli karbon içeriğinin kaynak metal bölgelerindeki toplam karbon miktarlarını desteklemesidir. Böylelikle kaynak işlemlerinin soğutma koşulları altında ısıdan etkilenen bölgelere kıyasla kaynak metal bölgesinin sertleşebilirliği korunur, şeklinde açıklanmaktadır [122].

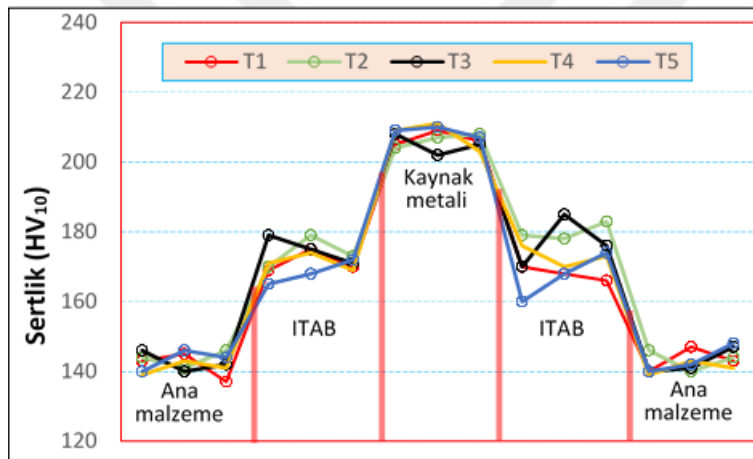
M grubu numuneleri üzerinde yapılan incelemelerde kumlama ve çalışma kapsamında kullanılan farklı kalınlıklardaki imalat ön astarının sertlik üzerinde herhangi bir etkisi

olmadığı görülmüştür. Çünkü çinko bakımadan zengin olan kaplamanın kaynak esnasında oluşan yüksek sıcaklardan dolayı yanması ve parçalanması ile kaynak metaline nüfuz edememiş ve sertliği etkileyecek bir etkisi kalmamıştır.

4.6.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin sertlik testi

Bu bölümde Tozaltı kaynağı ile birleştirilen T grubu numunelerine ait sonuçlar bölümler halinde varılmıştır.

Şekil 4.8’de herhangi bir işlem yapılmadan doğrudan birleştirilen T grubu numunelerine ait sertlik grafiği sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.8. T grubu numunelerine ait sertlik grafiği

Şekil 4.8’de T grubu numunelerine ait sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu görülmektedir. T1 numunesi için kaynak metal sertliği 206 HV, ısıdan etkilenen bölgede 168-171 HV ve ana malzemede 141-143 HV sertlik elde edilmiştir. T2 numunelerine ait sertlik grafiği incelendiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu görülmektedir. T2 kaynak metalinde sertlik 206 HV, ITAB’ta 174-180 HV ve ana malzeme 143-143 HV değerindedir. T3 numunelerine ait sertlik grafiği incelendiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu görülmektedir. T3 kaynak metalinde sertlik 205 HV, ITAB’ın sertliği 175-177 HV, ana malzemede 142-142 HV değerindedir. T4 numunelerine ait sertlik grafiği incelendiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yüksek ısı girdisi geç soğumayı sağlayacağı için tozaltı kaynak numunelerinin sertliklerinde ufak bir düşme görülür. T4 kaynak metalinde sertlik 207 HV, ITAB’ın sertliği 171-173 HV, ana malzemede 141-141 HV değerindedir. T5

numunelerinden alınan ölçüm sonuçlarına göre, genel olarak kaynak metalinin ITAB ve ana malzemeden daha sert olduğu görülmektedir. Kaynak metalinde en yüksek sertlik 208 HV, ana malzemede sertlik 143-143 HV, ITAB'ta 167-168 HV ölçülmüştür. Sertlik grafikleri incelendiğinde en yüksek sertliğin yapı dönüşümlerinin meydana geldiği kaynak metalinde olduğu, onu sırasıyla ITAB ve kaynak metalinin takip ettiği görülmektedir. Çelik ve diğerlerinin farklı malzemelerin kaynağının deneysel ve teorik incelenmesi adlı çalışmalarında, kaynaklı malzemelerin sertlik değişimi incelendiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde meydana geldiğini bildirmişlerdir [123].

Kumlama ve 25, 50 ve 75 μm olarak farklı kalınlıklarda uygulanan imalat ön astarları sonrası tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılan T grubu numunelerin sertlik ölçümlerinde, kumlama ve imalat ön astarlarının kaynak esnasındaki yüksek ısı girdisi ile yanarak sertlik üzerinde herhangi bir etkisi kalmamıştır.

4.6.3. Sertlik testi genel değerlendirme

MAG ve tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılan numunelerin ısı tesiri altında kalma derecelerine ve soğuma hızına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yani kaynak metali, ITAB ve ana malzemede ölçülen değerler farklılık göstermektedir. Bunun sebebini literatürde, sertlik çeliğin sertleşebilirliğine, soğuma hızına ve daha az derecede, önceki östenit tane boyutuna bağlı olduğu açıklanmaktadır [124].

Robotik MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen parçaların sertlik değerleri tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen parçalarinkinden daha fazladır. Bunun sebebi M grubu numunelerinin kaynağında düşük ısı girdisi ve buna bağlı olarak hızlı soğuma gösterilebilir. Literatürde, tozaltı kaynak yönteminde kullanılan elektrik enerjisinin % 68 doğrudan iş parçasına aktarılarak ısı enerjisi dönüşür, şeklinde bilgi verilmektedir [31]. Dolayısıyla yüksek ısı girdisi geç soğumayı sağlayacağı için tozaltı kaynak numunelerinin sertlikleri, MAG kaynak usulünde kaynatılan numunelerin sertliklerinden daha düşük olacaktır. Bunun bir diğer açıklaması Çizelge 3.7 ve 3.12'de verilen ısı girdilerinden, MAG yöntemine hesaplanan ısı girdisinin az olması ve buna bağlı olarak hızlı soğumanın gerçekleşerek tane büyümenin engellenmesidir. Literatürde, tane boyutu, erimiş bir metalin soğuma hızına bağlı olacaktır. Yavaş soğutma, birkaç çekirdek oluşumunu teşvik eder ve ortaya çıkan taneler

büyük olacaktır. Öte yandan, hızlı soğutma, çok sayıda çekirdek ve daha küçük taneciklerle sonuçlanır, şeklinde açıklanmıştır [125].

Tüm numunelerde elde edilen sertlikler en yüksek kaynak metalinde, sonrasında ITAB'ta elde edilmesinin sebebi, karbon içeriği yaklaşık % 0,2'nin altında olan sade karbon çelikte, kaynak sırasında ITAB'da martensit oluşmamaktadır. Dolayısıyla, ergime bölgesine yakın bölgede, metal çok yüksek sıcaklıklarda çıkacak ve iri taneler oluşacaktır. Soğutma esnasında, bu bölge nispeten düşük bir sertliğe ve dayanıklılığa sahip bir bölge elde edilmiştir. Bu sonuçlara paralellik gösteren Durgutlu ve arkadaşlarının ark kaynağında kaynak hızının nüfuziyete ve mikroyapıya etkisi çalışmalarında, tozaltı ark kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğunu ve onu sırasıyla ITAB ve ana malzemenin takip ettiği belirtilmiştir [94].

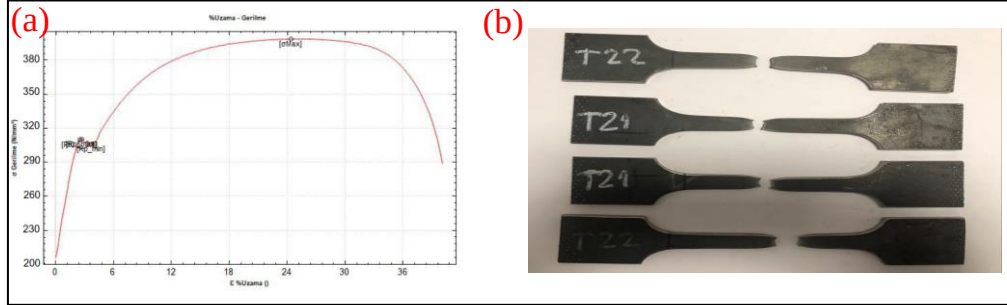
Kaynak metalinde artan sertliğin bir nedeni olarakta, kullanılan ilave metalin karbon içeriğinin kaynak metalindeki toplam karbon miktarlarını artırmasıdır. Kaynak metali sertliğine yönelik Demirbaş ve Apay yaptıkları çalışmada, ana malzemeye göre kaynak metalindeki sertlik artışı kaynak telinin kimyasal bileşiminden etkilendiğini belirtmişlerdir [126].

M ve T numunelerinin yüzey işlemleri ve kapsam aralığındaki imalat ön astar kalınlığının numunelerin sertliğine, kaynak esnasında elde edile ısı vasıtasıyla imalat ön astarı yakılarak ortamdan uzaklaştırılmasında dolayı bir etkisi olmamıştır. 75 µm imalat ön astar kaplanmış M5 ve T5 numunelerinde kaynak esnasında oluşan sıralı gözeneklerin kaynak bölgesi (kaynak metali, ITAB ve kaynak metali) üzerinde sertliğe bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

4.7. Çekme Testi

Çekme testleri, kaynaklı bağlantının mukavemeti ile esas malzeme mukavemeti arasındaki bağlantının tespiti için kullanılan bir yöntemdir. Çekme testi sonucu verileri ile incelemesi yapılan kaynaklı numuneye ait akma, çekme dayanımı ve yüzde uzama nitelikleri tespit edilir. Çekme testi ile elde edilecek sonuç yani kullanılan kaynak yönteminin uygunluğu açısından kaynaklı numune mekanik özelliklerinin esas malzeme mekanik özelliklerine denk olması beklenmektedir. Bu amaçla tüm numunelerin çekme testleri yapılmış olup öncelikli

olarak ana malzemenin çekme testi gerçekleştirilmiştir. Resim 4.21’de S235 JR esas malzemenin çekme grafiği, numune grubların daha iyi açıklanabilmesi için verilmiştir.



Resim 4.21. Ana malzeme a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri

Resim 4.21’de görüldüğü gibi S235 JR düşük karbonlu ana malzeme çekme dayanımı $388,1 \text{ N/mm}^2$, % uzama 40,1 ve kesit daralması %62,8’dir. Kopma sonuç resimlerinde görüldüğü gibi plastik akma sonrası boyun vermenin olduğu sünerek kopma şeklinde gerçekleşmiş olup test numuneleri sonuçları ise aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

4.7.1. MAG kaynaklı numuneleri çekme testi

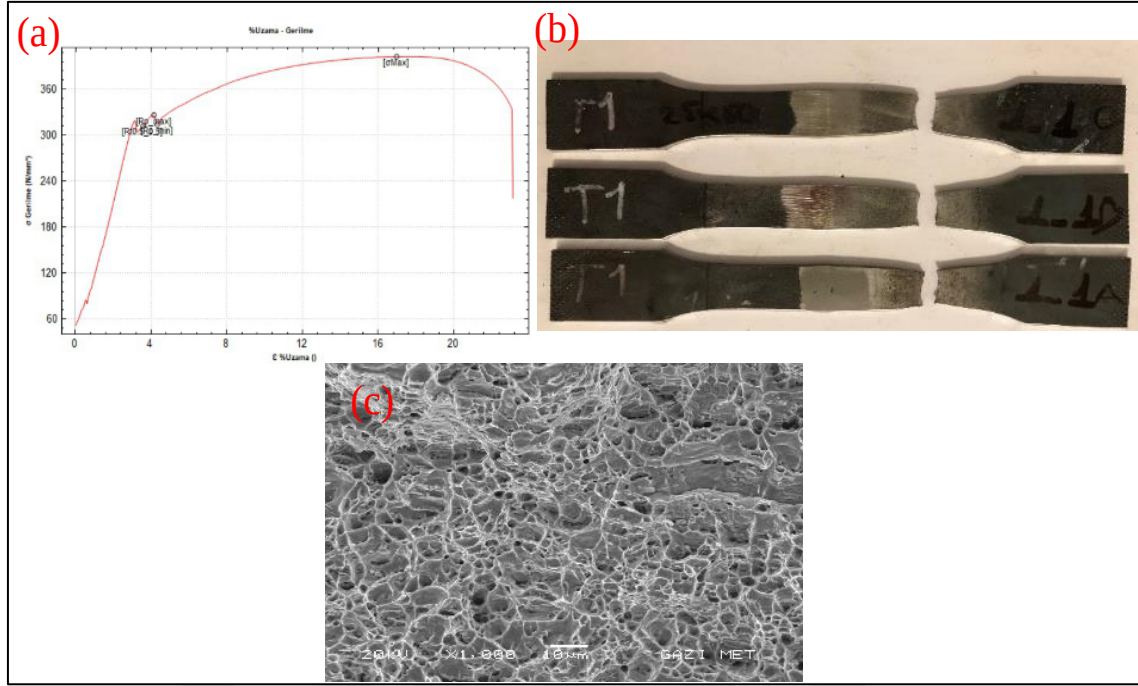
Robotik MAG kaynağı ile kaynatılan tüm M grubu yüzey ve farklı kalınlıkta imalat ön astar uygulaması yapılmış numuneleri Çizelge 4.1’de genel olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. MAG kaynağı ile kaynatılan numunelerin çekme sonuçları

Numune Adı	Çekme Hızı (mm/dk.)	Max. Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Kesit Daralması (%)	Uzama (%)
M1	15	404,2	58,9	24,6
		399,8	52,5	27,0
		402,9	55,2	25,0
Ortalamalar	15	402,3	55,5	25,5
M2	15	404,1	59,1	25,5
		402,9	58,8	22,2
		403,0	57,3	24,6
Ortalamalar	15	403,3	58,4	24,1
M3	15	399,6	56,7	26,3
		404,0	56,2	22,7
		399,6	54,0	24,1
Ortalamalar	15	401,1	55,6	24,4
M4	15	400,9	55,3	26,2
		407,8	57,2	22,3
		398,5	59,2	25,0
Ortalamalar	15	402,4	57,2	24,5
M5	15	397,1	59,8	26,2
		403,0	55,5	21,3
		400,0	55,1	23,1
Ortalamalar	15	400,0	56,8	23,5

Yukarı tüm çekme sonuçları verilen M grubu numunelerine ait çekme grafiği ile deney sonuçları, kopma fotoğrafları ve kopma numuneleri kırık yüzey sonuçları, yorularıyla birlikte bölümler halinde verilmiştir.

Resim 4.22’de herhangi bir işlem yapılmadan doğrudan birleştirilen M1 numunesine ait çekme grafiği, çekme ve kopma fotoğrafları verilmiştir.



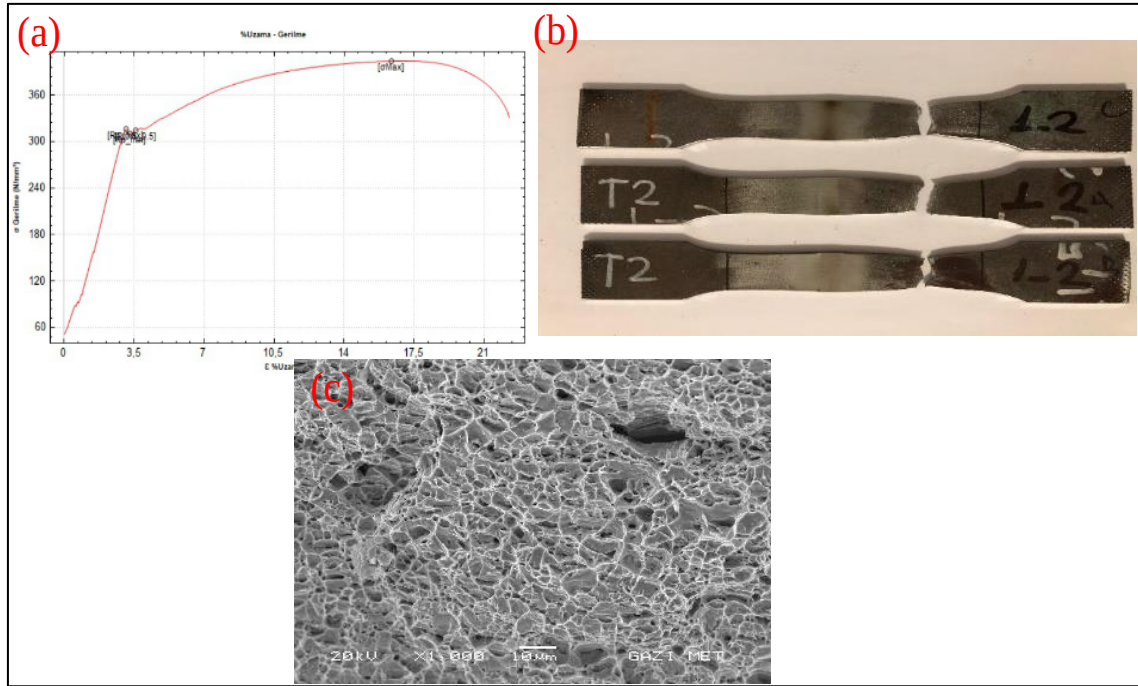
Resim 4.22. M1 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi

Yapılan çekme deneyinde, numunede gerçekleşen kopma ITAB'ın dışında Resim 4.22.b'de görüldüğü gibi ana malzemede meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak, kaynak metali ve ITAB'ın ana malzemeden daha sert olması ve çekme esnasında deformasyonun en yumuşak olan ana malzemeden meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çekme testi sonucu M1 grubu numuneleri ortalama çekme dayanımı $402,3 \text{ N/mm}^2$, % uzama 25,5 ve kesit daralması %55,5'dir. Ana malzemede ölçülen değerleri ile kıyaslandığında birbirine çok yakın değerlerin elde edildiği görülmüştür.

Resim 4.22.c'de çekme sonucu oluşan kopma yüzeyi incelendiğinde kesit daralması ve kırılma yüzeyindeki çukurların genel görüntüsü sünek kırılma davranışı ile kırıldığına işaret etmektedir. Gurson boşluk çekirdeği ve büyüme yoluyla sünek kırılmanın süreklilik teorisi üzerine yaptığı çalışmada sünek kopmayı tanımını benzer şekilde yapmıştır [127].

Kılıklı, kırık yüzeylerin incelenmesi çalışmasında, kırılma yüzey görüntüsü, inklüzyon içermeyen bir çeliğin kırık yüzey görünümü işaret ettiğine yönelik tanımlama yapmıştır [90].

Resim 4.23'de kumlanmış M2 numunesine ait çekme grafiği, çekme ve kopma yüzeyi fotoğrafları verilmiştir.

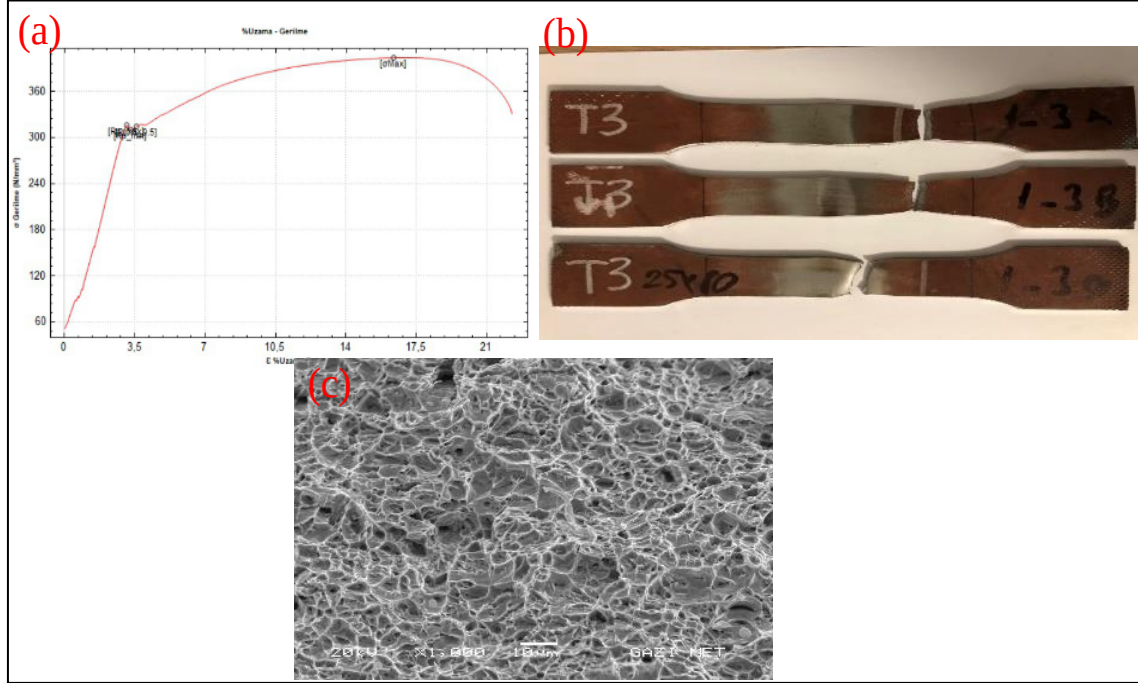


Resim 4.23. M2 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi

Resim 4.23.a’da verilen grafiğe göre numunenin çekme dayanımı $403,3 \text{ N/mm}^2$, % uzama 24,1 ve kesit daralması %58,4’dır. M2 numunelerinde gerçekleşen kopmalar Resim 4.23. b’de görüldüğü gibi sertliği termal dönüşüm ile artan kaynak metali ve ITAB’ın dışında gerçekleşmiştir. Çekme deneyi sonucunda gerçekleşen kopma ana malzemede meydana gelmiş olup yapılan kaynakların ve kaynaklar öncesi kumlamanın deney sonucunu etkilemediği görülmüştür. Bahman ve Alialhosseini’n St 37 kalite çelikten üretilen kaynaklı bağlantıların sertliği, akma dayanımı ve çekme dayanımındaki değişimleri üzerine yaptıkları çalışmada deney numunelerinin kaynak metali sertliğinin artmasından dolayı ana metalden koptuğunu bildirmişlerdir [128].

Resim 4.23.c’de çekme sonucu oluşan kopma yüzeyi incelendiğinde kırılma yüzeyinin görünümü, S235 JR çeliğinin sünek kırılmaya maruz kaldığını gösterir. Bir malzemenin şekil değiştirme özelliğinin bir ölçüsü olan süneklik, çekme numuneleri kopmadan önce elastik ve plastik şekil değişimine uğruyarak kırılmadan öncesi yüksek oranlarda enerji absorbe ederek plastik deformasyona uğrama ölçüsü olup fotoğraf incelendiğinde oluşan plastik deformasyon görülmektedir. Dolayısıyla kırılmanın sünek gerçekleştiği sonucuna varılmaktadır. Ayrıca kırık yüzeyde herhangi bir inklüzyon tespit edilmemiştir.

Resim 4.24'de 25 μm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanmış M3 numunesine ait çekme grafiği, çekme ve kopma yüzeyi fotoğrafları verilmiştir.

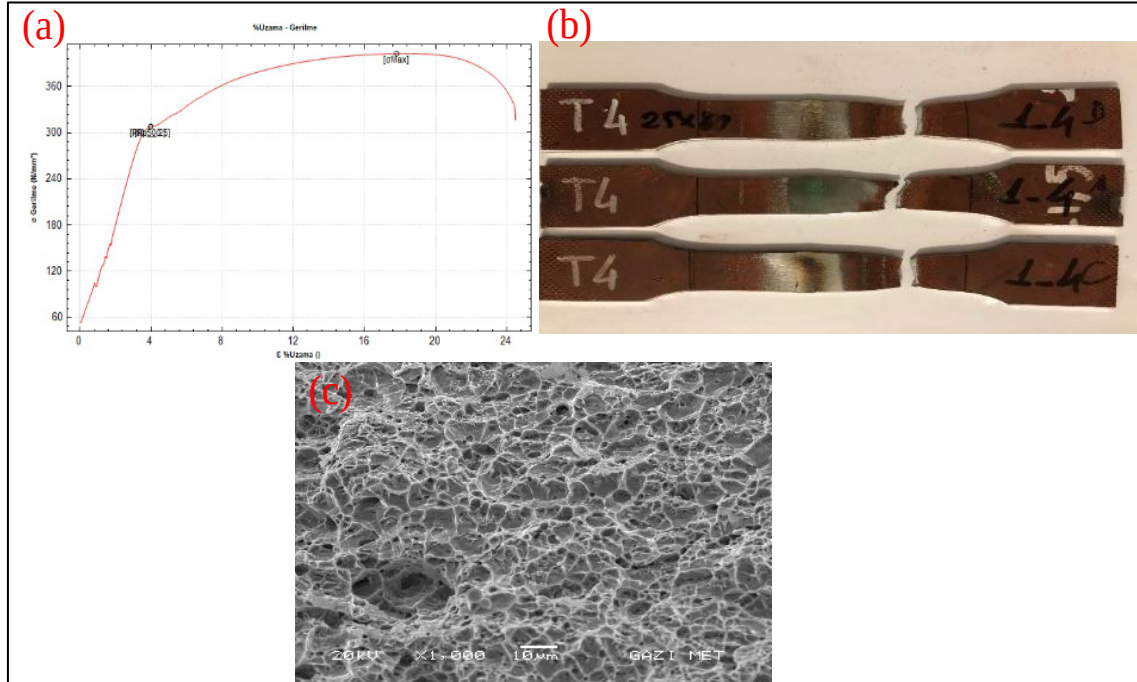


Resim 4.24. M3 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi

Resim 4.24.a'da verilen çekme deneyi grafiğine göre M3 numunesinin çekme dayanımı $401,1 \text{ N/mm}^2$, kesit daralması % 55,6 ve % uzama 24,4'dir. Yapılan çekme deneylerinde, numunelerde gerçekleşen kopmalar aşağıda Resim 4.24.b'de görüldüğü gibi ITAB'ın dışında ana malzemeden gerçekleşmiştir. Çekme deneyi sonucunda gerçekleşen kopma ana malzemede meydana gelmiş olup yapılan kumlama, imalat ön astar boyasının kaynakların deney sonucunu etkilemediği görülmüştür.

Malzemenin kırılma yüzeyi incelendiğinde sünek kırılma görülmüştür. Sünek kırılma çekme numuneleri için beklendik bir sonuçtur. Çünkü S235 JR malzemelere mukavemet kazandıran karbon oranı çok düşük olması sebebi ile şekillendirilebilirlik kayabiliyet çok iyi ve sünek olarak tanımlanmaktadır. M3 numunesi SEM görüntüleri incelendiğinde sünek kırılma mekanizmasının oluşması bu durumu desteklemiştir. Türkmen ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada sünek kırılma, yüksek miktarda plastik deformasyondan sonra meydana gelir ve malzemenin kırık yüzeyinde konik çanak şeklinde görüleceği yönelik açıklama yapmışlardır [129].

Resim 4.25'de 50 μm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanan M4 numunesine ait çekme grafiği, çekme ve kopma yüzeyi fotoğrafları verilmiştir.

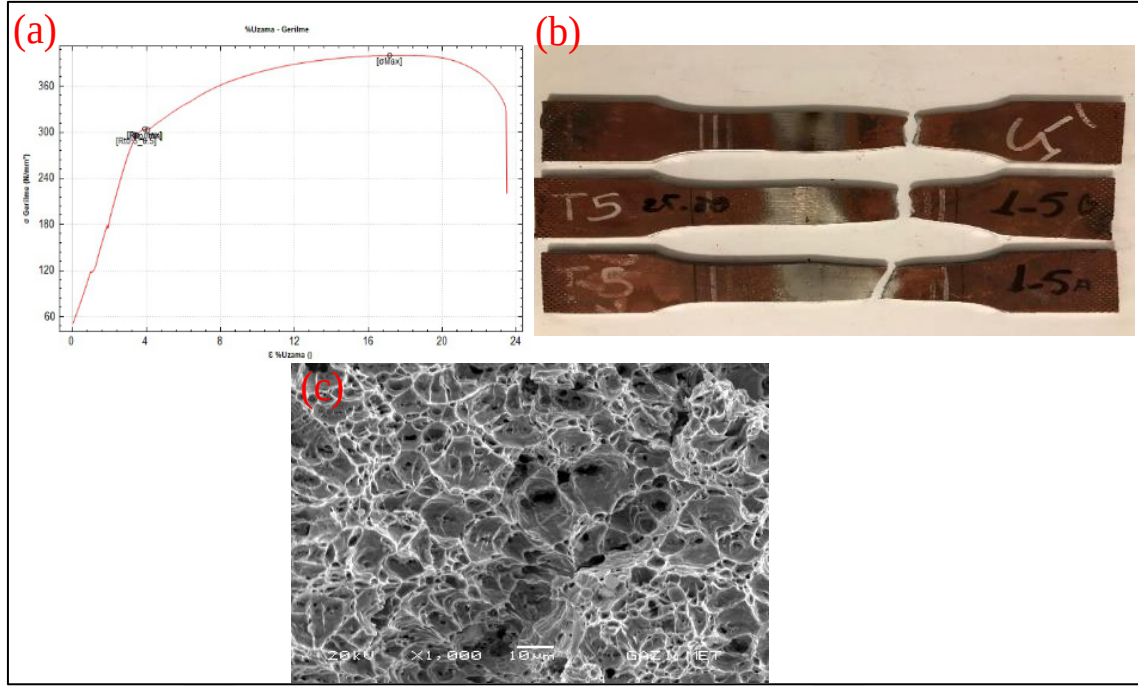


Resim 4.25. M4 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi

M4 numunelerine ait çekme dayanımı $402,4 \text{ N/mm}^2$, kesit daralması % 57,2 ve % uzama 24,5 olup çekme deneyi sonucunda gerçekleşen kopma ana malzemede meydana gelmiş olup yapılan kumlama, boya ve kaynakların deney sonucunu etkilemediği görülmüştür.

Malzemenin kırılma yüzeyi incelendiğinde sünek kırılma gerçekleştiği görülmüştür. Çünkü yüksek plastik davranışa sahip düşük karbonlu S235 JR malzemeler oldukça sünek davranış göstermektedir. Kırılmanın, herhangi bir termal dönüşümün olmadığı bir bölgede yani ana malzemede gerçekleşmesinden dolayı M4 numunesi için S235 JR malzemenin temel bir özelliği olan sünek davranışın, gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Jerzy ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda, plastik deformasyona maruz kalan S235 JR numunede sünek kırılma olacağını bildirmişlerdir [130].

Resim 4.26'da 75 μm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanmış M5 numunesine ait çekme grafiği, çekme ve kopma yüzeyi fotoğrafları verilmiştir.



Resim 4.26. M5 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi

M5 numunesinde maksimum çekme dayanımı $400,0 \text{ N/mm}^2$, kesit daralması % 56,8 ve % uzama 23,5'dir. Çekme deneyi sonucunda gerçekleşen kopma ana malzemede meydana gelmiş olup yapılan kumlama ve artan imalat ön astar kaplama kalınlığının kaynakların mukavemetini etkilememiştir.

M5 numunesi kopma yüzeyi sünek kırılma özelliklerini göstermektedir. Kırık yüzeyde eş eksenli oyukların oluştuğu görülmektedir. S235 JR malzemeler düşük karbon içeriklerinden dolayı plastik deformasyon sonucu oluşan kırılmalar sünek özellik taşırlar. Zainulabdeen çalışmasında, sünek kırılma yaklaşımının bir parçası olarak boşlukların oluşumu ile nihai kırılmayı gösterir, şeklinde tanımlama yapılmıştır [131].

4.7.2. Tozaltı kaynaklı numuneleri çekme testi

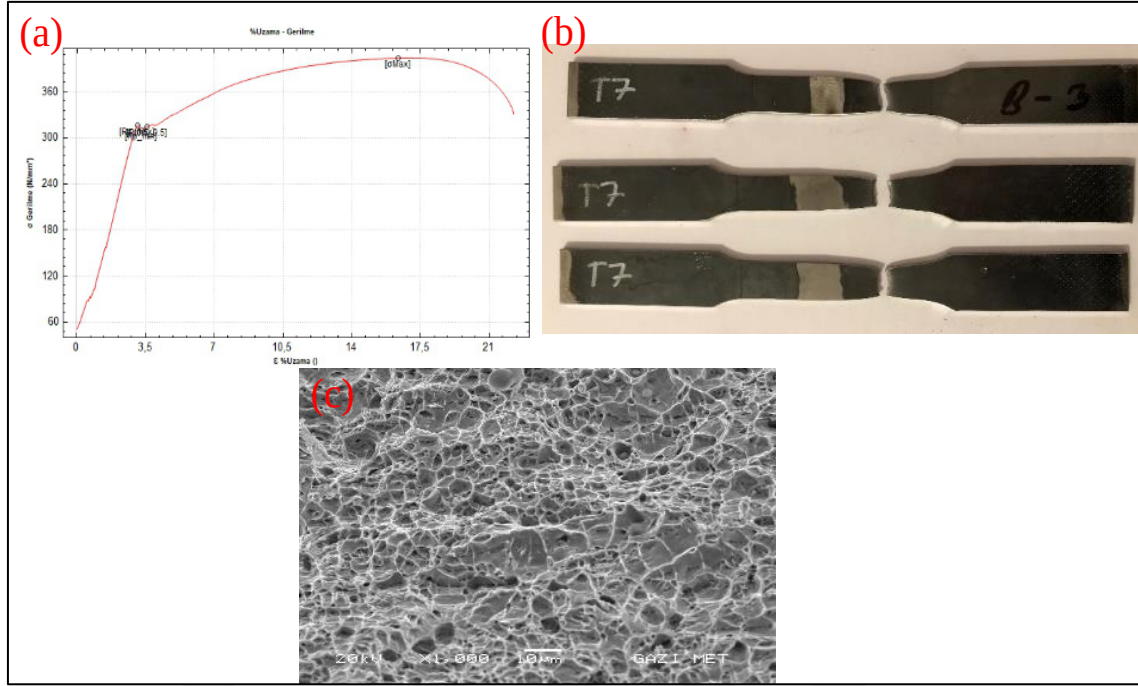
Tozaltı kaynağı ile kaynatılan T grubu numuneleri Çizelge 4.2'de çekme sonuçları ve ortalamaları verilmiştir.

Çizelge 4.2. Tozaltı kaynağı ile kaynatılan numunelerin çekme sonuçları

Numune Adı	Çekme Hızı (mm/dk.)	Max. Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Kesit Daralması (%)	Uzama (%)
T1	15	406,7	57,3	21,6
		401,0	56,0	23,1
		403,5	56,9	22,0
Ortalamalar	15	403,7	56,7	22,2
T2	15	397,3	58,6	22,9
		405,9	55,8	21,5
		401,5	59,3	23,1
Ortalamalar	15	401,6	57,9	22,5
T3	15	395,4	57,4	22,7
		400,5	56,3	23,5
		396,8	56,6	22,1
Ortalamalar	15	397,6	56,8	22,8
T4	15	402,9	59,2	21,5
		407,5	55,8	22,3
		398,8	59,2	24,2
Ortalamalar	15	403,1	58,1	22,7
T5	15	251,9	11,2	0,9
		258,4	9,4	1,8
		260,3	10,6	1,5
Ortalamalar	15	256,9	10,4	1,4

Yukarı tüm çekme sonuçları verilen T grubu numunelerine ait çekme grafiği ile deney sonuçları, kopma fotoğrafları ve kopma numuneleri kırık yüzey sonuçları, yorumları bölümler halinde verilmiştir.

Resim 4.45’de herhangi bir işlem yapılmadan doğrudan birleştirilen T1 numunesine ait çekme grafiği, çekme ve kopma yüzeyi fotoğrafları verilmiştir.

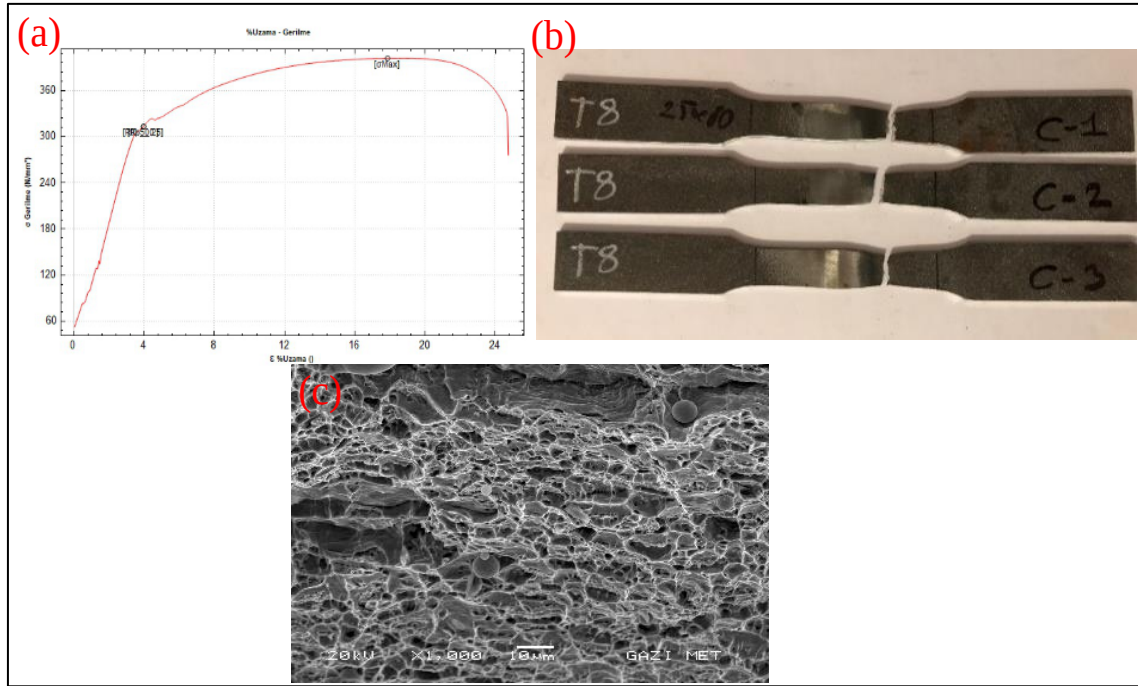


Resim 4.27. T1 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi

T1 numunesinde maksimum çekme dayanımı $403,7 \text{ N/mm}^2$, kesit daralması % 56,7 ve % uzama 22,2'dir. Kopma ana malzemede gerçekleşmiştir, bunun sebebi bu bölgede ısı kaynaklı herhangi bir termal değişiklik olmamasından dolayıdır. Termal değişikliğe uğrayan kaynak metali ve ITAB'ta soğuma hızından dolayı sertlik artmakta buna bağlı olarakta mukavemet artmaktadır. Dolayısıyla mukavemeti düşük olan esas metalde kopma gerçekleşir.

Resim 4.27.c'de çekme sonucu oluşan kopma yüzeyi incelendiğinde sünek kırılmanın gerçekleştiği görülmektedir. Sünek kırılmanın en büyük belirtisi mikro boşluk oluşumu olup kopma yüzeyinde gerilme bölgelerindeki çukurların tekrar tekrar ortaya çıkmasıyla gerçekleşir. Tarafder ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, ideal bir sünek kırılmada, çatlakların genişlemesi boyunca boşlukların birleşmesiyle ilerleme olacağına yönelik açıklama yapmışlardır [132].

Resim 4.28'de sadece kumlanmış ve sonrasında kaynatılmış T2 numunesine ait çekme grafiği, çekme ve kopma yüzeyi fotoğrafları verilmiştir.

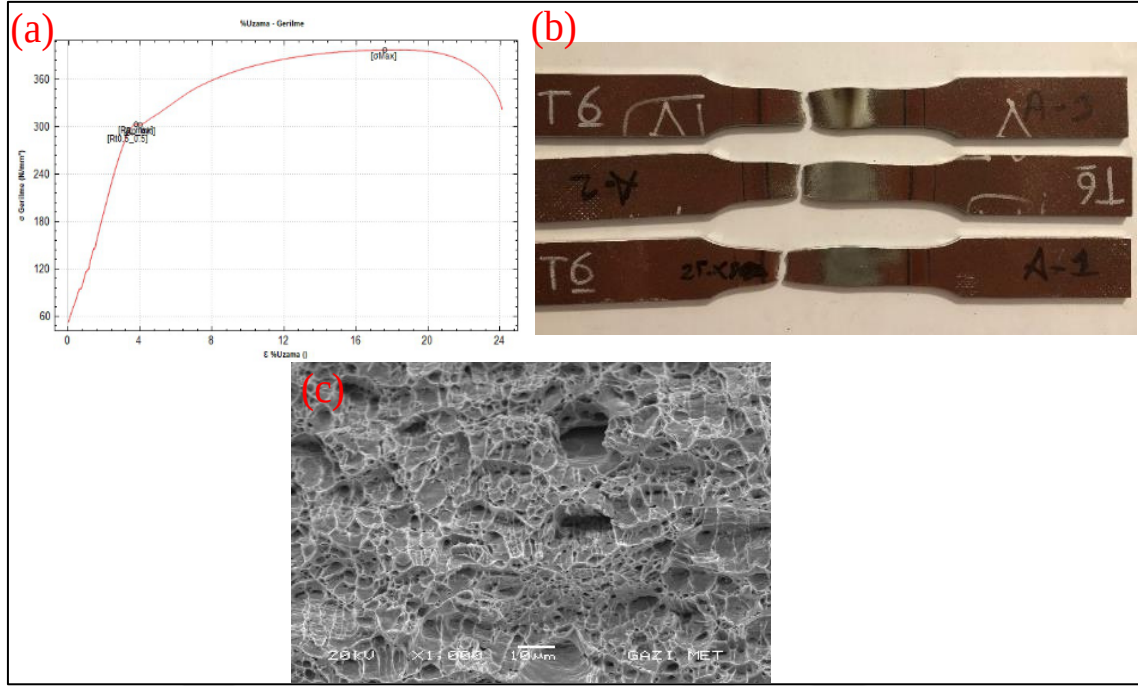


Resim 4.28. T2 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi

Yapılan çekme deneylerinde Resim 4.28.a’da verildiği gibi maksimum çekme dayanımı $401,6 \text{ N/mm}^2$, kesit daralması % 57,9 ve % uzama 22,5’dir.

Çekme deneyi sonucunda gerçekleşen kopma ana malzemede meydana gelmiş olup yapılan kumlama ve sonrasında yapılan kaynakların deney sonucunu etkilemediği görülmüştür. Uygulanan imalat ön astar boyanın plastik deformasyonu, malzemenin sünekliğini ve mukavemetini etkileyecek bir içyapı değişikliğine sebep olmamıştır. Yapılan işlem tümüyle yüzeysel bir işlem olup kaynak bölgesinde imalat ön astarıda oluşan ısı ile yakılarak ortamdaki uzaklaştırılmıştır. Dolayısıyla çekme sonucunu etkileyecek bir etkisi kalmamıştır. Resim 4.28.c’de çekme sonucu oluşan kopma yüzeyi incelendiğinde kırılma yüzeyi sünek kırılmayı işaret etmektedir. Literatürde, kırılma yüzeyinin görünümü, sünek çukurlar içeren plastik deformasyon özelliklerinin göstergesidir, şeklinde açıklamalar bulunmuştur [133].

Resim 4.29’da T3 numunesine kumlannmış, sonrasında ortalma $25 \mu\text{m}$ kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası birleştirilen numuneye ait çekme grafiği, çekme ve kopma yüzeyi fotoğrafları verilmiştir.



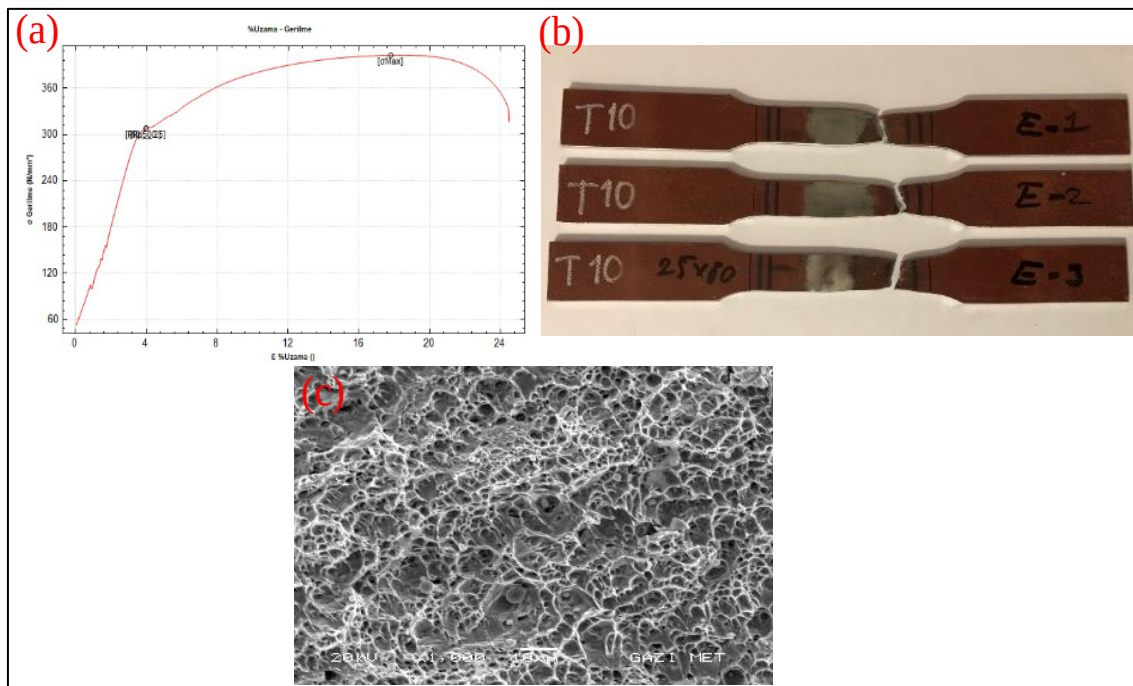
Resim 4.29. T3 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi

Resim 4.29.a’da verilen çekme grafiğine göre maksimum çekme dayanımı $397,6 \text{ N/mm}^2$, kesit daralması % 56,8 ve % uzama 28,8’dir.

Resim 4.29.b’de T3 numunelerine çekme deneyi sonucunda gerçekleşen kopmalar ITAB’ın dışında ana malzemede meydana gelmiş olup yapılan kumlama, imalat ön astar uygulamasının ve kaynakların deney sonucunu etkilemediği görülmüştür.

Resim 4.29.c’de çekme sonucu oluşan kopma yüzeyi incelendiğinde kırılma yüzeyinin görünümü, S235 JR çeliğinin sünek kırılmaya maruz kaldığını gösterir. Çekme numunesinde kayma ve deformasyon neticesinde boşluklar meydana gelmiş, bu boşluklar birleşene kadar genişlemiş ve sonrasında kopma gerçekleşmiştir. Kopma sonrası kırılma yüzeylerindeki oyuklar meydana gelerek sünek kırılma görüntüsü oluşturmuştur.

Resim 4.30’da T4 numunesine kumlanmış sonrasında ortalama $50 \mu\text{m}$ kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası birleştirilen numuneye ait çekme grafiği, çekme ve kopma yüzeyi fotoğrafları verilmiştir.



Resim 4.30. T4 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi

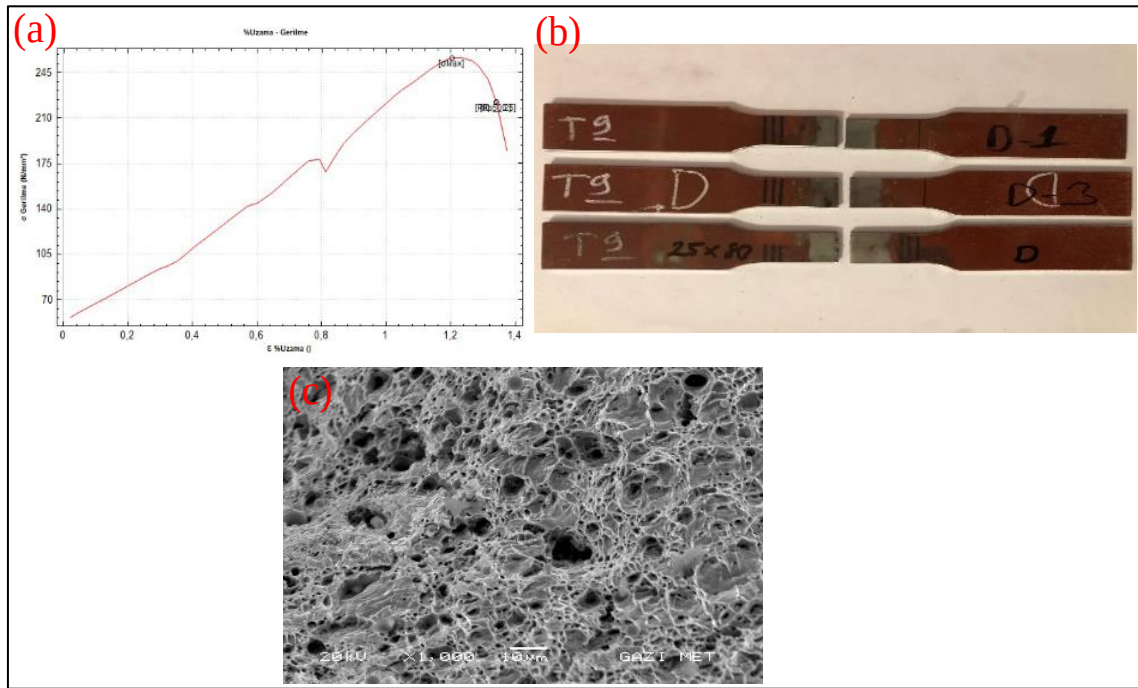
Resim 4.30.a’da T4 numunesinde maksimum çekme dayanımı $403,1 \text{ N/mm}^2$, kesit daralması % 58,1 ve % uzama 22,7’dir.

Resim 4.30.b’de verildiği gibi yapılan çekme testlerinde kopma ITAB’ın dışında ana malzemede gerçekleşmiş olup, artan imalat ön astar kalınlığı deney sonuçlarını etkilememiştir. Artan kaplama kalınlığının S235 JR malzemenin mekanik özelliklerini etkileyecek içyapı değişikliklerine bir etkisi olmamıştır. Numune yüzeylerine uygulanan kaplama kalınlığının artmış olması kaynak için meydana getirilmiş ark tarafından kaynak bölgesinden uzaklaştırılmıştır. Bunun sonucunda da kaynağın mukavemetini tesir edecek olumsuz bir etki meydana gelmemiş olup çekme deneyi sonucunda numunedeki kopmanın ana malzemede gerçekleşmesi ile sonuçlanmıştır. Kumar ve Sinha düşük karbonlu St 37 çelikleri çalışmasında, gerilme gerinim eğrisi, ana metalin kırılmasının sünek doğasını gösterdiğini bildirmişlerdir [134].

Resim 4.30.c’de çekme sonucu oluşan kopma yüzeyi incelendiğinde kırılma yüzeyinin görünümü, S235 JR çeliğinin sünek kırılmaya maruz kaldığını gösterir. Çetinakaya ve arkadaşları kopma yüzeylerinin düzgün olmadığı, küçüklü büyüklü derinlikleri içeren siyah

noktaların görüldüğü ayrıca girintili çıkıntılı sünek kopma yüzeylerinin oluştuğu şeklinde tanımlama yapmıştır [135].

Resim 4.31'de T5 numunesine Sa 2 ½ kumlanarak sonrasında ortalma 75 µm kalınlığında imalat ön astar boya ile boyanması sonrası birleştirilen numuneye ait çekme grafiği, çekme ve kopma yüzeyi fotoğrafları verilmiştir.



Resim 4.31. T5 numuneleri a) çekme grafiği, b) çekme sonrası kopma görüntüleri, c) kopma yüzeyi

Resim 4.31.a'da T5 numunesine ait grafik incelendiğinde maksimum çekme dayanımı 256,9 N/mm², kesit daralması % 10,4 ve % uzama 1,4'tür.

Resim 4.31.b'de verildiği gibi kopmalar kaynak metalinden gerçekleşmiş olup sonuçlar olumsuz olarak değerlendirilmiştir. Artan kaplama kalınlığı kaynak bağlantısını olumsuz yönde etkilemiştir. Kaynak için gerekli ısı enerjisi, 75 µm kalınlığındaki imalat ön astarı yakılıp ortamdaki uzaklaştırılmasına harcanmasından ve buna karşın düşürülmeyen kaynak hızından dolayı nüfuziyet sağlanamamıştır.

Resim 4.31.c'de çekme sonucu oluşan kopma yüzeyi incelendiğinde kırılma yüzeyinin görünümü, kırılmanın tam nüfuziyet sağlanamayan kaynaktan koptuğu tespit edilmiş olup

kaynak metalinde de sünek kopma görüntüsüne rağmen % uzama miktarı 1,4 olduması sebebiyle çekme numunesi sünek davranış göstermemiştir.

4.7.3. Çekme testi genel değerlendirme

Çekme deneyi ile elde edilen çekme mukavemeti sonuçları kaynak metalinin akma mukavemetini ve kaynak metalinin esas malzemeye uygunluğunu belirlememizi sağlamaktadır. Çekme testlerinde elde edilen sonuçlarda kaynak metalinin ana metale oranla daha mukavemetli olması beklenmektedir. TS EN ISO 4136 Çekme testi standardında belirtildiği gibi çekme sonucunda yöntemin uygunluğu açısından kaynaklı numune özelliklerinin en az ana malzeme çekme özelliklerine eşit olması beklenmektedir [136].

Çekme deneyinde T5 numunesi hariç geriye kalan tüm numunelerde kopma ITAB'ın dışında ana malzemede meydana gelmiştir. Kaynaklı numunelerin çekme dayanımının ana metalin çekme dayanımından biraz yüksek olduğu görülmüş olup bunun sebebi kaynaklı numunelerde, kaynaktan dolayı ITAB'ta ve kaynak metalinde mukavemet artmış ve bu bölgelerde deformasyon gerçekleşmesi daha çok kuvvet gereksinimi ortaya çıkartmıştır. Çekme bölgesindeki sünek kısım daha kısaldığı için çekme dayanımında bir parça artışa sebep olmuştur. Literatürde, kaynak metali genellikle nispeten yüksek yoğunlukta dislokasyon içerir ve bu da karbon ve karbon-manganezelerde akma dayanımının artmasına katkıda bulunur. Nihai sonuç, karbon ve/veya alaşım içeriği daha düşük olduğunda bile kaynak metalinin normal olarak eşdeğer plaka malzemesinden daha yüksek çekme ve akma dayanımına sahip olduğu açıklanmaktadır [111]. Benzer sonuçlara ve çalışmalara paralel olarak, Kahraman ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, çekme testi sırasında kaynaklı bölgenin deformasyonu engellemesi, aynı bileşim ve farklı çekme boylarında yapılan çekme testleri sonucu, eğer çekme hızı sabit ise çekme boyu kısa olan malzeme hızlı pekleşmeden dolayı daha yüksek dayanım gösterir. Çekme numuneleri standartlara uygun olarak hazırlandığından, kaynaklı numunelerdeki kaynak bölgesinin sert olması sebebiyle deformasyon bu bölgenin dışında meydana gelmektedir. Deformasyonun dar bir bölgede meydana gelmesi de dayanımın yüksek değerler göstermesine neden olmuştur. Kopma ana malzemeden olmasına rağmen, kaynaklı numunelerin % uzama değerlerinin düşük çıkmasının sebebi kaynaklı bölgenin çekme testi sırasında deformasyona uğramamasından kaynaklanmaktadır, şeklinde açıklamaktadır [137].

T5 numunesi hariç geri kalan numunelerde gerçekleşen kopmalar S235 JR malzemesinin düşük karbon içeriğine bağlı süneklikten dolayı, kaynak metali ve ITAB'ta mukavemet artışı sebebi ile ITAB'ın dışında esas metalde gerçekleşmiştir. Çelik malzemeler kırılmadan önce büyük şekil değiştirmeler yapabilme kabiliyeti gösterdiğinden sünek malzeme olarak tanımlanır. Sünek malzemenin pozitif özelliklerinden bir tanesi yüklerin çok büyük değerlere ulaştığı durumlarda malzemede gözle görülen şekil değiştirmeler meydana gelmesidir. Tam nüfuziyet sağlanmayan kaynaklara yönelik Ahsan ve arkadaşlarının çalışmasında, çekme testi ile mekanik özelliklerin değerlendirilmesi, %10 ana metal kalınlığına eşdeğer penetrasyon derinliğinin yeterli birleştirme mukavemeti sağlamak için yeterli olduğunu göstermiştir [7].

Çekme sonucu oluşan kopma yüzeyleri incelendiğinde kırılma yüzeylerinin görünümü, S235 JR çeliğinin yapı ve içerdiği düşük karbon oranına bağlı olarak sünek kırılmaya maruz kaldığını göstermiştir.

Daha önce yapılan çeşitli çalışmalarda anlatıldığı gibi kırılma, boşluk birleşmesi veya numunenin kendisinin mekanik kararsızlığı nedeniyle meydana gelebilir. İlk olarak, boşluklar inklüzyonlarda çekirdeklenir ve ardından plastikliğin yardımıyla büyür. Sonunda birleştiklerinde, bir çatlak oluşur ve malzeme kırılır. Plastik deformasyona maruz kalan S235 JR numunede sünek kırılma olur, şeklinde açıklamalar yapılmaktadır [128,138,139].

M ve T grubu numuneleri çekme değerleri T5 hariç birbirine yakın olup, kopmalar ITAB'ın dışında gerçekleşmiştir. Seçilen yöntemle ilgili olarak robotik MAG ile kaynatılan numunelerde kumlama ve artan imalat ön astar kalınlığı kaynak kalitesini etkilemesine rağmen çekme testinin sonucunu etkilememiştir. Ancak M5 numunesi üzerinde görülen sıralı gözeneklerin kaynağın kep tarafında olduğu ve çekme numunesi işleme yöntemi ile numunelerin hazırlanması esnasında yüzeyden uzaklaştırıldığı düşünülmektedir. Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılan T5 hariç geriye kalan T grubu numunelerinde ise artan kaplama kalınlığı kaynak kalitesini olumsuz etkilemiş olup çekme sonuçlarında ise sadece T5 numunesi çekme testinde olumsuz sonuç elde edilmiştir. Bunun da sebebi kapsam aralığındaki kaplama kalınlığından dolayı elde edilemeyen nüfuziyet ve sıralı gözeneklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kaynak kusuru olarak değerlendirilen nüfuziyet eksikliği ve sıralı gözeneklerdir. T5 numunesinde görülen gözenekler kaynaklı birleştirmenin yapısal bütünlüğünü ciddi olarak zayıflatarak kaynaklı bağlantının mukavemetini olumsuz olarak

etkilemektedir. Nüfuziyet yeterisizliği, ergimenin T5 numunesi kalınlığı boyunca olmaması sonucunda meydana gelmiş ve kaynak bağlantısının alt kısımlarında kırılmayı ve kopmayı teşvik eden oyuk ve çentikler şeklinde ortaya çıkmıştır. Bu kusur çekme esnasında T5 kaynaklı numunenin bağlantısı üzerinde olumsuz bir etkisi oluşturmuştur. Dolayısıyla yapılan çekme deneyinden olumsuz sonuçlar elde edilmiştir.

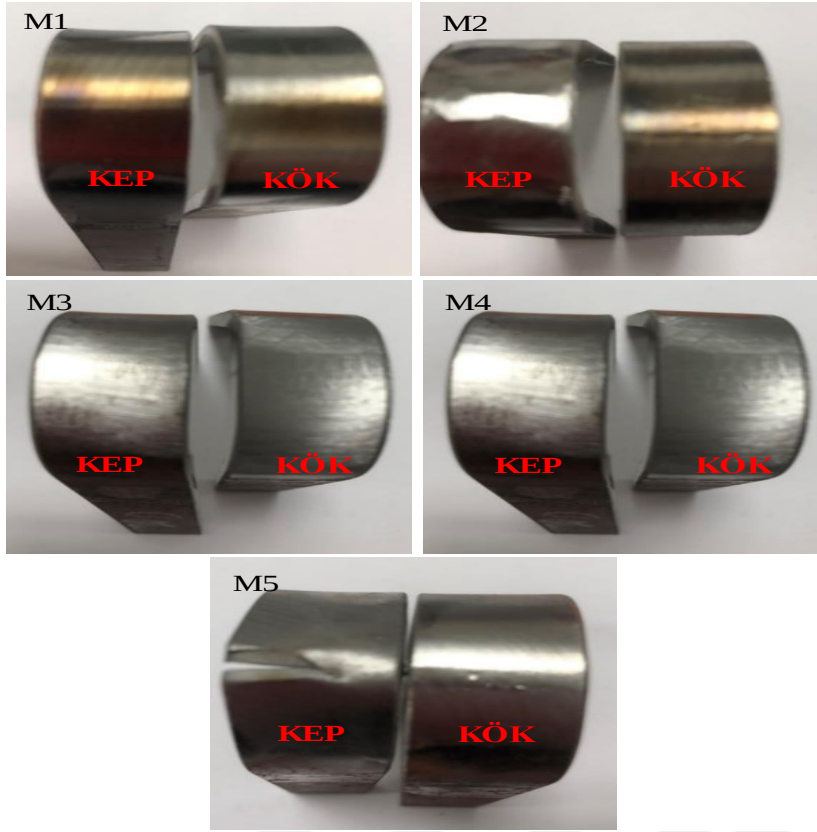
4.8. Eğme Testi

Eğme testi, kaynaklı birleştirme yüzeyindeki veya yakınındaki sünekliliğini, birleştirme bölgesinde veya bölgeye yakın hasarların olup olmadığını değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Alın kaynakları numunelerine enine kök, yüzey ve kenardan eğme testleri yapılabilir. Eğme test yöntemi, ana metal ve kullanılan ilave malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinde tespitinde de kullanılır. Bu sebepten dolayı test parçalarının kaynak sünekliliği tespiti için eğme testi yapılmış olup aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

4.8.1. MAG kaynaklı numunelerin eğme testi

Alın kaynaklı olarak birleştirilmiş M grubu deney numuneleri üzerinde yapılan kök ve kep yüzeyi eğme deneylerinde amaç, birleştirmenin yüzeyindeki veya yakınındaki sünekliliği veya kaynak süreksizliklerini değerlendirmektir. Eğilme deneyi ile numunelerin mukavemeti hakkında birleşim bilgilerini belirlemek ve numunelerin eğilmeye karşı olan mekanik özelliklerini değerlendirmek için yapılmıştır. Eğme deneyi ile kaynaklı birleştirmenin, kaynak metalinde ya da ITAB'ında bir süreksizlik varsa buralarda çekme ve basma gerilmeleri ile gerilme yığılmaları meydana gelecektir. İç yüzeye yakın bölgede basma gerilmeleri, dış yüzeye yakın bölgede ise çekme gerilme yığılmaları da zamanla kopmalara neden olmaktadır. Bu bölümde robotik MAG kaynağı ile birleştirilen M grubu numunelerine ait eğme deney sonuç fotoğrafları verilmiştir.

Resim 4.32'de görüleceği gibi kep ve kök için kaynaklı birleştirmelerin şekillendirilebilirliği her bir kaynak parametresine ait kep ve kök eğme deney numunesi TS EN ISO 5173 standardına uygun hazırlanarak eğme deneyine tabi tutularak belirlenmiştir.



Resim 4.32. M grubu numunelerine ait eğme test sonucu

Resim 4.32’de verilen M1, M2, M3 ve M4 numunelerine yapılan kep ve kök eğme testinde eğme deneyi neticesinde kaynaklı birleşme bölgesinde herhangi bir çatlak görülmemiştir. Kaynaklı malzemenin şekillendirilebilirliği iyi olduğunu ve bu durum birleştirmenin şekillendirilebilirliğinin şartları yerine getirdiğini işaret etmektedir. Kullanılan malzemenin kaynak bölgesinin sertliğinin eğme ile kırılabilirlik sertliğe ulaşmadığını göstermektedir.

Çeşitli çalışmalarda, S235 JR yapı çeliklerine, kaynak bölgesinin şekil değiştirme özelliğinin tespiti için uygulanan iki yönlü eğme testleri sonucunda, S235 JR çelik şekillendirilebilirlik açısından uygun olduğu belirtilmiştir [76,140,141].

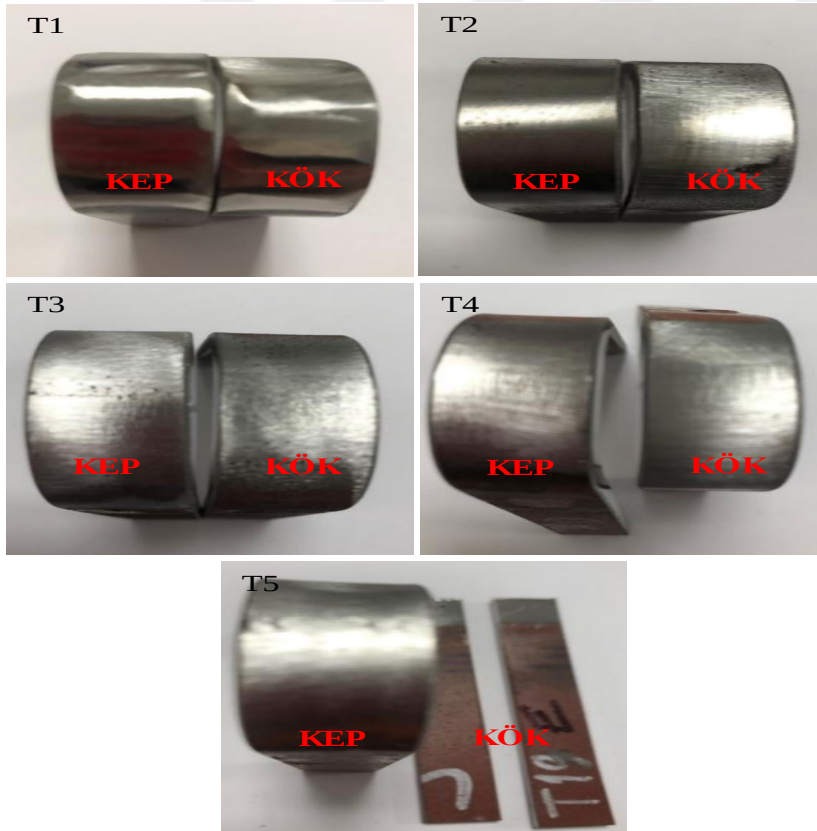
Robotik MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen M1, M2, M3 ve M4 numunelerinin eğme testlerinde, kaynaklı bağlantının şekillendirilebilirliğini etkileyecek çatlak tespit edilememiştir. Malzemenin temin edildiği şekliyle, kumlanması ve 25 μ m, 50 μ m kaplama kalınlığı uygulanmış olması eğme testine bir etkisi olmamıştır. Ancak 75 μ m olarak imalat ön astarı uygulanmış M5 numunesinde çatlak tespit edilmiştir. M5 numunesi için yapılan eğme testi sonrası yapılan değerlendirmede, kök bölgesinde herhangi bir çatlak tespit

edilmemiş, ancak kep kısmında çatlak görülmüştür. Radyografi filminde görülen gözeneklerin bu çatlak oluşumunda etkisi olduğu düşünülmektedir. İmalat ön astar kalınlığı M5 numunesi eğme testini olumsuz olarak etkilemiştir.

4.8.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin eğme testi

Eğme testinde T grubu numuneleri alın kaynaklı bağlantıdaki ITAB ve kaynak metalinde herhangi bir boşluk veya çatlak varsa bu noktalarda, çekme ve basma gerilmeleri tarafından gerilme yığılmaları oluşarak zamanla kopmalara neden olmaktadır. Eğilme halindeki deney numunelerinde, iç yüzeye yakın bölgede basma gerilmeleri, dış yüzeye yakın bölgede ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Eğme deneyi ile ana metal, ITAB ve ilave metallerin fiziksel özelliklerini belirlemek için yapılır. Bu amaçla deneyler gerçekleştirilmiş olup aşağıda T grubu numunelerine ait sonuçlar verilmiştir.

Resim 4.33’de tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen T grubu numunelerine ait kep ve kök eğme deney sonuç resmi verilmiştir.



Resim 4.33. T grubu numunelerine ait eğme test sonucu

T1, T2, T3 ve T4 numunelerinin yapılan kep ve kök eğme testinde eğme deneyi neticesinde birleşme bölgesinde çatlak tespit edilmemiş, numunelerde şekillendirilebilirlik açısından herhangi problemin oluşmadığı görülmüştür. Yapılan çeşitli çalışmalarda, kaynaklı S235 JR çeliklerine, kaynak bölgesinin şekil değiştirme özelliğinin belirlenmesi için uygulanan iki yönlü eğme testleri sonucunda, tüm kombinasyonlar 180° eğildiklerinde gözle görülebilir bir kaynak hatasına rastlanmamıştır. Bükme testinde, çatlak durumunun uzama miktarı ile doğru orantılı olduğu göz önüne alındığında, elastik dönüşüm miktarının U tipi bir bükülme oranına izin verdiği sonucuna varılabilir. Bu, kaynak metalinin neden en azından malzemeler kadar burulma mukavemeti sergilediğini açıklar. Bu nedenle kaynak metali, temel malzemeler olarak sahada kullanıma uygundur, şeklinde açıklamalar bulunmuştur [114,142-144].

Resim 4.33'deki T5 numunesine ait eğme test sonucuna yönelik değerlendirmede, yapılan kep ve kök eğme testinde eğme deneyi sonrasında birleşme bölgesinde kaynak kusurları tespit edilmiştir. Kep bölgesinde eğme deneyinde çatlak, kök bölgesinde eğme deneyinde ise bükme testi başlangıcında kökte kopma meydana gelmiştir. T5 numunesi Sa 2 ½ derecesinde kumlanmış, daha sonra 75 µm kalınlığında imalat ön astar boya uygulanmış S235 JR çeliklerin kaynaklarında, şekillendirilebilirlik açısından problemler tespit edilmiştir. Bu problemin oluşmasında kapsam aralığındaki imalat ön astarının kaynak esnasında kaynak kusurlarına neden olduğu ve kusurlarında eğme testinin olumsuz sonuçlanmasına sebep olduğu görülmüştür.

4.8.3. Eğme testi genel değerlendirme

Eğme deneyinin yapılmasındaki gaye, kaynaklı bölgenin eğilmeye maruz kalan bölgelerinin öngörülen değerlere ve ana malzemeye uygunluğunun belirlenmesidir. Deney sonucuna göre kaynaklı numuneler üzerine kaynak dikişleri üzerine 180° eğme deneyleri yapılmıştır. M5 ve T5 numuneleri hariç numuneleri kaynak dikişlerinde herhangi bir hasarın ve çatlağın oluşmadığı gözlemlenmiştir.

M1, M2, M3, M4, T1, T2, T3 ve T4 numunelerinin eğme testlerinde herhangi bir problem tespit edilmemiş, numunelerin kaynaklarının uygun olduğu değerlendirilmiştir. Yapılan alın birleştirme bağlantısının şekillendirebilirlik kabiliyetinin olumlu olarak sonuçlanmıştır. Safriwardy tarafından yapılan çalışmada, eğme testi, yüzey alanında çok az değişiklik olan

veya hiç değişmeyen doğrusal bir eksene karşı metalin plastik deformasyon işlemidir. Eğme, nötr eksenin dışındaki metalin çekmesine neden olurken diğer taraf basınc altındadır. Dış yük sadece esneklik sınırı içinde deformasyona neden oluyorsa malzemenin sünek olduğu söylenir, şeklinde tanımlama yapılmaktadır [145].

Farklı yüzey durumlarına getirilip kaynakları yapılan numunelerin kaynaklarının eğme testi ile uygunluk değerlendirmesi sonucunda M5 ve T5 numuneleri hariç, diğer birleştirmelerin başarılı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Solic ve diğerlerinin yaptığı yapısal özelliklerin test edilmesi çalışmasında, bükme testinin sonuçları iyi olarak değerlendirildiği, yani bükülmeye maruz bırakıldıktan sonra kaynak yüzünde veya kaynak kökünde görünür bir mekanik hasar meydana gelmediğini bildirmişlerdir [5].

Kaplama kalınlığı en yüksek olan M5 ve T5 numunelerinde görülen hasarların sebebi, radyografi filmlerinde görülen gözenek, sıralı gözenek ve nufuziyet eksikliklerinde kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bu kusurların kaynaklı bağlantının şekillendirilebilirlik kabiliyetini düşürdüğü tespit edilmiştir. Dolayısıyla numuneler üzerine 75  m kalınlığında uygulanan imalat  n astarlarının kaynak kalitesi üzerine etkisi olduğu görülmektedir.

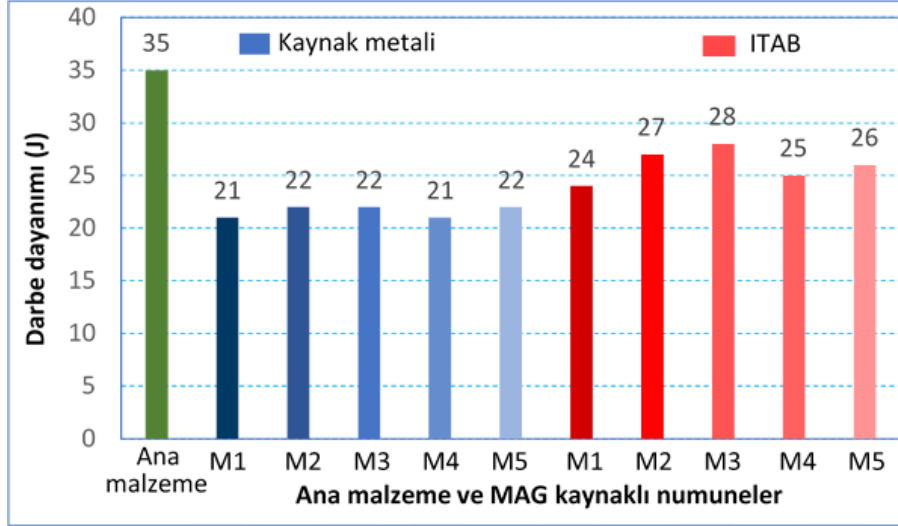
4.9.  entik Darbe Testi

Malzemelerin dinamik kuvvetlere karşı kırılma mukavemeti ve enerjisini tespit etmek için kullanılan bir testtir. Bu test yüksek ani bir darbe uygulanan malzemenin sönümlediği enerjinin miktarını ölçer ve malzemenin gevrekliğini veya sünekliliğini değerlendirilmesinde kullanılır. Ayrıca bu test, kaynaklı malzemelerin standarta belirlenmiş bir sıcaklıktaki darbe dayanımını tespiti için kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, numuneler kaynak metalini ve ITAB'ı içerecek şekilde ayrı ayrı hazırlanarak oda sıcaklığında testler gerçekleştirilmiş olup sonuçlar bölümler halinde verilmiştir.

4.9.1. MAG kaynaklı numunelerin çentik darbe testi

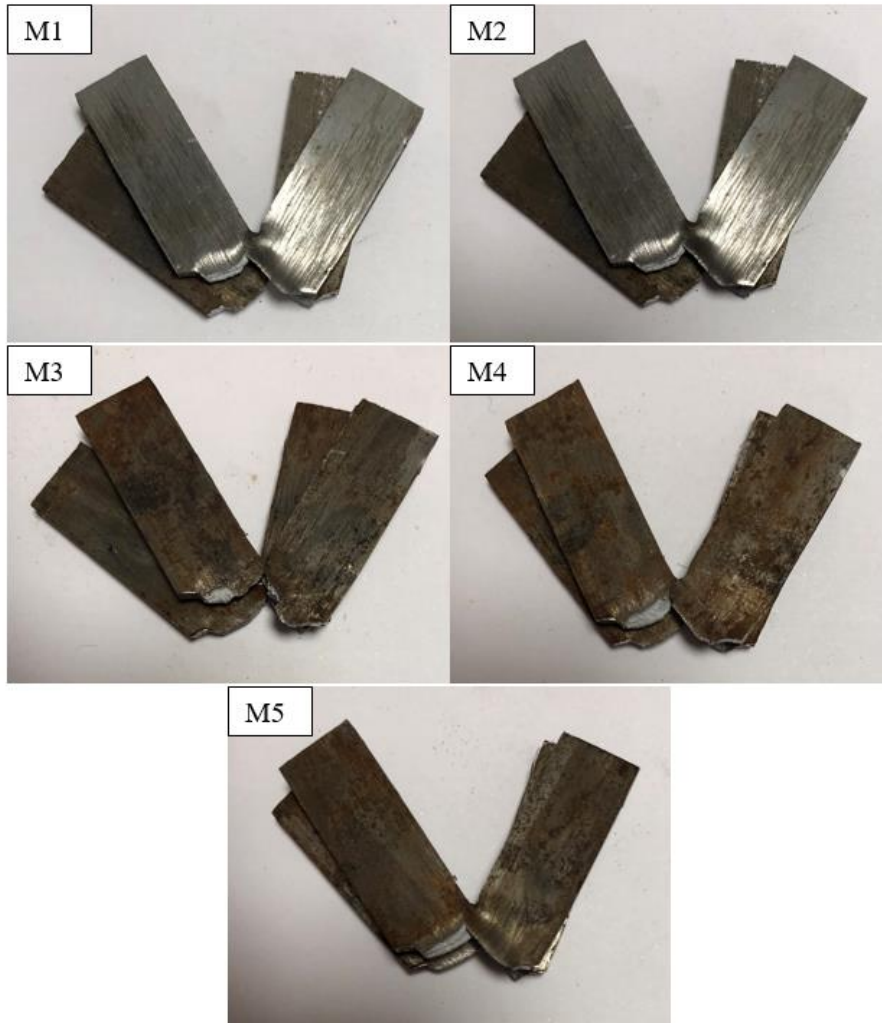
M grubu numunelerinin belirlenmiş bir sıcaklıklarda, hangi kırılma davranışını gösterdiğini belirlemek amacıyla, çentik darbe deneyinden yararlanılmıştır. Bu amaçla yapılan robotik MAG kaynağı ile birleştirilen M grubu numunelerine ait çentik darbe test sonuçları aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.9’da robotik MAG kaynağı ile birleştirilen M grubu numunelerinin çentik deneyi sonuçları grafikte verilmiştir.



Şekil 4.9. M grubu numunelerine ait çentik darbe sonuçları

Standart dışı test numuneleriyle yapılan çentik darbe numuneleri oda sıcaklığında test edilmiştir. Test sonucu grafiksel olarak Şekil 4.9’da gösterilmiştir. S235 JR çeliği çentik darbe tokluğu 35 J ölçülmüş ve kullanılan kaynak telinin tokluğu ise 60 J olarak verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen M grubu numuneleri için kaynak metalindeki sırasıyla değerler 21 J, 22 J, 22 J, 21 J, 22 J, ITAB’ta ise 24 J, 27 J, 28 J, 25 J ve 26 J olarak ölçülmüştür. Test sonuçlarına göre ısı girdisine ve soğuma şartlarına bağlı olarak numunelerdeki ölçülen sertliklerine bağlı olarak çentik darbe test sonuçlarıyla zıt yönde uyumluluk göstermektedir. Buradan çıkartılan sonuç, ana malzeme, ITAB ve kaynak metalinden elde edilen tokluk değerleri, aynı bölgelerde elde edilen sertlik değerleriyle zıtlık göstermektedir. Sonuç olarak, test numunelerinin sertlikleri arttıkça, toklukta düşme gözlenmiştir. Çentik darbe testi sonucu M grubu numunelerine ait kopma resimleri Resim 4.34’de görülebilir.



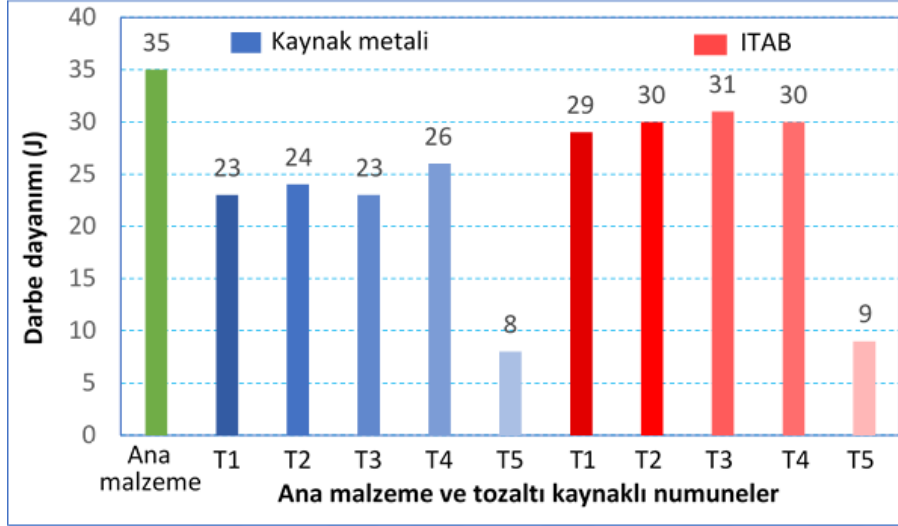
Resim 4.34. M grubu numunelerine ait çentik darbe testi kırılma görüntüsü

Düşük karbonlu çeliklerin alın kaynaklı birleştirmelerinde kritik öneme sahip bölgeleri ITAB ve kaynak metalidir. Çünkü bu bölgelerde ısı girdisine ve soğuma hızına bağlı olarak sertliklerinde bir artış olmaktadır. Bu bölgelerde yapılan çentik darbe testi sonucunda kopmalar sünek özellik göstermiş olup M grubu numunelerine yapılan kumlama ve kapsam aralığındaki farklı kalınlıklardaki imalat ön astar kalınlıklarının test sonuçlarına bir etkisi olmamıştır.

4.9.2. Tozaltı kaynaklı numunelerin çentik darbe testi

T grubu numunelerinde çentik darbe testi, numunelerinin dinamik zorlamalar altında kırılması için gerekli enerji miktarını ve süneklilik durumunun tespit için yapılmıştır. Bu amaçla yapılan tozaltı kaynağı ile birleştirilen T grubu numunelerine ait çentik darbe testi

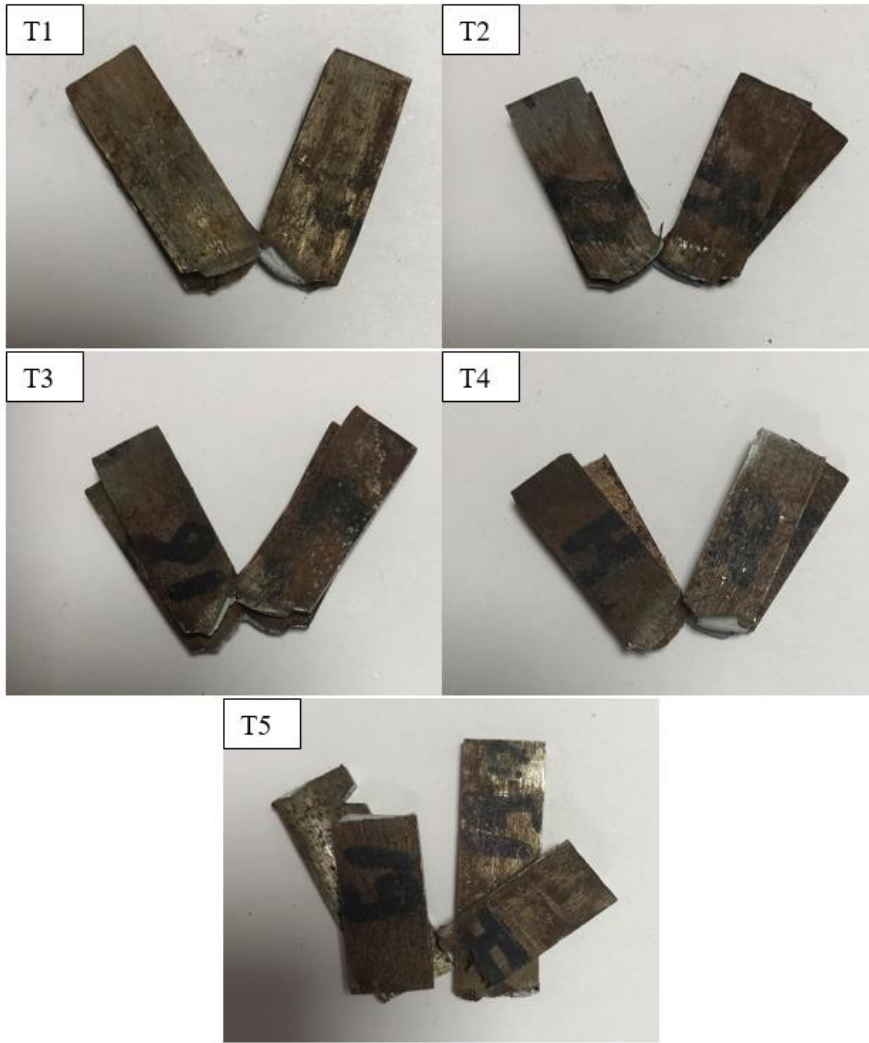
sonuçları aşağıda verilmiştir. Şekil 4.10'da tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen T grubu numunelerinin çentik deneyi sonuçları grafiğe verilmiştir.



Şekil 4.10. T grubu numunelerine ait çentik darbe sonuçları

T grubu numuneleri ana malzeme çentik darbe tokluğu 35 J ve kullanılan ilave metalin tokluğu ise -30°C 'de 55 J olarak verilmiştir. Bu değer kullanılan kaynak tozuna göre değişkenlik göstermektedir.

Test sonucu grafiksel olarak Şekil 4.9'da gösterildiği gibi T1, T2, T3 ve T4 numunelerinin kaynak metalinde çentik darbe değerleri sırasıyla 23 J, 24 J, 23 J, 26 J, ITAB'ta ise 29 J, 30 J, 31 J, ve 30 J olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, elde edilen sertliklerle ilişkili olarak zıt anlamda değişkenlik göstermektedir. T grubu numunelerinin sertlik testlerine zıt olarak en yüksek sertliğin elde edildiği kaynak metalinde tokluk en düşüktür. ITAB'ta ise elde edilen tokluk ana malzemedan düşük kaynak metalinden yüksek olarak elde edilmiştir. T5 numunesi çentik darbe testi sonucu kaynak metalinde 8 J, ITAB'ın ise 9 J olarak tespit edilmiştir. Nüfuziyet elde edilemeyen ve sıralı gözenek içeren kaynağın darbe direnci diğer numunelere kıyasla oldukça düşük değerlerde çıkmıştır. Kaynak kusuru olarak değerlendirilen nüfuziyet eksikliği ve sıralı gözenekler bağlantının mukavemetini düşürmüştür. Çentik testi sonucu kırılmış numuneler görüntüleri Resim 4.35'de verilmiştir.



Resim 4.35. T grubu numunelerine ait çentik darbe testi kırılma görüntüsü

Kaynaklı bağlantıların yapılan çentik testlerinde ana malzemeye uyumluluk aranmaktadır. Daha yüksek sertliğe sahip kaynaklı bağlantısındaki kaynak metalinde kırılma dayanımı düşük ve daha düşük sertliğe sahip kaynaklı bağlantının ITAB'ında kırılma dayanımı yüksektir. Kaynak metalinin ve ısıdan etkilenmiş bölgenin çentik darbe testi sonunda kırılmanın sünek şekilde gerçekleştiği görülmüştür.

Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılan T grubu numunelerinin imalat ön astar kalınlığı en yüksek 75 μm olan numunede test sonuçlarını olumsuz olarak etkilemiştir. Bunun sebebi alın birleştirmesindeki kaynak metalindeki radyografi filmlerinde görülen süresizliklerin sebep olduğu düşünülmektedir. T1, T2, T3 ve T4 numuneleri çentik darbe testi sonuçları, standardın öngördüğü $+ 20^0 \text{ C}$ 'de, 27 J değerinden yüksek olması sebebinden dolayı kaynaklı birleştirmelerin dinamik yüklemelere karşı emniyetli olduğu saptanmıştır.

4.9.3. Çentik darbe testi genel değerlendirme

Çalışmada standartlara uygun ancak standart dışı ölçülerde hazırlanan çentik darbe numuneleri oda sıcaklığı, 20 °C sıcaklıkta test edilmiştir. S235 JR çeliği çentik darbe tokluğu 35 J ve kullanılan MAG kaynak telinin tokluğu ise -30 °C'de 60 J, tozaltı kaynak telinin darbe dayanımı -30 °C'de 55 J olarak verilmiştir. S235 JR kaynaklı birleştirmelerin oda sıcaklığında kaynak metal, ilave metal ve birleştirilen ana malzemelerin kimyasal içeriğinin yanı sıra kaynak termal çevriminden etkilenmektedir.

Kırılma enerjisi değerlerinin pozisyon kaynakları ve kaynak metal için standardın öngördüğü 27 J (20 °C'de) değerinden yüksek olması nedeniyle T5 hariç kaynaklı birleştirmelerin dinamik zorlamalara karşı emniyetli olduğu saptanmıştır.

Deneyler sonucunda elde edilen çentik darbe değerleri sırasıyla en yüksek ana malzemede, sonra ITAB'ta daha sonra ise kaynak metalinde elde edilmiştir. Kaynak metalinde kullanılan ilave metal ve soğuma hızlarına bağlı olarak artan sertliğin tokluğu düşmüştür. ITAB'ta ise tane irileşmesi ve soğuma hızına bağlı olarak artan sertlik, kaynak metalinden daha yüksek değerlerde gerçekleşerek darbe enerjisini absorbe etme gücünü azalarak ana malzemeden daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Durgutlu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada en yüksek çentik darbe mukavemetini ana malzeme gösterirken bunu sırasıyla ITAB ve kaynak metal takip etmektedir [136]. Çetinkaya yaptığı bir çalışmada sertliğin artmasıyla tokluğun azaldığını rapor etmektedir. Burada kaynak metalinden elde edilen çentik darbe mukavemetleri ITAB'dan elde edilen değerlerden daha düşük bulunmuştur [146]. Düşük karbonlu çeliklerin kaynağında ITAB'ın kırılma davranışları üzerine yapılan bir çalışmada ITAB'daki iri taneli bölgenin tokluğunun kaynak metalinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca ITAB'ın sertliğinin kaynak metal sertliğinden düşük olması bu sonucu doğrulamaktadır, şeklinde açıklanmaktadır [126].

Mikroyapı incelemelerinde görülen asiküler ferrit yapısı kaynak metalinin tokluğunu artırmasına rağmen widmanstaten, tane sınır ve poligonal ferrit yapıları tokluğu olumsuz olarak etkilemektedir. Dolayısıyla kaynak metalinin tokluğunun düşük olması normal olarak değerlendirilmiştir. Literatürde, asiküler ferritin birbirine kenetlenen yapısı, ince tane boyutu ile birlikte, bölünme yoluyla çatlak ilerlemesine karşı maksimum direnç sağlar. Tane sınırı

ferrit, ferrit yan plakalar veya üst beynit oluşumu, bu mikroyapılar kolay çatlak ilerleme yolları sağladığından kaynak metali tokluğuna zarar verir [111].

Darbe testi sonrası elde edilen veriler incelendiğinde T5 numunesi hariç geriye kalan tüm numunelerde istenilen değerlerin sağlandığı görülmüş olup kaynak bağlantısının ve ITAB'ın darbe dayanımı istenilen değerlerde olduğu görülmüştür. Yani bağlantının tokluğu uygun olarak değerlendirilmiştir. İmalat ön astarının kaynak kalitesi üzerine etkisi olduğu ancak çentik darbe test sonucuna etkisi olmadığı görülmüştür. Çünkü imalat ön astarı kaynak esnasında oluşan ısıdan dolayı yanarak gaza dönüşmüştür. Solic ve diğerlerinin yaptığı yapısal özelliklerin test edilmesi çalışmasında, darbe enerjisinin test edilmesi, koruyucu kaplamanın darbe enerjisi değerleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmadığını, yani ölçülen değerlerin izin verilen değerin altında olmadığını veya koruyucu kaplamalı ile test edilen iki numune arasında ortalama değerlerde anlamlı bir sapma olmadığını kanıtladı. Elde edilen sonuçlara göre koruyucu kaplama yanmasının ve kaynağında kullanılan gazla karıştırılmasının olumsuz bir etkisinin olmadığı kanıtlanmıştır. Bu nedenle, ön imalat astarını malzemelerin geçici bir koruması olarak kullanmanın güvenli olduğu sonucuna varıldığını bildirmiştir [5].

MAG ve tozaltı kaynak yöntemleri ile kaynatılan M ve T grubu numunelerinde kaynak metali ve ITAB'ta yapılan çentik darbe testlerinin tamamında beklendiği gibi ana malzemeye nazaran toklukta düşüş görülmüştür. Kaplama kalınlığı en yüksek olan T5 numunelerinde kaynak nüfuziyetinin sağlanamamasından dolayı en düşük çentik değeri elde edilmiştir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması sonunda 4 mm kalınlığında S235 JR kalite malzeme başlangıçta iki farklı gruba ayrılıp, bir gruptakiler robotik MAG yöntemi ile diğer gruptakiler ise tozaltı kaynak yöntemi ile yüzey işlemleri yapılarak ve yapılmadan kaynatılmışlardır.

- Robotik MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde, kaplamadaki yanma ve kararma miktarı kaplama kalınlığına bağlı olarak artmaktadır.
- Kaplama kalınlığına bağlı olarak kaynak esnasındaki duman çıkış miktarında artış görülmüştür.
- Kaplama kalınlığı arttıkça arkı başlatmanın zorlaştığı görülmüştür.
- Arkın başlatılması, en kolay kumlama yapılmış malzemede daha sonra ise herhangi bir işlem yapılmamış malzemede şeklinde sıralanabilir.
- Tozaltı ark kaynak yöntemi ile en yüksek kaplama kalınlığına sahip numune (T5) hariç diğer tüm numunelerde gözle yapılan inceleme neticesinde, kaynak yüzey kusurları olan eksik veya fazla kaynak kepi, kökte çökme gibi hatalara rastlanılmamıştır. T5 numunesinde tam nüfuziyet sağlanmamış olup bunun sebebinin kaplama kalınlığından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.
- T5 numunesi hariç M ve T grubu numunelerinde makroyapı görüntüleri incelendiğinde, kaynak nüfuziyetinin uygun olduğu, kaynak hatalarına rastlanmadığı fakat ısı girdisinin ITAB genişliğini etkilediği görülmüştür. Kaplama kalınlığı en yüksek olan T5 numunesinde tam nüfuziyet elde edilememiştir. Dolayısıyla kaplama kalınlığı makroyapı inceleme sonuçlarını etkilemiştir.
- Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde hem robotik MAG hem de tozaltı ark kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde benzer mikro yapıların olduğu görülmüştür. Kaynak metalinde witmanstaten ferrit, asiküler ferrit ve poligonal ferrit içyapısının olduğu görülmektedir. Bu içyapı oluşumunda yumuşak ferrit levhaları ile sert perlit kolonileri

birbiri içerisine girmektedir bu nedenle bu yapının oluştuğu bölge ana metale nazaran daha sert ve kırılğan olmaktadır. Bu yapının oluşum nedeni soğuma hızının yüksek olmasıdır. T5 numunesinde asiküler ferrit oluşumu görülmüştür. Yapılan farklı kaplama kalınlıklarının ve yüzey hazırlamının mikroyapı üzerine bir etkisi olmamıştır.

- Radyografik muayene sonuçlarına bakıldığında M2, T1, T2, T3 ve T4 numunelerinin standartlar içerisinde olduğu ve herhangi bir kaynak hatasının bulunmadığı görülmüştür. M1, M3, M4, M5 ve T5 numunelerinde ise porozite (gözeneklilik) oluştuğu saptanmıştır. Oluşan porozitenin kapsam aralığında uygulanan imalat ön astar kaplamanın kaynak esnasında kaynak banyosunda hapsolmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- SEM incelemelerinde tüm numunelerde benzer yapı elde edilmiştir. SEM ve EDS analizi çalışmalarında elde edilen sonuçlar beklenildiği gibi ana malzeme ilave tel ana yapısına uygun sonuçlar elde edilmiştir. Yüzey işlemleri ve kapsam aralığındaki imalat ön astar artan kaplama kalınlığının SEM sonuçlarında etkisi görülememiştir.
- Sertlik sonuçlarına göre tüm numunede de sertlik değerlerinin ana malzemedan kaynak metaline doğru gittikçe arttığı görülmüştür. Tüm parçalar üzerinde yapılan değerlendirmede, sertlikler robotik MAG kaynağının tozaltı kaynağına nazaran bir parça yüksek olduğu görülmüştür. Sertlik sonuçları ile yüzey işlemleri ve artan kaplama kalınlığı arasında bir ilişki görülmemiştir.
- T5 numunesi hariç, çekme testlerinin tüm numunelerde kaynak bölgesi haricinde esas malzemedan koptuğu ve mekanik değerlerinin standardının gerekliliği olan en az 360 MPa değerinden yüksek olduğu bulunmuştur. Kopma yüzeyi SEM incelemelerinde sünek kırılma özellikleri görülmüştür, T5 numunesi resminde görülen sünek kopma görüntüsü elde edilmiş olmasına rağmen gerçekleşen sünek kopma değildir. T5 numunesi hariç diğer numunelerde yüzey durumu ve kaplama kalınlığının bir etkisi olmamıştır.
- M5 ve T5 numuneleri hariç tüm numunelerde eğme testleri başarı ile sonuçlanmış olup elde edilen kaynakların şekillendirilebilirliği uygun olarak değerlendirilmiştir. M5 ve T5 numuneleri hariç diğer tüm numunelerin 180° çift yönlü eğme testleri sonucunda, gözle görülebilir bir kusur tespit edilmemiştir. M5 numunesinde çatlak, T5 numunesinde ise kopma meydana gelmiştir. Ancak M5 ve T5 numunelerinde görülen hasar kaplama kalınlığının kaynağın şekillendirilebilirliği üzerine olumsuz etkisi olduğu görülmüştür.

- T5 numunesi hariç tüm numunelerde, çentik darbe testleri neticesinde, kaynak metali tokluk değerleri, ITAB ve ana malzeme tokluk değerlerinden daha düşük olduğu bulunmuştur. T5 numunesinde 75 µm kalınlığındaki imalat ön astar kaplamanın olumsuz etkisi çentik darbe testi sonuçları üzerinde görülmüştür.

5.2. Öneriler

- Farklı kaplama kalınlıklarında nufuziyet derinliğinin değişip değişmediğinin kontrolü yapılabilir. Kaplamaların köşe kaynaklar üzerine etkisi araştırılabilir.
- Kaplama yapılmış malzemeler ile yapılmamış aynı tür veya farklı tür malzemelerin standart 10 mm kalınlığında malzemeler kaynatılıp standart darbe testleri eksi sıcaklıklarda yapılabilir.



KAYNAKLAR

1. Hempel (2017). *Doğru boya sistemi nasıl seçilmeli*. Korozyona karşı koruyucu boyalar için ISO 12944 standardına uygun temel esaslar ve sistemler. İstanbul: Hempel Coatings, 14-16.
2. Berendsen M., (1989). *Marine Painting Manual*, TNO Paint Research Institute Delft. Netherlands: Springer Netherlands 167-169.
3. Boekholt R., (1996). The influence of shop primers on weld quality for mechanized or automated welding, *Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, Welding Mechanisation and Automation in Shipbuilding Worldwide*, Woodhead Publishing, 133-136.
4. Blasko G. J., Moniak D. J. and Howser B. C., (1992). *A project of the national shipbuilding research program for the society of naval architects and marine engineers ship production committee*, SP-7 Welding Panel, Evaluation of hitachi zosen portable welding robotics, U.S. Navy: News Shipbuilding, 3-5.
5. Solic T., Maric D., Jagodic Z., and Samardzic I., (2017). Testing Of The Shopprimer's Influence on The Quality Of Welded Joint. *Metalurgija*, 56 (3-4), 357-360.
6. D'Addona D.M., Genna S., Giordano A., Leone C., Matarazzo D., and Nele L., (2015). Laser Ablation of Primer During the Welding Process of Iron Plate for Shipbuilding Industry. *9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, University of Naples Federico II, P.le Tecchio, Naples, Italy, 464-469.
7. Ahsan Md. R. U., Kim Y. R., Ashiri R., Cho Y. J., Jeong C., and Park Y. D., (2016). Cold Metal Transfer (CMT) GMAW of Zinc-Coated Steel. *Welding Journal*, 95, 120-132.
8. Anık S., (1991). *Kaynak Tekniği El Kitabı*, Yöntemler ve Donanımlar. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı. Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, 41-103.
9. Komaç E., (2014). *Teknik Eğitim El Kitabı*, İstanbul: Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2-47.
10. Kurt A., (2012). Kaynaklı Birleştirme Teknikleri - Ders Notları, *Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü*, Ankara, 2-145.
11. Çimenoglu H., (2007). Kaynak Metalurjisi, Ders Notları *İ.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü*, İstanbul, 5-53.
12. Cary H. B. and Helzer S. C. (2005). *Modern welding technology*. (Sixth Edition). N.J., Pearson/Prentice Hall, 1-16.
13. Eryürek İ.B., (2007). *Gazaltı Ark Kaynağı*. İstanbul: Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticaret A.Ş., 6-68.
14. Anık S. ve Vural M., (1991). *Gazaltı Ark Kaynağı*. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı, Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, 99-222.

15. GSI SLV-TR,(2011). Uluslararası Kaynak Mühendisliği (IWE), *Ders Notları*. Ankara
16. Miller (2012). *Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW). MIG (GMAW) Welding*. USA: Miller Electric Mfg. Co., 5-20.
17. Tülbentçi K,. (1990). *MIG-MAG Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı*. İstanbul: Gedik Holding, Gedik Eğitim Vakfı, Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, 9-210.
18. Tülbentçi K,. (1993). *MIG - MAG Kaynağı, Gaz Altı Kaynağı*, İstanbul: İTÜ Kimya - Metalürji Mühendisliği, 212-268.
19. Askaynak, (2017). *Doğru Kaynak Torcu Seçimi*, Teknik Makale. Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticaret A.Ş, Askaynak, 2-6.
20. Aslanlar S,. (2009). Kaynak Teknolojisi ve Uygulamaları, *Elektrik Ark Kaynak ve Gaz Eritme Kaynak Teknolojisi Ders Notu*. Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü.
21. Ertürk İ,. (1994). Gazaltı Kaynak Teknikleri, *Ankara Sanayi Odası Dergisi*, Ankara,77-79, 2-33.
22. Nadzam J,. (2014). *Gas Metal Arc Welding Guidelines*, Lincoln Electric, Publication C4.200 Issue Date 08/14 Lincoln Global Inc. 22801 Saint Clair Avenue, Cleveland, OH, 44117, U.S.A, 5-39.
23. EWM, (1994). MIG/MAG Welding Dictionary,(Sixth Edition), *EWM-Wissen -rund ums Schweißen*, 56271 Mündersbach, Germany, 5-31.
24. Yılmaz R,. (2007). MIG-MAG Gazaltı Kaynağında Kaynak Parametreleri ve Seçimi, Sakarya Üniversitesi, *Ders Notları*, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, Sakarya, 3-93,
25. Gök G. V. ve Afyon Ç,. (1999). Kaynak Uygulamalarında Robot Teknolojisi, *Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi*, 221-229.
26. Yumurtacı S. ve MERT T.,(2003).Robotik Kaynak Sistemleri ve Gelişme İstikametleri, *Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi*, Mühendis ve Makina Dergisi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Ankara, 167-178.
27. Shimon Y. Nof. (1999). *Handbook of Industrial Robotics* (2nd. ed.). John Wiley & Sons, Inc., Wiley, New York, USA, 11-40.
28. Tama Y. S,. (2009). Çelik Yapı Uygulamalarında Kullanılan Kaynak Yöntemleri, Üstünlükleri ve Sakıncalı Yönleri, *Yapısal Çelik Derneği*, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, 1-9.
29. Külahlı E,. (1988). Toz Altı Kaynak Yöntemi. *Kaynak Bilimi*, Oerlikon Yayını, 2, İstanbul, 1-12.
30. Anık S. ve Tülbentçi K,. (1991).Tozaltı Kaynak Tekniği, *Kaynak Teknolojisi II*, Gedik Kaynak San. Tic. A.Ş, Pendik, İstanbul, 59-71.

31. Kahraman, N. ve Gülenç, B. (2016). *Modern Kaynak Teknolojisi*.(3rd Edn.) Ankara: Behçet Gülenç, 136-150.
32. Farnsworth, S.R.,(2010). Ten Welding Defects, *Welding For Dummies*, Wiley Publishing, Inc., 111 River St. Hoboken, NJ 07030-5774, Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana, USA, 291-299.
33. TS EN ISO 6520-1,(2008) Kaynak ve ilgili işlemler - Metalik malzemelerde geometrik kusurların sınıflandırılması - Bölüm 1: Ergitme kaynağı,(1.Baskı) *Metalurji İhtisas Grubu*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2-26.
34. Sevük A., (2007). *Gazaltı Ark Kaynağında Sorunların Giderilmesi*, İstanbul: Askaynak, Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticaret A.Ş., Kartal, İstanbul, 1-13.
35. Yılmaz R., (2010). Kaynak Hataları ve Önlenmesi, *Ders Notları*, Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, 2-22.
36. TWI (2002). Welding Inspection Defects Repairs, *Course Reference*, England, 2-50.
37. Parmar, R.S.,(1995). *Welding Engineering And Technology*,(First Edition) Khanna Publisher, 2-B, Nath Market, Nai Sarak, Delhi-110006, India, 659-700
38. Keleşoğlu E.,(2011). *Sert Kaplamalar Üretim Teknikleri ve Özellikleri*, İstanbul: İTÜ, 1-3.
39. Kanat Boya, (2012). Koruyucu Boyalar ve Kaplamalar, *Yapısal Çelik*, Kemalpaşa, İzmir, 2-13.
40. Kansai Altan, (2017), *Neotect, Protective Coatings*, İzmir: Kansai Altan Boya Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, Kemalpaşa, İzmir, 4-20.
41. TS EN ISO 8501-1, (2008) Çelik taban malzeme yüzeylerin hazırlanması - Boya ve ilgili malzemelerin uygulanmasından önce - Yüzey temizliğinin gözle muayenesi - Bölüm 1: Kaplanmamış çelik taban malzeme yüzeylerinin ve önceki kaplamanın tamamen kaldırılmasından sonraki çelik taban malzeme yüzeylerinin pas dereceleri ve hazırlanma dereceleri, ICS 25.220.10, *Metalurji İhtisas Grubu*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 13-27.
42. Ecelak Boya ve Kimya San.Tic.Ltd.Şti., (2007). *Yüzey Hazırlama Sistemleri, Metal Yüzey Temizliği*, İzmir: Ecelak Boya ve Kimya San.Tic.Ltd.Şti.,1-8.
43. Western Australia, (2000). *Code of Practice Abrasive Blasting*, Australia: West Perth, W.A: Work Safe, Western Australia Commission, 2-27.
44. Tercoo,(2011). *Kumlama ve Boyaya Hazırlama Hakkında*, İstanbul: Gözdem Elektrik San. ve Tic. Ltd. Şti. Ataşehir, İstanbul, 1-2.
45. Clemco, Industries Corp.,(2017). *The Performance System, Technical Data Sheet*, USA: Clemco, Washington, USA, 1-2.

46. HMG Paints Ltd., (2009). *Pictorial Surface Preparation Standards for Painting Steel Surfaces*, England: HMG Paints Ltd, Manchester, Riveride Works, Collyhurst Road, Manchester, M40 7RU, England, 3-22.
47. TS EN ISO 8503-1(2012). Boya ve ilgili ürünlerin uygulanmadan önce çelik taban malzemelerin hazırlanması- Kumlanarak temizlenmiş çelik taban malzemelerin yüzey pürüzlülük karakteristikleri- Bölüm 1: Aşındırıcı ile kumlanarak temizlenmiş yüzeylerin değerlendirilmesi amacıyla ıso yüzey profil kompratörleri için özellikler ve tarifler, ICS 25.220.10, Kimya İhtisas Grubu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1-7.
48. Mallory A.W.,(1984). *Guidelines for Centrifugal Blast Cleaning*, Pittsburgh: Steel Structures Painting Council, 1-23.
49. TPC Technology Company (2013). Selecting the Right Abrasive. Technology, *A JPCL eBook*, Technology Publishing Company 2100 Wharton Street, Suite 310 Pittsburgh, PA 15203, 5-29.
50. JOTUN, (1999). *Coating Manual*, Sandefjord, Norway: Jotun Paints,3(5)-15.37.
51. Yalçın H. ve Koç T., (1997). Mühendisler için Korozyon, *Türk Mühendis ve Mimarlar Odası Birliği*, Kimya Mühendisleri Odası, 2-14.
52. Kürkçü E., (2005), Boya Sektöründe Solvent Kullanımı: İş Sağlığı Güvenliği Açısından Tehlikeleri ve Alınması Gereken Önlemler, *T.C. Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Müdürlüğü*, Ankara, 1-11.
53. Özkan M., (2001), Çelik Sanayinde Boya Seçimi, *I. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı-1*, E/2001/274-1, 419-422.
54. Ceylan H., Tezcan M., Çivrilili P. ve Korkut M. A., Boyalar, *Kimyasal Maddeler, Deterjanlar, İlaçlar, Boyalar*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Buca Eğitim Fakültesi, Fen Bilgisi Öğretmenliği, 15-16.
55. Camcıoğlu Ş.,(2010). Su Bazlı Boya Üretim Tesislerinin Atıksularının Arıtılmasında Genelleştirilmiş Minimum Değişmeli (GMV) Algoritma ile pH Kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-41.
56. Lee, C.H., Son, S.M., Shin, C.S., Baek, Y.H., and K.K. Baek,(2008).Technical Aspects Of Soluble Salt Contamination Analysis in New Shipbuilding Yards. *Paper presented at the CORROSION 2008*, New Orleans, Louisiana, USA, 3-28
57. Contraros P., Callow L. and Lomas J.,(2007), *The Inspection, Maintenance and Application of Marine Coating Systems*,(Third Edition), Houston: American Bureau of Shipping, USA, 1-38.
58. TS EN ISO 12944-5 (2020). Boyalar ve vernikler - Çelik yapıların koruyucu boya sistemleri ile korozyona karşı korunması - Bölüm 5: Koruyucu boya sistemleri, ICS 87.020 Boya Kaplama Prosesleri, Kimya İhtisas Grubu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1-26.
59. Contraros P., Callow L. and Lomas J., (2007). Guidance Notes On The Inspection, *Maintenance and Application of Marine Coating Systems* (Third Edition), Copyright

American Bureau of Shipping ABS Plaza 16855 Northchase Drive Houston, TX 77060 USA, 1-135.

60. Lambourne, R., and Strivens, T. A. (1999). *Paint and Surface Coatings, Theory and Practice*. (Second Edition), Norwich, NY: William Andrew Pub. Cambridge, England, 1-406.
61. Talbert R., (2008). *Paint Technology, Handbook*, (First Edition), New York: Francis Group, ISBN 9781574447033, Published October 4, CRC Press, 68 B/W Illustrations, New York, USA, 75-177.
62. Aktaş E.,(2011). İşletme Stajı Raporu, *Betek Boya ve Kimya Sanayi A.Ş. Laboratuvarı*, Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, 13-29.
63. McKeen, L. W. (2006). *Fluorinated Coatings and Finishes Handbook, The Definitive User's Guide and Databook*, New York: William Andrew Pub. Norwich, England, 45-196.
64. Teknos,(2013). *Handbook, For Corrosion Protection of Steel Surfaces by Painting*, Teknos OY, (Second Edition), Publisher: Teknos Oy, Finland, 9-65.
65. Swan T.,(2015). *The Coating Inspectors Handbook, Montipower Test Equipment and Specialty Tool*, USA: M Test, 2115 FM 1960 East 4, Humble, USA, 4-66.
66. Akay, A.A., Kaya, Y. ve Kahraman, N.,(2013). Farklı Özellikteki Malzemelerin Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Birleştirmelerin Tahribatlı ve Tahribatsız Muayenesi. *Sakarya University Journal of Science*, 85-96.
67. Sarıcaoğlu, N, Çam, T., Aydın, S. ve Kurt, A., (2018). Çok Pasolu Kaynaklarda Isı Girdisinin Kaynak Metaline Etkisi, 5th International Conference on Welding Technologies and Exhibition(ICWET'18), Saraybosna, Bosnia And Herzegovina, 49-56.
68. TS EN 1090-2,(2018). Çelik ve alüminyum yapı uygulamaları- Bölüm 2: Çelik yapılar için teknik gerekler, ICS 91.080.10 Metal Yapılar, *Teknik Kurul*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 36-38.
69. Altınkök, N. (2017). MAG-TIG-Tozaltı Kaynak Bağlantısının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Termal Analizi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 536-544.
70. Apay S. ve Gel M., Çil G. (2018). Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Farklı Kaynak Parametreleri Kullanılarak Birleştirilen API X70M PSL2 Malzemelerin Kaynak Bölgesinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 714-723.
71. Akkaş, N., Onar, V. ve Varol, F. (2018). Raylı Sistem Araçlarında Kullanılan S235JR(Cu) Çelik Sacların Direnç Nokta Kaynağında Mikro Yapı Analizi. *III. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi*, Gaziantep, 1591-1599.
72. Vural M., Piroğlu F., Çağlayan Ö. ve Uzgider E., (2003). Yapı Çeliklerinin Kaynaklanabilirliği, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 47-51.

73. Kılıçlı V., (2012). Kaynak Metalinde Gözlenen Mikroyapılar, *MEM-317 Malzeme Karakterizasyonu*, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Ankara, 2-18.
74. Çevik B., (2018). Analysis of Welding Groove Configurations on Strength of S275 Structural Steel Welded by FCAW, *Politeknik Dergisi*, 489-495.
75. Brechet Y, Garzon C.M. and Veron M, (2009). Isothermal Precipitation of Widmanstätten Ferrite on a Fe-3.1 Pct Ni-0.1 Oct C Steel, *Eight ALEM Workshop*, May 25-27, Stockholm-Sweden, 4-23.
76. Kaya Y.,(2018). S235JR ile S355JR Yapı Çeliklerinin Özlü Tel Elektrotla MAG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 597-602.
77. Cui L., Yang X., Wang D., Cao J. and Xu W.,(2014),Experimental study of friction taper plug welding for low alloy structure steel: Welding process, defects, microstructures and mechanical properties, *Materials & Design*, 62, 271-281.
78. Easterling K. E., (1992). Introduction to the Physical Metallurgy of Welding (Second Edition), Oxford; Boston: Butterworth Heinemann, England, 1-190.
79. Jorge J.C.F., Souza L.F.G., Mendes M.C., Bott I.S., Araújo L.S., Santos V.R., Rebello J.M.A. and Evans G.M.,(2021), Microstructure characterization and its relationship with impact toughness of C-Mn and high strength low alloy steel weld metals – a review, *Journal of Materials Research and Technology*, 23(8), 635-648.
80. Jafarlou H., Hassannezhad K., Asgharzadeh H. and Marami G. R., (2017).Enhancement of Mechanical Properties of Low Carbon Steel Joints Via Graphene Addition, *Materials Science and Technology*, 34(4), 455-467.
81. Güven İ., Küçükömeroğlu T., Aktarer, S., Murat D. ve Çam, G., (2018). Sürtünme Karıştırma Kaynağıyla Birleştirilen St37/St52 Levhaların Mikroyapı Karakterizasyonu ve Mekanik Özellikleri. *Journal of Science and Engineering*, 20, 59, May, 471-481.
82. Kurt A., (2013). Kaynak Metalurjisi, *Ders Notları*, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Ankara,1-131.
83. Suryana S., Pramono, A., Muda I. and Setiawan A.. (2019). The Influence of Heat Input to Mechanical Properties and Microstructures of API 5L-X65 Steel Using Submerged Arc Welding Process. *MATEC Web of Conferences*, 269, 01009, 1-7
84. Jenney C. L. and O'Brien A., (2001). *Welding Handbook*, Welding Science and Technology, (Ninth Edition),1, LeJeune Road, Miami: American Welding Society, 87-155.
85. Loder D., Mayerhofer A. and Michelic S. K.,(2016). On the Formation Potential of Acicular Ferrite Microstructure in Different Steel Grades Focusing on the Influence of Carbon Content, *AISTech 2016 Proceedings*, 2465-2474.
86. Ebrahimnia M., Goodarzi M., Nouri M. and Sheikhi M., (2009). Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc welding, *Mater Des.* 3, 1-5.

87. Çelik S., (2010). Kaynak Metalurjisi, *Ders Notları*, BAÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, 2-70.
88. Silva C. C., Assis J. T., Philippov S. and Farias J. P.,(2016). Residual Stress, Microstructure and Hardness of Thin-Walled Low-Carbon Steel Pipes Welded Manually, *Materials Research*. 19(6), 1215-1225.
89. Čičo, P & Kalincová, D. and Kotus M., (2011). Influence of welding method on microstructural creation of welded joints. *Research in Agricultural Engineering*, 50-56.
90. Kılıçlı V.,(2012). Kırık Yüzeylerin İncelenmesi, *MEM-317 Malzeme Karakterizasyonu*, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği, Ankara, 11-30.
91. Ceyhun V. ve Sönmez U., (2011), St 37-2 (S235JR) Çeliklerinin Özlü Tel Elektrod İle Kaynağında Kaynaklı Birleştirmenin Dayanım ve Mikroyapı Özelliklerinin Araştırılması, *VIII. Ulusal Kongre Ve Sergisi Kaynak Teknolojisi*,153-168.
92. Esmailian M.,(2010). The Effect Of Cooling Rate and Austenite Grain Size on The Austenite to Ferrite Transformation Temperature and Different Ferrite Morphologies in Microalloyed Steels, *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 7(1), 7-14.
93. Honeycomb, R.W.K. and Kerr R.W., (1981). *Microstructure and Properties*, London: Edvard Arnold, 7(1), 78-79.
94. Durgutlu A., Gülenç B. ve Tülbentci K., (1999). Ark Kaynağında Kaynak Hızının Nüfuziyete ve Mikroyapıya Etkisi, *Tr. J. of Engineering and Environmental Science*, 23, 251-259.
95. Erden M.A., Gündüz S., Çalgülü U. ve Boz M.,(2018), Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen alaşımsız ve hardoks çeliklerin mikroyapı ve sertlik özelliklerinin araştırılması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 33(1), 221-226.
96. Küçükömeroğlu T., Aktarer S., İpekoğlu G. ve Çam G., (2015). Sürtünme Karıştırma Kaynaklı St 37-St 44 Alın Bağlantıların İçyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 425-434
97. Cvetkovski S., Slavkov D. and Magdeski J., (2003).Welding Procedure Specification For Arc Welding Of St 52-3N Steel Plates With Covered Electrodes, *Proceedings of 3.rd, BMC-2003-Ohrid*, R. Macedonia,152-160.
98. Svensson L. E., (1994). *Control of Microstructure Properties Steel Arc Welds*, (First Edition), London: Boca Raton, England, 55-225.
99. Güral A., Bostan B. ve Özdemir A.T.,(2007).Heat treatment in two phase region and its effect on microstructure and mechanical strength after welding of a low carbon steel, *Materials & Design*, 28, 897-903.
100. Ron, T. L., Dolev G.K., Leon O., Shirizly A. And Aghion A. E., (2019), Environmental Behavior of Low Carbon Steel Produced by a Wire Arc Additive *Manufacturing Process. Metals*, 9, 3-13.

101. Maslarevic A., Bakic G. M., Djukic M. B., Rajicic B., Maksimovic V. and Pavkov V., (2020). Microstructure and Wear Behavior of MMC Coatings Deposited by Plasma Transferred Arc Welding and Thermal Flame Spraying Processes. *Trans Indian Inst Met* 73, 259–271
102. Głuchowski W., Rdzawski Z., Sobota J., Domagała-Dubiel J. and Muzia G., (2015). Microstructure and mechanical properties of steel rods after controlled deformation, *International Scientific Journal published monthly by the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering*, 71(1), 5-13.
103. Ron, T. L., Dolev G.K., Leon O., Shirizly A. and Aghion A. E., (2020), The Effect of Microstructural Imperfections on Corrosion Fatigue of Additively Manufactured ER70S-6 Alloy Produced by Wire Arc Deposition. *Metals* 2020, 2-8.
104. Wang C., Wang X., Kang J., Yuan G. and Wang G. (2019), Effect of Thermomechanical Treatment on Acicular Ferrite Formation in Ti-Ca Deoxidized Low Carbon Steel. *Metals* 2019, 4-13.
105. Jafarzadegan, M., Feng, A., Abdollah-Zadeh A., Tohid S., Jun S. and Assadi H., (2012). Microstructural characterization in dissimilar friction stir welding between 304 stainless steel and st37 steel. *Materials Characterization*. 74, 28-41.
106. Zhongzhu L., Yoshinao K., Fuxing Y., Mamoru K, and Kotobu N., (2007). Nucleation of Acicular Ferrite on Sulfide Inclusion during Rapid Solidification of Low Carbon Steel. *Isij International-Isij Int.* 47, 1781-1788.
107. Zhabrev L., Dmitry K., Mushnikov I. and Oleg P., (2020). The Coatings Breakdown Products Influence on the Gas Metal Arc Welding Parameters, *Coatings* 10, 5-12.
108. GE Inspection Technologies (2008). *Industrial Radiography, Image Forming Techniques*, USA: GE Inspection Technologies, 124-134.
109. Moore P.O., (2002). *Radiographic Testing, Nondestructive Testing Handbook*, (Third Edition), USA: American Society For Nondestructive Testing, 475-481.
110. Nacereddine N., Zelmat M., Belaïfa S. and Tridi M., (2005). Weld defect detection in industrial radiography based digital image processing. 3rd. Proceeding of World Academy of Science, Engineering and Technology. 2. SETIT, 27-31.
111. Kou S., (2003). *Welding Metallurgy*, (Second Edition) Wisconsin: Department of Materials Science and Engineering University of Wisconsin, 143-393.
112. TS EN ISO 5817, (2014). Kaynak - Çelik, nikel, titanyum ve bunların alaşımlarında ergitme kaynaklı (demet kaynağı hariç) birleştirmeler - *Kusurlar için kalite seviyeleri*, Teknik Kurul, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2-38.
113. ESAB, (2015). *Submerged Arc Welding, Xa00109620*, Laxa: ESAB AB, Se-695 81 Laxå, Sweden, 3-37.
114. Ceyhun V., (2014). Kaynak Metali ve Ana Malzeme Süreksizlikleri, *Ders Notları, Kaynak Teknolojisi Eğitim, Muayene, Uygulama ve Araştırma Merkezi*, Ege Üniversitesi, İzmir, 4-69.

115. International Atomic Energy Agency, (1992). *Industrial Radiography, Manual for the Syllabi Contained in IAEA-TECDOC-628: Training Guidelines in Non-destructive Testing Techniques*, Training Course Series No. 3, IAEA, Vienna, Austria, 243-247.
116. Mix, P. (2005). *Introduction to Nondestructive Testing, A Training Guide* (Second Edition). Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, USA, 301-407.
117. CGSB, (1981). *Manual on Industrial Radiography*, Ottawa: Canadian General Standards Board, 48-GP-5M, Ottawa, Canada, 101-113.
118. Carestream, (2014). *NDT Images An Overview, Your guide to proper processing and interpretation of radiography films for Non-Destructive Testing (NDT)*, New York: Carestream, Inc. 150 Verona Street Rochester, N.Y., USA, 4-82.
119. IAEA, (2008). *Introduction to Radiographic Examination, Nondestructive Examination (NDE) Technology and Codes, Student Manual*, Volume 1, Chapter 5.0, Vienna: IAEA, Technical Training Center, Vienna, Austria, 12-57.
120. Samatas C., (2012). *Welding Discontinuities, X-ray Films*, Thessaloniki, Greece, 2-12.
121. Akay, A.A., Kaya, Y. ve Kahraman, N. (2013). Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen X60, X65 ve X70 Çeliklerin Kaynak Bölgesinin Etüdü . *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3, 34-42.
122. Başyigit A.B. ve Solak B., (2020). The Effects of Flux Type on Mechanical and Microstructural Properties of S235 Structural Steel by Submerged Arc Welding, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(2), 659-666.
123. Çelik A., Özel, A., Akgün A, (1999). Farklı Malzemelerin Kaynağının Deneysel ve Teorik İncelenmesi, *Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Ankara, 21-30.
124. Lancaster, J. F. (1999). *Metallurgy of Welding*, (Sixth Edition), Cambridge, England: Woodhead Publishing, England, 51-177.
125. Francis R., (2017). *An Introduction to The Metallurgy of Steel and Its Alloys*, Version 1, Australia: Ashburton, Victoria, Australia, 71-90.
126. Apay S. ve Demirbaş U., (2020). S355J2+N Malzemelerin Elektrocüruf Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliği ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 940-950.
127. Gurson A.L., (1977), Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I – Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Transactions of the ASME, 99(1), 2-15.
128. Bahman A.R. and Alialhosseini E., (2010). Change in hardness, yield strength and UTS of welded joints produced in St37 grade steel, *Indian Journal of Science and Technology*, 1162-1164,

129. Türkmen M., Çalığülü U., Islak S. ve Gökdaş M., (2018), Weldability of Optim 700 MC-St37 Steel Pairby Plasma Transfer Arc (PTA) Welding Method, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 31-36.
130. Jerzy P., Dąbrowski R., Roźniata E., Kokosza A. and Dziurka R., (2014). Microstructure and mechanical properties of structural steel after dynamic cold working deformation. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(4), 1699-1702.
131. Zainulabdeen, A. (2019). Study of Fatigue Fractography of Mild Steel Used in Automotive Industry. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 15, 82-88.
132. Tarafder S., Ranganath V.R., Sivaprasad S., Johri P., (2003), Ductile fracture behaviour of primary heat transport piping material of nuclear reactors, *Sadhana*, February/April, 28(1-2), 167-186
133. Baser T.A., (2011), Fatigue Crack Propagation Behavior Of Brazed Steel Joints, EMPA-Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research Laboratory for Joining Interface and Technology, Dübendorf, Switzerland, 12-27.
134. Kumar P. and Sinha A.N., (2018), Microstructure and mechanical properties of pulsed Nd: YAG laser welding of St37 carbon steel, welding of St37 carbon steel, *International Conference on Robotics and Smart Manufacturing (RoSMA2018)*, *Procedia Computer Science*, 733–739
135. Çetinkaya C., Arabacı U. ve Akay A., (2006), Yakma Alın Kaynağı İle Kaynatılmış İki Farklı Çeliğin Kaynak Kalitesine Yığma Akım Zamanının Etkisi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 519-525,
136. Biner İ., (2015). Kaynaklı Numunelerin Tahribatlı Testlerinin Güvenilirliği ve Cihaz Kalibrasyonu, *Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 125-129.
137. Kahraman N., Gülenç B. ve Durgutlu A., (2005). Tozaltı Ark Kaynağı İle Kaynaklanan Düşük Karbonlu Çeliklerde Serbest Tel Uzunluğunun Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması. *G.Ü. Fen Bil. Ens Dergisi*, 18(3), 473-480.
138. Kossakowski P.G., (2017), Experimental Determination Of The Void Volume Fraction For S235JR Steel At Failure In The Range of High Stress Triaxialities, *Arch. Metall. Mater.*, 167-172
139. Pineau A., Benzerga A.A. and Pardoen T., (2016), Failure of metals I: Brittle and ductile fracture, *Acta Materialia* 107, 424-483
140. Okay, T., Hayriye E.E., Kaçar R. and Najafiharehtapeh A., (2015). Investigation Of The Weldability of S235JR-Hardox400 Steel, 2. *Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu (IISS'15)*, Karabük, 287-292.
141. Thakur A. and Aregawi G., (2019), Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of ST 37-2 Rear Trailing Arm, *International Journal of Current Engineering and Technology*, 9(1), 80-91.

- 142.Kobelco,(2015), *Weld Imperfections and Preventive Measures*, Kobe Steel Ltd, 5-912, Kita-Shinagawa-Ku, Tokyo, 141-8688 Japan, 1-19.
- 143.Guo J., Xu X., Jepson M.A. and Thomson R.C.,(2019), Influence of weld thermal cycle and post weld heat treatment on the microstructure of MarBN steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 174, 13-24,
- 144.Çiçek B, İş E.G., Gümüş E. ve Topuz P., (2018). The Effect of Welding Positions on the Weldability of X20CrMoV11-1 Steels. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 5 (1) , 75-83.
- 145.Safriwardy F.,(2018), The Effect of Welding Position on the Quality of SMAW Welding Electrode Joint AWS E 7018, *Proceedings of the 1st Workshop on Multidisciplinary and Its Applications WMA-1*, January 20-21, Indonesia, 278-285.
- 146.Çetinkaya C (1999). Düşük karbonlu çeliklerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), 279-293.



GAZİ GELECEKTİR...