

**DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK VE BASINÇLI
KAP ÇELİĞİNİN TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ
İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE BİRLEŞTİRMELERİN
MEKANİK/MİKRO YAPI ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**



**2019
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Hüseyin KÜÇÜKÖNER

**DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK VE BASINÇLI KAP ÇELİĞİNİN
TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE
BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK/MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Hüseyin KÜÇÜKÖNER

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

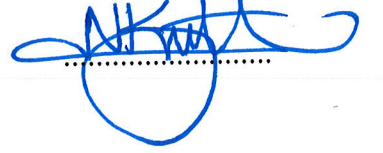
KARABÜK

Eylül 2019

Hüseyin KÜÇÜKÖNER tarafından hazırlanan “DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK VE BASINÇLI KAP ÇELİĞİNİN TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK/MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 27/09/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU (GÜ)



Üye : Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)



Üye : Prof. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)

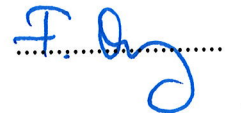


...../...../2019

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.





“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Hüseyin KÜÇÜKÖNER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK VE BASINÇLI KAP ÇELİĞİNİN
TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE
BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK/MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Hüseyin KÜÇÜKÖNER

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Eylül 2019, 96 sayfa

Bu çalışmada dubleks paslanmaz (AISI2205) çelik ve basınçlı kap (P355GH) çeliği tozaltı ark kaynak yöntemi ile kendi aralarında ve birbirleriyle alın kaynağı yapılarak birleştirilmiştir. Üç farklı birleştirme çiftinde de (AISI2205-AISI2205), P355GH-P355GH) ve (AISI2205-P355GH) 3.2 mm çapında ELOX UP 309L tozaltı kaynak teli ve Eliflux Bss- A tozaltı kaynak tozu kullanılmıştır. Tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirilen bu malzemeler yüzey ve yüzey altı hatalarının tespit edilebilmesi için öncelikle tahribatsız muayene yöntemleriyle (gözle muayene, manyetik parçacık muayenesi, ultrasonik muayene ve radyografik muayene) test edilmiştir. Daha sonra kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için bir takım tahribatlı testler (çekme testi, eğme testi, darbe çentik testi, sertlik testi) uygulanmıştır. Bunların yanında kaynak bölgesindeki yapısal değişimleri görebilmek için mikroyapı çalışması

yapılmıştır.

Gözle muayenesi yapılan kaynaklı numunelerin tamamında herhangi bir kaynak hatasına (dikiş geometrisinde orantısızlık, kökte sarkma, yanma olukları, yüzeye açık süreksizlik vb.) rastlanmamıştır. Yapılan tahribatsız muayeneler (manyetik parçacık testi, ultrasonik test ve radyografik test) sonucunda kaynak bağlantılarında standartların izin vermediği hiçbir kaynak hatası (gaz boşlukları, çatlaklar, çekinti boşlukları, yetersiz nüfuziyet, ergime eksikliği vb.) tespit edilmemiştir.

Çekme testleri sonucunda AISI2205-AISI2205 birleştirmelerinde kopma kaynak metalinden, diğer birleştirmelerde ise P355GH ana malzemedan gerçekleşmiştir. Yapılan eğme testleri sonucunda tüm birleştirmelerde kaynak bölgesinde gözle görülebilir bir kaynak hatasına rastlanılmamıştır. Çentik darbe testleri sonucunda en yüksek tokluk değeri AISI2205 malzemenin ITAB'ında, en düşük tokluk değeri ise P355GH kaynak metalinde ölçülmüştür. Yapılan sertlik ölçümlerinde en yüksek sertlik değeri AISI2205 malzemenin ITAB'ında, en düşük sertlik ise P355GH ana malzemedan ölçülmüştür. Mikroyapı çalışmaları sonucunda kaynak metalinin dentritik yapıda olduğu ve ana malzeme tarafında ergime sınırına bitişik bölgede tanelerin irileştiği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Dupleks paslanmaz çelikler (AISI2205), basınçlı kap çelikleri (P355GH), tozaltı kaynağı, tahribatlı ve tahribatsız muayene.

Bilim Kodu : 91511

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

JOINING OF DUPLEX STAINLESS STEEL AND PRESSURE VESSEL STEEL THROUGH SUBMERGED ARC WELDING AND INVESTIGATION OF MECHANICAL/MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF THE JOINTS

Hüseyin KÜÇÜKÖNER

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

September 2019, 96 pages

In this study, AISI2205 duplex stainless steel and P355GH pressure vessel steel were joined with each other and between each other through submerged arc welding process as the butt welds. The ELOX UP 309L filler metal with a diameter 3,2 mm and the ElifluxBss-A weld flux were used for the three different joint couples (AISI2205-AISI2205, P355GH-P355GH and AISI2205-P355GH). In order to define surface and subsurface defects of these three couple different joints, they were subjected to nondestructive tests (visual inspection, magnetic particle test, ultrasonic inspection and radiographical test). A set of destructive tests (tensile test, bending test, impact toughness test and hardness test) also carried out in order to determine mechanical properties of the joints. Besides, to examine microstructure changes on the weld zone, microstructural studies were performed.

As a result of visual inspection, no weld defects (irregular bead shape, irregular root form, under cut and discontinuity surface defects) were seen on all the joints. Similarly weld defects (gas porosities, macro cracks, shrinkage cavity, insufficient penetration and lack of fusion) with allowed standardized rules were not encountered with respect the nondestructive test results (magnetic particle test, ultrasonic test and radiographical test).

From the tensile test results, fracture was occurred on the weld metal of AISI2205 for the AISI2205-AISI2205 joint couples while for the other joint couples fracture were seen on the base metal of P355GH. There was no visible any weld defects on the weld zone of all the joints as a result of bending test. From the impact toughness test results, the highest toughness was obtained on the HAZ of AISI2205 whereas the lowest toughness was obtained on the weld metal of P355GH. With respect to microhardness test results, the highest microhardness measured at the HAZ of AISI2205 and the lowest microhardness measured at the base metal of P355GH. As a result of microstructure examines, the weld metal was dendritic and grain coarsening on the grains at the zone of adjacent to melting boundary was seen.

Key Word : Duplex stainless steels (AISI2205), pressure vessel steels (P355GH), submerged arc welding, destructive and nondestructive tests.

Science Code : 91511

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın en başından bitimine kadar tecrübelerinden istifade ettiğim ve bana her konuda destek olan Gazi Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Behçet GÜLENÇ, Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU ve Hacettepe üniversitesi öğretim görevlisi Dr. Halil KARAKOÇ'a teşekkür ederim.

Çalışma sürecinde bana yol arkadaşlığı yapan ve her türlü desteğini esirgemeyen Gökhan ÇAYIRHAN'a ve Tolga KURTULUŞ'a teşekkür ederim.

Ayrıca, bu Yüksek Lisans Tez Çalışmasını KBÜBAP-18-YL-094 numaralı proje ile destekleyen, KBÜ Rektörlüğüne ve BAP komisyonuna teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca büyük sabır gösteren ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan sevgili eşim Meryem KÜÇÜKÖNER'e tüm kalbimle teşekkür ederim. Bu çalışmayı biricik kızlarım Esmâ ve Aslıhan KÜÇÜKÖNER'e ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
BASINÇLI KAP ÇELİKLERİ.....	3
2.1. BASINÇLI KAPLARIN SINIFLANDIRILMASI	3
2.2. BASINÇLI KAPLARIN ÇEŞİTLERİ	4
2.3. BASINÇLI KAPLARDA MALZEME SEÇİMİ	5
2.4. BASINÇLI KAPLARDA KULLANILAN MALZEMELER	7
2.5. YENİM PAYI.....	7
2.6. BASINÇLI KAP TASARIMINDA KULLANILAN STANDARTLAR	8
2.7. BASINÇLI KAPLARA ETKİYEN YÜKLER	9
2.7.1. İçsel ve Dışsal Basınç	9
2.7.2. Statik ve Dinamik Yükler	10
2.7.3. Sıcaklık	10
2.7.4. Rüzgâr.....	10
2.7.5. Ağırlık.....	10
2.7.6. Titreşim.....	11

2.8. BASINÇLI KAPLARIN KAYNAĞI.....	11
2.8.1. Kullanılan Kaynak Yöntemleri.....	11
2.8.2. Kaynak Kabiliyetleri.....	11
 BÖLÜM 3	13
DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLER	13
3.1. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİĞİN TANIMI VE TARİHSEL GELİŞİMİ	13
3.2. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜRETİMİ.....	15
3.3. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN KULLANIM ALANLARI.....	15
3.4. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERDE OLUŞAN FAZLAR.....	17
3.4.1. Birincil Fazlar	17
3.4.1.1. Östenit Fazı	17
3.4.1.2. Ferrit Fazı.....	17
3.4.1.3. İkincil Fazlar	18
3.4.1.4. Sigma Fazı	18
3.4.2. Chi Fazı.....	18
3.4.2.1. Nitrürler (Cr_2N ve CrN).....	19
3.4.2.2. Karbürler (M_{23}C_6 ve M_7C_3)	19
3.5. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN ALAŞIM ELEMENTLERİ VE ETKİLERİ.....	19
3.5.1. Krom.....	20
3.5.2. Nikel	20
3.5.3. Mangan	20
3.5.4. Silisyum	20
3.5.5. Molibden.....	20
3.5.6. Karbon	21
3.5.7. Azot.....	21
3.6. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİĞİN METALURJİK ÖZELLİKLERİ	21
3.7. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİĞİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	23
3.8. KAYNAK KABİLİYETİ.....	26

BÖLÜM 4	27
TOZALTI ARK KAYNAĞI.....	27
4.1. TOZALTI ARK KAYNAĞININ TANIMI VE TARİHÇESİ	27
4.1.1. Tanımı.....	27
4.1.2. Tarihçesi	28
4.2. TOZALTI ARK KAYNAĞININ PRENSİPLERİ	28
4.3. TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMLERİ	29
4.4. TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİNDE KULLANILAN KAYNAK PARAMETRELERİ.....	29
4.4.1. Akım Şiddeti.....	30
4.4.2. Akım Yoğunluğu	30
4.4.3. Ark Gerilimi.....	31
4.4.4. Kaynak Ağızı	31
4.4.5. Kaynak Hızı	31
4.4.6. Kaynak Düzlemi ve Elektrot Açısı	32
4.4.7. Serbest Tel Uzunluğu	33
4.5. TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİNDE KULLANILAN KAYNAK TELLERİ.....	33
4.6. TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİNDE KULLANILAN KAYNAK TOZLARI.....	34
4.7. TOZALTI ARK KAYNAĞININ KULLANIM ALANLARI	34
4.8. TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	35
4.8.1. Avantajları	35
4.8.2. Dezavantajları	35
 BÖLÜM 5	37
GEÇMİŞTE YAPILMIŞ ÇALIŞMLAR.....	37
 BÖLÜM 6	45
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
6.1. KULLANILAN MALZEMELER.....	45
6.2. MALZEMELERİN KAYNAĞA HAZIRLIĞI	46
6.3. KAYNAK İŞLEMLERİ.....	47

Sayfa

6.4. KAYNAKLI BAĞLANTILARIN TAHRİBATSIZ MUAYENESİ.....	48
6.4.1. Gözle Muayene.....	48
6.4.2. Manyetik Parçacık Muayenesi.....	49
6.4.3. Ultrasonik Muayene.....	49
6.4.4. Radyografik Muayene	50
6.5. KAYNAK BAĞLANTILARININ TAHRİBATLI MUAYENESİ	51
6.5.1. Numune Hazırlama.....	51
6.5.2. Çekme Testi	52
6.5.3. Eğme Testi	53
6.5.4. Çentik Darbe Testi.....	54
6.5.5. Sertlik Testi.....	55
6.6. MAKRO VE MİKROYAPI İNCELEMELERİ	56
6.7. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ANALİZİ.....	57
 BÖLÜM 7	 59
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	59
7.1. GÖZLE MUAYENE	60
7.2. MANYETİK PARÇACIK MUAYENESİ.....	60
7.3. ULTRASONİK MUAYENE	61
7.4. RADYOGRAFİK MUAYENE	62
7.5. ÇEKME TESTİ	64
7.6. EĞME TESTİ.....	68
7.7. ÇENTİK DARBE TESTİ.....	69
7.8. SERTLİK TESTİ.....	73
7.9. MAKRO VE MİKROYAPI	76
7.9.1. Makro Yapı.....	76
7.9.2. Mikro Yapı.....	77
7.10. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU(SEM) SONUÇLARI	81
 BÖLÜM 8	 85
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	96



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Basınçlı kapların sınıflandırılmasının şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.2.	Çeşitli basınçlı kaplar	5
Şekil 3.1.	Farklı alanlarda kullanılan dubleks paslanmaz çelik örnekleri	15
Şekil 3.2.	%70 Fe içeren dubleks paslanmaz çelikte soğuma oluşan fazlar.....	17
Şekil 3.3.	Fe-Cr-Ni üçlü faz diyagramı	21
Şekil 3.4.	2205 Dubleks paslanmaz çelik alaşımında sıcaklıkla değişimi.....	21
Şekil 3.5.	Dubleks paslanmaz çeliklerin ve 316L östenitik paslanmaz çeliğin farklı sıcaklıklardaki akma dayanımları.....	23
Şekil 3.6.	Soğuk şekillendirmenin saf 2205 (EN 1.4462) dubleks paslanmaz çelikler üzerindeki etkisi	24
Şekil 4.1.	Tozaltı ark kaynak makinesi.....	25
Şekil 4.2.	Tozaltı ark kaynak akımının, dikiş geometrisine etkisi.....	28
Şekil 4.3.	Tozaltı ark kaynağı ile farklı hızlardaki nüfuziyet profilleri	29
Şekil 4.4.	Kaynak düzleminin kaynak dikişi ve nüfuziyet üzerine etkileri	30
Şekil 6.1.	Kaynağa hazırlanan numuneler	43
Şekil 6.2.	Tozaltı ark kaynak işlemi	44
Şekil 6.3.	Manyetik parçacık test ekipmanları	46
Şekil 6.4.	Ultrasonik muayene cihazı	47
Şekil 6.5.	Radyografi muayene ünitesi	48
Şekil 6.6.	Çekme testi numunesi teknik çizimi	49
Şekil 6.7.	Çekme test cihazı ve çekme numuneleri	50
Şekil 6.8.	Eğme test numuneleri.....	51
Şekil 6.9.	Çentik darbe testi numuneleri	51
Şekil 6.10.	Numunelerin sertlik ölçüm noktaları.....	52
Şekil 6.11.	Sertlik test cihazı	53
Şekil 6.12.	Optik mikroskop.....	54
Şekil 6.13.	Taramalı elektron mikroskobu çalışma şeması.....	55
Şekil 6.14.	Taramalı elektron mikroskobu.....	55
Şekil 7.1.	Kaynaklı birleştirmelerin makro görüntüleri.....	56

Şekil 7.2. Kaynaklı numunelerin florışıl test fotoğrafları.....	57
Şekil 7.3. Ultrasonik test raporu.....	58
Şekil 7.4. Kaynak yapılan malzemelerin radyografik görüntüleri.....	59
Şekil 7.5. İncelenen numunelerin radyografik test raporu.....	60
Şekil 7.6. Ana malzemelerin ortalama çekme grafikleri.....	61
Şekil 7.7. Ana malzemeler ve kaynaklı numunelerin ortalama çekme grafikleri	62
Şekil 7.8. Çekme testi sonucunda kopan numunelerin görüntüleri.....	63
Şekil 7.9. Eğme testi sonrasında numunelerin kep ve kök görüntüleri.....	65
Şekil 7.10. Çentik darbe testi sonrası kırık numuneler	67
Şekil 7.11. Ana malzeme ve kaynaklı malzemelerin tokluk değerleri	68
Şekil 7.12. Tüm numunelerden alınan ortalama sertlik değerleri grafiği.....	71
Şekil 7.13. Kaynaklı numunelerin kaynak metali (dikey) sertlik ölçüm sonuçları ...	72
Şekil 7.14. Birleştirmelerin makro görüntüleri.....	74
Şekil 7.15. AISI2205 ana malzemenin mikro yapısı	75
Şekil 7.16. P355GH ana malzemenin mikro yapısı	75
Şekil 7.17. AISI2205-AISI2205 birleştirmesinin mikroyapı görüntüsü	76
Şekil 7.18. P355GH / P355GH birleştirmesinin mikroyapı görüntüsü.....	77
Şekil 7.19. Dupleks/basınçlı kap çeliğinin mikroyapı görüntüsü	77
Şekil 7.20. AISI2205-AISI2205 birleştirmesinde kaynak metalinden alınan EDS analizleri	79
Şekil 7.21. P355GH-P355GH birleştirmesinde kaynak bölgesinden alınan EDS analizleri	79
Şekil 7.22. AISI2205-P355GH birleştirmesinde kaynak metalinden alınan EDS analizleri	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Literatürde malzeme seçiminde kullanılan kriterler	6
Çizelge 3.1. İlk nesil dökülmüş ve dövülmüş dubleks paslanmaz çelik türlerine ait kimyasal bileşimleri	14
Çizelge 3.2. İkinci nesil dubleks paslanmaz çelik sınıflarına ait kimyasal bileşimleri	15
Çizelge 3.3. Dubleks paslanmaz çeliklerin ASTM ve EN standartlarına göre mekanik özellikleri	23
Çizelge 3.4. Östenitik ve dubleks paslanmaz çeliklerin minimum uzama miktarları.....	25
Çizelge 4.1. EN 756'ya göre kaynak tellerinin kimyasal bileşimleri	33
Çizelge 6.1. AISI2205 ve P355GH çeliklerinin mekanik özellikleri.....	46
Çizelge 6.2. Ana malzeme ve ilave metalin kimyasal bileşimleri	46
Çizelge 7.1. Çekme test sonuçları ve ortalaması	64
Çizelge 7.2. AISI2205 ve P355GH ana malzeme tokluk değerleri.....	70
Çizelge 7.3. AISI2205 ve P355GH birleştirmelerden ölçülen tokluk değerleri	71
Çizelge 7.4. AISI 2205-AISI2205 kaynağında ölçülen sertlik değerleri	73
Çizelge 7.5. P355GH-P355GH kaynağında ölçülen sertlik değerleri.....	73
Çizelge 7.6. P355GH-AISI2205 birleştirildiği numuneden alınan sertlik ölçüm değerleri	74
Çizelge 7.7. EDS analiz sonuçları.....	83

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Creş	: krom eşdeğerliliği
Nieş	: nikel eşdeğerliliği
Al	: alüminyum
C	: karbon
Cu	: bakır
Cr	: krom
Fe	: demir
He	: helyum
Mn	: mangan
Mo	: molibden
N	: azot
Ni	: nikel
P	: fosfor
S	: kükürt
Ti	: titanyum
W	: tungsten
α	: ferrit
δ	: delta ferrit
γ	: östenit

KISALTMALAR

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
AOD	: Argon Oksijen Dekarbürizasyonu
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

AWS : American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu)
DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
DSS : Dupleks Stainless Steel (Dupleks Paslanmaz Çelik)
EN : European Norm (Avrupa Normu)
IIW : International Institute of Welding (Uluslararası Kaynak Enstitüsü)
ITAB : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
SAW : Submerged Arc Welding (Tozaltı Ark Kaynağı)
SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TSE : Türk Standard Endüstrisi
UV : Ultra Viyole
VOD : Vakum- Oksijen Dekarbürizasyonu

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde hızlı bir şekilde gelişmekte olan imalat sanayi, beraberinde farklı metal ve alaşımlarının çeşitli kaynak yöntemleri ile birleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Kimyasal ve mekanik özellikleri birbirinden farklı olan iki metalin birleştirilmesi işlemi aynı türden malzemelerin birleştirilmesine kıyasla daha problemlidir. Farklı metallerin; ergime derecelerinin de birbirinden farklı olması, ilave tel kullanılacaksa seçilecek telin iki malzemeye de uyum sağlaması ve kaynak parametreleri ayarlanırken her iki malzemenin de göz önünde bulundurulması gibi daha birçok faktör bu süreci oldukça zorlu kılmaktadır. Fakat kaynak teknolojisinin gelişmesiyle beraber farklı metallerin ve alaşımların ekstra bazı tedbirler alınarak çeşitli kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri mümkün olmaktadır [1-3].

Basıncılı kap çelikleri petrokimya, petrol ve gaz endüstrilerinde basınç ihtiva eden kaplarda yaygın olarak kullanılan bir malzeme türüdür. Üretim yöntemlerinin kolaylığı, düşük maliyeti ve kullanım alanlarındaki istenilen mekanik özellikleri optimum seviyede karşılıyor olması daha pek çok alanda tercih edilme sebeplerindendir. Ağırlıkça % 0,15 - % 0,30 oranlarında karbon içeren bu çelik türünün kaynak kabiliyeti ve çentik darbe tokluğu oldukça iyidir. Ön tedbir almadan kaynaklanabilir ve kaynaktan sonra ısıdan etkilenen bölgenin zararlı etkilerine pek rastlanmaz [4,5].

Dubleks paslanmaz çelikler yapısında iki fazı bir arada bulundurması sebebi ile östenik ve ferritik çeliklere kıyasla daha üstün mekanik özelliklere ve korozyon direncine sahip bir çelik türüdür. Ayrıca tavllanmış durumlarda bile yapısında tek faz bulunduran çelik çeşitlerine göre neredeyse iki kat daha yüksek akma dayanımı gösterir. Tokluk ve süneklik özelliklerinin yüksek olması ve kolay üretim gibi avantajlarından dolayı kullanım alanı son yıllarda oldukça genişlemiştir. Deniz suyuna karşı üstün koruma

sağlaması sebebi ile gemi imalatında da kullanım alanı oldukça artmıştır. Ayrıca kimya endüstrisi, kağıt endüstrisi, petrol ve gaz endüstrileri, nükleer endüstri, tuzdan arındırma üniteleri ve eczacılık sektörü başlıca kullanım alanlarıdır. Kaynak kabiliyeti çok iyi olmamakla beraber yeni nesil dubleks paslanmaz çeliklerde bu değer optimum seviyede geliştirilmiştir [6-14].

Yapılan bu çalışmada birleştirilecek malzemelerin et kalınlıklarının büyük olması nüfuziyetli bir kaynak yöntemi olan tozaltı ark kaynağını seçmemizde etkili olmuştur. Tozaltı kaynak yöntemi otomatik bir kaynak yöntemidir. Ark çıplak elektrod ile iş parçası arasında sürekli beslenen bir toz örtüsü altında gerçekleşir. Diğer kaynak yöntemlerine kıyasla aynı kaynak dikiş genişliklerinde daha derin nüfuziyet elde edilir. Ayrıca toz altında daha yavaş soğuyan kaynak bölgesi birleşmenin mekanik özelliklerine olumlu yönde tesir etmektedir. Oldukça verimli bir kaynak yöntemi olan tozaltı ark kaynağı imalat sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır [15,16].

Bu çalışmada iki farklı malzeme olan dubleks paslanmaz (AISI 2205) çelik ve basınçlı kap (P355GH) çeliği yapılan literatür çalışmalarının ışığında tozaltı ark kaynak yöntemi kullanarak alın altına birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin olası kaynak hatalarını tespit edebilme adına tahribatsız muayene yöntemlerinden (manyetik parçacık testi, ultrasonik test ve radyografik test) istifade edilmiştir. Ardından bir takım mekanik testlere tabi tutulmuş (çekme testi, eğme testi, darbe çentik testi, sertlik testi) ve mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

Bu çalışmadaki amacımız birleştirme sonrası kaynak bölgelerinin (ana malzeme, ITAB ve kaynak metali) statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarını belirleyerek, bu iki malzemenin birleştirilmesinde meydana gelebilecek olumsuzlukları iyileştirmeye çalışmaktır. Ayrıca iki farklı özellikteki bu malzemelerin uygun şartlar sağlanarak birleştirilebileceği ve birleştirme sonrası güvenli bir biçimde konstrüksiyonlarda kullanılabileceğini bilimsel olarak ortaya koymaktır.

BÖLÜM 2

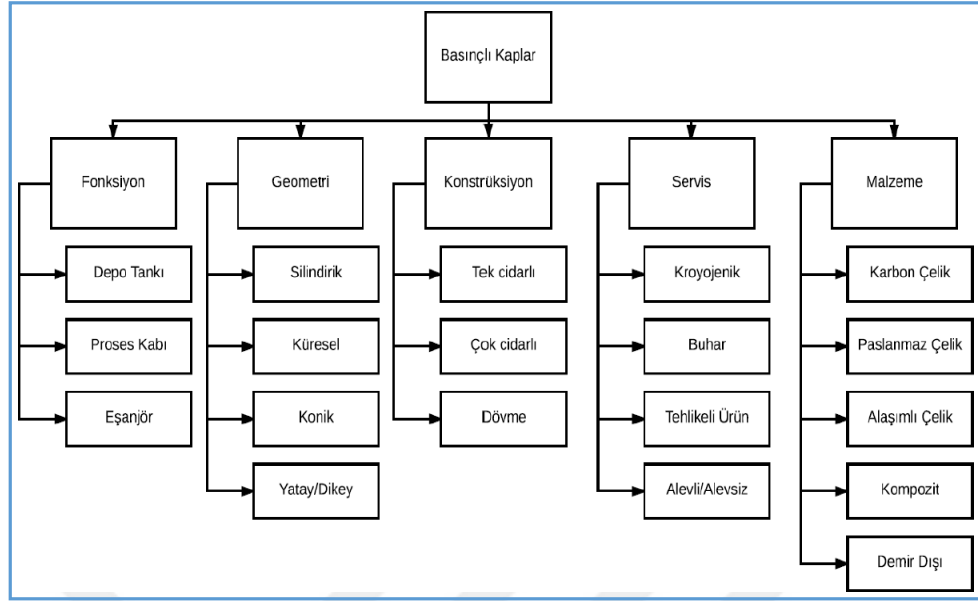
BASINÇLI KAP ÇELİKLERİ

Basınçlı kaplar; içlerinde akışkan taşıyan ya da depolayan, içsel ve dışsal basınçlara maruz kalan yüksek sızdırmazlık özelliği istenen depolar ve tanklar olarak tanımlanabilir. Basınçlı kaplarda bazı özel uygulamaların dışında genellikle iç basınç dış basınçtan fazladır [17]. TSE ye göre ise “basınçlı kap $0,490 \times 10^5$ Pa $\square$ 5 Atü ve daha yüksek basınçlı sıvı ve gazların üretiminde, taşınmasında ya da depolanmasında kullanılan küre, silindir biçimli küre, silindir ya da koni biçimli hacimlerin birleştirilmesinden oluşan atmosfere kapalı kaplardır” [18].

Basınçlı kapların emniyetle görevini yerine getirebilmesi için belirli aralıklarda kontrolden geçmesi gerekmektedir. Bu sebeple basınçlı kaplar tasarım, imalat ve kontrolleri ilgili standartlara uygun olarak yapılmalıdır. Ülkemizde basınçlı kapların kontrolünü ve muayenesini T.S.E ve Türk Loydu kurumları yapmakta ve takip etmektedir [19].

2.1. BASINÇLI KAPLARIN SINIFLANDIRILMASI

Basınçlı kapları konstrüksiyon, fonksiyon ve geometri gibi çeşitli parametrelere göre sınıflandırmak mümkündür. Farklı parametrelere göre sınıflandırılmış basınçlı kapların şeması Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Basınçlı kapların sınıflandırılmasının şematik gösterimi.

Basınçlı kaplar yukarda yapılan sınıflandırmanın dışında ince cidarlı basınçlı kaplar ve kalın cidarlı basınçlı kaplar olarak da sınıflandırılabilir. Burada cidar kalınlıklarının çaplarına oranı 1:10'dan küçük basınçlı kaplar ince cidarlı, 1:10'dan büyük basınçlı kaplar ise kalın cidarlı basınçlı kaplar olarak adlandırılırlar [20].

2.2. BASINÇLI KAPLARIN ÇEŞİTLERİ

Kullanıldıkları alanlar dikkate alınarak yapılan basınçlı kap çeşitleri aşağıdaki gibidir;

- Boru hatları,
- Kazanlar,
- Kompresörler,
- Hava tankları,
- LPG tankları,
- Hidrolik akışkan devreleri,
- Hidrofor (basınçlandırma sistemleri)
- Sınai gaz tankları,
- Soğutma üniteleri,
- Pnömatik akışkan devreleri,

- Gaz tüpleri,
- Kriyojenik tanklar,
- Otoklavlar (iç basınca dayanıklı kaplar) vb [19].

Şekil 2.2’de farklı alanlarda kullanılan basınçlı kap çelikleri gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Çeşitli basınçlı kaplar.

2.3. BASINÇLI KAPLARDA MALZEME SEÇİMİ

Basınçlı kaplarda malzeme seçiminde kullanılan kriterler malzemenin kullanılacak ortam koşullarına ve kabın maruz kalacağı sıcaklık, basınç ve korozyon gibi etkenlere göre farklılık göstermektedir [21]. Malzeme seçiminde kullanım koşulları ve malzeme kriterleri göz önüne alınarak aday malzemeler belirlenmelidir. Bir sonraki aşamada işlerinde en uygun olanın seçilerek malzeme seçim süreci tamamlanmalıdır [22,23].

Malzeme seçimi için yapılan literatür çalışmalarına bakıldığında Çizelge 2.1’de birbirinden farklı kriter seçeneklerinin kullanıldığı görülmektedir.

Çizelge 2.1. Literatürde malzeme seçiminde kullanılan kriterler [24].

Çalışma	Malzeme seçimi yapılan parça	Seçim kriteri
Wan ve chang [25]	Takım	Sertleştirilebilirlik, tokluk, yumuşama direnci, işlenebilirlik, malzeme maliyeti
Chen [26]	Takım	Sertleştirilebilirlik, tokluk, yumuşama direnci, işlenebilirlik, malzeme maliyeti
Tretheway ve arkadaşları [27]	Kaplama malzemesi	Sertlik, tokluk, young modülü, kayma modülü, çalışma sıcaklığı, aşınma direnci, kimyasal direnç, boyut, şekil, yüzey sertliği, malzeme içi bağ dayanımı ve biyokirliliğe karşı direnç
Jee ve kang [28]	Volan	Yorulma limiti, kırılma tokluğu, yoğunluk ve fiyat
Sapuan [29]	Otomobil pedal kutusu	Mekaniksel, fiziksel, kimyasal, ekonomik ve üretim kabulleri
Rao [30]	Labirent conta şeritler	Sünme direnci, oksidasyon direnci, ısı genleşme, akma gerilmesi, gerinim limiti, young modülü ve tokluk
Qian ve zhao [31]	Değişken şekilli mikroaktuatlar	Maksimum hareket gerginliği, maksimum çalıştırma siresi, darbe çalışma katsayısı, young modülü ve yoğunluk
Rao [32]	Kriyojenik sıvı nitrojen depolama tankı	Tokluk indeksi, akma dayanımı, young modülü, yoğunluk, ısı genleşme, termal iletkenlik ve özgül ısı
Çiçek k. çelik m. [33]	Gemilerde kullanılan ısı değiştiriciler	Dayanım, ısı iletkenlik, korozyon direnci ve fiyat
Shanian ve savadogo [34]	Kitlesel ısı işlem görmeyen silindir örtüsü	Yoğunluk, basınç dayanımı, nihai çekme gerilmesi, bükme kuvvet indeksi, statik yük indeksi, sertlik, akma gerilmesi, elastik modülü, ısı yayılımı, ısı iletkenlik, kalınlık, maliyet
Manshadi ve arkadaşları [35]	Kriyojenik sıvı nitrojen depolama tankı	Tokluk indeksi, akma dayanımı, young modülü, yoğunluk, ısı genleşme, termal iletkenlik ve özgül ısı
Bahraminajab M., ve Jahan A. [36]	Diz protezi	Dayanım, young modülü, kırılma tokluğu, korozyon direnci, aşınma direnci, biyoyuymululuk, ve kemik uyumluluğu
Rao [30]	Polimer elektrolit yakıt pilleri için metalik plaka	Elastik modülü, yoğunluk, mukavemet, termal stres, termal genleşme, iletkenlik, ısı yayılımı, kırılma tokluğu, elektrik direnci, maliyet, korozyon direnci, dönüşüm miktarı ve hidrojen geçirgenlik katsayısı
Jahan A. [37]	Kalça eklem protezi	Biyoyuymululuk, korozyon direnci, çekme gerilmesi, bağıl tokluk, bağıl aşınma direnci, elastik modül, özgül yoğunluk ve fiyat
Khabbaz ve arkadaşları [38]	Kriyojenik sıvı nitrojen depolama tankı	Tokluk indeksi, akma dayanımı, young modülü, yoğunluk, ısı genleşme, termal iletkenlik ve özgül ısı

Malzeme seçiminde önce maliyet unsurları değerlendirilir sonra da hammadde temini, malzemenin üretimi, işlenebilirliği, kaynak kabiliyeti gibi faktörler dikkate alınır. Malzeme seçimi esnasında; malzeme özellikleri, çekme mukavemeti, işletme sıcaklığı ve basıncı, korozyon etkisi, akma gerilmesi, kırılma analizi, emniyet katsayısı, aşınma

katsayısı, hidrojen etkisi faktörlerinin göz önüne alınması gerekir [19].

2.4. BASINÇLI KAPLARDA KULLANILAN MALZEMELER

Basınçlı kap imalatında kullanılan malzemelerin büyük bir kısmını karbonlu çelikler oluşturmakla birlikte, bazı özel durumlarda demir dışı metaller, ferritik çelikler ve östenitik çeliklerde basınçlı kap imalatında kullanılmaktadır. Basınçlı kabın içinde taşıdığı sıvının veya gazın imalatda kullanılan malzemenin korozyon direncinin üzerinde olacağı değerlendiriliyorsa ya da ürünü kirletme ve reaksiyona girme riski varsa bu durumda basınçlı kap mekanik özellikleri daha kuvvetli bir metalle veya metal dışı bir malzeme ile kaplanabilir. Nikel, kurşun ve ferritik alaşımlar basınçlı kapları kaplamakta kullanılan başlıca metallerdir. Metal dışı kaplama malzemeleri ise; donatılı beton, kauçuk, cam, plastikler, ısı yalıtım malzemeleri ve sıcağa dayanıklı malzemelerdir [39,40].

2.5. YENİM PAYI

Basınçlı kapların ve parçalarının istenen ömrü boyunca yenim, erozyon ve mekanik aşınma nedenleriyle malzeme et kalınlıklarında kayıplar söz konusu olabilir. Bu durumda malzeme kalınlığı tasarım hesapları sırasında bulunun kalınlıklardan daha büyük seçilmelidir.

6 mm'den küçük olan ve içerisinde su, buhar veya basınçlı hava bulunduran kaplar için "ASME Boiler and Pressure Vessel Code" yenim payı hesaplanan levha kalınlığının 1/6'sından az olamayacağını belirtir.

Diğer kaplar için yenim hızı tasarımcı tarafından tahmin edilmelidir. Yenim etkisi bilinmez ise, yenim payı tasarımcının deneyimine göre saptanır. Genellikle kaplar ve borular için senede 0.15 mm yenim hızı yeterlidir.

Basınçlı kabın istenen ömrünün saptanması ekonomik bir sorudur. Büyük kaplar genellikle daha uzun (15-20) yıl küçük kaplar ise daha kısa (8-10) yıl çalışma ömrüne göre tasarlanırlar. Basınçlı kabın çeşitli bölümlerine değişik yenim etkisi oluyorsa

kabın her tarafında aynı yenim payını hesaplanan kalınlığa eklemek gerekmez. Yenim hızını ölçmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlardan en yaygın olanı yenim problemleri ve ultrasonik kalınlık ölçme cihazlarının kullanılmasıdır.

Yenim etkisindeki kaplarda boşaltma deliği bulunmalıdır. İç yenim erozyon veya mekanik aşınmayla karşılaşan bütün basınçlı kaplarda adam girişi veya kontrol deliği olmalıdır. Yenimi önlemek amacıyla, yenime dirençli malzemeler kap malzemesinin bütünü olarak değil yalnızca iç kaplama olarak kullanılır. Mekanik aşınmayla karşılaşan kaplarda, kabın bu bölümü, kaynakla veya civata ile bağlanmış çarpma plakaları ile korunmalıdır. Yenim olan kaplarda, iç parçalar kap gövdesine sürekli kaynak edilmeli ve boşluklar ile dar ceplere izin verilmemelidir [41].

2.6. BASINÇLI KAP TASARIMINDA KULLANILAN STANDARTLAR

İçerisinde yüksek basınçlı ürünler bulundurması sebebiyle basınçlı kapların tasarımlarına azami ölçüde dikkat edilmesi gerekmektedir. Standartlara uygun olarak imal edilmeyen tasarımlar tehlike arz ettiği için can ve mal kayıplarına sebep olabilir. Bu tür kazalara engel olmak için dünyada basınçlı kapların konstrüksiyonu için çeşitli standartlar bulunmaktadır. Bu standartlarda basınçlı kapların tasarımı, imalatı ve gözetimine dair kurallar tanımlanmıştır [39].

Farklı ülkelerde kullanılan standartların bazıları aşağıda sıralanmıştır [42].

- TSE: TS 1203, TS 13222-1, TS 736, TS 377, TS 497, TS 12952,
- Türk Loydu: TL Cilt B Kısım 4- Makine Kuralları Bölüm 14- Basınçlı Kaplar
- Almanya: AD 2000,
- Almanya: TRG Technische Regeln Druckgase,
- ABD: ASME Boiler and Pressure Vessel Code,
- İngiltere: PD 5500,
- İtalya: Italian Pressure Vessel Code ANCC,
- Avusturalya: AS 1210, Unfired Pressure Vessel and Class 1H,
- Hindistan: IS 2825, Code for Unfired Pressure Vessel,
- İsveç: Swedish Pressure Vessel Codes,

- Japonya: Japanese Pressure Vessel Code,
- Japonya: Japanese Standards for Pressure Vessel Construction,
- Rusya: Regeln für Entwurf und Betriebssicherheit von Druckbehältern,
- Fransa: CODAP,
- Hollanda: Regeis Voor Toestellen,
- Belçika: Reglement General Pour la Protection Travail (RGPT),
- Avrupa: EN 13445.

2.7. BASINÇLI KAPLARA ETKİYEN YÜKLER

Basınçlı kaplar çoğu zaman yüksek basınç altında çalıştıklarından dolayı kullanımları sırasında hayati riskler söz konusu olabilmektedir. Bu riskleri en az seviyeye indirmek ve basınçlı kapların söz konusu çalışma koşullarında emniyetle görevlerini yerine getirebilmesi insan hayatı bakımından önem arz etmektedir. Bu sebepten dolayı bir basınçlı kap tasarımında o kaba etki eden bütün kuvvetler tespit edilmeli ve bu kuvvetlerin kaba nasıl bir etki oluşturacağı önceden hesaplanmalıdır. İmalat aşamasından sonra ilgili standartlar dahilinde bütün güvenlik kontrolleri yapılmalıdır. Basınçlı kaplara etkiyen kuvvetler aşağıda sıralanmıştır [43].

- İçsel ve dışsal basınç,
- Statik ve Dinamik yükleme,
- Sıcaklık,
- Rüzgar,
- Ağırlık (ölü yükler),
- Titreşimler.

2.7.1. İçsel ve Dışsal Basınç

İçsel ve dışsal basınç, basınçlı kapların tasarımında kullanılan temel parametrelerden biridir. Sadece içten basınca maruz kalan kapların tasarımında yalnız iç basınç hesaplanır. Sadece dıştan gelen bir basınca maruz kalan kaplar da ise yalnız dış basınç hesaplanır [43].

2.7.2. Statik ve Dinamik Yükler

Basınçlı kap tasarımlarında kabın kendi öz yüklerinin dışında, örneğin kabın taşınması sırasında meydana gelmesi muhtemel, statik ya da dinamik yükleri de hesaplanması ve tasarım yüküne eklenmesi gerekmektedir [43].

2.7.3. Sıcaklık

Sıcaklık doğrudan bir tasarım yükü olmamakla beraber çevresel şartların basınçlı kaba etkilerinin analizinde dikkate alınması gereken bir parametredir. Yüksek sıcaklıkta çalışan basınçlı kaplarda sıcaklık farkı ısıl gerilmelerin oluşmasına neden olacağından bu tür ortamlarda çalışacak kaplar için termal genleşmesi düşük olan malzemeler tercih edilmelidir [43].

2.7.4. Rüzgâr

Rüzgâr farklı hızlarda gerçekleşen türbülanslı bir akış olarak tanımlanabilir. Rzgrın yatay yönlü yani yer yüzüne paralel olduğu kabul edilir ve yükseklerle çıktıkça hızının arttığı bilinmektedir.

Dikey konumlarda çalışan basınçlı kaplarda rzgr önemli bir parametredir özellikle ayakların tasarımı yapılırken rzgr yönüne dikkat edilmesi gerekmektedir. Basınçlı kaplara etkiyen rzgrın kabın yüksekliği ile doğrudan orantılı olduğu düşünülürse aşırı rzgrlı bölgelerde çok yüksek tasarımlar seçilmelidir [43].

2.7.5. Ağırlık

Basınçlı kaplarda ağırlıklar ekseriyetle, kabın bağlantı elemanlarının ağırlıklarından ibarettir. Basınçlı kaba hiçbir bağlantı ve yükleme yapılmadan alınan yük değerine boş yük veya l yük denir. Basınçlı kabın ağırlığı, eksen kaçıklığı bulunmuyorsa ve yk bileşkesi kap eksenini ile çakışıyorsa, sadece basma gerilmesi meydana getirir, bu da genellikle önemsiz kabul edilir [43].

2.7.6. Titreşim

Basınçlı kaplarda titreşime yol açan temel sebep rüzgardır. Basınçlı kaplarda kullanılan malzemelerde yorulmaya sebebiyet verdiği için büyük doğal titreşim Periyodu sınırlandırılmalıdır [43].

2.8. BASINÇLI KAPLARIN KAYNAĞI

Basınçlı kaplar içlerinde sıvı ya da gaz bulundurması sebebiyle kaynaklı bağlantıların yüksek kalitede ve sızdırmaz özelliğe sahip olması gerekmektedir. Basınçlı kapların kaynaklı birleştirmelerinde bazı özel durumlar haricinde alın kaynağı tercih edilmeli ve kaynak hatalarına izin verilmemelidir. Kaynak bölgesi tahribatsız muayene yöntemleriyle test edildikten sonra sızdırmazlık testinden de geçirilmelidir [44].

2.8.1. Kullanılan Kaynak Yöntemleri

Basınçlı kapların kaynağında ergitmeli kaynak yöntemleri tercih edilir. Bu kaynak yöntemlerinden bazıları aşağıda sıralanmıştır; [19].

- Örtülü elektrod kaynağı,
- MIG-MAG kaynağı,
- TIG kaynağı,
- Tozaltı ark kaynağı.

2.8.2. Kaynak Kabiliyetleri

Kaynak kabiliyeti kavramı kaynak biliminde oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Bu kavram bir malzeme kaynak edilirken önemli oranda tedbirin alınıp alınmadığını gösterir. Bir metal veya alaşım yüksek bir kaynak kabiliyetine sahip dendiği zaman, hiçbir özel tedbire başvurmadan, her türlü çalışma şartları altında, tatminkar bir kaynak kalitesi elde edilebileceği anlamına gelir.

Basınçlı kapların imalinde kullanılan malzemeler genellikle karbonlu çeliklerdir. Bu

Çeliklerin kaynak kabiliyeti içerisinde bulundurduğu karbon miktarıyla doğrudan orantılıdır. Teorik olarak karbon miktarı arttıkça kaynak edilebilirlik dūřmektedir. Az ve orta karbonlu çeliklerin sırasıyla maksimum % 0,25 ve % 0,55 oranında karbon bulundurdıklarından kaynak kabiliyetleri oldukça iyidir. Bu tūr çelikler kaynak işlemi öncesinde hiçbir özel tedbire gereksinim duymadan kolaylıkla kaynaklanabilirler. Bununla birlikte karbonlu çeliklerde karbon oranı % 0,55'in üzerine çıktığı zaman kaynak öncesi n tav gibi bazı özel tedbirlerin alınması gerekmektedir. Ayrıca malzemenin içerisindeki silisyum, mangan, fosfor ve kükürt kaynak kabiliyetini dūřurmektedir.



BÖLÜM 3

DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLER

3.1. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİĞİN TANIMI VE TARİHSEL GELİŞİMİ

Dubleks paslanmaz çeliklerin içyapısında iki faz bir arada bulunur. Çift fazlı paslanmaz çelik olarak da adlandırılan bu çelik türü östenitik ve ferritik çeliklere kıyasla her birinden daha üstün özellikler gösterir. Östenitik çeliklere göre daha iyi gerilme korozyonu dayanımına, ferritik çeliklerle göre ise daha iyi tokluk ve süneklik değerlerine sahiptirler. Bunların yanında dubleks çelikler tavlınmış durumda bile 550 ile 690 MPa akma dayanımı gösterirler ki, bu değer, fazların tek başına bulunduğu çelik türlerindeki akma dayanımının yaklaşık iki katıdır [45].

Dubleks paslanmaz çelikler yüksek mekanik özelliklere sahip, korozyon direnci iyi ve kolay üretim gibi özelliklerin bir arada toplandığı, geniş kullanım alanları olan bir paslanmaz çelik türüdür. Dupleks paslanmaz çelikler 1980'li yıllardan itibaren, üretim maliyetinin daha düşük olması, mekanik özelliklerin daha üstün olması ve korozyon direncinin daha kuvvetli olması gibi faktörlerden dolayı östenitik ve diğer paslanmaz çelik türlerine kıyasla daha çok tercih edilir duruma gelmiştir [46-48].

Dubleks paslanmaz çelikler ilk defa 1930 yılında İsviçre'de üretilmiştir. O yıllarda üretilen bu çelikler alaşım elementi olarak yalnızca Cr, Ni ve Mo içermekteydi ve yüksek karbonlu östenitik paslanmaz çeliklerde görülen taneler arası korozyona çözüm üretmek amacıyla geliştirilmişti. İlk Nesil Dupleks Paslanmaz Çelikler olarak adlandırılan bu çelik türleri östenitik paslanmaz çeliklere göre sıcak yırtılma dayanımı daha iyi olmasına rağmen yüksek karbon oranına sahip olması ve kaynak işleminden sonra tane sınırındaki korozyon özelliklerinin ana metalden daha düşük olması kullanım alanını oldukça sınırlamıştır [49,50]. İlk nesil döküm ve dövülmüş dupleks paslanmaz çeliklere ait kimyasal bileşim Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. İlk nesil dökülmüş ve dövülmüş dubleks paslanmaz çelik türlerine ait kimyasal bileşim [50].

İlk Nesil Dubleks Paslanmaz Çelikler									
Kalite	UNS No	EN No	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu
329	S32900	1.4460	0,08	23-28	2,5-8	1,0-2,0	-	1	-
**	S31500	1.4424	0,03	18-19	4,3-5,2	2,5-3	0,05-0,1	-	-
	S32404		0,04	20,5-22,5	5,5-8,5	2,0-3,0	0,2	2	1,0-2,0

Sonuç olarak metalürjik değişkenlerin hassas olarak ayarlanamaması ve tek şirket ürünü olması gibi sebeplerden dolayı bu ilk nesil dubleks paslanmaz çelikler beklentileri karşılayamamış ve kullanımı yaygınlaşamamıştır.

Elektrik ark fırınlarında rafine tekniklerinin geliştirilmesiyle (Argon-oksijen dekarbürizasyonu-AOD), C oranına sahip malzeme üretimi, ısının daha kontrol edilebilir hale gelmesi ve yapı içerisinde bulunan empürite miktarlarının azaltılması 1968 yılında son ürün kalitesinde önemli bir artış sağlanmıştır. Argon-oksijen dekarbürizasyonu tekniği sayesinde ITAB'ın korozyon direncini ve tokluğunu iyileştirici özellikler sağlayan azotun alaşım elementi olarak yapı içerisine ilave edilmesi mümkün olmuştur. Azot yapı içerisindeki zararlı intermetalik seviyelerini azaltmasının yanında östenit kararlılığını da arttırıcı bir etkiye sahiptir [49,50]. Çizelge 3.2'de ikinci nesil dubleks paslanmaz çelik sınıflarına ait kimyasal bileşimler verilmiştir.

Çizelge 3.2. İkinci nesil dubleks paslanmaz çelik sınıflarına ait kimyasal bileşimler [50].

İkinci Nesil Dubleks Paslanmaz Çelikler										
Kalite	UNS No	EN No	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	W	Cu
Yalın										
	S32001	1.4482	0,03	19,5-21,5	1-3	0,6	0,05-0,17	4-6	-	1
	S32101	1.4162	0,04	21-22	1,35-1,7	0,1-0,8	0,2-0,25	4-6	-	0,1-0,8
	S32202	1.4062	0,03	21,5-24	1-2,8	0,45	0,18-0,26	2	-	-
	S82011		0,03	20,5-23,5	1-2	0,1-1	0,15-0,27	2-3	-	0,5
2304	S32304	1.4362	0,03	21,5-24,5	3-5,5	0,05-0,6	0,05-0,2	2,5	-	0,05-0,6
		1.4655	0,03	22-24	3,5-5,5	0,1-0,6	0,05-0,2	2	-	1,0-3,0
Standart										
	S32003		0,03	19,5-22,5	3-4	1,5-2	0,14-0,2	2	-	-
2205	S31803	1.4462	0,03	21-23	4,5-6,5	2,5-3,5	0,08-0,2	2	-	-
2205	S32205	1.4462	0,03	22-23	4,5-6,5	3,0-3,5	0,14-0,2	2	-	-

3.2. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜRETİMİ

Dubleks paslanmaz çeliği konvansiyonel bir indüksiyon fırını veya elektrik ark fırınında üretmek mümkündür. Bu işlemin akabinde (argon-oksijen dekarbürizasyonu) AOD veya (vakum-oksijen dekarbürizasyonu) VOD fırınında işlem görürler. Bu aşamalardan sonra deoksidasyon ile rafinasyon tamamlanmakta, hemen ardından solüsyona alma ve suda su verme ısıl işlemi uygulanmaktadır [51,52].

3.3. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN KULLANIM ALANLARI

Dubleks paslanmaz çeliklerin kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır;

- Deniz suyu borulama sistemleri,

- Kimyasal reaktör boruları,
- Yangın söndürme sistemleri
- Isı değiştiriciler,
- Baca gazı filtreleri,
- Asetik ve fosforik asit taşıma sistemleri,
- Yağ ve gaz endüstrisi ekipmanları,
- Jeotermal ısı değiştiriciler,
- Kimyasal madde tankerleri,
- İnsanlar için implant malzemeleri,
- Tuzdan arındırma fabrikaları,
- Kağıt üretimi endüstrileri [52,53].

Şekil 3.1’de farklı alanlarda kullanılan dubleks paslanmaz çelik örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Farklı alanlarda kullanılan dubleks paslanmaz çelik örnekleri a) S32101 ve S32205 dubleks paslanmaz çelikler ile inşa edilen çok aşamalı tuzdan arındırma üniteleri [54], b) Deniz aşırı petrol ve gaz uygulamalarında kullanılan 2507 dubleks paslanmaz çelik borular [55], c) New Doha Uluslararası Havaalanı’nın dubleks paslanmaz çelik çatısı [54].

3.4. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERDE OLUŞAN FAZLAR

Dubleks paslanmaz çelikler yapılarında, birincil (δ ve γ) ve ikincil (γ_2 , σ , χ , π , karbürler ve nitrürler) fazları bulundurmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda yapıda oluşan ikincil fazlar, intermetalik fazlardır [56].

3.4.1. Birincil Fazlar

Dubleks çeliklerde birincil fazlar; içerisinde % 18-28 krom ve % 4,5-8 aralığında nikel alaşımların bulunduğu paslanmaz çeliklerin 1000-1050 °C’de tavlaniıp hızlı bir şekilde soğutulmak suretiyle elde edilen östenit ve ferrit fazlarından meydana gelmektedir [49].

3.4.1.1. Östenit Fazı

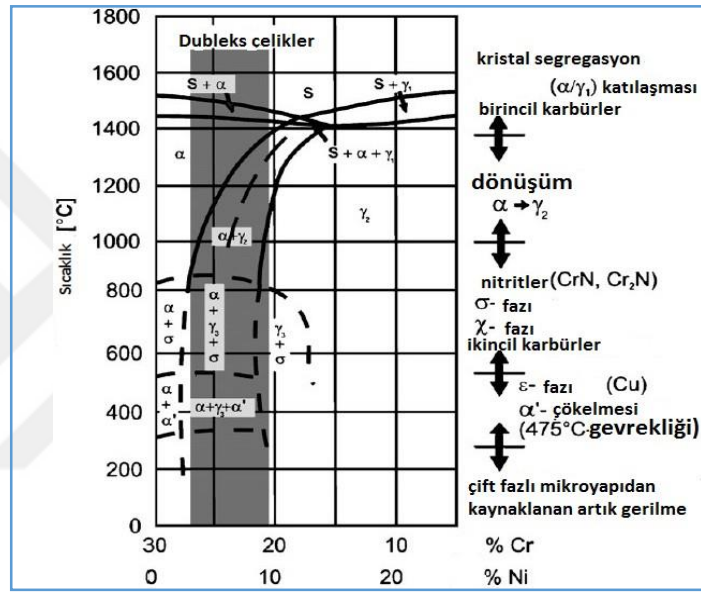
Yapısında % 70 Fe ve % 25 Cr içeren dubleks paslanmaz çelikler ferrit olarak katılaşmaktadır. Östenit ötektit dönüşüm ile $\alpha/(\alpha+\gamma)$ ara yüzeylerinde çekirdeklenmeye başlamaktadır. Yapı içerisindeki östenit oranı soğuma hızına bağlıdır. Soğuma hızlarının düşük olduğu durumlarda östenit oluşumu daha kolaydır. İlk nesil dubleks paslanmaz çeliklerin muhteviyatında azot elementin olmadığı daha önceden ifade edilmişti. Azotun Östenit kararlaştırıcı element olarak yapı içerisine girmesiyle ferrit-östenit dönüşümünün daha yüksek sıcaklıklarda meydana geldiği görülmüştür [49].

3.4.1.2. Ferrit Fazı

Yapısında ferrit fazı bulunması sebebiyle dubleks paslanmaz çelikler östenitik çelik türlerine alternatif olarak üretilmiştir. Netice itibariyle üretilen bu çelikler klorlu ortamlarda östenik çeliklere kıyasla daha yüksek gerilmeli korozyon dayanımına sahip olmuşlardır. Dubleks paslanmaz çeliklerde yapı içerisindeki alaşım elementleri yayılması ferrit fazı içerisinde daha hızlı gerçekleşmesi nedeniyle ikincil fazlar ferrit fazı içerisinde büyümektedir. Bu nedenle yapı içerisindeki ferrit oranının malzemenin mekanik ve korozyon özelliklerine doğrudan tesir ettiği söylenebilir [49].

3.4.1.3. İkincil Fazlar

Yapıdaki alaşım elementleri oranlarının yüksek olması sebebiyle dubleks paslanmaz çelikler karmaşık bir katılaşma davranışı sergilemektedir. Bu tür çeliklerde daha önce belirtildiği üzere yapıda birincil faz olarak ferrit ve östenit bulunmaktadır; bunların dışında ise sıcaklık değişimine bağlı olarak farklı fazlar da çekirdeklenmektedir. İçerisinde % 70 Fe bulunan dubleks paslanmaz çelikte soğuma sırasında oluşan fazlar Şekil 3.2’te gösterilmiştir [49].



Şekil 3.2. %70 Fe içeren dubleks paslanmaz çelikte soğuma sırasında oluşan fazlar [57].

3.4.1.4. Sigma Fazı

Krom ve molibden zengin, 650-950 °C sıcaklık aralığında meydana gelen Sigma fazı; oldukça sert ve gevrek bir çöktürdür. Yapı içerisinde korozyon direncini ve malzemenin darbe özelliklerini düşürücü özelliğe sahiptir. δ/γ arayüzeylerinde ve δ/δ tane sınırlarında 750 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çekirdeklenir [51,58].

3.4.2. Chi Fazı

700-900 °C sıcaklık aralığında meydana gelen chi fazı, σ fazına kıyasla daha düşük

seviyelerde çökelme kabiliyetine sahiptir. χ fazının çökmesi; İntermetalik oluşturan elementlerce zengin ferritin, uzun süre 700°C civarındaki sıcaklıklara maruz kalması sonucu oluşur. χ fazı da sigma gibi δ/γ ara yüzeyinde oluşur ve ferrit tanelerinin içine doğru büyür [58].

3.4.2.1. Nitrürler (Cr_2N ve CrN)

Dubleks paslanmaz çeliklerde azot yapı içerisinde korozyon direncini arttırmak ve östenit fazını kararlaştırmak amacıyla eklenir. Sıcaklık değeri 1050 °C'nin üzerlerine çıkıldığında, hacimsel olarak ferrit büyür ve katılaşmanın başladığı hattın altında yapı tamamen ferritikken bazı alaşımlarda östenit fazını içerir. Ferrit fazı içerisindeki azot çözünürlüğünün yüksek seviyelerde olduğu bu sıcaklıklarda ferrit azotça doymuş hale gelir. Fakat soğuma esnasında azot çözünürlüğü düşer ve ferrit taneleri içinde iğne benzeri Cr_2N çökeltileri oluşur. CrN ise dubleks paslanmaz çeliklerin kaynak işlemleri sırasında ITAB'da meydana gelir [51,58].

3.4.2.2. Karbürler (M_{23}C_6 ve M_7C_3)

Karbon oranı % 0,02'den daha az olması sebebiyle dubleks paslanmaz çeliklerde karbür oluşumu nadir olarak ortaya çıkar. % 0,03 oranlarında karbon içeren dubleks alaşımlarında ise 650-950 °C sıcaklık aralığında M_{23}C_6 tipi karbür yapılar çöker. Çökelme yoğun olarak δ/γ arayüzeylerinde; kromca zengin ferritin, kromca zengin östenitle kesiştiği noktalarda meydana gelmektedir. 950-1050 °C sıcaklık aralığında δ/γ arayüzeyinde oluşan M_7C_3 ; Oluşum yaklaşık 10 dakika sürdüğünden dolayı bu yapı su verme teknikleriyle engellenebilir [58].

3.5. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN ALAŞIM ELEMENTLERİ VE ETKİLERİ

Dubleks paslanmaz çeliklerde başlıca alaşım elementleri karbon, nikel ve kromdur. Bu elementler malzemenin korozyon direncine ve mekanik özelliklerine olumlu yönde tesir etmektedir. Karbon, krom ve nikelin dışında yapı içerisine kullanım amaçlarına göre alüminyum, bakır, titanyum, azot, molibden ve tungsten gibi değişik alaşım

elementleri de dahil edilebilmektedir [52].

3.5.1. Krom

Dubleks paslanmaz çeliklerde krom önemli bir alaşım elementidir. Krom malzemenin korozyon direncini arttırdığı gibi malzemeye asidik ortamlarda da çalışma kabiliyetini kazandırması, dubleks paslanmaz çeliklere kattığı önemli avantajlarından. Ayrıca krom yapı içerisinde ferrit fazı oluşmasına da önemli katkı sağlamaktadır; öyleki % 12'den fazla krom içeren demir-krom alaşımlarında yapı % 100 ferrit olarak katılaşmaktadır [52].

3.5.2. Nikel

Dubleks paslanmaz çeliklerde nikelin yapı içerisinde östenit fazı oluşturma kabiliyetinin yanı sıra fazların oda sıcaklığı altında kararlı olmasını sağlayıcı etkileri de bulunmaktadır. Nikelin malzemenin tokluk değerlerini arttırdığı bilinmekle beraber malzemenin gerilmeli korozyon direncini de düşürdüğü gerçeği de göz ardı edilmemesi gereken bir husustur [59].

3.5.3. Mangan

Mangan dubleks paslanmaz çeliklerde östenit fazını desteklemekle beraber malzemenin çekme mukavemetini ve aşınma direnci özelliklerini de iyileştirdiği bilinmektedir [52].

3.5.4. Silisyum

Silisyum ekseriyetle bütün paslanmaz çeliklerde yapı içerisine deoksidasyon amacıyla eklenen bir alaşım elementidir. Ayrıca tüm paslanmaz çeliklerde nitrik asitli ortamlara karşı koruma sağlar. Dubleks paslanmaz çeliklerde oransal olarak % 1'in üzerinde olması malzemeye olumsuz etkilerinden dolayı istenilen bir durum değildir [52].

3.5.5. Molibden

Molibden dubleks paslanmaz çeliklerde çukurcuk ve aralık korozyonuna karşı

korunma sağlama amacıyla yapı içerisine ilave edilen bir alaşım elementidir. Ayrıca yapıdaki ferrit fazı oluşumunu da desteklediği bilinmektedir [52].

3.5.6. Karbon

Dubleks paslanmaz çeliklerde karbon östenit oluşturma kabiliyeti bakımından önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte krom karbür çökmesini engellemek amacıyla ekseriyetle yapı içerisine ilave edilen karbon oranı % 0.03 değerlerini geçmemektedir [52].

3.5.7. Azot

Dubleks paslanmaz çeliklerde azotun başlıca görevi yapı içerisindeki ferrite karşı östenit oluşturma kabiliyetinin olmasıdır. Bunun yanında bir alaşım elementi olarak azotun yapıya belli oranlarda ilavesi malzemenin mukavemetini arttırmakla beraber korozyon direncine de olumlu manada ciddi katkı sağlamaktadır [52].

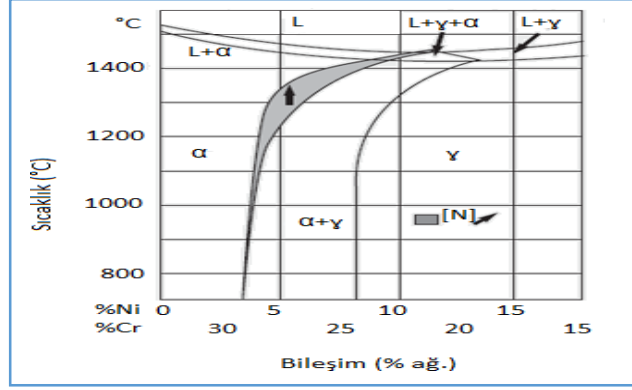
3.6. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİĞİN METALURJİK ÖZELLİKLERİ

Dubleks paslanmaz çeliklerin metalürjik davranışlarını Şekil 3.5'te gösterilen demir-krom-nikel üçlü faz diyagramını kullanarak analiz etmek mümkündür. Bu diyagramdaki % 68 demir bölümü incelendiğinde katılaşmanın δ -ferrit olarak başladığı ve sıcaklığın 1000 °C'lere çıkmasıyla birincil östenit fazına dönüştüğü görülmektedir. Dubleks paslanmaz çeliklerde ferrit-östenit dengesi düşük sıcaklıklardan çok fazla etkilenmemekle birlikte bu sıcaklıklarda yapı içerisinde soğuma sırasında nitrürler, karbürler, sigma fazı ve diğer intermetalik fazlar oluşur [60].

Dubleks paslanmaz çelik üretim aşamasında çelik içerisindeki östenit ve ferrit fazlarının oranları malzemenin termal geçmişine ve bileşimine bağlıdır. Şekil 3.3'te verilen krom- nikel üçlü faz diyagramı incelendiğinde malzeme bileşimindeki küçük farklılıklar bile ferrit-östenit dengesini değiştirdiği görünmektedir. Bu tür çeliklerin mikro yapısındaki faz oranları aşağıdaki eşitlikler kullanılarak belirlenebilir [58].

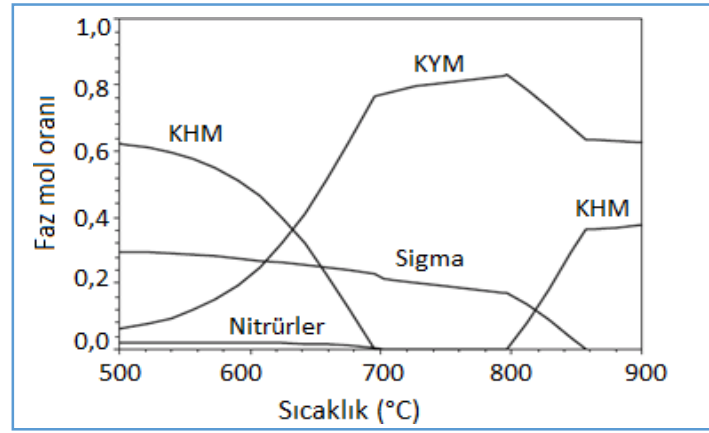
- $Cr_{eş} = \%Cr + 1,73\%Si + 0,88\%Mo$

- $Ni_{eş} = \%Ni + 24,55\%C + 21,75\%N + 0,4\%Cu$
- $\%Ferrit = -20,93 + 4,01C_{reş} - 5,6Ni_{eş} + 0,016T$



Şekil 3.3. Fe-Cr-Ni üçlü faz diyagramı [55].

Dubleks paslanmaz çeliklerde Cr, Mo, Ni ve N değerleri ve malzemeye uygulanan ısı işlemlerin kontrol altında tutulmasıyla arzu edilen östenit-ferrit faz dengesini sağlamak mümkün olur. Fakat, östenite dönüşecek ferrit miktarını soğuma hızı belirlediği için, yüksek sıcaklıklara çıkıldıktan sonra soğuma, arzu edilen faz dengesini elde etmeyi güçleştirecektir. Hızlı soğuma oranları ferrit lehine olduğu için, ısı işlem sonrasında dengede olması istenenden fazla miktarda ferrit oluşması söz konusudur. Örneğin; düşük ısı girdisiyle kaynak yapıldığında, ITAB’da yüksek miktarda ferrit oluşabilir [58]. Şekil 3.4’ten anlaşılabacağı üzere 2205 dubleks paslanmaz malzeme 700 °C’ye kadar ısıtıldığında δ-ferrit; γ ve σ fazlarına ayrıştığı görünmektedir. 700-800 °C sıcaklık aralığında ferrit görülmemekte ve sigma fazı; sıcaklık arttıkça kısmen östenite dönüşmektedir. 800 °C’de δ-ferrit yeniden ortaya çıkmakta ve sigma fazı 860 °C civarına kadar yapıda görülmektedir [61].



Şekil 3.4. 2205 Dupleks paslanmaz çelik alaşımında faz mol oranının sıcaklıkla değişimi [61].

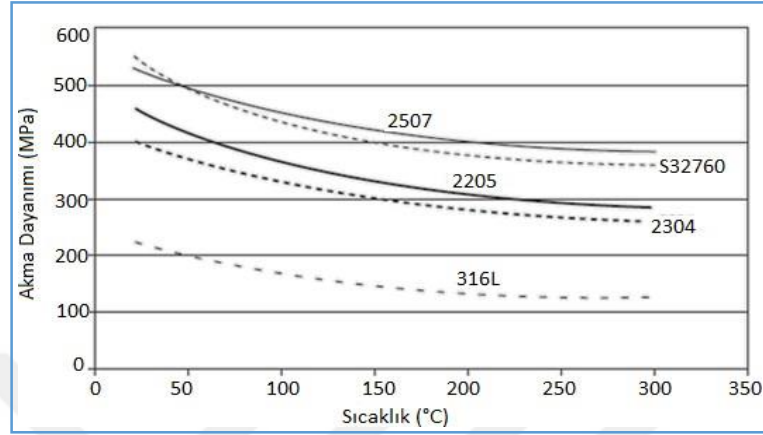
3.7. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİĞİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Yapılarında östenit ve ferrit fazlarını bir arada bulunduran dupleks paslanmaz çelikler, çift fazlı mikro yapıları sayesinde mekanik özellikleri üst seviyelerdedir. Standart dupleks paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Tavlanmış durumdaki dupleks paslanmaz çeliklerin akma dayanımları, alaşım elementi olarak azot bulundurmeyen standart östenitik paslanmaz çeliklere göre çok daha yüksektir. Bu durum, bazı uygulamalarda cidar kalınlığının azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Dupleks paslanmaz çeliklerin ve 316L östenitik paslanmaz çeliklerin, oda sıcaklığında ve 300 °C'deki akma dayanımları Şekil 3.5'te gösterilmiştir [58].

Çizelge 3.3. Dupleks paslanmaz çeliklerin ASTM ve EN standartlarına göre mekanik özellikleri [58].

	ASTM				EN			
ALAŞIM	UNS No.	Akma Dayanımı %0.2 MPa	Gerilme Dayanımı MPa	Uzama	EN No.	Akma Dayanımı Rp 0.2 MPa	Gerilme Dayanımı R _m MPa	Uzama A ₅ %
2304	S32304	400	600	25	1.4362	400	630	25
2205	S32205	450	655	25	1.4462	460	640	25
2507	S32750	550	795	15	1.4410	530	730	20

Dubleks paslanmaz çeliklerde ferrit fazında 475 °C üzerindeki sıcaklıklarda gevreklik oluşma tehlikesi nedeniyle bu sıcaklığın üzerindeki çalışma koşullarında kullanılması önerilmez.



Şekil 3.5. Dupleks paslanmaz çeliklerin ve 316L östenitik paslanmaz çeliğin farklı sıcaklıklardaki akma dayanımları [55].

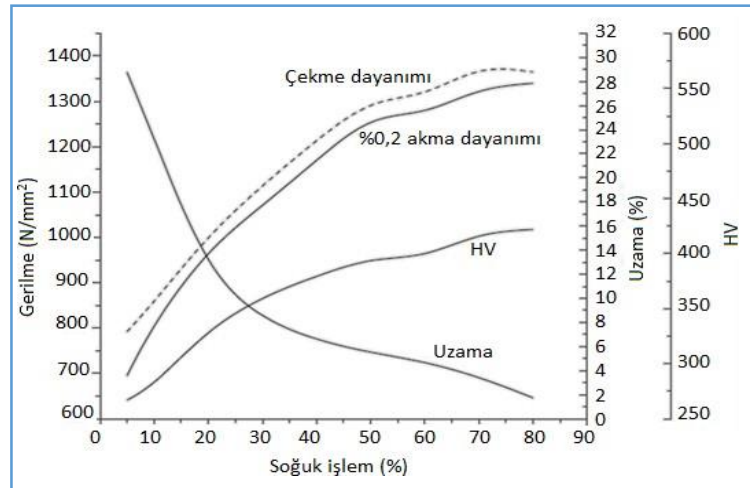
Dubleks paslanmaz çeliklerin mikro yapısına bakıldığında katılaşma yapısının oldukça izotropik olduğu görülür. Hadde veya dövme işlemlerinden sonrasında mevcut her iki faz da tavlanır. Mukavemet; haddeleme yönünde, haddelemeye dik olan yöne göre çok daha yüksektir. Çentik dayanımı haddeleme yönünde daha fazladır. Ölçülen tokluk değeri, uzunlamasına (L-T) Charpy test numunesinde, diğer yönlerine göre daha fazladır.

Dubleks paslanmaz çelikler, -40 °C gibi düşük sıcaklıklarda bile tokluk özelliklerini muhafaza eder. Fakat tokluk ve süneklik değerleri östenitik paslanmaz çeliklere kıyasla daha kötüdür. Çizelge 3.4'te standart östenitik ve dupleks paslanmaz çeliklerin gerilme testinde minimum uzamaları verilmiştir [58].

Çizelge 3.4. Östenitik ve dubleks paslanmaz çeliklerin minimum uzama miktarları [55].

ASTM A 240			EN 10088-2			
UNS No	Alaşım	Uzama min (%)	EN No	Uzama min(%)*		
				P	H	C
S32003	-	25	-	-	-	-
S32101	-	30	1.4162	30	30	30
S32202	-	30	1.4062	-	-	-
S32304	2304	25	1.4362	25	20	20
S32205	2205	25	1.4462	25	25	20
S32750	2507	15	1.4410	20	15	15
S30403	304L	40	1.4307	45	45	45
S31603	316L	40	1.4404	45	40	40

Dubleks paslanmaz çeliklerin, süneklik özelliği östenitik paslanmaz çeliklere oranla çok daha düşük seviyelerde olduğu için şekil verme işlemlerinde ara tav uygulaması yapılması gerekmektedir. Ayrıca sertliklerinin oldukça yüksek olması nedeniyle dubleks paslanmaz çeliklerin işlenebilirliği östenitik çeliklere kıyasla daha zor ve uzun bir süreçtir. Soğuk şekillendirmenin 2205 dubleks paslanmaz çelik malzeme özelliklerine etkisi Şekil 3.6’da görülmektedir [58].



Şekil 3.6. Soğuk şekillendirmenin SAF 2205 (EN 1.4462) dubleks paslanmaz çelikler üzerindeki etkisi [55].

3.8. KAYNAK KABİLİYETİ

Dubleks paslanmaz çelikler genel olarak ergitmeli kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilebilirler. Birleştirmelerin güvenli çalışma sıcaklığı maksimum 250 °C'dir. Bu tür çeliklerde 475 °C'lik bir sıcaklığa ulaşıldığında kırılgan fazlar meydana gelir. Bu sebeple 250 °C ile 900 °C arasındaki sıcaklıklarda tokluk düşmektedir.

Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynak işlemlerinde kullanılan ilave tel ana malzemeyle aynı azot miktarına sahip olması gerekirken, nikel oranı ise ana malzemeye göre biraz daha fazla olacak şekilde seçilmelidir. Nikel oranı düşük olan malzemelerin kaynağında karışım % 40'ın altında tutulmalıdır. Çözündürme tavlama ve arkasından su verme işlemi yapıldığı takdirde ilave metal kullanılmadan da kaynak yapılabilir. Kaynak işlemlerinde ön tavlama yapılmamalı, pasolar arası sıcaklık yaklaşık % 23 krom içeren malzemelerde 250 °C'yi veya yaklaşık % 25 Cr içeren malzemelerde 150 °C'yi aşmamalıdır [62].

BÖLÜM 4

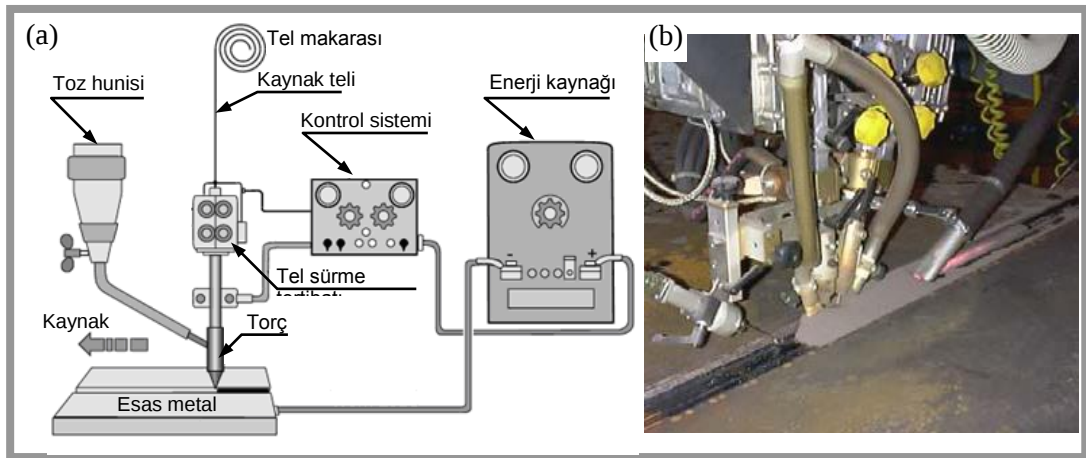
TOZALTI ARK KAYNAĞI

4.1. TOZALTI ARK KAYNAĞININ TANIMI VE TARİHÇESİ

4.1.1. Tanımı

Tozaltı ark kaynağı esasen bir elektrik ark kaynağı çeşitlidir. Bu kaynak yönteminde ark, otomatik bir mekanizma tarafından kaynak bölgesine gönderilen çıplak tel ile iş parçası arasında kaynak bölgesini sürekli besleyen toz yığını altında oluşur.

Tozaltı ark kaynağı otomatik bir kaynak yöntemidir. Kaynak işlemi esnasında genel olarak birleştirilecek malzeme sabittir makine hareket eder. Lakin silindirik malzemelerin kaynağında bu durum değişir ve kafa sabitken iş parçası döner. Tozaltı ark kaynak makineleri genellikle özel raylar veya paletlerle tekerlek üzerinde hareket ederler [16]. Şekil 4.1’de tozaltı kaynak makinasının şematik ve fotoğraf görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.1. Tozaltı ark kaynak makinası a) tozaltı ark kaynağı şematik b) fotoğraf görüntüsü.

4.1.2. Tarihçesi

Tozaltı ark kaynağı (submerged arc Welding-SAW) yöntem ilk olarak, Pensilvanya’da kurulan bir boru fabrikası için National Tube firması tarafından geliştirilmiştir. 1930 yılında patenti alınan bu kaynak yöntemi; 1933 yılından itibaren Amerika’da yayılmaya başlamış, 1937’den itibaren de Avrupa’da uygulama alanı bulmuş ve özellikle ikinci dünya savaşından sonra gelişerek endüstride büyük önem kazanmıştır. Türkiye’de ise 1960 yıllarında uygulanmaya başlamıştır [16].

4.2. TOZALTI ARK KAYNAĞININ PRENSİPLERİ

- Kaynak çoğunlukla 500-1500 amper aralığında yapılmasına rağmen bazı durumlarda 150-5000 amper değerlerine kadar tolere edilebilir.
- Bu kaynak çeşidinde sürekli beslenen örtüsüz elektrodalar kullanılır ve kaynak bölgesini atmosferin olumsuz etkilerinden korumak için ergiyik havuzunun üzeri bir toz tabakasıyla kaplanır.
- Bu kaynak yöntemi büyük çaplı ilave tellerin kullanılmasına olanak sağlar
- Tel besleme ünitesi sayesinde ilave tel kaynak bölgesine otomatik olarak gönderilir.
- Ark oluştuğunda koruyucu toz ve ilave tel belli oranlarda erimeye başlar.
- Bu kaynak yöntemi ile yüzey kaplama işlemleri yapılmak istendiğinde özlü tellerde kullanılabilir.
- Kaynak teli ile iş parçası arasında meydana gelen ark, koruyucu toz tabakası altında kaldığından dışardan görünmez.
- Ekseriyetle telin her “mm” çapı için 100/120 amper akım kullanılır
- Ark üfleme akım değerlerinin yükseltilmesiyle belirginlik gösterir.
- Tozaltı kaynak yönteminde kaliteli bağlantılar elde etmek için kaynak ağzlarının nizami olması önemlidir.
- Bu kaynak yönteminin yarı otomatik ve tam otomatik olmak üzere iki çeşidi vardır [16].

4.3. TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMLERİ

Tozaltı ark kaynağında kullanım alanlarına göre çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler aşağıda sıralanmıştır;

- Tandem tozaltı kaynak yöntemi
- Paralel tozaltı kaynak yöntemi
- Seri kaynak yöntemi
- Band elektrodla tozaltı kaynak yöntemi
- Kızgın tel yöntemi
- Demir tozu ilavesiyle tozaltı kaynak yöntemi [16].

4.4. TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİNDE KULLANILAN KAYNAK PARAMETRELERİ

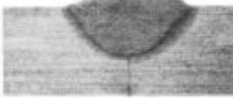
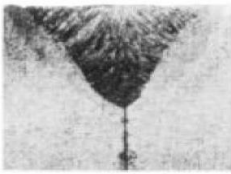
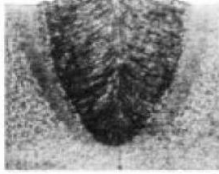
Kaynak parametreleri bütün kaynak yöntemleri için birleştirmenin kalitesine birinci derecede tesir eden son derece önemli bir husustur. Kaynak parametrelerinin etkilerinin iyi bilinmesi ve gerek görüldüğü takdirde bu değişkenlerin birinin veya birkaçının değiştirilmesi hedeflenen kaynak kalitesine ulaşmak açısından son derece önemlidir [63].

Tozaltı ark kaynak yönteminde kullanılan kaynak parametreleri;

- Akım şiddeti
- Akım yoğunluğu
- Ark gerilimi
- Kaynak ağzı
- Kaynak hızı
- Kaynak düzlemi ve elektrod açısı
- Serbest tel uzunluğu şeklinde sıralanabilir [16].

4.4.1. Akım Şiddeti

Akım şiddeti dikiş geometrisini büyük oranlarda etkileyebilen önemli parametrelerdendir. Nüfuziyet derinliği, esas metalin ve elektrodun ergime derecesi gibi değişkenleri akım şiddeti belirler ve bu değer kaynak hızından bağımsız düşünülmemelidir. Aksi taktirde nüfuziyet derinliği, kaynak teli ve esas metal ergime derecesi, dikiş yüksekliği, dikiş genişliği, ITAB genişliği gibi parametrelerin arzu edilen sınırlar dışına çıkması söz konusu olabilir. Örnek olarak akım şiddetinin kaynak hızına kıyasla aşırı fazla seçilmesi ergiyen tel miktarını arttıracaktır bu sebepten de nüfuziyet derinliği, dikiş yüksekliği ve dikiş genişliği de artacaktır. Tozaltı ark kaynak akımının, dikiş geometrisine ve nüfuziyette etkisi Şekil 4.2’de verilmiştir [64-66].

Düşük	Uygun	Yüksek
		
350 Amper 29 Volt 30 ipm	500 Amper 29 Volt 30 ipm	650 Amper 29 Volt 30 ipm
Düşük	Uygun	Yüksek
		
350 Amper 40 Volt 12,5 ipm	500 Amper 40 Volt 12,5 ipm	650 Amper 40 Volt 12,5 ipm

Şekil 4.2. Tozaltı ark kaynak akımının, dikiş geometrisine ve nüfuziyette etkisi [67].

4.4.2. Akım Yoğunluğu

Akım şiddetinin tel kesitine oranı akım yoğunluğu olarak tanımlanır. Akım yoğunluğu arttıkça dikiş yüksekliği, nüfuziyet ve ergime gücünde artar. Kaynak tel çapı kalınlaştıkça telin akım yüklenebilme kapasitesi artar ve kaynaklanan malzemeye daha büyük oranlarda akım yüklenebilir [67,68].

4.4.3. Ark Gerilimi

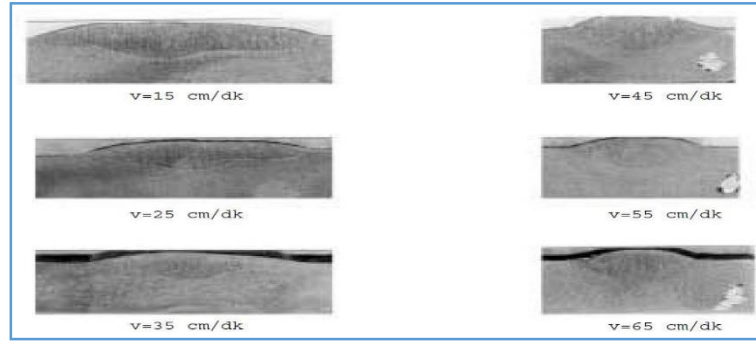
Ark gerilimi dikiş nüfuziyetine ve kaynak kep geometrisine direk etki eden bir parametredir. Ark gerilimi arttıkça nüfuziyet azalır, kaynak kep genişliği artar ve kep yüksekliği de düşer aynı zamanda toz kullanılan kaynak tozu miktarı da artar. Yüksek ark gerilimleriyle çalışılması durumunda kaynak bölgesinin kimyasal bileşiminde silisyum miktarının artması gibi değişimler gözlemlenebilir. Düşük ark gerilimiyle çalışma durumlarında ise yeterli ergime sağlanamayacağından dolayı kötü bir kaynak dikişi meydana gelecektir [67].

4.4.4. Kaynak Ağzı

Kaynaklı bağlantılarda birleştirilecek malzemeleri belirli bir kalınlığa kadar kaynak ağzı açmadan birleştirmek mümkündür. Ancak birleştirilecek malzeme kalınlığı arttıkça kaliteli bir bağlantı elde etmek için kaynak ağzı açma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Kaynak ağzı açmadaki birincil amaç nüfuziyet derinliğini arttırmaktır. Kaynak ağız açısı genişledikçe nüfuziyet artar ve kep yüksekliği azalır [67].

4.4.5. Kaynak Hızı

Kaynak hızı kaynak bölgesinin metalürjik açıdan kalitesini belirleyen önemli bir faktördür. Artan kaynak hızıyla beraber kaynak genişliği ve nüfuziyette aynı oranda azalır. Kaynak hızının yavaş olması durumlarında ısı girdisi artacağından malzemenin delinme riski artar. Sekil 4.3’de tozaltı ark kaynağı ile farklı hızlarda elde edilmiş nüfuziyet profilleri verilmiştir [67,69].

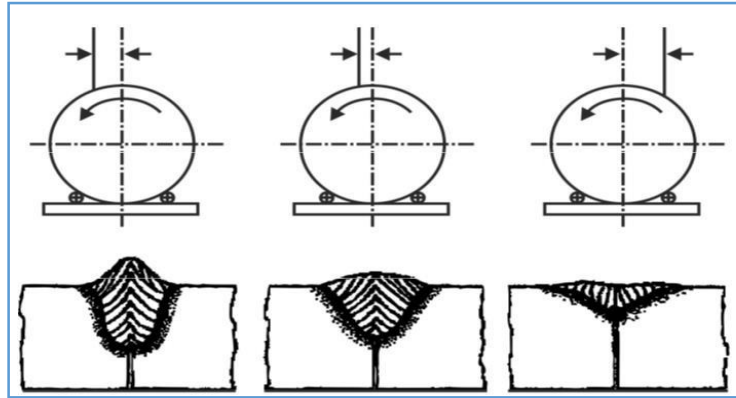


Şekil 4.3. Tozaltı ark kaynağı ile farklı hızlardaki nüfuziyet profilleri [70].

4.4.6. Kaynak Düzlemi ve Elektrot Açısı

Tozaltı ark kaynak yönteminde elektrodun eğim açısı kaynak nüfuziyetini ve dikiş formunu önemli ölçüde etkilemektedir. Kaliteli bir kaynak dikişi elde etmek için elektrod eğim açısı 5-15° aralığında tutulması gerekmektedir.

Tozaltı ark kaynağında birleştirilecek malzemeler çoğunlukla yatay pozisyonda kaynaklanır. Birleştirmenin yapılacağı düzlemin eğimi 6°'den daha büyük olması durumlarında kaynağın yapıldığı yöne göre dikişin geometrisi ve nüfuziyeti de değişmektedir. Açılı düzlemlerde yukarı yönlü yapılan kaynaklarda dikiş genişliği az, dikiş yüksekliği ve nüfuziyet fazladır. Aşağı yönlü yapılan kaynaklarda ise kaynak dikişi geniş ve nüfuziyet düşüktür [67]. Kaynak düzleminin kaynak dikişi ve nüfuziyet üzerine etkileri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Kaynak düzleminin kaynak dikişi ve nüfuziyet üzerine etkileri.

4.4.7. Serbest Tel Uzunluğu

Serbest tel uzunluğu kaynak telinin nozulun dışında kalan kısmı veya kaynak memesinin kaynaklanacak malzemeye olan uzaklığı olarak tanımlanır. Serbest tel uzunluğunun artmasıyla kaynak dikişi daralır, dikiş yüksekliği artar ve nüfuziyet azalır. Ayrıca serbest tel uzunluğunun artmasıyla kaynak metali ve ITAB'ın sertlik değerlerinde azalmaların olduğu belirlenmiştir [67].

4.5. TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİNDE KULLANILAN KAYNAK TELLERİ

Tozaltı ark kaynak yönteminde kullanılan teller örtüsüz elektrot sınıfına girer, çoğunlukla daireseldir ve dış yüzeyleri de bakırla kaplıdır. Genellikle 1,2 – 12 mm çap aralığında üretilmekle beraber istisnai durumlar için üretilen dikdörtgen kesitli olanları da piyasada bulmak mümkündür. Bu teller kaynak bölgesinin metalürjik güvenliği açısından muhteviyatında yüksek miktarda manganez içeren çeliklerden üretilirler [63]. EN 756'ya göre kaynak tellerinin kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. EN 756'ya göre kaynak tellerinin kimyasal bileşimleri [15].

Tel türü	Alaşım elementi miktarı							
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr
S1	0,05-0,15	0,15	0,35-0,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S2	0,07-0,15	0,15	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S3	0,07-0,15	0,15	>1,30-1,75	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S4	0,07-0,15	0,15	>1,75-2,25	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S1Si	0,07-0,15	0,15-0,40	0,35-0,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S2Si	0,07-0,15	0,15-0,40	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S2Si2	0,07-0,15	0,15-0,60	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S3Si	0,07-0,15	0,15-0,40	>1,30-1,85	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S4Si	0,07-0,15	0,15-0,40	>1,75-2,25	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S1Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	0,35-0,60	0,025	0,025	0,45-0,65	0,15	0,15
S2Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,025	0,025	0,45-0,65	0,15	0,15
S3Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	>1,30-1,75	0,025	0,025	0,45-0,65	0,15	0,15
S4Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	>1,75-2,25	0,025	0,025	0,45-0,65	0,15	0,15
S2Ni1	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,80-1,20	0,15
S2Ni1.5	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,020	0,020	0,15	>1,20-1,80	0,15
S2Ni2	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,020	0,020	0,15	>1,80-2,40	0,15
S2Ni3	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,020	0,020	0,15	>2,80-3,70	0,15
S2Ni1Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,020	0,020	0,45-0,65	1,20-1,80	0,20
S3Ni1.5	0,07-0,15	0,15-0,25	>1,30-1,70	0,020	0,020	0,15	>1,20-1,80	0,20
S3Ni1Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	>1,30-1,80	0,020	0,020	0,45-0,65	1,20-1,80	0,20
S3Ni1.5Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	1,20-1,80	0,020	0,020	0,45-0,65	>1,20-1,80	0,20
S0	Üzerinde anlaşılan herhangi bir kimyasal bileşim							

4.6. TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİNDE KULLANILAN KAYNAK TOZLARI

Bu yöntemde kullanılan kaynak tozlarının başlıca amacı kaynak bölgesini atmosferin zararlı etkilerinden korumaktır. Bunun yanında kaynak tozlarının kaynak dikişine uygun bir şekil verme ve yine kaynak dikişinin daha yavaş soğumasını sağlaması gibi fiziksel ve metalürjik etkileri de vardır. Ana malzeme, kaynak teli ve kaynak tozu kaynak dikişinin kimyasal bileşimini belirleyen unsurlardır [71-74].

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan tozlar kuvars, kalkspat, kil, dolomit ve manganez cevherinin belli oranlarda karıştırılıp eritilerek üretilirler.

Kararlı bir ark sağlaması, kaynak dikişinde herhangi bir hataya sebep olmaması, cürufun kolay kalkması, nemi az çekmesi ve kaynak dikişinden istenilen bileşimi vermesi bu kaynak yönteminde kullanılan tozlardan istenilen özelliklerden bazılarıdır [63].

4.7. TOZALTI ARK KAYNAĞININ KULLANIM ALANLARI

- Depo, kazan ve tank imalatı
- Çelik konstrüksiyonlar
- Vinç ve köprü imalatı
- Boru kaynakları
- Dolgu kaynakları
- Gemi inşaatı
- Ağır makine imalatı
- Metal kaplama işlemleri
- Açık ve kapalı profillerin imalatı [16].

4.8. TOZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

4.8.1. Avantajları

- Kaynak otomatik olduğundan yapımında kaynakçı el maharetinin etkisi çok önemli değildir.
- Mekanik dayanımı yüksek kaynak dikişleri elde edilir.
- Silindirik ve düz parçaların kaynağında, her kalınlık ve boyuttaki boruların kaynaklarında kullanılabilen yüksek kaynak hızına sahip bir yöntemdir.
- Kaynak esnasında ark ışınları görünmez ve sıçrama olmaz. Dolayısıyla kaynakçı için gerekli koruma daha azdır.
- Kapalı ve açık alanlarda uygulama imkanı vardır.
- Tozaltı ark kaynak yönteminde yüksek nüfuziyetli kaynak dikişleri elde edilir. Çift yönlü birer paso ile yapılan kaynaklarda 20 mm kalınlığındaki bir malzeme kaynak ağzı açmadan kaynatılabilir.
- Diğer yöntemlere göre küçük kaynak ağzı açılarını kaynak yapmak mümkündür.
- Çapaksız ve düzgün bir kaynak dikişi verir.
- Tozaltı ark kaynaklarında, kaynak başlangıcı ve kaynak sonu hatalarını önlemek için kaynak başlangıç ve bitiş kısımlarına, daha sonra kesilip atılmak üzere ilave parçalar puntalanır ve kaynak bu hurda parça üzerinden başlatılır ve yine hurda parça üzerinde bitirilir. Böylece kaynak başlangıç ve bitiş (krater) hatalarından kaçınılmış olur.
- Örtülü elektrod ile yapılan elektrik ark kaynağında, elektrik enerjisinin % 25'inden, tozaltı ark kaynağında ise % 68'inden doğrudan kaynak için yararlanılmaktadır. Bu da enerjinin ekonomik kullanıldığını gösterir [16].

4.8.2. Dezavantajları

- Tüm metal ve metal alaşımları için uygulanabilen bir yöntem değildir.
- Toz altı ark kaynak yöntemin başlangıç yatırım maliyeti yüksektir.
- Tozaltı ark kaynak tozları havadan nem almaya eğilimlidir, bu da kaynakta

gözeneğe neden olur. Bu nedenle tozları kurutma ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Tozlar, kaynaktan önce 2-3 saat 300 °C’de ısıtılmalıdır. Bu konudaki en iyi seçim, üretici firma tavsiyelerine uyulmasıdır.

- Bu kaynak yöntemi 5 mm’den ince malzemelerde yanma yapabileceği için çok elverişli değildir. Kaynak yapılabilecek en ince sac kalınlığı ise 1.2 mm’dir.
- Kaliteli bir kaynak elde edebilmek için kaynaklanacak malzeme düzgün olmalı, yüzeyinde yağ, pas ve diğer kirlilikler olmamalıdır.
- Yöntem, her kaynak pozisyonu için uygun değildir [16].



BÖLÜM 5

GEÇMİŞTE YAPILMIŞ ÇALIŞMLAR

McPherson ve arkadaşları [75], yapmış oldukları çalışmada 15 mm kalınlığındaki AISI2205 dubleks paslanmaz çelik ve düşük karbonlu çelik malzemeyi tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirmiş ve birleştirmenin mikroyapı özelliklerini değerlendirmişlerdir. Kullanılan ilave telin karbonlu çelik tarafına doğru metal transferi gerçekleştirmesiyle bu bölgenin ITAB'ında aşırı yüksek sertlik değerlerinin ölçüldüğü belirtilmiş ve aynı bölgede martenzitik bir yapı oluştuğunu, ayrıca birleştirmede karbür çökmesinin bulunmadığı tespit edilmiştir.

Sieurin ve arkadaşı [76], yapmış oldukları çalışmada 30 mm ve 50 mm kalınlığındaki dubleks paslanmaz çelik malzemeleri tozaltı ark kaynak yöntemini kullanarak kaynatmış ve kaynak bölgesindeki östenit miktarını iyileştirmeye çalışmışlardır. ITAB'daki iyileştirilmiş östenitin değerlendirilmesi için, çekirdeklenme hızı ve difüzyon kontrollü büyümenin hesaplanmasına dayanan bir model kullanılmıştır. Ayrıca soğuma hızının mikroyapı üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Isı dağılımının oldukça düzgün olduğu ve kaynak sonrası soğuma hızlarının literatürdeki referanslarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. İyileştirilmiş östenit miktarı mikroyapı analizleriyle belirlenmiş ve literatürle paralel olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kaynakların havada soğuması tatmin edici bir faz dengesi sağlamış ve kırılma intermetalik çökeltilerin önüne geçmesinde önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir.

Fersini ve arkadaşları [77], yapmış oldukları çalışmada AISI2205 dubleks paslanmaz çelik malzemelerin bir kısmını tozaltı ark kaynak yöntemi diğer kısmını ise hibrid (lazer-gaz metal ark) kaynağı yöntemiyle birleştirip birleştirmenin mekanik mikroyapı özelliklerini karşılaştırıp sonuçları değerlendirmişlerdir. Birleştirmeler karşılaştırıldığında her iki kaynak tipinde de düzgün bir kaynak yüzeyi elde edilmiş ancak hibrid kaynağının tozaltı ark kaynağına göre daha verimli olduğunu ve daha

nüfuziyetli bir kaynak dikişı elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca her iki kaynak yönteminde de östenit-ferrit faz oranlarının kaynak metalinde daha dengeli olduğu tespit edilmiştir.

Luo ve arkadaşları [78], yapmış oldukları çalışmada 10 mm kalınlığındaki AISI2205 dubleks paslanmaz çelik malzemeyi tozaltı ark kaynak tekniği ile çift taraflı kaynatmışlardır. Yapılan birleştirmelerin kaynak verimliliğini araştırmışlar ve mekanik, mikroyapı özelliklerini tespit ederek sonuçları değerlendirmişlerdir. Ergime çizgisinden kaynak merkezine doğru gidildiğinde ince dentritik tanelerin kademeli olarak kaba sütunlu tanelere dönüştüğü tespit edilmiştir. Kaynak metali faz oranlarının % 68 östenit ve % 32 ferrit olduğu tespit edilmiştir. Ferrit oranının ITAB'a gelindiğinde %5 7'ye çıktığı ifade edilmiştir. Mikro sertlik çalışması yapılan birleştirmede en yüksek sertlik değeri ITAB'da gözlemlenmiştir. En düşük mikro sertlik değeri ise ortalama 245 Hv ile ana malzemede olduğu tespit edilmiştir. Birleştirmelerin çekme dayanımları ise ortalama 795 MPa olduğunu tespit etmişlerdir. Arka tarafa yapılan kaynağın birinci ve ön tarafa yapılan kaynağa ısı işlem etkisi yaratarak σ -fazını belirgin bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir. Dubleks paslanmaz çelik birleştirmelerinde σ -fazının malzemenin mikro sertlik ve plastik-elastik deformasyon kalitelerine önemli ölçüde tesir etmesi sebebi ile çift taraflı yapılan tozaltı ark kaynaklarında kaynak ısısının kontrol altında tutulması gerektiği belirtilmiştir.

Luo ve arkadaşları [79], yapmış oldukları çalışmada AISI2205 dubleks paslanmaz çelik malzemeyi X kaynak ağızı açarak tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirmiş ve kaynak sonrası belli numuneleri ısı işlemine tabi tutmuşlardır. Isıl işlem gören birleştirmeler ve ısı işlem görmeyen birleştirmelerin mekanik ve mikro yapısal özelliklerini karşılaştırıp sonuçlar değerlendirilmiştir. Kaynak sırasında ısı girdisi nedeniyle ITAB'da σ -fazının kolaylıkla çökeldiği ancak kaynak sonrası yapılan ısı işlem nedeniyle σ -fazının ortadan kaybolduğu belirlenmiştir. Kaynak sonrası yapılan ısı işlemin ITAB ve kaynak metali mikro yapılarında iyileşmeye sebep olduğu fakat ısı işlem sonrasında ikincil fazların ayrışmasına da neden olduğundan dolayı kaynak bölgesi mekanik özelliklerinde düşüş oluşturduğu tespit edilmiştir. Birleştirmelerde ölçülen en yüksek mikro sertlik değerinin kaynak sonrası ısı işlem görmemiş numunenin ITAB'ında olduğu tespit edilmiştir.

Graziano ve arkadaşları [80], 10 mm kalınlığındaki LDX 2101 dubleks paslanmaz çelik malzemeyi uygun ilave tel seçimini yaptıktan sonra MIG kaynağı ve tozaltı ark kaynak yöntemlerini kullanarak birleştirmişlerdir. Ana malzeme, ITAB ve kaynak bölgesinden mikroyapı çalışmaları, sertlik testi, çentik darbe testi, çekme deneyi ve EDS analizlerini yaparak mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini değerlendirmişlerdir. İlk bakışta MIG ve tozaltı ark kaynak yöntemleriyle birleştirilen numuneler arasında mekanik özellikler bakımından (sertlik, çekme dayanımı, darbe tokluğu) bir fark bulunamadığını ifade etmişler. Ancak görüntü analizlerinde farklılıkların ortaya çıktığını tespit etmişlerdir. Ayrıca tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirilen numunelerin kaynak bölgelerinde belirli bir ferrit ve östenit faz dengelerinin olmadığını belirtmişlerdir. Mekanik özellik değerleri arasında bir fark bulunmadığını metalografik gözlemlerde kırılma bölgesi etrafındaki östenit fazının daha fazla deforme olduğunu ve darbe testinde gevrek türde bir kırılma meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Fabiola ve arkadaşları [81], yapmış oldukları çalışmada AISI2205 dubleks paslanmaz çelik malzemeyi 850 C° ve 900 C° seviyelerinde 3 ve 6 saatlik zaman dilimlerinde izotermal ısıtma işlemine tabi tutmuşlar ve ısıtma işlem etkilerini değerlendirmişlerdir. Aşım elementlerinin ergime bölgesinde hızlı soğuma nedeniyle fazlar içerisinde neredeyse eşit miktarda dağılımı ve hızlı soğumanın σ -fazındaki çökelme oluşumunu desteklediğini tespit etmişlerdir. Bunun aksine ITAB ve ana malzeme yalnızca ısıtma döngülerine maruz kaldıklarından σ -fazı oluşumundan daha az etkilendiklerini belirtmişlerdir. χ fazı 850 C° seviyesinde meydana geldiğini ve 900 C° seviyesinde ise σ -fazı hızlıca χ fazının yerini aldığını tespit etmişlerdir.

Świerczyńska ve arkadaşları [82], süper dubleks paslanmaz çelik malzemeleri tozaltı ark kaynağı ve özlü tel ile yapılan MIG-MAG kaynağı yöntemleriyle birleştirmiştir. Birleştirmelerin makro-mikroyapı incelemeleri hidrojen yükleme testleri, elektro kimyasal testleri, korozyon testleri ve sem analizleri yapıp değerlendirilmiştir. Kaynak metalinin dentritik yapılı östenit ve ferritten teşkil olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kaynak bölgesinde birden fazla kaynak dikişi atıldığından yapı içerisinde ikincil östenite de rastlanmıştır. Tozaltı ark kaynak yöntemiyle yapılan birleştirmelerde kaynak metalinin diğer kaynak yöntemine kıyasla çukurcuk

korozyonuna karşı oldukça dirençli olduğu tespit edilmiştir. Testlerin sonunda süper dubleks çeliklerde kaynak bölgelerinin katodik korumalı ortamlarda genel korozyon ve çukur korozyonu başlatma eğilimlerinin olabileceği belirlenmiştir.

Junior ve arkadaşları [83], dubleks paslanmaz çelik plaka üzerine tozaltı ark kaynak yöntemiyle dolgu kaynağı yaptığı çalışmada ısı girdisinin ve soğuk tel besleme hızının çukurcuk korozyonu üzerindeki etkilerini incelemiştir. Soğuk tel beslemesi ile doğru dolgu teli seçimi yapılmışsa ısı girdisini değiştirmeden kaynak bölgesi korozyon direncini arttırmanın mümkün olduğunu belirtmiştir. Bunun yanında ITAB genişliği ve soğuk tel besleme hızı arttıkça çukurcuk oluşumunun azaldığını ve östenit miktarının önemli ölçüde arttığını tespit etmişlerdir. Burada çukurcuk oluşumunun azalmasını yapı içerisindeki östenit miktarıyla alakalı olduğu belirlenmiştir.

Canlı [19], yapmış olduğu çalışmada, basınçlı kapların imalatında sıklıkla kullanılan P355NL2, P460 ve S355J2 çelikleri, tozaltı ark kaynak yöntemi ile kendi aralarında ve birbirleri ile birleştirmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin kaynak bölgesinin makro/mikroyapı incelemeleri, sertlik, çekme, eğme ve çentik darbe testleri yapılarak değerlendirilmiştir. Gözle muayene sonucunda tozaltı ark kaynağında sıklıkla rastlanılan kaynak hatalarına (yanma olukları, gözenek, dikişte taşma ve yetersiz nüfuziyet) rastlanmamıştır. Ayrıca makroyapı resimlerinde gaz boşluğu ve yetersiz ergime hatalarının olmadığı görülmüştür. En yüksek sertlik değeri kaynak metalinde olduğu tespit edilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda kopma dayanımı düşük malzeme tarafında gerçekleşmiştir. Sıcaklığın düşmesi ile beraber darbe direncinin de düştüğü tespit edilmiştir.

Kayakök [84], tozaltı ve MAG kaynak yöntemlerinde kaynak ağzı – nüfuziyet ilişkisinin incelenmesi ve ekonomik yönden kıyaslanması konulu tezinde MAG kaynak yönteminin tozaltı ark kaynak yöntemine göre daha ekonomik bir yöntem olduğunu fakat üretim bandında maliyetin tek başına bir kriter olamayacağını belirtmiştir. Bu sebeple üretim aşamasında kısa zamanda en ucuz ve hızlı ürünü elde etme amacı olduğunu ve bu iki kriterin beraber değerlendirmesi gerektiği tespitinde bulunmuştur.

Bonnefois ve Soullignac [85], çalışmalarında dubleks paslanmaz çeliklerin tozaltı kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğini incelemiştir. Kaynağı 10 mm'nin üzerindeki kalınlıklara sahip dubleks ve süper dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında yüksek dolgu oranından dolayı en ekonomik kaynak yöntemi tozaltı ark kaynağı olarak belirlenmiştir. Dubleks paslanmaz çeliklerin tozaltı yöntemi ile kaynağında, çeliğin türü, kullanılan tozun baziklik derecesi, kaynak metalinin oksijen bileşeni ve bağlantının mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerin dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir.

Luoa ve arkadaşları [78], çalışmalarında, 2205 dubleks paslanmaz çeliğe (DSS) uygulanan kaynak işlemi sonrası mikroyapı çalışmalarını incelemişlerdir. Kaynak sonrası ısıtıl işlem (PWHT) uygulanmış ve uygulanmamış tozaltı ark kaynağı dikişlerindeki değişimi analiz etmek için OM, XRD ve mikrosertlik test yöntemleri kullanılmıştır. Araştırma sonuçları, ısıdan etkilenen bölge (ITAB) yakınında ergime sınırında fazın kaybolduğunu ve PWHT ile kaynak merkezinde γ' faz miktarı azalırken sonraki PWHT sırasında kaynaklı merkez bölgesinin arttığını göstermektedir. PWHT sonrası kaynak merkez bölgesinde bazı ikinci fazların birikme dağılımı da bulunmuştur. Çalışmaya göre ergime sınırında ve kaynaklı orta bölgede PWHT olmaksızın ayrı ayrı iki mikro sertlik değeri bulunmuştur. Bununla birlikte, PWHT sırasında HAZ yakınlardaki ergime sınırındaki maksimum mikro sertlik değeri kaybolmuş ve kaynaklı merkez bölgesindeki değeri hala korunmaktadır. Bu durumun ikinci fazların, element difüzyonlarının ve partikül ayrımının PWHT sırasındaki değişimlerinden kaynaklandığı söylenebilir. Kaynak sonrası ısıtıl işleminden kaynaklanan 2205 DSS SAW birleştirmelerindeki ikinci faz transferini göstermek için bir gelişim mekanizması tanımlanmaktadır.

Heuser [86], yapmış olduğu çalışmada tozaltı ark kaynağı ile birleştirilen dubleks paslanmaz çeliklerinin mukavemetlerini araştırmıştır. ITAB'daki östenit dönüşüm oranının kaynak parametreleri ile yakından ilişkisi olduğunu, dolayısıyla tozaltı ark kaynağında ısı girdisinin önemli bir konu olduğunu belirtmiştir. Heuser, yüksek baziklik derecelerinde kaynak tozları kullanılmasının olası çatlamaların önüne geçebileceğini ve pasolar arası sıcaklığın 200 C°'yi geçmemesini tavsiye etmektedir.

Karlsson [87], yapmış olduğu çalışmada tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilen dubleks paslanmaz çeliklerin mikro yapısını incelemiştir. Bu tür çeliklerin günümüzde Argon Oksijen Dekarbürizasyonu(AOD) ve Vakum – Oksijen Dekarbürizasyonu (VOD) yöntemleriyle üretildiğini aynı zamanda bu çeliklerin üstün mekanik özellikleri sebebiyle sanayide değişik alanlarda sıklıkla kullanıldığını belirtmiştir. Dubleks paslanmaz çeliklerin genellikle yapısında ferrit ve östenit fazlarının bir arada bulunduran, ince taneli, yüksek korozyon direncine sahip ve yüksek mukavemetli bir çelik türü olduğunu açıklamıştır.

Mercado vd. [88], yapmış olduğu çalışmada AISI1025 dubleks paslanmaz çeliğini tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirip kaynak bölgesine toz kompozisyonun etkilerini incelemiştir. Çalışmada üç farklı toz kombinasyonu kullanılmış ve kaynak parametreleri sabit tutulmuştur. Titanyum oksit oranı yüksek olan tozlarda asiküler ferrit tespit etmiştir. İnklüzyon oranının kesit daralması ve yüzde uzamaya etki ettiğini tespit etmiştir.

Tekin [89], paslanmaz çelik malzeme ile düşük karbonlu alaşımsız çelik malzemelerin tozaltı kaynak metodu ile birleştirilmesini ve bağlantıların mekanik özelliklerini incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; kaynak hızı arttıkça kaynak metali ve ITAB’da oluşan tane yapısının incelendiğini, ark gerilimi ve amper değeri arttıkça tane irileşmesinin meydana geldiği ve sertliğin azaldığını, kaynak hızı arttıkça kaynak metali ve ITAB’da sertliğinin arttığı, buna karşılık amper ve voltaj değerine bağlı olarak ısı girdisinin artmasıyla kaynak metali ve ITAB’da sertliğin düştüğünü, kaynak hızı arttıkça kaynak bölgesi ve ITAB’da çekme mukavemetinin arttığı, buna karşılık amper değeri ve ark gerilimi arttıkça kaynak metali ve ITAB’da çekme mukavemetinin azaldığını rapor etmiştir.

Akay [67], düşük alaşımlı, ince taneli, yüksek mukavemetli X60, X65 ve X70 çelikleri, tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı tel ve tozlar kullanılarak birleştirmiştir. Kaynaklı birleştirmeler, öncelikle tahribatsız muayene yöntemlerinden ultrasonik ve radyografik muayeneye tabi tutulmuşlardır. Kaynaklı birleştirmelerin dayanımları ise çekme testi, eğme testi, çentik darbe testi ve sertlik deneyi yapılarak değerlendirilmiştir. Kaynaklı bölgede tel-toz-ana malzeme kompozisyonlarını

belirlemek için, kaynaklı birleştirmeler üzerinde spektral analiz çalışmaları yapılmış ayrıca, kaynak bölgesinin makro/mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numuneler üzerinde yapılan ultrasonik ve radyografik muayeneler sonucunda, kaynak bölgesinde herhangi bir kaynak hatasına rastlanılmamıştır. Yapılan çekme testleri sonucunda, tüm numunelerde kopma, ana malzemeden gerçekleşmiş ve bütün bağlantı dayanımları, ana malzemelerden daha yüksek bulunmuştur. Eğme testleri sonucunda, göz ile yapılan muayenede herhangi bir çatlak, yırtık vb. hata görülmemiştir. Çentik darbe test sonuçlarına göre, S2Mo teli ve P223 tozu ile birleştirilen numuneler, S1 teli ve LN 761 tozu kullanılan birleştirmelere göre daha iyi tokluk dayanımına sahip oldukları görülmüştür. Yapılan sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değerleri kaynak metalinden ölçülürken onu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip etmektedir. Deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, X70 malzemede kullanılan, S2Mo teli ve P223 tozu en verimli mekanik test sonuçları vermiştir.

Celasun [68], S355J2 çeliğinin ısıtma işlem ve farklı tozaltı kaynak tellerinin kaynak kabiliyetine etkisinin incelenmesi konulu yüksek lisans tezi çalışmasında, çekme testleri sonucu, ısıtma işlemle elde edilen 780 S numunelerin S2Mo tozaltı kaynak teli ile kaynatılan numunelerin daha yüksek çıktığı görülmüş, ultrasonik muayene ve manyetik parçacık muayene ile kaynak iç bölgesinde çatlak, gözenek, inklüzyon vb. kusurlara rastlanmamış, çentik darbe testleri sonucu, kırık yüzeylerin SEM analizi gerçekleştirilmiş ve 20 °C sıcaklıkta numunelerin sünek, - 40 °C sıcaklıkta numunelerin gevrek kırıldığı gözlemlenmiş, 4 farklı kaynaklı bağlantının çentik darbe testleri sonucu, numune sıcaklığı ile doğru orantılı olarak sıcaklık düştükçe darbe direncinin de düştüğü tespit edilmiş ve S2Mo tozaltı kaynak teli ile kaynatılan numunelerin darbe direncinin, S1 tozaltı kaynak teli ile kaynatılanlara göre daha yüksek olduğu, ayrıca S2Mo tozaltı kaynak teli ile ısıtma işlem görmüş 780 S malzemeye ait kaynaklı bağlantıların en yüksek darbe direncine sahip olduğu belirtilmiştir.

Ada [63], petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların tozaltı ve spiral kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi konulu yüksek lisans tezi çalışmasında tozaltı kaynağında, ilave tel bileşiminin kaynak metalinin sertliğini doğrudan etkilediği, S3Mo tel kullanılarak yapılan birleştirmenin, S2Mo tel kullanılarak yapılan birleştirmelere kıyasla kaynak metalinde daha sert bir yapı

oluşturduğu rapor etmiştir. Kaynak metaline ilave edilen Mn'nın kaynak metalini sertliğini ve tokluğunu arttırdığı, buna karşılık Ti ilavesinin kaynak metalini sertliğini düşürdüğü, API 5L standardındaki X52, X60, X65 ve X70 malzemelerin petrol ve doğalgaz iletim hatlarında kullanımı için -20 °C'deki çalışma şartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir.

Erbay [90], yapmış olduğu çalışmada; tozaltı ark kaynağında kaynak parametrelerinin mikroyapı ve nüfuziyette etkisini araştırmış, kullanılan kaynak parametreleri ile kaynak metalini mikroyapısı, nüfuziyet parametreleri, kaynak metalindeki sertlik değişimleri ve kaynak metalini ısı girdisi değişimleri ile bunlar arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Artan kaynak hızlarında ısı girdisinin düştüğünü ve sertliğin arttığını belirtmiştir. Kaynak hızı arttıkça kaynak metalini tanelerinin küçüldüğü, kaynak hızı azaldıkça tane yapısının büyüdüğünü tespit etmiştir.

Gülenç ve Kahraman [91], çalışmalarında, tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak yapılmış ve bu amaçla çeşitli teller ve tozlar kullanılmış olan aşınmış parçaları incelemiştir. Bu kaynaklı parçalar farklı yükler altında aşınma testlerine tabi tutulmuş ve sertlik ve mikroyapı değişiklikleri incelenmiştir. Pin-on aşınma test cihazı kullanılmış olup elde edilen sonuçlar, en sert kaynak metalinin en yüksek aşınma direnci, sertliği en düşük kaynak metalinin ise en az aşınma direnci gösterdiğini belirtmişlerdir. Elde edilen kaynak sertliği ve aşınma direncinin, kaynak telinin ve tozunun kimyasal bileşimine bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Yukarıda verilen literatür bilgileri ışığında dubleks paslanmaz çelik ve basınçlı kap çeliklerinin farklı kaynak yöntemleri ile ve benzer ve farklı olarak birleştirildiği çalışmaların olduğu bir gerçektir. Bu çalışmada ise bu farklı özellikteki iki malzeme (dubleks paslanmaz (AISI 2205) çelik ve basınçlı kap (P355GH) tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiş ve bağlantı dayanımları tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri ile test edilmiştir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada iki farklı malzeme olan dubleks paslanmaz çelik ve basınçlı kap çeliklerinin tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirilebilirlikleri araştırılmıştır. Bu iki farklı malzeme kaynak bölgesi mekanik özelliklerinin kıyaslanması açısından önce kendi aralarında, sonra da birbiriyle sabit kaynak hızı ve akım değerlerinde kaynaklanmıştır. Tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirilen bu malzemeler yüzey ve yüzey altı hatalarının tespit edilebilmesi için öncelikle tahribatsız muayene yöntemleriyle (gözle muayene, manyetik parçacık muayenesi, ultrasonik muayene ve radyografik muayene) test edilmiştir. Daha sonra kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için bir takım tahribatlı testler (çekme testi, eğme testi, darbe çentik testi, sertlik testi) uygulanmıştır. Bunların yanında kaynak bölgesindeki yapısal değişimleri görebilmek için mikroyapı çalışmaları ve taramalı elektron mikroskopunda kimyasal analizleri yapılmıştır.

6.1. KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışmada 300x130x12mm ölçülerinde AISI 2205 kalite dubleks paslanmaz çelik ve P355GH kalite basınçlı kap çeliği kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan AISI 2205 çelik ve P355GH çeliğinin mekanik özellikleri Çizelge 6.1’de, kimyasal bileşimi de Çizelge 6.2’de verilmiştir. Birleştirme işlemini yapabilmek için farklı malzemelerin ve paslanmaz çelik malzemelerin kaynaklarında kullanılan 3.2 mm çapında ELOX 309L kaynak teli koruyucu toz olarak da Eliflux BSS-A tozaltı ark kaynak tozu kullanılmıştır.

Çizelge 6.1. AISI2205 ve P355GH çeliklerinin mekanik özellikleri.

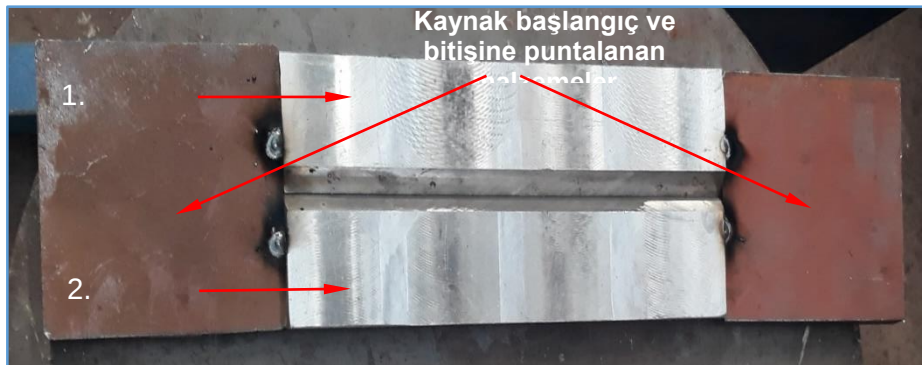
Malzeme	Min. Akma Dayanımı (MPa)	Min. Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
AISI2205	450	650	25
P355GH	345	510	20

Çizelge 6.2. Çalışmada kullanılan ana malzeme ve ilave metalin kimyasal bileşimleri [24,25].

AISI2205 kalite dubleks paslanmaz (%)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0,03	0,333	1,814	0,03	0,02	22	5,5	3,105	0,14	Kalan
P355GH kalite basınçlı kap çeliği (%)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Ti	Fe
0,186	0,20	1,45	0,010	0,013	0,009	0,021	0,05	0,001	Kalan
İlave metal ELOX 309L (%)									
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Fe
0,018	0,44	1,70	23,4	12,33	0,03	0,09	0,025	0,025	Kalan

6.2. MALZEMELERİN KAYNAĞA HAZIRLIĞI

Toplam 12 adet malzeme ısının tesiriyle metalürjik değişimlerin olmaması için bor yağ soğutmalı hidrolik testerede 300x130 mm boyutlarında kesilmiş ve freze tezgahında TS EN ISO 9692-2 standartlarına uygun olarak 30° V kaynak ağızı açılmıştır. Kaynaklanacak numuneler aralarında boşluk bırakılmadan birbirine ve aynı zamanda çarpılmaların da önüne geçebilmek için tezgâha puntalanmıştır. Ayrıca kaynak başlangıç ve bitiş noktalarında olası kusurları önlemek için numunelerin iki ucuna da parça puntalanmıştır. Kaynağa hazırlanan numuneler Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Kaynağa hazırlanan numuneler.

6.3. KAYNAK İŞLEMLERİ

Kaynak işlemi Ankara Sincan'da 1. Organize sanayi bölgesi Bauer Casings Makine San. ve Tic. Ltd. Şti. de ESAB LAF 1000 DC tozaltı ark kaynak makinasında yapılmıştır. Kaynak işleminde kullanılan tozaltı ark kaynak makinası ve kaynaklı parçalar Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Tozaltı ark kaynak işlemi a) Kaynak makinası yandan görüntüsü, b) kaynak makinası önden görüntüsü, c) kaynak işlemi devam ederken, d) kaynak işlemi sonrasında ergiyen koruyucu toz cürufu ve e) kaynağın temizlendikten sonraki son hali.

Toz altı ark kaynak yönteminin kök paso yapmaya elverişli olmaması sebebiyle kaynaklarda kök paso aynı ilave tel ile TIG kaynak yöntemiyle yapılmıştır. Kök

pasonun üzerine toz altı kaynak yöntemiyle ile 300 amper akım değeri ve 30 cm/dk sabit hız kullanılarak bir paso daha uygulanmıştır. Daha sonra birleştirmenin arka yüzü çevrilmiş TIG kaynak yöntemiyle yapılan kök paso spiral yardımıyla tıraşlanarak bu bölge tekrardan toz altı kaynak yöntemiyle kaynaklanmıştır. Bütün kaynak işlemleri boyunca kaynak parametreleri hiç değiştirilmemiştir. Malzemelerin kaynak işlemleri bitirildikten sonra havada kendi haline soğumaya bırakılmıştır.

6.4. KAYNAKLI BAĞLANTILARIN TAHRİBATSIZ MUAYENESİ

Tahribatsız muayene; test edilecek malzemenin fiziksel bütünlüğünü koruyarak, ona zarar vermeden muayene edebilme imkanı sağlamaktadır. Çeşitli tahribatsız muayene yöntemlerini kullanarak malzemenin yüzeyinde ve yüzey altındaki kusurları tespit etmek mümkündür. Tahribatsız muayene yöntemiyle test edilen numunenin tekrar kullanılabilir olması bu yöntemin en önemli avantajlarından.

Bu çalışmada tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirilen numunelere tahribatsız muayene yöntemlerinden gözle muayene, manyetik parçacık muayenesi, ultrasonik muayene ve radyografik muayene testleri uygulanmıştır.

Kaynaklı birleştirmelerin manyetik parçacık ve ultrasonik testleri Gazi Üniversitesi Kaynak ve birleştirme teknolojileri uygulama ve araştırma merkezi'nde (KABTEM) seviye 1 ve seviye 2 uzman personel tarafından yapılmıştır. Radyografik muayenesi ise Avrasya NDT şirketinde alanında uzman personel tarafından yapılmıştır.

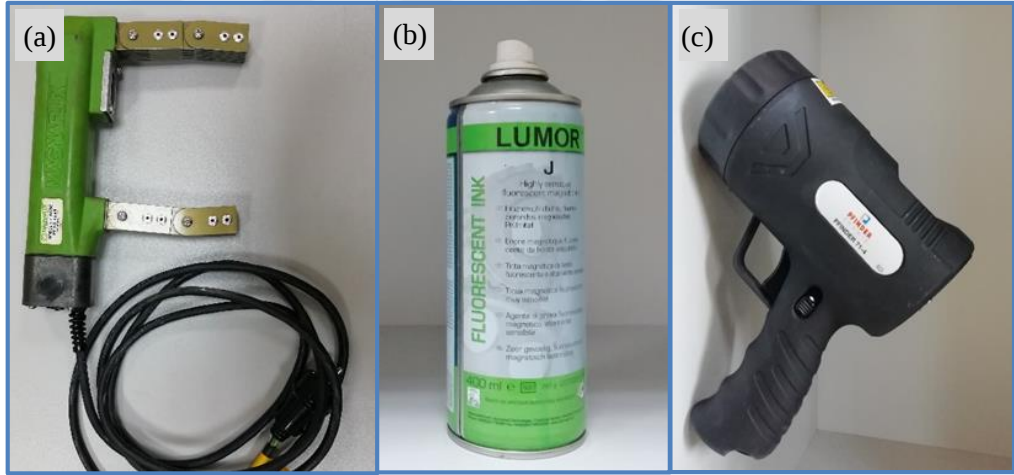
6.4.1. Gözle Muayene

Gözle muayene malzemenin yüzeyinde gözle görünebilen devamsızlıkların belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Muayene çıplak gözle ve gerektiğinde büyüteç, ayna, mastar gibi yardımcı elemanlar kullanılarak yapılır. Bu çalışmada muayene işlemleri standartlar dahilinde aydınlatma, mesafe ve açı dikkate alınarak çıplak göz ile yapılmıştır.

6.4.2. Manyetik Parçacık Muayenesi

Manyetik parçacık muayenesi ferromanyetik malzemelerin yüzey ve yüzey altı hatalarının tespitinde yaygın olarak kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Yöntem genel olarak kontrol edilecek ferromanyetik malzemelerin bir manyetik alan oluşturucu tarafından manyetize edilmesi ve malzeme yüzeyine uygulanan manyetik parçacıkların süreksizliklerin üzerine birikmek suretiyle bir indikasyon oluşturması esasına dayanır [92].

Numunelerin manyetik parçacık muayenesi doğru akımda manyetik boyunduruk kullanılarak florişıl boyalar ile yapılmıştır. Muayene sonrasında malzemeler alternatif akımla de manyetize işlemi yapılarak ntrleştirilmiştir. Muayene işlemleri kaynaklı numunelerin hem kep tarafına hem de kök tarafına uygulanmıştır. Manyetik parçacık muayenesinde kullanılan ekipmanlar şekil 6.3’de gösterilmiştir.



şekil 6.3. Manyetik parçacık test ekipmanları a) Manyetik boyunduruk, b) Florişıl manyetik parçacık spreyi ve c) Ultra viyole (UV) fener.

6.4.3. Ultrasonik Muayene

Ultrasonik muayene; insan kulağının duyamayacağı kadar yüksek frekanslı ses dalgalarının bir prob aracılığıyla test edilecek malzemeye gönderilmesi ve bu ses dalgalarının bir süreksizliğe çarptıktan sonra tekrar proba yansarak süreksizliğin konum ve boyutlarının belirlenmesi esasına dayanır [93].

Kaynak dikişlerinin ultrasonik muayenesi Glardoni RDG2500 ultrasonik test cihazında yapılmıştır. Muayene 45° açılı problarla seviye 2 uzman personel tarafından TS EN ISO 11666, TS EN ISO 23279 ve TS EN ISO 17640 standartlarına göre uygulanmıştır. Muayenede kullanılan ultrasonik test cihazı Şekil 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.4. Ultrasonik muayene cihazı.

6.4.4. Radyografik Muayene

Radyografik muayene metal ve metal olmayan tüm malzemelerin yüzeyinde veya iç bölgelerindeki her türlü süreksizliklerin tespitinde yaygın olarak kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu yöntemle malzemenin iç bölgelerinde ve yüzeyinde bulunan her türden çatlakların, gaz boşluklarının, çekinti boşluklarının, yapısal kusurların, inklüzyonların, hatta malzemelerdeki yoğunluk farklılıklarının belirlenmesi mümkündür. Endüstriyel anlamda yapılan radyografik muayene yöntemlerinin genel manada iki çeşidi vardır bunlardan ilki gama kaynağı radyografisi ikincisi ise X- ışını radyografisidir [94]. Bu çalışmada kaynaklı numuneler X- ışını radyografisi yöntemiyle test edilmişlerdir.

Malzemelerin radyografik muayenesi GEMIX G-200 model dijital radyografi muayene sisteminde TS EN ISO 17636-1, TS EN ISO 5579 ve TS EN ISO 19232 standartları göz önünde bulundurularak seviye 2 uzman personel tarafından yapılmıştır. Radyografik muayene ünitesi Şekil 6.5’de gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Radyografi muayene ünitesi.

6.5. KAYNAK BAĞLANTILARININ TAHRİBATLI MUAYENESİ

Daha önce tahribatsız muayeneleri yapılan kaynaklı bağlantılara mekanik özelliklerini belirlemek için ilgili standartlar ışığında çekme, eğme, darbe çentik ve sertlik testleri uygulanmıştır.

6.5.1. Numune Hazırlama

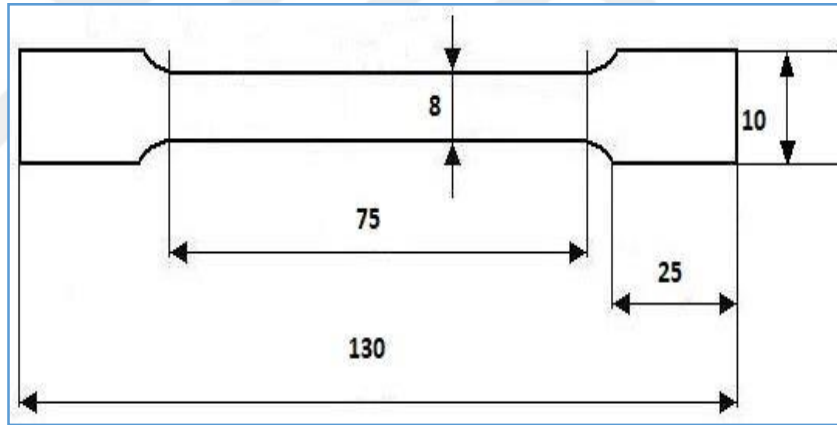
Numune hazırlama sırasında AISI 2205 malzemenin işlenebilirliğinin zor olması ve daha hassas çalışma adına tozaltı ark kaynak yöntemiyle kaynatılan malzemeler tel erozyon yöntemiyle istenilen ölçülerde kesim işlemleri yapılmıştır. Kesim işlemleri sırasında numunelerin kaynak başlangıç ve bitiş noktalarının ilk 20 mm'si fireye ayrılmış ve testlerde kullanılmamıştır. Tel erozyonda kesilen malzemeler torna ve freze tezgahlarında işlenerek her numune kendi test standartlarına göre şekillendirilmiştir.

Altı adet kaynaklı bağlantıların her birinden ve ana malzemelerden 3'er adet çekme testi numunesi, 9'ar adet (3 kaynak metali, 3 dubleks ITAB ve 3 basınçlı ITAB) çentik darbe testi numunesi ve 3'er adette eğme testi numunesi çıkartılmıştır. Ayrıca makro-mikroyapı incelemesi ve sertlik testleri için birer adet numune daha hazırlanmıştır.

6.5.2. Çekme Testi

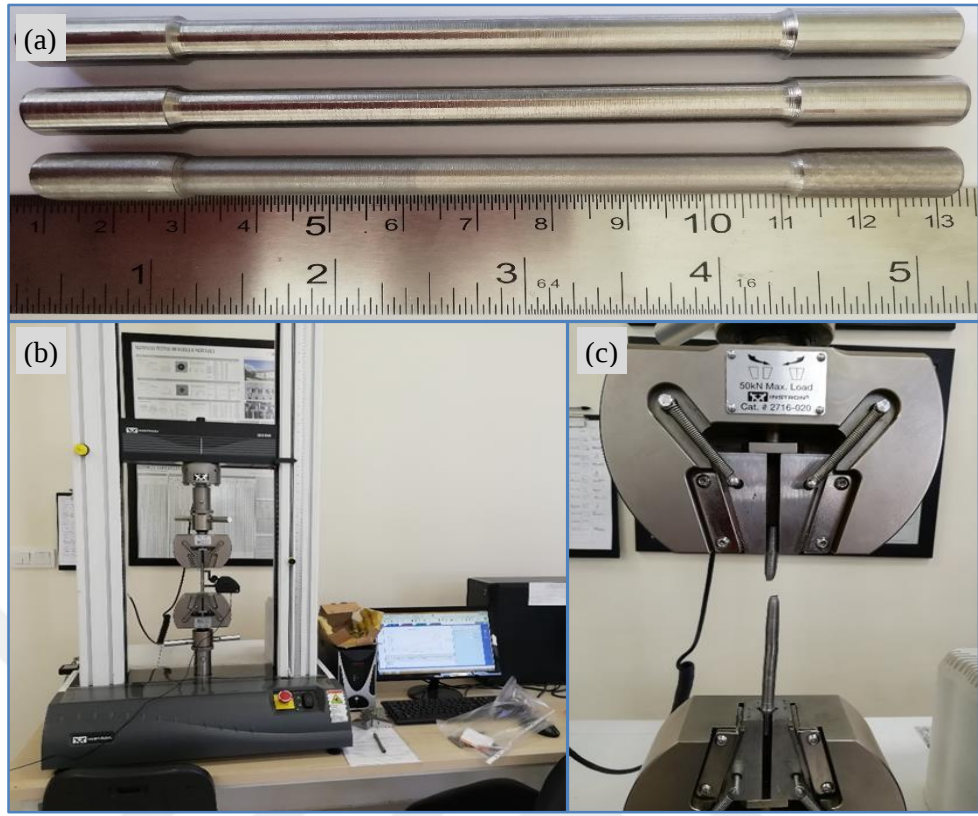
Çekme deneyi bize malzemenin mukavemeti hakkında bilgi veren önemli mekanik test yöntemlerinden birisidir. Test numunelerinin çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması, elastik ve plastik deformasyon sınırları çekme testi sonucunda elde edilir. Test parçaları sabit sıcak ve hızda tek eksenle kopuncaya kadar çekilerek test gerçekleştirilir. Testi yapan cihaz malzemenin uzamasını kaydeder ve testin sonunda gerilme birim şekil değiştirme grafiğini oluşturur [95].

Çekme testi için kaynaklı bağlantılardan ve ana malzemelerden 3'er adet olmak üzere toplam 15 adet numune hazırlanmıştır. Numuneler 130 mm boyunda ve dairesel olarak hazırlanmıştır. Şekil 6.6'da standart bir çekme testi numunesinin teknik resim çizimi gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Çekme testi numunesi teknik çizimi.

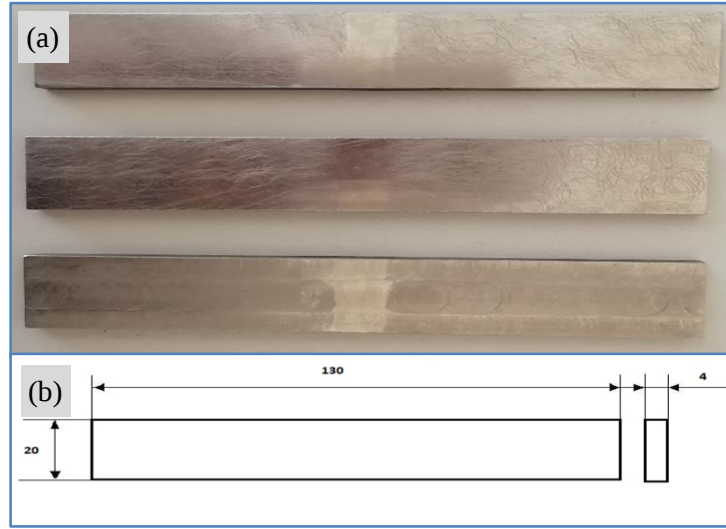
Çekme deneyleri “TS EN ISO 4136:2012; metalik malzemelerin kaynakları üzerinde tahribatlı deneyler-enine çekme deneyi” standardına uygun olarak KBÜ, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Laboratuvarında bulunan AG-50 kN SHIMADZU Autograph çekme/basma cihazında ve 2 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan test numuneleri ve çekme testinin yapıldığı cihaz Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Çekme test cihazı ve çekme numuneleri a) kaynaklı çekme testi numuneleri, b) test devam ederken çekme test cihazı ve c) test cihazında kopan numune.

6.5.3. Eğme Testi

Eğme testi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji Malzeme Mühendisliği bölümü mekanik testler laboratuvarında yapılmıştır. Kaynaklı bağlantıların her birinden ikişer adet olmak üzere toplam altı adet eğme test numunesi hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken merkezde 6 mm kalınlık kalacak şekilde kep ve kök bölgelerinden eşit miktarda talaş kaldırılarak tıraşlanmıştır. Hazırlanan numunelere her birleştirme türü için bir adet kep yönüne (ilk paso yönüne) bir adet kök yönüne (II. veya kök paso) doğru 180° eğme testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.8’da eğme testi numunelerinin gerçek görüntüsü ve teknik resim çizimi verilmiştir.



Şekil 6.8. Eğme test numuneleri a) Çekme testi numune fotoğrafı ve b) Teknik resmi.

6.5.4. Çentik Darbe Testi

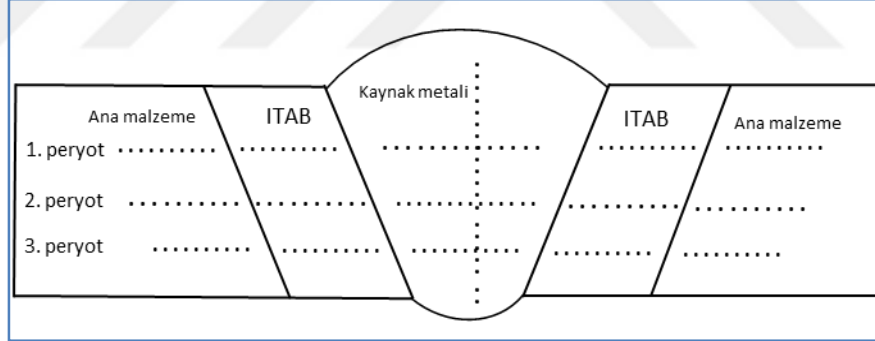
Çentik darbe testi için kaynak metalinden 3, ITAB'dan 3 ve ana malzemelerden de 3'er numune alınarak toplamda 27 numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Instron wolpert PW30 Marka cihazda ve oda sıcaklığında teste tabi tutulmuştur. Şekil 6.9'da çentik darbe testinin şematik birer görseli ve gerçek test numunesinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.9. Çentik darbe testi numuneleri.

6.5.5. Sertlik Testi

Kaynaklı birleştirmelerin sertlik ölçümleri için hazırlanan numuneler öncelikle 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmış sonrasında ise 6 ve 3 mikron keçelerde parlatılma işlemine tabi tutulmuşlardır. Hazırlanan numunelerin sertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçme yöntemiyle 500 gr yük uygulanarak kaynak metali, ITAB ve ana malzemeyi kapsayacak şekilde mikro sertlik ölçme cihazında yapılmıştır. Ölçümler 1 mm aralıklarla her numune için üç farklı bölgeden 3 şerit oluşturacak şekilde yapılmıştır. Ayrıca birer tane de kepten kök yönüne doğru kaynak yönüne dik olacak şekilde ölçüm alınmıştır. Her ölçüm şeritinde kaynak metalinden 10, ITAB'dan 10 ve ana malzemelerden 10'ar ölçüm alınmıştır. Toplamda her numune için kendi aralarında yapılan kaynaklarda 90 ölçüm, dubleks ile basınçlı kap çeliklerinin birleştirildiği kaynaklar için 120 ölçüm alınmıştır. Sertlik testi yapılan numunelerin sertlik ölçüm noktaları Şekil 6.10'da, sertlik ölçümlerinin yapıldığı test cihazının görüntüsü ise Şekil 6.11'de verilmiştir.



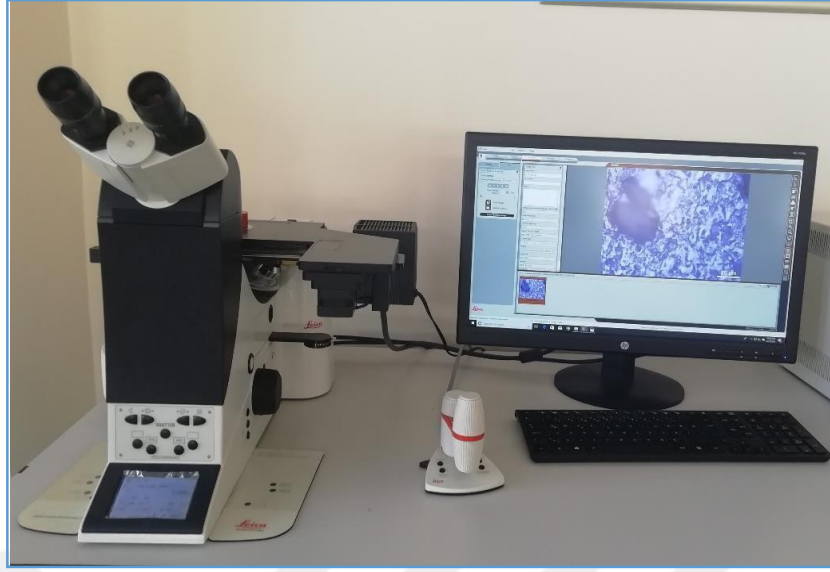
Şekil 6.10. Numunelerin sertlik ölçüm noktaları.



Şekil 6.11. Sertlik test cihazı.

6.6. MAKRO VE MİKROYAPI İNCELEMELERİ

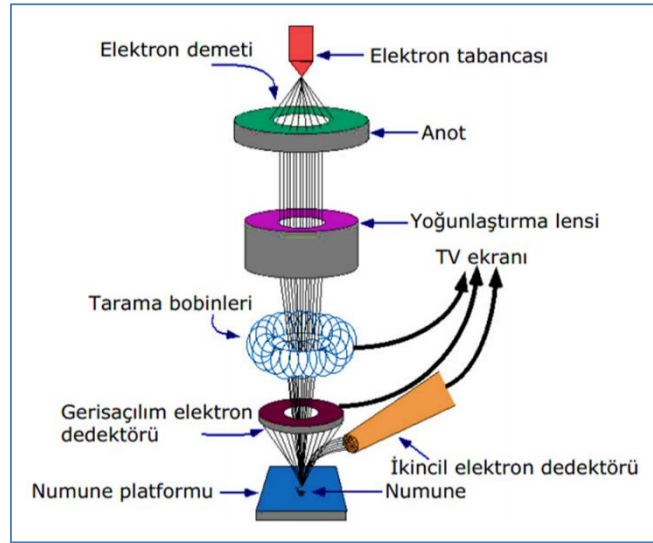
Makro ve mikroyapı incelemesi için hazırlanan numunelere ilk olarak metalografik işlemlerin daha kolay yapılabilmesi için bakalite gömme işlemi yapılmıştır. Bakalite gömme işleminden sonra mikroyapı görüntülerini alabilmek için numuneler sırasıyla 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin akabinde önce 6 mikron sonra da 3 mikronluk keçelerle uygun solüsyonlar kullanarak parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatılan basınçlı kap çeliği numuneler % 3'lük Nital çözeltisinde 15 saniye dağlanmıştır. Dupleks paslanmaz çelik ve kaynak metali ise elektrolitik dağlama yöntemi kullanılarak % 40 NaOH + % 60 saf su çözeltisinde 30 saniye boyunca dağlanmışlardır. Dağlanan numunelerin 50, 100, 200, 500 ve 1000 büyütmelerde mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Görüntülerin alındığı optik mikroskobun fotoğrafı Şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.12. Optik mikroskop

6.7. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ANALİZİ

Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM), manyetik malzemelerin yüzeylerini yüksek enerjili elektronlarla tarayarak element ve yüzey analizleri yapan bir yöntemdir. Oldukça yüksek büyütme oranlarına çıkabilir ve mikron seviyelerinde çok küçük alanlara odaklanabilir. Bu yöntem çok küçük ebatlardaki nesnelerin büyük ve yüksek çözünürlü görüntülerini almak içinde kullanılabılır. SEM; numune hücresi, optik kolon ve görüntüleme ünitelerinden oluşmaktadır. Ayrım gücünün yüksek olması ve analiz birleştirme gibi özelliklerinden dolayı kullanım alanı genişlemektedir [95-97]. Taramalı elektron mikroskobunun çalışma şeması Şekil 6.13’de verilmektedir.



Şekil 6.13. Taramalı elektron mikroskobu çalışma şeması [97].

Bu çalışmada tüm birleştirmelerden, ana malzeme, ITAB ve kaynak metalini kapsayacak şekilde birer adet çizgisel ve yine her bölgeden birer adet olmak üzere EDS alan analizleri yapılmıştır. Çalışmada JEOL marka JSM-6060LV model SEM cihazı kullanılmış olup görüntüsü Şekil 6.14’de verilmiştir.

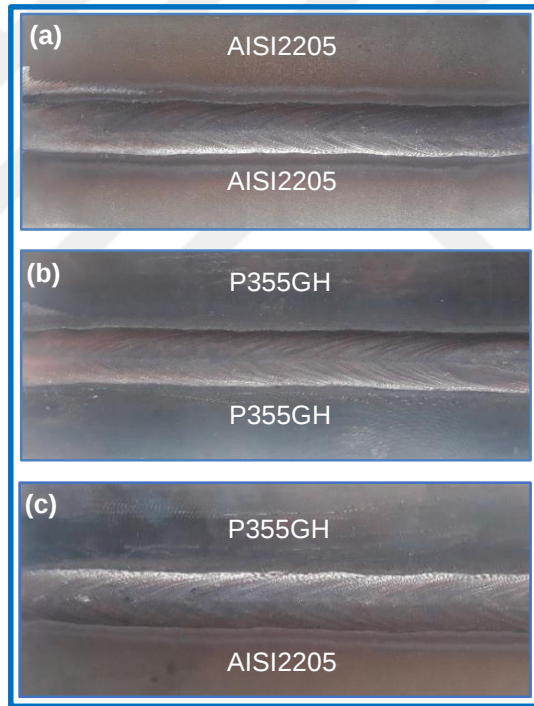


Şekil 6.14. Taramalı elektron mikroskobu.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik malzemeler ile P355GH basınçlı kap çelikleri kendi aralarında benzer ve birbirleri arasında farklı kombinasyonda olacak şekilde, aynı ilave metal ve toz kullanılarak, sabit parametrelerde tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin görüntüleri Şekil 7.1’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Kaynaklı birleştirmelerin makro görüntüleri a) AISI2205-AISI2205 P355GH-P355GH ve c) P355GH-AISI2205.

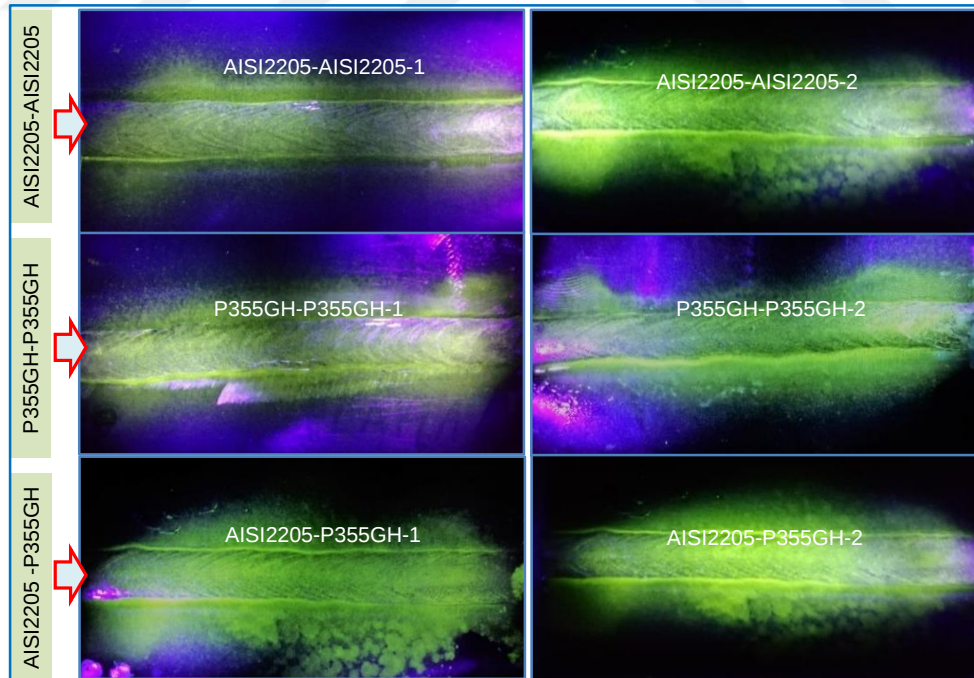
Birleştirme işlemleri sonrasında kaynaklı bağlantıların, kaynak bölgelerinin hata barındırıp-barındırmadıkları tahribatsız test yöntemleri ile, mekanik özellikleri ise tahribatlı testler ile belirlenmeye çalışılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Ayrıca kaynak bölgesi mikroyapı, sertlik ve SEM çalışmaları ile değerlendirilmeye çalışılmıştır.

7.1. GÖZLE MUAYENE

Birleştirmelerin görsel muayenesi TS EN ISO 17637 numaralı standartına göre alanında uzman personel tarafından yapılmıştır. Muayene sonucunda görsel testlerde görülmesi muhtemel yanma olukları, kök sarkması, aşırı iç bükey-dış bükey kaynak dikişi, yüzeye açık çatlak ve gaz boşluğu gibi kaynak hatalarına rastlanılmamıştır. Ayrıca kaynak esnasındaki numuneleri sağlam puntalama ve sabitleme işe yaramış, kaynaklı numunelerde kabul edilemez boyutlarda açısız çarpılma ve kalınlık sapması hatası (high-low defect) görülmemiştir.

7.2. MANYETİK PARÇACIK MUAYENESİ

Kaynaklı bağlantılar yüzey ve yüzey altı hatalarının tespiti için florişil manyetik parçacık testine tabi tutulmuşlardır. Yapılan test sonuçlarına göre bağlantılarda herhangi bir indikasyon tespit edilmemiştir. Yapılan test görüntüleri Şekil 7.2’de verilmiştir. Şekilde verilen görüntüler göz ile muayene sonucunu doğrular niteliktedir.



Şekil 7.2. Kaynaklı numunelerin florışıl test fotoğrafları.

7.3. ULTRASONİK MUAYENE

Kaynak bölgesindeki yüzey altı kusurların tespiti için numunelere ultrasonik muayene yöntemiyle test yapılmıştır. Bu yöntem bize radyografik muayene yöntemlerinde tespit etmesi daha zor olan, daha hassas ve kılcal hataları görme imkanı vermektedir. Şekil 7.3’de malzemelerin ultrasonik test raporu sunulmuştur.

Gazi Üniversitesi
Kaynak ve Birleştirme Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi(KABTEM)

ULTRASONİK TEST RAPORU
ULTRASONIC TEST REPORT

Tarih : 22.05.2019

Test parçası	Tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirilmiş levha										
Muayene gerekleri	% 100 Ultrasonik muayene										
Malzeme	AISI 2205, P355GH										
Boyutlar	300X130X12 mm										
Prosedür	TS EN ISO 11666, TS EN ISO 23279, TS EN ISO 17640										
Muayene sınıfı	Metot 1 kabul seviyesi 2										
UT cihazı	Gladoni RDG2500										

Prob					Kalibrasyon		Maksimum ses mesafesi için kazanç ayarı						
Tarama pozisyonu	Prob özellikleri	Demet açısı	Prob indeksi	Taban adaptasyonu	Kalibrasyon bloğu	Kalibrasyon yansıtıcı	Kayıt seviyesi	Maksimum ses mesafesi	Duyarlılık kalibrasyonu için ilave kazanç	Transfer düzeltmesi	Diğer düzeltmeler	Duyarlılık düzeltmeleri	Ses zafılaması dB/mm
1	8X9 4MHz	45°	12	+1EY	m.p	1,6 RAD	DAC	1,2xsp	+2db	✓	✓	+2db	✓
1	8X9 4MHz	45°	12	+1EY	m.p	1,6 RAD	DAC	1,2xsp	+2db	✓	✓	+2db	✓
2	8X9 4MHz	45°	12	+1EY	m.p	1,6 RAD	DAC	1,2xsp	+2db	✓	✓	+2db	✓
2	8X9 4MHz	45°	12	+1EY	m.p	1,6 RAD	DAC	1,2xsp	+2db	✓	✓	+2db	✓

Parça no	Prop tipi	Ses mesafesi	Temas yüzeyinden	Boyuna hata	Enine hata	Kayıt uzunluğu	Arka duvar yankısı	Kabul	Red	Açıklama
AISI2205-AISI2205 1	-	-	-	-	-	-	-	✓		
AISI2205-AISI2205 2	-	-	-	-	-	-	-	✓		
P355GH-P355GH 1	-	-	-	-	-	-	-	✓		
P355GH-P355GH 2	-	-	-	-	-	-	-	✓		
AISI2205-P355GH 1	-	-	-	-	-	-	-	✓		
AISI2205-P355GH 2	-	-	-	-	-	-	-	✓		

Testi yapan: *Museyin Kırıköner*

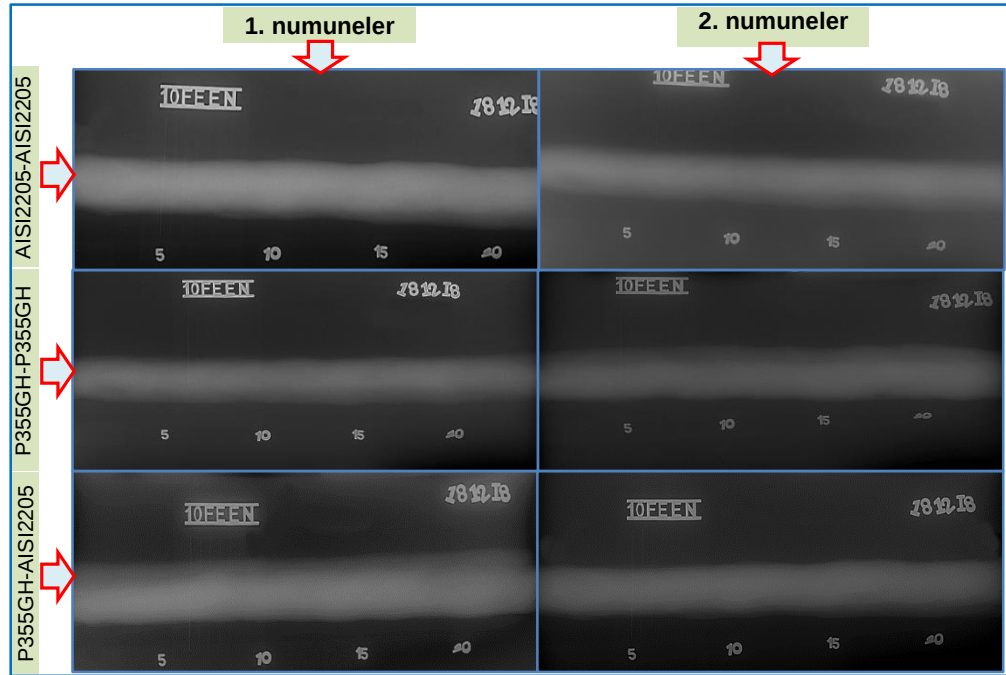
Testi onaylayan: *Hakan Aras*

Şekil 7.3. Ultrasonik test raporu.

Ultrasonik muayenede, kaynaklı bağlantıların kaynak bölgesinde oluşabilecek nüfuziyet yetersizliği, yanma olukları, gözenek oluşumu, kalıntılar, çatlaklar vb. hatalar belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan ultrasonik muayene sonucunda standartların izin vermediği bir kaynak hatasına rastlanmamıştır. Kaynaklı malzemelerin tamamı ultrasonik muayene yönteminden kabul alarak geçmişlerdir. Akay ve arkadaşları[98]; tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı tel ve tozlar kullanılarak X60, X65 ve X70 malzemeleri birleştirmişler ve yüzey altı kusurların tespiti için yaptıkları ultrasonik muayeneye sonucunda herhangi bir kaynak hatası gözlemlenmemişler ve gözetilen normlar dâhilinde bağlantıların kabul edilebilir olduklarını rapor etmişlerdir.

7.4. RADYOGRAFİK MUAYENE

Birleştirmede oluşması muhtemel yüzey ve yüzey altı hataların tespiti için kaynaklı numunelerin tamamına radyografik muayene testi uygulanmıştır. Radyografik muayene görüntüleri Şekil 7.4’de, radyografik muayenesi yapılan numunelerin inceleme sonucu hazırlanan radyografik test raporu ise Şekil 7.5’te verilmiştir.



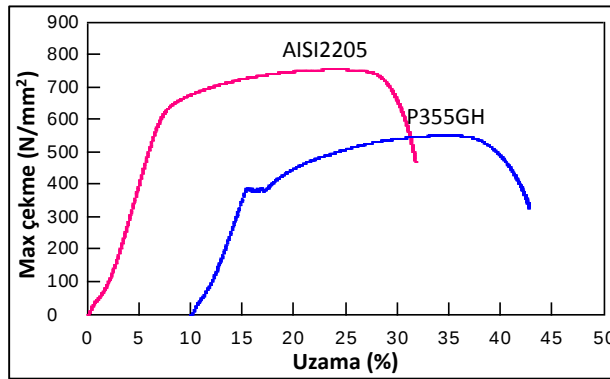
Şekil 7.4. Kaynak yapılan malzemelerin radyografik görüntüleri.

7.5. ÇEKME TESTİ

AISI2205 ve P355GH çeliklerinin kaynak öncesi (ana malzeme) ve kaynak sonrası kaynaklı bağlantıların çekme testleri yapılmıştır. Çizelge 7.1’de ana malzeme ve kaynaklı birleştirmelerin çekme test sonuçları ve ortalaması Şekil 7.6’da ise ana malzemelerin çekme grafikleri verilmiştir.

Çizelge 7.1. Çekme test sonuçları ve ortalaması.

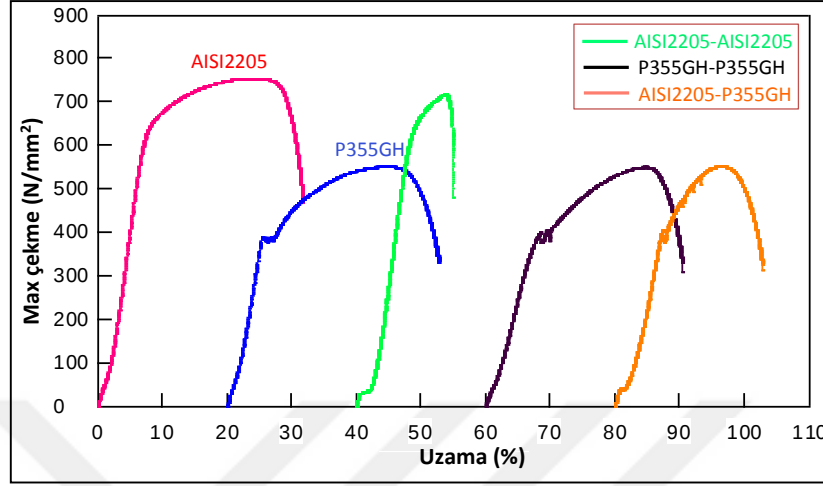
		1. ölçüm	2. ölçüm	3. ölçüm	Ortalama
P355GH Ana malzeme	Max. Çekme (N/mm²)	554,81	551.93	555.91	553,92
	Uzama (%)	24.89	25.77	24.37	25,01
AISI2205 Ana malzeme	Max. Çekme (N/mm²)	756.97	756.96	758.98	757,64
	Uzama (%)	23.38	24.24	24.23	23,95
AISI2205-AISI2205 Birleştirme	Max. Çekme (N/mm²)	719.57	722.63	723.44	721,88
	Uzama (%)	14.66	12.96	13.84	13,82
P355GH- P355GH Birleştirme	Max. Çekme (N/mm²)	551.25	554.33	553.21	552,93
	Uzama (%)	23.78	23.96	25.77	24,50
AISI2205- P355GH Birleştirme	Max. Çekme (N/mm²)	555.17	553.32	555.55	554,68
	Uzama (%)	17.06	16.03	16.11	16,40



Şekil 7.6. Ana malzemelerin ortalama çekme grafikleri.

Çekme test sonuçları incelendiğinde ana malzemeler içerisinde en yüksek çekme mukavemetinin AISI2205 malzemede olmasına rağmen % uzama değerlerinin birbirine çok yakın yakın olduğu görülmektedir. Kaynaklı numunelere gelindiğinde ise en yüksek çekme değerine AISI2205-AISI2205 birleştirmesinde ulaşılmıştır.

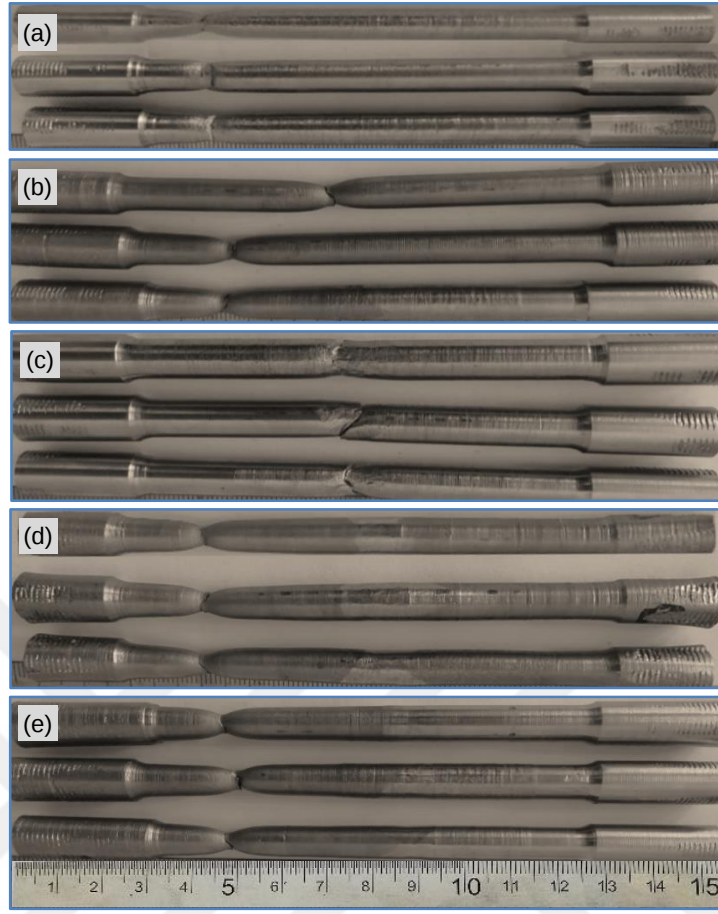
Şekil 7.7’de ana malzeme ve kaynaklı numunelerin ortalama çekme grafikleri verilmiştir.



Şekil 7.7. Ana malzemeler ve kaynaklı numunelerin ortalama çekme grafikleri.

AISI2205 dubleks paslanmaz-AISI2205 dubleks paslanmaz çelik malzemelerin kendi aralarında tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirildiği numunelerde, ana metale göre kaynaklı numunelerin çekme dayanım değerlerinde ve % uzama oranlarında belirgin bir düşüş görülmüştür. AISI2205 dubleks paslanmaz çelik ana malzemeden ölçülen $757,64 \text{ N/mm}^2$ çekme mukavemeti, kaynaklanmış numunede yaklaşık % 5 kayıp ile $721,88 \text{ N/mm}^2$ 'ye, % 23,95 olan uzama ise % 57 kayıp ile % 13,82'ye düşmüştür. Bu değerlerden kaynaklı bağlantının uzamasının daha fazla etkilendiği sonucu çıkmaktadır. Kaynaklı birleştirmelerde ilave metalin mekanik özellikleri kaynağın mekanik özelliğini belirleyen unsurlardandır. Dolayısı ile ilave metalin mekanik özelliklerinin düşük olması kaynaklı birleştirmenin çekme dayanım değerlerini düşürmüştür.

Ana malzeme ve kaynaklı numune çekme grafikleri genel olarak incelendiğinde ana malzeme ve birleştirmelerin % uzama miktarları birbirine yakinken AISI2205-AISI2205 birleştirmesinin yüzde uzama miktarında diğer numunelere göre ciddi bir düşüş olduğu görülmektedir. Çekme testi sonunda kopan numunelerin görüntüleri Şekil 7.8’de verilmiştir.



Şekil 7.8. Çekme testi sonucunda kopan numunelerin görüntüleri a) AISI2205 ana malzeme, b) P355GH ana malzeme, c) AISI2205-AISI2205 birleştirmesi, d) P355GH-P355GH birleştirmesi ve e) AISI2205-P355GH birleştirmesi.

Çekme testleri sonucunda AISI2205-AISI2205 birleştirmelerinde kopma kaynak metalinden olurken, farklı malzeme birleştirmelerinde (AISI2205-P355GH) ve basınçlı kapların kendi aralarındaki birleştirmelerinde (P355GH-P355GH) kopmaların tümü P355GH ana malzemeden gerçekleşmiştir. Normal şartlarda çekme testine tabi tutulan kaynaklı numunelerin kaynaktan veya ITAB bölgesinden kopması istenilen bir durum değildir. Kopmanın ana malzemeden olması beklenir [100]. Fakat bu çalışmada kaynak işlemi için seçilen ilave metal-toz kombinasyonu, AISI2205 ve P355GH gibi mekanik, metalürjik ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı malzemelerin kaynağı için özellikle seçilmiştir. Farklı malzemeleri birleştirebilmek için seçilen bu ilave tel ve toz, AISI2205 malzemenin mukavemetinden daha düşük olduğundan dolayı çekme testi sırasında AISI2205-AISI2205 birleştirmelerinde kopma kaynak bölgesinden gerçekleşmiştir.

Çekme testi sonrası kopma numune yüzeyleri incelendiğinde ise P355GH malzemedен gerçekleşen kopmaların tamamının ciddi bir plastik deformasyona uğrayarak sünek türde bir davranış sergilediği görünmektedir. Burada sünek kopmanın sebebi olarak P355GH'nin plastik deformasyon kabiliyetinin yüksek olması ve sertliğinin AISI2205 malzemeye göre oldukça düşük olması gösterilebilir. AISI2205 ana malzeme ve AISI2205-AISI2205 birleştirmesinde gerçekleşen kopmalar değerlendirildiğinde ise P355GH'den meydana gelen kopmaların aksine oldukça gevrek türde bir kopma gerçekleşmiştir.

Siridhar ve arkadaşları [101]; 200x100x12 mm boyutlarındaki AISI304 östenitik paslanmaz çelik levhaları 308L kaynak teli kullanarak tozaltı ark kaynak yöntemiyle üç farklı akım parametresi (400A, 430A, 460A) ile birleştirmişlerdir. Kaynak akımındaki artışla çekme ve akma dayanımlarının da doğru orantılı olarak arttığını tespit etmişlerdir. Bunun sebebini ise kaynak akım değerlerindeki artışın kaynak nüfuziyetini de arttırmasına bağlamışlardır. Aynı zamanda çekme testi sonrası kopan numune yüzeylerini incelemişler ve numunelerin plastik deformasyona uğrayarak sünek tipte bir kopma gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

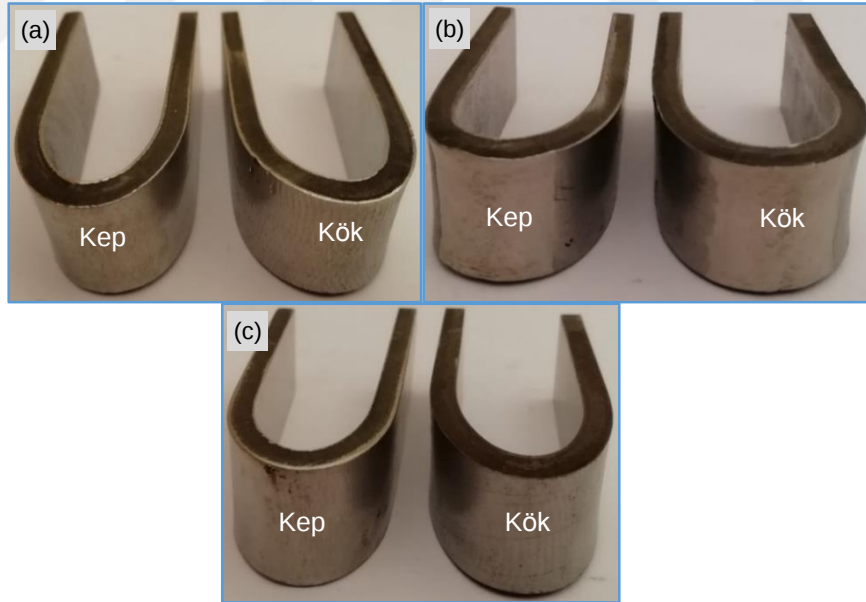
Gülsün [102]; östenitik paslanmaz çelikleri tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda çekme test sonuçlarının kaynak hızına bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini, kaynak hızı arttıkça çekme mukavemetinin arttığını ve yüzde uzamanın düştüğünü belirtmiştir. Bu durumun ise kaynak metalinin hızlı soğumasından kaynaklandığını rapor etmiştir.

Yapılan bir başka çalışmada ise Tekin [89] paslanmaz çelik malzeme ile düşük karbonlu alaşımsız çelik malzemelerin tozaltı kaynak metodu ile birleştirmiş ve birleştirmelere çekme testi uygulamıştır. İki farklı metalin tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirilmesinden hazırlanan çekme numuneleri test sırasında akma dayanımı daha düşük olan malzeme tarafından boyun vermeye başlamış ve yük artışıyla beraber kopmanın tüm testlerde aynı malzemedен gerçekleştiği belirtilmiştir.

7.6. EĞME TESTİ

Eğme testi esnasında sünek bir malzeme test ediliyorsa malzeme yüksek basma dayanımı göstererek herhangi bir hasara uğramadan eğilmektedir. Gevrek bir malzeme test edilirse, çekme gerilmesi daha yüksek değerlere ulaşır ve malzeme tamamen eğilmeden belli bir açıda hasara uğrar. Eğer test edilen numunede kalınlık yönünde mikro yapısal bir hata yoksa uygulanması gereken basma ve çekme yükleri de artar. Kaynaklı birleştirmelerde, kaynak dikişi ve çevresinin şekil değiştirme kabiliyeti ve kaynak dikişi ile esas metal arasında iyi bir bağlantı olup olmadığı bu deneylerle tespit edilmektedir [103]. Kaynaklı numunelere, kep ve kök yönüne eğme sonucunda elde edilen makro görüntüler Şekil 7.9’da verilmiştir.

Kaynaklı bağlantılara uygulanan 180° eğme testi sonucunda tüm numunelerde kaynak bölgesinde gözle görünebilir bir kaynak hatasına rastlanmamıştır. Bu da bize kaynaklı bağlantıların başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.9. Eğme testi sonrasında numunelerin kep ve kök görüntüleri a) AISI2205-AISI2205, b) P355GH-P355GH ve c) AISI2205-P355GH.

Eğme test sonuçlarına göre bu çalışmada tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirilen tüm kaynak kombinasyonlarının kaynak bölgesi plastik deformasyon özelliklerinin

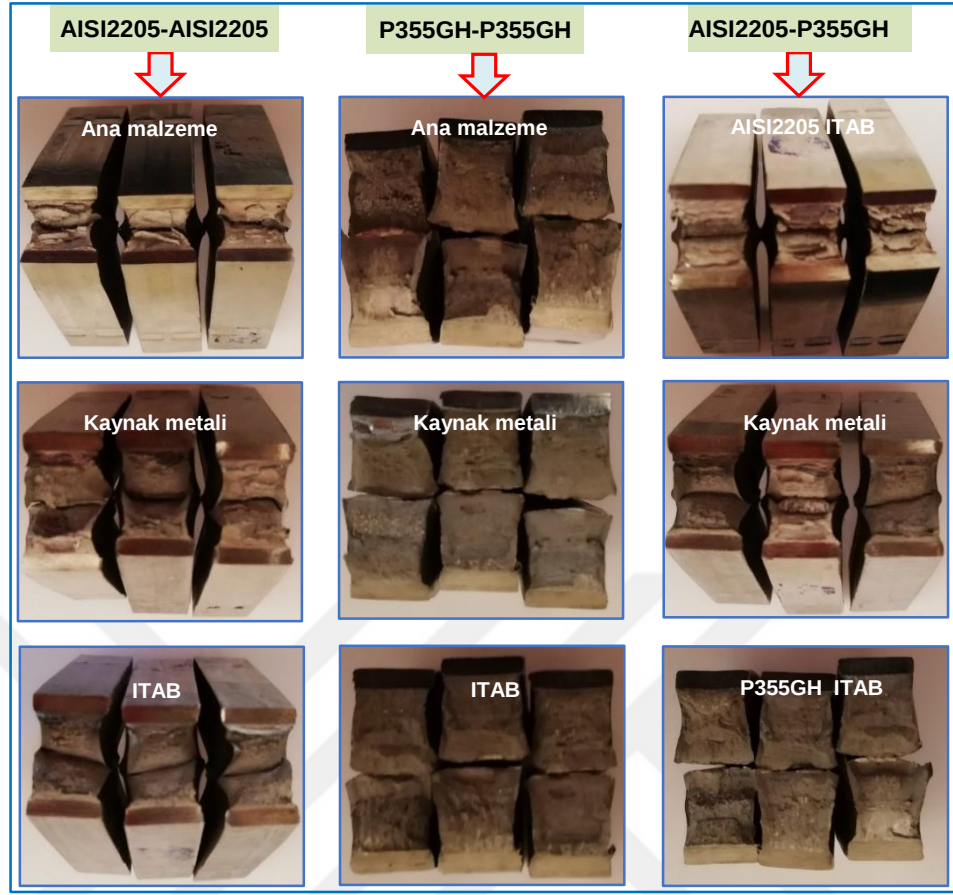
istenilen ölçülerde olduğu ve ilgili servis şartlarında çalışabileceği ispatlanmıştır. Akay; yaptığı çalışmada tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirdiği malzemeleri 180° eğme testine tabi tutmuş ve numunelerde herhangi bir çatlama, yırtılma gibi hatalara rastlamadığını belirtmiştir [67].

Yapılan başka bir çalışmada Dünder [100]; baraj tesisatlarında sıklıkla tercih edilen S355j2 çelik malzemeyi tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirmiştir. Birleştirmeye 180° eğme testi uygulamış ve TS EN 15614-1 standardına göre 3 mm'den büyük hata olmama şartının sağladığını belirtmiştir.

Saoudi ve arkadaşları [104]; yüksek mukavemetli API X70 çelik boruları tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirmiş ve bağlantıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bağlantılara uygulanan 180° eğme testleri sonucunda numunelerin yüksek süneklik göstererek büküldüğünü ve deformasyona uğrayan bölgede herhangi bir hasara rastlanmadığını belirtmişlerdir.

7.7. ÇENTİK DARBE TESTİ

Tozaltı ark kaynak yöntemiyle kendi aralarında birbirleriyle birleştirilen dubleks paslanmaz çelik (AISI2205), basınçlı kap (P355GH) çeliği ve farklı kombinasyonda birleştirilen (AISI2205-P355GH) malzemelerin kaynak metali, ITAB ve ana malzeme bölgelerinden alınan numunelere tokluk tespiti için darbe çentik testi uygulanmıştır. Şekil 7.10'da darbe çentik testi sonrası numunelerin kırılmış haldeki fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 7.10. Çentik darbe testi sonrası kırık numuneler.

Yapılan çentik darbe testi sonucunda numunelerin bir kısmı tamamen kopup ayrılırken diğer kısmında standartların izin verdiği ölçüde kopma tam gerçekleşmemiştir. Çizelge 7.2’de AISI2205 dubleks paslanmaz çelik ve P355GH basınçlı kap ana malzemelere uygulanan çentik darbe testi sonucu bulunan tokluk değerleri tablo olarak verilmiştir.

Çizelge 7.2. AISI2205 ve P355GH ana malzeme tokluk değerleri (J).

Malzeme	I. ölçüm	II. ölçüm	III. ölçüm	Ortalama
AISI2205	352	346	341	346
P355GH	195	188	186	190

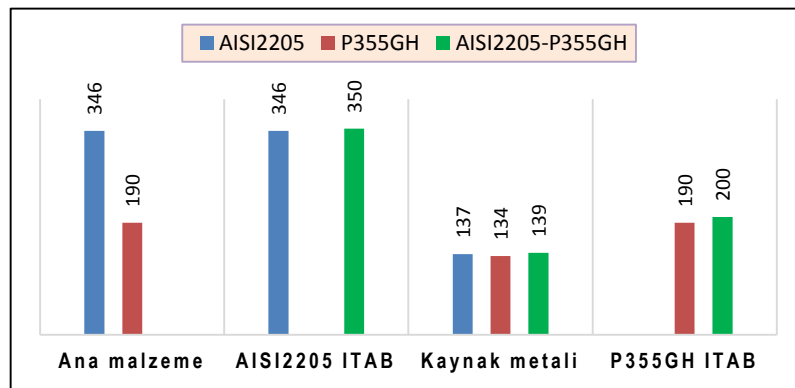
Ana malzeme tokluk değerlerine bakıldığında AISI2205 malzemenin P355GH malzemeye kıyasla tokluk değerinin neredeyse iki katı olduğu görülmektedir. Ana

malzeme tokluk değeri literatür değeriyle örtüşmektedir.

Tozaltı ark kaynağı ile farklı malzemelerin kendi aralarında (AISI2205-AISI2205 ve P355GH-P355GH) ve farklı kombinasyonda (AISI2205-P355GH) birleştirildiği numunelerin çentik test sonuçları Çizelge 7.3'te verilmiştir. Çizelgede verilen değerler, kolay anlaşılabilmesi için Şekil 7.11'de grafik hale dönüştürülerek sunulmuştur.

Çizelge 7.3. AISI2205 ve P355GH birleştirmelerden ölçülen tokluk değeri (J).

Birleştirme	Ölçüm	ITAB	Ortalama	Kaynak metali	Ortalama		
AISI2205-AISI2205	1	349	346	140	137		
	2	346		136			
	3	342		131			
P355GH-P355GH	1	195	190	138	134		
	2	188		136			
	3	186		126			
AISI2205-P355GH	Ölçüm	ITAB	Ortalama	Kaynak metali	Ortama	ITAB	Ortalama
	1	354	350	145	139	205	200
	2	351		140		201	
	3	347		134		194	
	AISI2205				P355GH		



Şekil 7.11. Ana malzeme ve kaynaklı malzemelerin tokluk değeri (J).

Şekil 7.10'da verilen kaynaklı numunelerin tokluk değeri incelendiğinde en yüksek tokluk değerinin AISI2205-P355GH birleştirmesinin ITAB'ından ölçüldüğü onu sırasıyla AISI2205-AISI2205 birleştirmesi ve P355GH birleştirmesinin ITAB'ının

takip ettiği ve en düşük tokluk değerinin de kaynak metallereinden ölçüldüğü görülmektedir. Malzemelerin kendi aralarında yapılan birleştirmelerdeki kaynak metali tokluk değerleri incelendiğinde en yüksek tokluk değerinin AISI2205 malzemenin kaynak metalinde olduğu görülmektedir. İki birleştirme çiftinde de aynı kaynak parametreleri kullanılması kaynak ısı girdilerinin de eşit olmasını sağlamıştır. Ayrıca kullanılan kaynak tozu ve telinde aynı olması gibi parametrelerin bir araya gelmesinden dolayı kaynak metalinden ölçülen tokluk değerleri birbirlerine çok yakın değerde ölçülmesi gayet doğaldır.

Yapılan darbe çentik test sonuçları genel olarak incelendiğinde tokluk değerlerinin kaynaklı bağlantılarda arzu edilen seviyelerde ölçüldüğünü ve P355GH-AISI2205 birleştirmesinin yanı sıra tüm birleştirmelerinde yeteri kalitede olduğu ispatlanmıştır.

Yang [105]; yaptığı çalışmada ASME SA516 kalite basınçlı kap çeliğini tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirmiştir. Darbe çentik testleri uyguladığı numunelerde en yüksek tokluk değerine ITAB’da ulaşmış, kaynak metali tokluğu ITAB’dan daha düşük bulunmuştur. Artan kaynak ilerleme hızının, kaynak metali tokluğunu yükselttiğini, fakat kaynak ilerleme hızının ITAB üzerinde çok etkisi olmadığını tespit etmiştir. Ayrıca artan ısı girdisiyle ITAB’ın genişlediğini ve tokluğun düştüğünü belirtmiştir.

Özakın [95]; yaptığı çalışmada tozaltı ark kaynağıyla birleştirilen numunelerin MIG-MAG kaynak yöntemiyle birleştirilen numunelerden daha yüksek kırılma enerjilerine sahip olduğunu tespit ederken elektrik ark kaynağıyla birleştirilen numunelerden ise daha düşük kırılma enerjisine sahip olduğunu belirtmiştir.

Celesun [68]; çeliğinin ısııl işlem ve farklı tozaltı kaynak tellerinin kaynak kabiliyetine etkisinin incelenmesi üzerine bir çalışma yapmış ve tozaltı ark kaynak yöntemiyle kaynatılan çelik malzemeler 20 C°, 0 C° ve -40 C° sıcaklıklarında darbe çentik testine tabi tutulmuş ve test sonuçlarının sıcaklıkla doğru orantılı olduğunu, sıcaklık düştükçe tokluk değerinin de düştüğünü belirtilmiştir.

7.8. SERTLİK TESTİ

Yapılan sertlik ölçüm çalışmasında kaynak öncesi ana malzemelerden, kaynak sonrası ise kaynak bölgesinden (kaynak metali metalinden ve ITAB) sertlik ölçümleri alınmıştır. Ölçümler malzemelerin kendi aralarında yapılan kaynaklarında tek taraflı, farklı malzemelerin kaynaklandığı uygulamalarda ise her iki yönden de alınmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen değerler tablo halinde Çizelge 7.4-7.6 aralığında, bu tabloların ortalamasından oluşturulan grafik Şekil 7.12’de gösterilmiştir. Ayrıca kaynaklı numunelerin kaynak metalleri kesitlerinden dikey doğrultuda sertlik ölçümleri yapılmış ve bu ölçümlerden elde edilen grafikler Şekil 7.13’de sunulmuştur.

Çizelge 7.4. AISI 2205-AISI2205 kaynağında ölçülen sertlik değerleri (HV).

Malzeme	Periyot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AISI2205 malzeme	1. periyot	271	266	276	272	267	273	266	271	268	271
	2. periyot	272	271	265	269	264	268	272	269	269	268
	3. periyot	268	273	270	267	272	273	268	277	270	266
	Ortalama	273	270	270	269	267	271	279	272	269	268
ITAB	1. periyot	278	272	282	270	279	276	286	278	280	283
	2. periyot	285	282	270	278	275	271	279	274	275	281
	3. periyot	274	282	276	284	282	284	277	286	275	280
	Ortalama	279	278	276	277	278	277	280	279	276	281
Kaynak metali	1. periyot	223	234	235	232	236	225	216	224	236	234
	2. periyot	232	234	235	237	226	236	222	225	215	225
	3. periyot	225	224	218	222	219	221	223	222	224	236
	Ortalama	227	230	229	230	227	227	220	221	225	231
Dik		223	220	226	224	222	237	217	218	215	210
Hata payı ±3 HV											

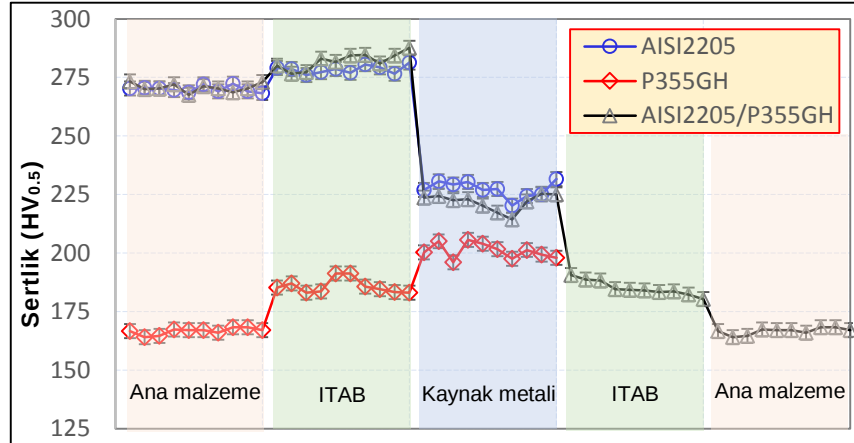
Çizelge 7.5. P355GH-P355GH kaynağında ölçülen sertlik değerleri (HV).

Malzeme	Periyot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P355GH malzeme	1. periyot	172	167	170	169	169	173	169	171	170	171
	2. periyot	166	160	160	165	169	165	162	170	166	163
	3. periyot	162	165	164	168	163	163	167	164	169	167
	Ortalama	166	164	164	167	167	167	166	168	168	167
ITAB	1. periyot	184	189	183	183	194	196	184	183	186	184
	2. periyot	190	188	181	186	192	187	186	183	179	182
	3. periyot	182	184	185	182	188	191	187	188	185	183
	Ortalama	185	187	183	183	191	191	185	184	183	183
Kaynak metali	1. periyot	191	207	193	204	211	203	195	202	201	197
	2. periyot	200	203	199	209	205	196	194	206	203	199
	3. periyot	210	205	196	204	196	206	204	196	194	198
	Ortalama	200	205	196	205	204	201	197	201	199	198
Dik		203	198	194	201	207	212	204	198	201	196
Hata payı ±3 HV											

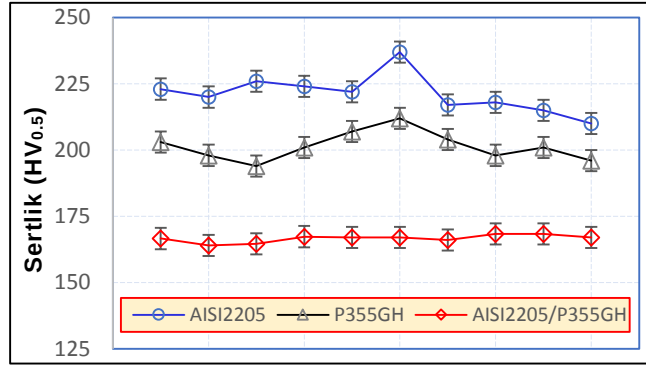
Çizelge 7.6. P355GH-AISI2205 birleştirildiği numuneden alınan sertlik ölçüm değerleri (HV).

Malzeme	Periyot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AISI2205 Malzeme	1. periyot	278	266	276	272	267	273	267	265	268	277
	2. periyot	273	271	265	269	264	268	276	267	273	270
	3. periyot	269	273	270	275	272	273	268	274	270	272
	Ortalama	273	270	270	272	268	271	270	269	270	273
AISI2205 ITAB	1. periyot	289	286	283	294	284	297	296	285	291	293
	2. periyot	282	277	270	274	280	272	278	276	271	276
	3. periyot	269	267	279	281	281	284	280	282	291	294
	Ortalama	280	276	277	283	281	284	284	281	284	287
Kaynak Metali	1. periyot	220	234	224	226	230	225	220	232	228	227
	2. periyot	232	218	220	217	214	223	214	222	228	230
	3. periyot	219	221	224	226	217	204	209	212	220	218
	Ortalama	223	224	222	223	220	217	214	222	225	225
Dik		221	222	229	235	224	232	234	222	217	209
P355GH ITAB	1. periyot	183	183	188	184	185	182	187	184	181	187
	2. periyot	191	187	189	185	186	184	184	185	187	178
	3. periyot	198	196	188	185	182	186	179	182	179	176
	Ortalama	190	188	188	184	184	184	183	183	182	180
P355GH malzeme	1. periyot	172	167	170	169	169	173	169	171	170	171
	2. periyot	166	160	160	165	169	165	162	170	166	163
	3. periyot	162	165	164	168	163	163	167	164	169	167
	Ortalama	166	164	164	167	167	167	166	168	168	167

Hata payı ±3 HV



Şekil 7.12. Tüm numunelerden alınan ortalama sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi.



Şekil 7.13. Kaynaklı numunelerin kaynak metali (dikey) sertlik ölçüm sonuçları.

Şekil 7.11’de verilen sertlik testi sonuçlarına bakıldığında en yüksek sertlik değerinin AISI2205 malzemenin ITAB’ında (276-294 HV), en düşük sertlik değerinin ise P355GH ana malzemede (164-168 HV) olduğu görülmüştür. Mikroyapı çalışmalarında AISI2205 malzemenin ITAB’ında ferrit miktarında ciddi bir artış tespit edilmiş ve aynı bölgede tane irileşmesi olduğu belirlenmişti. Bu sonuçlara göre sertliğin daha düşük olması gerektiği düşünülebilir fakat literatürde LDX 2101 paslanmaz çelik malzemenin MIG ve tozaltı ark yöntemi ile birleştirildiği çalışmada, ITAB’da ferrit artışı ve tane irileşmesi nedeniyle sertliğin arttığını belirten çalışmalar vardır [79].

Kaynaklı bağlantılarda sertliğin en önemli olduğu yerlerin başında kaynak metali sertliği geldiği bilinmektedir. Şekil 7.12 kaynak metali sertliği açısından incelendiğinde; kendi aralarında birleştirilen AISI2205 kaynak metali sertliğinin en yüksek olduğu, benzer şekilde kendi arasında birleştirilen P355GH kaynak metali sertliğinin ise en düşük olduğu görülmektedir. Farklı birleştirme (AISI2205-P355GH) numunesinde ise sertliğin AISI2205 birleştirmesinden düşük, P355GH birleştirmesinden yüksek olduğu bulunmuştur. Metalürjik olarak kaynak metalinin farklı malzemelerin kaynağında malzeme1+malzeme2+ilave metalden oluştuğu, benzer malzemelerin kaynağında ise malzeme+ilave metalden oluştuğu düşünülürse, ölçülen sonuçların son derece normal olduğu söylenebilir. Bir başka ifade ile kaynak metalinin kimyasal bileşimi, dolayısıyla kimyasal bileşimin meydana getirdiği sertlik, ilave metal ile ana malzeme/malzemelerin kimyasal bileşimlerinin seyrelme miktarına göre değişmektedir.

Fersini ve arkadaşları [77]; AISI 2205 malzemeyi tozaltı ark ve hibrit (lazer- gaz metal ark) kaynak yöntemleriyle ayrı ayrı kaynakladıkları çalışmada tozaltı ark ve hibrit kaynaklı numunelerin ITAB'larının aynı sertlik değerlerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. En yüksek sertlik değerine ise hibrit kaynak yöntemiyle birleştirilen numunenin kaynak metalinde olduğunu belirtmişlerdir.

Keshav ve Dheerendra [106]; yapmış olduğu çalışmada HSLA çeliğini tozaltı ark kaynak yöntemi farklı akım (500A-700A) ve kaynak ilerleme hızları (200-300mm/dk) kullanarak birleştirmişlerdir. Yaptıkları mikro sertlik çalışmasında sertliğin kaynak merkezinden ana malzemeye kadar değiştiğini ve ITAB'a gelindiğinde en yüksek sertlik değerine ulaşıldığını tespit etmişlerdir. Kaynak akımındaki artış ve kaynak ilerleme hızındaki azalmayla sertliğin düştüğünü gözlemlemiş ve buradaki sertlik düşüşünü yüksek ısı girdisiyle açıklamışlardır.

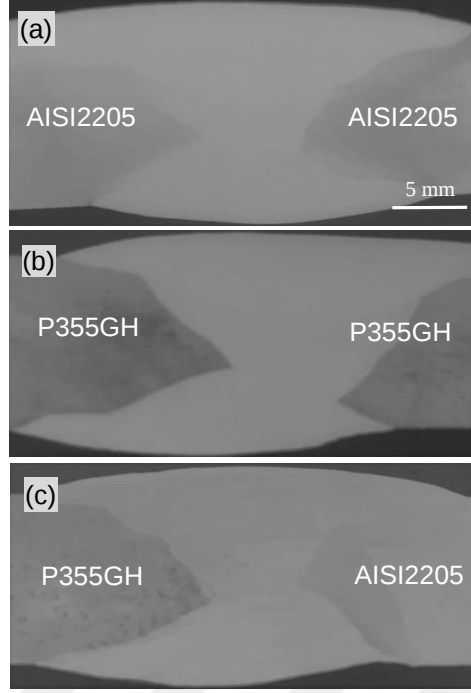
Asarkaya [103], Durgutlu ve arkadaşları [107] benzer konularda yaptıkları araştırmalarda kaynaklı numunelerin sertlik testlerinde en yüksek sertlik değerine kaynak metalinde rastlandığı, sonra sırasıyla ITAB ve ana malzemelerin takip ettiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada, kaynak metalinin sertliğinin ITAB'dan düşük çıkmasının sebebi, daha önceki bölümlerde de bahsedilen kaynak teli seçimiyle yakından ilişkili olduğudur.

7.9. MAKRO VE MİKROYAPI

Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen dubleks paslanmaz çelik ve basınçlı kap çeliklerinin kaynak bölgelerinde meydana gelen mikro yapısal değişimleri görebilmek için makro ve mikro çalışmaları yapılmış elde edilen görüntüler karşılaştırılıp değerlendirilmiştir.

7.9.1. Makro Yapı

Yapılan üç farklı birleştirme türüne de makro yapı çalışması yapılmıştır. Makro fotoğrafları çekilen birleştirmelerin görüntüleri Şekil 7.14'te verilmiştir.

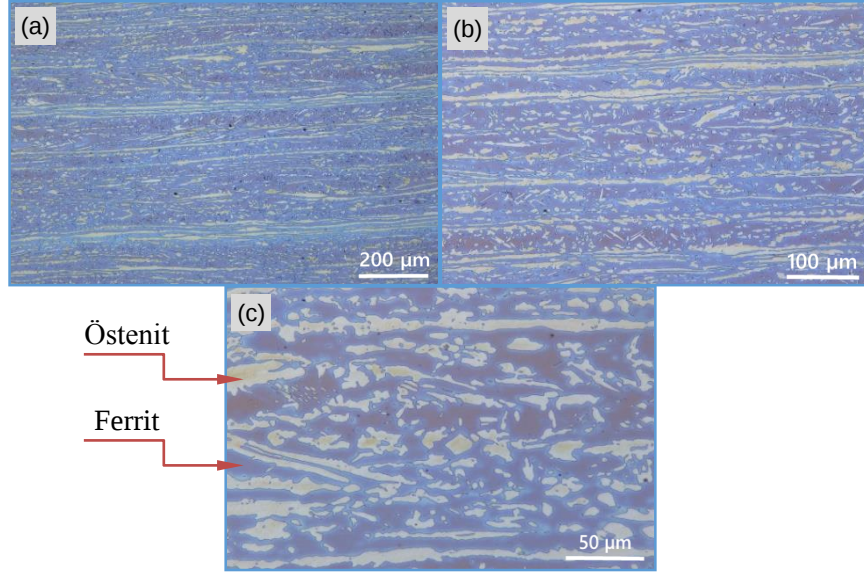


Şekil 7.14. Birleştirmelerin makro görüntüleri a) AISI2205-AISI2205, b) P355GH-P355GH ve c) AISI2205-P355GH.

Makro görüntüler incelendiğinde birleştirmelerin çift paso kaynaklandığı açık bir şekilde görünmekle beraber ana malzeme ve kaynak metali de kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Ayrıca görüntülerde gözle görülebilir bir kaynak hatası tespit edilmemiştir.

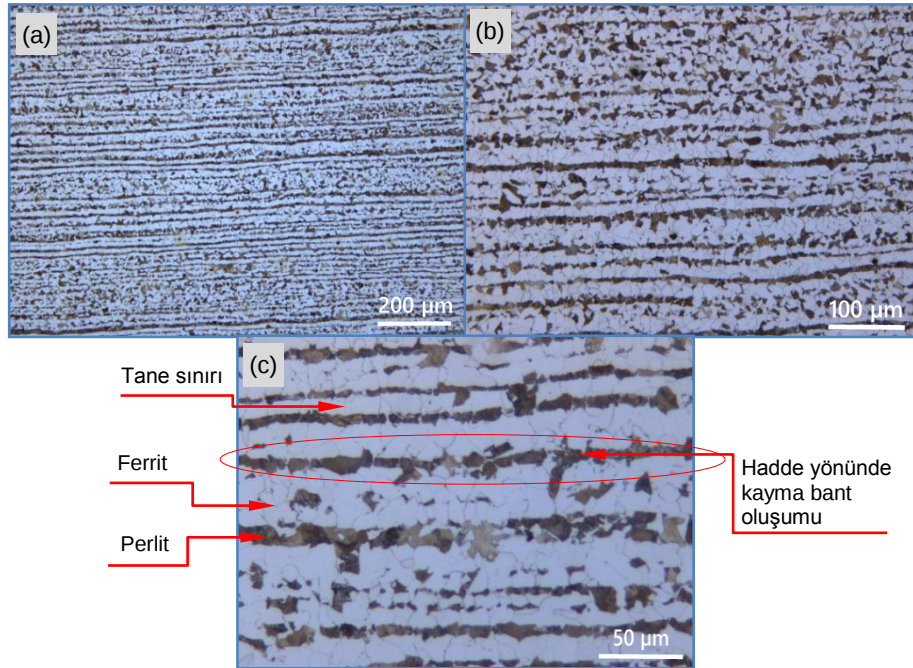
7.9.2. Mikro Yapı

AISI2205 malzemenin kaynak öncesi mikroyapı resimleri Şekil 7.15’de verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinde açık renkli görülen yapılar östenit fazını oluştururken, koyu renkli yapılar ise ferrit fazını oluşturmaktadır. Mikro yapıları analiz edebilmek için farklı büyütme oranlarında mikroyapı resimleri alınmıştır. Oluşan yapılarına bakıldığında fazların haddeleme yönüne doğru uzadığı ve östenit-ferrit oranının birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



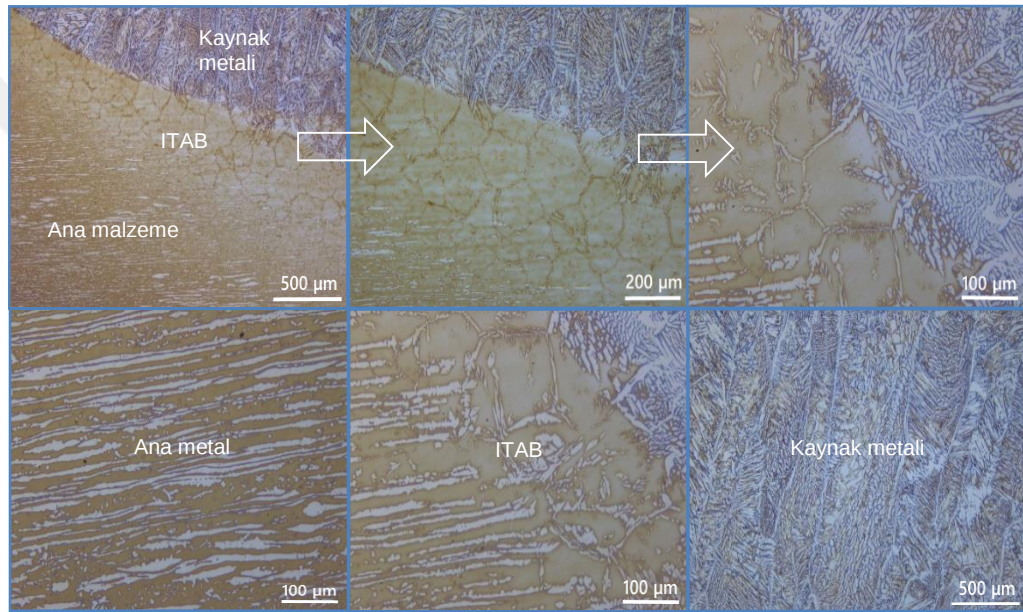
Şekil 7.15. AISI2205 ana malzemenin mikro yapısı (a) 100X (b) 200X (c) 500X.

P355GH ana malzeme mikroyapı görüntüleri şekil 7.16’da verilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde tanelerin haddeleme yönünde uzadığı ve bantlı bir yapıdan meydana geldiği görülmüştür. Ana malzeme mikro yapısını ince taneli ferrit ve perlit fazlarının olduğu görülmüştür. Burada açık renkli alanlar ferrit fazını oluştururken, koyu renkli bölgeler ise perlit fazını oluşturmaktadır.



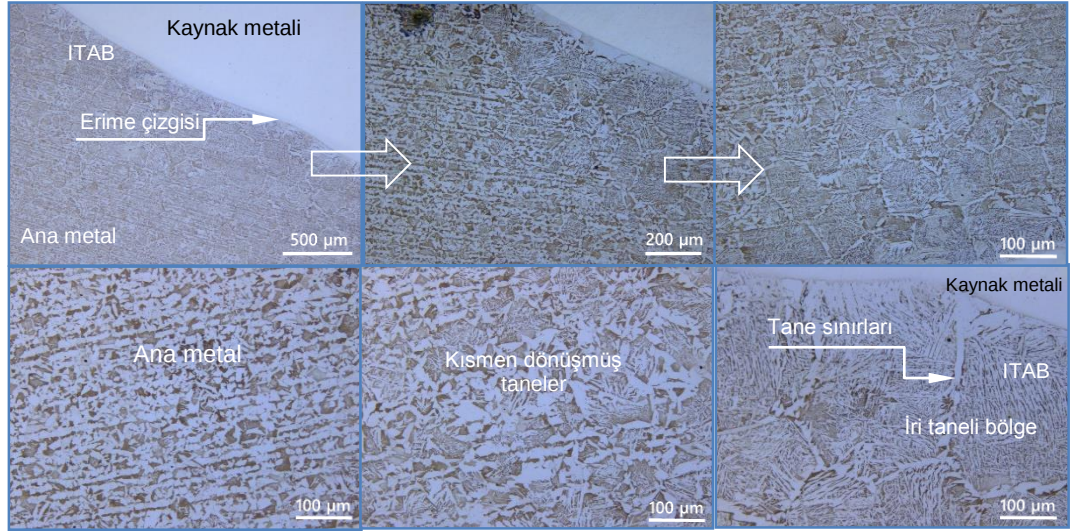
Şekil 7.16. P355GH ana malzemenin mikro yapısı (a) 100X, (b) 200X, (c) 500X.

AISI2205 dubleks paslanmaz çeliklerin kendi aralarında yapılan kaynakların mikroyapı görüntüleri Şekil 7.17’de farklı büyütme oranlarında verilmiştir. Kaynak metali mikro yapısının dentritik yapıda olduğu ve tanelerin ısı akış yönüne doğru uzadığı görünmektedir. ITAB’ın mikro yapısına bakıldığında ise östenit miktarı düşerek ferrit miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca ana malzemede lineer uzanan tanelerin ITAB’a geldiğinde yüksek ısı girdisi nedeniyle daha küresel form kazandığı ve tane irileşmesi meydana geldiği tespit edilmiştir. Kaynak metali mikro yapısına bakıldığında, katılaşmanın dendritler şeklinde merkeze doğru ilerlediği görülmektedir.



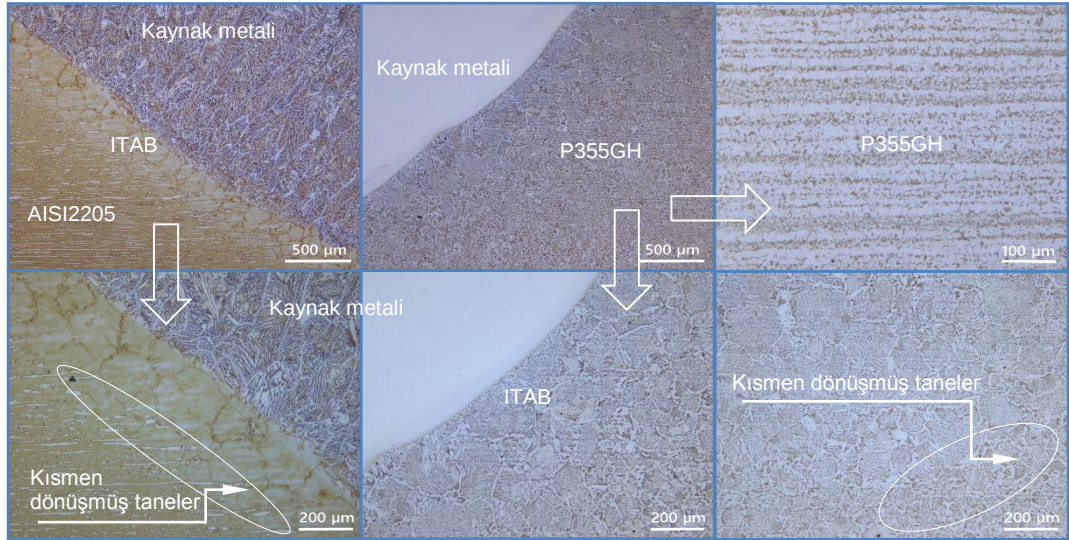
Şekil 7.17. AISI2205-AISI2205 birleştirmesinin kaynak sonrası mikroyapı görüntüsü.

Şekil 7.18’de P355GH basınçlı kap çeliğinin kendi aralarında yapılan kaynağın mikro görüntülerine bakıldığında, ana malzemeden kaynak metaline doğru yaklaştığa hadde yönünde uzanan bantlı tane yapısının kaybolduğu ve tanelerin büyüyerek daha küresel form kazandığı gözlemlenmiştir. Özellikle yüksek sıcaklığa maruz kalan ergime sınırına bitişim kısımda tane irileşmesi görülmektedir.



Şekil 7.18. P355GH / P355GH birleştirmesinin kaynak sonrası mikroyapı görüntüsü.

AISI2205 ve P355GH birleştirmelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde bütün birleştirmelerde aynı kaynak teli kullanılması sebebiyle her iki malzemenin de kendi aralarında yaptıkları birleştirmelerdeki özellikleri sergilediği görülmektedir. AISI2205 ve P355GH çeliklerinin birleştirildiği numunelerin mikro görüntüleri Şekil 7.19’da verilmiştir.



Şekil 7.19. Dupleks/basınçlı kap çeliğinin kaynak sonrası mikroyapı görüntüsü.

Şekil 7.17-7.19'daki mikroyapı resimleri genel olarak incelendiğinde; dubleks paslanmaz çelik ve basınçlı kap çelik kaynak metalinin farklı görünüm sergilediği görülmektedir. Literatürde [108] bu mikroyapı değişimlerinin kaynakla birleştirilen farklı metallerin kimyasal kompozisyonlarının farklılığı, ergime ve karışımın yanı sıra soğumanın farklı olması, ana malzemelerin ısı iletim ve ısı genleşme katsayılarının farklı olmasının neden olduğu bildirilmiştir.

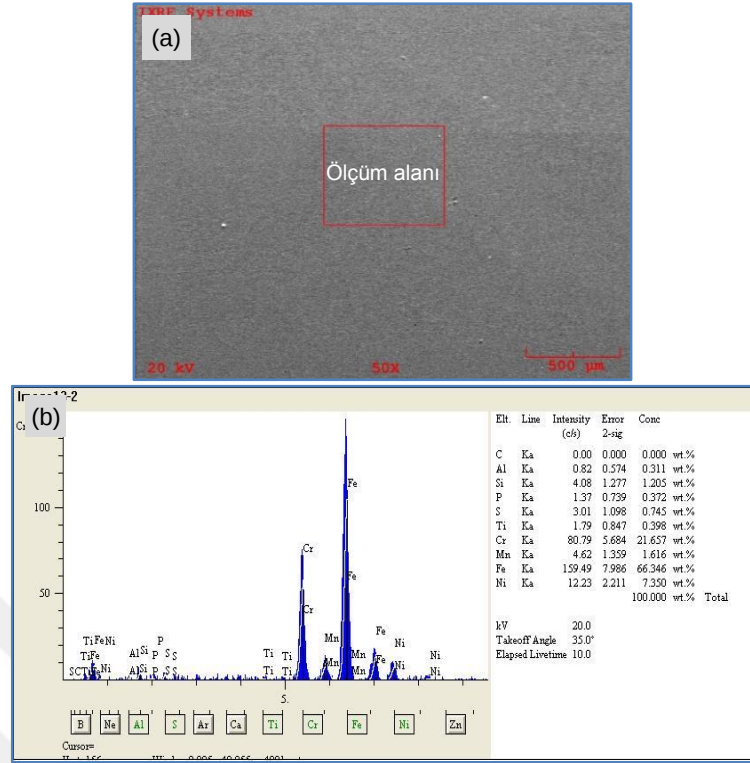
Farklı metallerin birleştirilmesinde kaynak metali yapısının hem ana malzemelerden hem de ilave metalden oluştuğu düşünüldüğünde kaynak metali mikro yapısında ferrit miktarının artması beklenen bir durumdur. Bu birleştirmede kaynak metali ferrit miktarı, P366GH-P355GH birleştirmesinden daha az, AISI2205-AISI2205 birleştirmesinden daha fazla olduğu mikroyapı görüntülerinden kolaylıkla görülebilir.

Perez ve arkadaşları [109], yapmış oldukları çalışmada 30 mm boyutunda AISI2205 dubleks paslanmaz çeliği ER 2209 ilave metal kullanarak tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Mikroyapı özellikleri incelendiğinde ise ana malzemede bulunan yatay yönelmiş eşit östenit/ferrit fazının kaynak dikişinde dentritik bir form aldığını ve ferrit fazı miktarının düştüğünü tespit edilmiştir. ITAB'ın mikroyapı incelemelerinde ise ortalama tane büyüklüğünün yüksek ısı girdisi nedeniyle ana malzemeye kıyasla arttığı tespit edilmiştir.

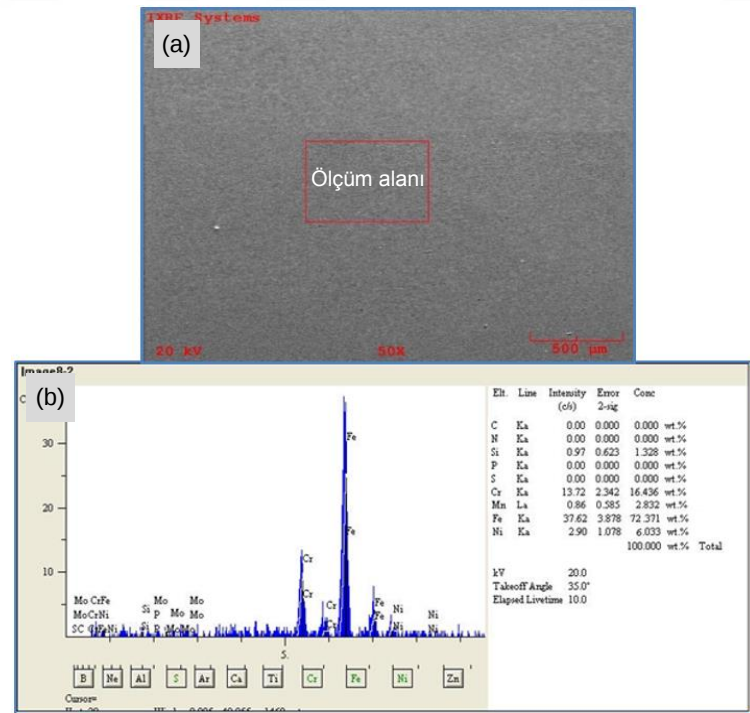
Peasura; yaptığı çalışmada tozaltı ark kaynak parametrelerinin basınçlı kap çelikleri üzerindeki mekanik özelliklerini incelemiş ve birleştirilen malzemelerin kaynak bölgesi mikro yapısında ferrit ve perlit olduğu tespitini yapmıştır. Ayrıca katılaşma hızının perlit yoğunluğunu doğrudan etkileyen bir parametre olduğunu belirtmiştir [110].

7.10. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU(SEM) SONUÇLARI

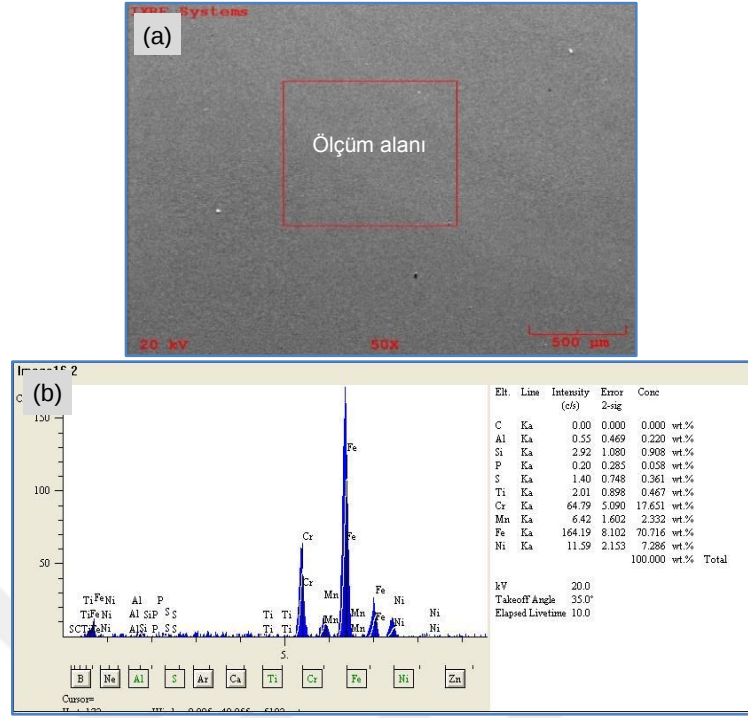
Birleştirmelerin tamamına SEM ile EDS analizleri yapılmıştır. Üç farklı birleştirmenin de kaynak bölgesinden yapılan ölçümlerinde kaynak metali ortalama % element oranları tespit edilmiştir. AISI2205-AISI2202, P355GH-P355GH ve AISI2205-P355GH birleştirmesinde yapılan alan ölçüm grafikleri sırasıyla Şekil 7.20-7.22 arasında verilmiştir. Bu grafiklerden ölçülen değerler, kolay anlaşılabilmesi açısından Çizelge 7.7'de toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.20. AISI2205-AISI2205 birleştirmesinde kaynak metalinden alınan EDS analizleri a) ölçüm alanı b) EDS grafiği.



Şekil 7.21. P355GH-P355GH birleştirmesinde kaynak bölgesine yapılan EDS analizleri a) Ölçüm alanı, b) EDS grafiği.



Şekil 7.22. AISI2205-P355GH birleştirmesinde kaynak metalinden alınan EDS analizleri a) ölçüm alanı b) EDS grafiği.

Çizelge 7.7. EDS analiz sonuçları (% ağırlıkça).

	Fe	Cr	Ni	Mn
AISI2205-AISI2205	66.34	21.65	7.35	1.61
P355GH-P355GH	72.37	16.43	6.03	2,23
AISI2205-P355GH	70.71	17.65	7.28	2.33

Şekil 7.19-7.21 arasında verilen grafikler ve Çizelge 7.7’de toplu halde verilen sayısal değerler elementel bazda incelendiğinde, tüm birleşmelerin ağırlıklı olarak sırasıyla Fe, Cr ve Ni elementlerini içerdiği görülmektedir. Doubleks paslanmaz çeliklerin kendi aralarında birleştirildiği (AISI2205-AIAI2205) numunede Cr miktarının en yüksek, Fe miktarının ise en düşük olduğu görülmektedir. Bu birleştirmenin aksine basınçlı kap çeliklerinin kendi aralarında birleştirildiği (P355GH-P355GH) numunede Cr miktarının en düşük, Fe miktarının ise en yüksek olduğu tespit edilmiştir. Doubleks paslanmaz çelik ile basınçlı kap (AISI2205-P355GH) çeliğinin birleştirildiği numunede ise Fe ve Cr miktarları, kendi aralarında birleştirilen numunelere göre orta seviyede bulunmuştur.

Benzer şekilde kaynaklı birleştirmeler Ni elementi açısından değerlendirilecek olursa, en yüksek Ni miktarının dubleks paslanmaz çeliklerin kendi aralarında yapılan numunede, en düşük Ni miktarının ise basınçlı kap çeliğinin kendi arasında yapılan birleştirmede olduğu görülmektedir. Buradan kaynak esnasında kullanılan ilave metalin kaynak metalinin oluşmasında önemli bir etkiye sahip olduğu sonucu çıkmaktadır. Basınçlı kap çeliğinin kendi arasında birleştirilmesinde bile Cr ve Ni oranlarının ilave metalin Cr ve Ni oranlarına yaklaştığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, tüm birleştirmelerde aynı ilave tel kullanılmasına karşın, EDS sonuçlarına bakıldığında, her birleştirmenin kaynak metalini kimyasal kompozisyonlarında oransal olarak bir değişim olduğu gözlenmektedir. Bu değişim bize ana malzemeden kaynak metaline ciddi oranlarda bir metal transferi olduğunu göstermektedir.

Farklı iki malzemenin ergitmeli kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin ve bunun için en uygun ilave (kaynak) metalinin seçilmesi oldukça zor olduğu bilinmektedir. Farklı malzemelerin (paslanmaz çelikler ile düşük karbonlu elik gibi) ergitmeli kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak yöntemi ve ilave metal uygun seçildiği taktirde kaynak metallerinin mukavemeti ana malzemeden daha iyi olabilmektedir denilmektedir [111]. Fiziksel ve kimyasal farklılıklar yüzünden iki farklı malzemenin iyi dayanım ve devamlılık sağlaması için ilave metalin, bu iki metalin özellikleri ile uyuşması gerekir. Bir alışmada Tusek ve arkadaşları [112], fiziksel ve kimyasal farklılıklar yüzünden iki farklı malzemenin iyi dayanım ve devamlılık sağlaması için ilave metalin, bu iki metalin özellikleri ile uyuşması gerektiğini rapor etmişlerdir.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

AISI2205 kalite dubleks paslanmaz çelikler ile P355GH kalite basınçlı kap çeliklerin kendi aralarında ve birbirleriyle tozaltı ark kaynak yöntemi kullanarak birleştirildiği bu çalışma sonucunda;

- Dubleks paslanmaz çelik ile basınçlı kap çeliklerinin kendi aralarında ve birbirleriyle yapılan tozaltı ark kaynaklarının tamamından başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuç, dubleks paslanmaz çelik ile basınçlı kap çeliklerinin birleştirilmesinde ilave metal, kaynak tozu ve kaynak parametrelerinin uygun seçildiğini göstermektedir.
- Kaynaklı bağlantılara yapılan tahribatsız testler (manyetik parçacık, ultrasonik ve radyografi) sonucunda, tozaltı ark kaynak yönteminde görülmesi muhtemel kaynak hatalarının (çatlaklar, gözenekler, yanma olukları, kök sarkması, aşırı kep yüksekliği, aşırı iç bükey kaynak dikişi, nüfuziyet yetersizliği) hiç birisine rastlanmamıştır.
- Çekme testleri sonucunda farklı malzemelerin birbirleriyle yapılan kaynaklarında ve P355GH çeliklerinin kendi arasında yapılan kaynakların tamamında kopma P355GH çeliği tarafından ana malzemedan gerçekleşmiştir. Yalnızca AISI2205 çeliklerin kendi aralarında yapılan kaynaklarda kopma kaynak metalinden gerçekleşmiştir.
- Kaynaklı bağlantılara uygulanan 180° eğme testi sonucunda, tüm numunelerde kaynak bölgesinde gözle görünebilir bir kaynak hatasına rastlanmamıştır. Bu sonuç, kaynaklı bağlantıların eğme testinde başarılı olduğunu göstermektedir.

- Çentik darbe test sonuçlarına göre, en yüksek tokluk değeri AISI2205-P355GH birleştirmesinin ITAB'ından ölçülmüştür. En düşük tokluk değeri ise kaynak metallereinden ölçülmüştür.
- Sertlik ölçümleri sonucunda, tüm birleştirmelerin ITAB'larında sertliğin ana malzemelere göre kısmen daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kaynak metallereinin sertlikleri incelendiğinde ise sertliklerin, AISI2205 dubleks paslanmaz çelikten düşük, P355GH basınçlı kap çeliğinden daha yüksek oldukları görülmüştür.
- Mikroyapı çalışmaları sonucunda kaynak metali mikro yapısının dertritik olduğu ve tüm birleştirmelerde ergime sınırına bitişik kısımda tane irileşmesinin meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca kaynak metalindeki tanelerin ısı akış yönüne doğru yönlendiği tespit edilmiştir.
- SEM'de yapılan EDS analizi sonucunda, tüm numunelerin kaynak metalindeki kimyasal kompozisyonların, esas metale yakın olduğu görülmüştür.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre;

- Birleştirme işlemleri hem V kaynak ağzı hem de X kaynak ağzı açılarak gerçekleştirilebilir.
- Özellikle dubleks paslanmaz çeliklerin kendi aralarında birleştirmeleri için farklı tel/toz kombinasyonları kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Maruyama, T., “Arc welding technology for dissimilar joints”, **Welding International**, 17 (4): 276-281 (2003).
2. David, L., “ASM Handbook, Welding, brazing and soldering”, **ASM International**, 6, 192-196 (1995).
3. Avesta welding The Avesta welding manual., “Practice and products for stainless steel welding”, **Vastra Aros**, 4, 23-32 (2004).
4. American Welding Society., “Welding Handbook, ”**American Welding Society**, Miami, (1982).
5. Granjon, H., “Fundamentals of Welding Metallurgy”, **Abington Publishing**, Cambridge, (1991).
6. Zhang, Z., Jing, H., Xu, L., Han, Y., Zhao, L., “Investigation on Microstructure Evolution and Properties of Duplex Stainless Steel Joint Multi-Pass Welded by Using Different Methods”, **Mater. Des**, 109, 670–685 (2016).
7. Jiang, Z., Chen, X., Huang, H., and Liu, X., “Grain Refinement of Cr25Ni5 Mo1.5 Duplex Stainless Steel by Heat Treatment”, **Mater. Sci. Eng**, 363 (1-2): 263-267 (2003).
8. Chen, T. H., Yang, J. R., “Microstructural Characterization of Simulated Heat Affected Zone in a Nitrogen-Containing 2205 Duplex Stainless Steel”, **Mater. Sci. Eng**, 338 (1-2): 166-181 (2002).
9. Liou, H. Y., Hsieh, R. I., Tsai, W. T., “Microstructure and Pitting Corrosion in Simulated Heat-Affected Zones of Duplex Stainless Steels”, **Mater. Chem. Phys**, 74 (1): 33–42 (2002).
10. Hosseini, V. A., Hurtig, K., Karlsson, L., and Corros, M., “Effect of multipass TIG welding on the corrosion resistance and microstructure of a super duplex stainless steel”, **materials and corrosion**, 68, 405 (2016).
11. Marchi, C. S., Somerday, B. P., Zelinski, J., Tang, X., Schiroky, G. H., ”Mechanical properties of super duplex stainless steel 2507 after gas phase thermal precharging with hydrogen” **Metall. Mater. Trans**, 2763-2775 (2007).
12. Gunn, R. N., “Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications”, **Abington Publishing**, Cambridge (1997).

13. Nilsson, JO., “Super duplex stainless steels. Materials Science and Technology”, <http://dx.doi.org/10.1179/mst.1992.8.8.685>, 8 (8): 685-700. (1992).
14. Pohl, M., Storz, O., Glogowski, T., “Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel. Materials Characterization”. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2006.03.015>, 58 (1): 65-71. (2007).
15. Ramakrishnan, M., Muthupandi, V., “Application of submerged arc welding technology with cold wire addition for drum shell long seam butt welds of pressure vessel components”, *Int J Adv Manuf Technol*, 65: 945-956 (2013).
16. Kahraman, N., Gülenç, B., “Modern Kaynak Teknolojisi Kitabı”, *Epa-Mat Basın Yayın Ltd. Şti*, Ankara, 136-150 (2009).
17. Chattopadhyay, S., “Pressure Vessels Design and Practice”, *CRC Press Boca Raton*, (2004).
18. Türk Standartları Enstitüsü., “Basınçlı Kaplar Yönetmeliği”, *TSE*, Ankara, 1-3. (2007).
19. Canlı, A., “Tozaltı Ark Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Basınçlı Kap Çeliklerinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-8 (2017).
20. Tovler, G., “Sinnott, R., “Chemical Engineering Design”, *Second Edition Elsevier*, Oxford, (2013).
21. Balcı, A., “Basınçlı Kaplarda Malzeme Seçimi İçin Karar Destek Sisteminin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 7-9 (2014).
22. Fayazbakhsh, K., Abedian, A., Manshadi, B. D., and Khabbaz, K. S., “Introducing a novel method for materials selection in mechanical design using Ztransformation in statistics for normalization of material properties”, *Materials and Design*, 30, 4396-4404 (2009).
23. Sapuan, S. M., Jacob, M. S. D., Mustapha, F., and Ismail, N., “A prototype knowledge-based system for material selection of ceramic matrix composites of automotive engine components”, *Materials and Design*, 23, 701-708 (2002).
24. Chatterjee, P., Athawale, V. M., and Chakraborty, S., “Materials selection using complex proportional assessment and evaluation of mixed data methods”, *Materials & Design*, 32 (2): 851-860 (2011).
25. Wang, M. J. J., and Chang, T. C., “Tool steel materials selection under fuzzy Environment”, *Fuzzy Sets and Systems*, 263-270 (1995).
26. Chen, S. M., “A new method for tool steel materials under fuzzy environment”, *Fuzzy Sets and Systems*, 265-274 (1997).

27. Tretheway, K. R., Wood, R. J. K., Puget, Y., and Roberge, P. R., “Development of a knowledge based system for materials management”, ***Materials and Design***, 39-56 (1998).
28. Jee, D. H., Kang, K. J., “A method for optimal material selection aided with decision making theory”, ***Materials and Design***, 199-206 (2000).
29. Sapuan, S. M., “A knowledge-based system for materials selection in mechanical engineering design”, ***Materials and Design***, 687-695 (2001).
30. Rao, R. V., “A decision making methodology for material selection using a improved compromise ranking method”, ***Materials and Design***, 29, 1949-54 (2008).
31. Qian, J., and Zhao, Y. P., “Materials selection in mechanical design for microsensors and microactuators”, ***Materials and Design***, 619-625 (2002).
32. Rao, R. V., “A material selection model using graph theory and matrix Approach”, ***Materials Science and Engineering***, 248-255 (2006).
33. Cicek, K., and Celik, M., “Selection of porous materials in marine system design: The case of heat exchanger aboard ships”, ***Materials and Design***, 30 (10): 4260-4266 (2009).
34. Shanian, A., and Savadogo, O., “A material selection model based on the concept of multiple attribute decision making”, ***Materials and Design***, 329-337 (2006).
35. Manshadi, B. D., Mahmudi, H., Abedian, A., and Mahmudi, R., “A novel method for materials selection in mechanical design: combination of nonlinear linearization and a modified digital logic method”, ***Materials and Design***, 8-15 (2007).
36. Bahraminasab, M., and Jahan, A., “Material selection for femoral component of total knee replacement using comprehensive VIKOR”, ***Materials and Design***, 32 (8-9): 4471–4477 (2011).
37. Jahan, A., Mustapha, F., Ismail, M. Y., Sapuan, S. M., and Bahraminasab, M., “A comprehensive VIKOR method for material selection”, ***Materials and Design***, 32 (3): 1215–1221 (2011).
38. Khabbaz, R. S., Manshadi, B. D., Abedin, A. and Mahmudi, R., “A simplified fuzzy logic approach for materials selection in mechanical engineering design” ***Materials and Design***, 687-697 (2009).
39. Sancaklı, İ., “Basınçlı Kap Konstrüksiyonlarına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi ve Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi ***Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*** İstanbul 7-16 (2017).

40. Anık, S., Ceyhun, V., ve Vural, M., “Silindirik Lpg Tanklarının Değişik Standartlara Göre Bilgisayar Yardımıyla Tasarımı”, **4. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu**, Yalova, (1993).
41. Mestan, F., “Basınçlı kapların deneysel ve teorik olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü**, İstanbul, 1-20 (2010).
42. Türkel, V., Küresel Lpg Tanklarının Tasarımının ve İmalatının Bilgisayar Yardımıyla İncelenmesi, Doktora Tezi, **SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, (2004).
43. Baba, S., “Anizotropik Kalın Cidarlı Basınçlı Kapların Serbest ve Zorlanmış Titreşim Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, **Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Samsun 6-8 (2013).
44. Kahraman, N., “URT418: Boru ve Basınçlı Kapların Kaynağı Ders Notları”, **Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği**, (2017).
45. Çetin, T., “Dubleks Paslanmaz Çeliğin Nİ3AL ile Kaplanabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 11 (2014).
46. Johansson, P., ve Liljas, M., “A New Lean Duplex Stainless Steel for Construction Purposes”, **Proceeding of 4th European Stainless Steel Conference and Market**, Paris, (2002).
47. Charles, J., “Why and Where Duplex Stainless Steels”, **Proceeding of 5th World Conference on Duplex Stainless Steels**, Netherlands, (1997).
48. Dupouiron, F., Faucheur, S., and Varvat, G., “Fabrications of Duplex Stainless Steels”, **Proceeding of Duplex Stainless Steels**, France, 91 (1991).
49. Akpınar, S., “Dubleks Paslanmaz Çelikte Oluşan Sigma ve Chi Fazlarının Oluşum Mekanizmalarının Farklı Isıl İşlem Parametreleriyle Saptanması”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul. 21-43 (2014).
50. Stainless, T. M. R., “Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steel”, **International Molybdenum Association**, London, (2009).
51. Gunn, R. N., “Duplex Stainless Steels, Microstructure properties and applications”, **Abington Publishing**, Cambridge, England, (2003).
52. Başyigit, A., “Dubleks Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynağında Soğuma Hızı ve Koruyucu Gazın Oluşan Manyetik Fazların Oranına ve Kaynaklı Bağlantının Özelliklerine Etkisi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 4-15 (2014).
53. ASM Handbook , “Welding, brazing, soldering: Microstructural development of duplex stainless steels”, **ASM International**, 6 (2003).

54. Nirosta, K. T., "Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels", Third Edition, **The International Molybdenum Association**, London, (2014).
55. Association, I. M., "Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steel", Second Edition, **The International Molybdenum Association**, London, (2009).
56. Sieurin, H., and Sandström, R., "Sigma Phase Precipitation in Duplex Stainless Steel 2205", **Materials Science and Engineering**, 444: 271-276 (2007).
57. Pohl, M., Storz, O. and Glogowski, T., "Effect of Intermetallic Precipitations on The Properties of Duplex Stainless Steel", **Materials Characterization**, 58 (1): 65-71 (2007).
58. Gürel, S., "Dubleks Paslanmaz Çelikteki Sigma ve Chi Fazlarının Ergitme Kaynağındaki Oluşum Mekanizmalarının Modelleme ile Saptanması", Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 12-25 (2015).
59. Lippold, J. C., and Kotecki, D. J., "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", **Wiley-Interscience Publications**, New Jersey, 1-258 (2005).
60. Charles, J., "Super Duplex Stainless Steels: Structure and Properties", **Proceedings of Duplex Stainless Steels'91 Les Editions de Physique**, 3 (1991).
61. Elmer J. W., Palmer T. A., and Specht E. D., "Direct Observations of Sigma Phase Formation in Duplex Stainless Steels Using In-Situ Synchrotron X-Ray Diffraction", **Metallurgical and Materials Transactions A**, 38 (3): 464-475 (2007).
62. Özdemir, C., "Paslanmaz çelikler ve üretim yöntemlerinin incelenmesi", yüksek lisans tezi **Yıldız teknik üniversitesi fen bilimleri enstitüsü**, İstanbul 89 (2010).
63. Ada, H., "Petrol ve Doğalgaz Boru Hatları İçin Üretilen Boruların Tozaltı ve Spiral Kaynak Yöntemiyle Kaynaklara birliği ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 14-71 (2006).
64. Kılınçer, S., "Düşük karbonlu çeliklerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 12-22 (1998).
65. İnternet: <https://www.metalurjimalzeme.net/tozalti-kaynagi-nedir>
66. Soncu, R., "Çelik platina malzemelere dik pozisyonda tozaltı kaynağı yönteminin Uygulama parametrelerinin incelenmesi ve yöntemin modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bursa, 4-20 (2009).
67. Akay, A., "Farklı Özellikteki Malzemelerin Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Birleştirmelerin Tahribatlı ve Tahribatsız Muayenesi", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2012).
68. Celasun, E., "S355J2 Çeliğinin Isıl İşlem ve Farklı Tozaltı Kaynak Tellerinin Kaynak Kabiliyetine Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2012).

69. Sirin, K., Akın, Ü., ve Akgüllü, E., “Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde kaynak parametrelerinin belirlenmesi”, **Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi**, İstanbul, 151-156 (2001).
70. Durgutlu, A., Gülenç, B., ve Tülbentçi, K., “Ark kaynağında kaynak hızının nüfuziyete ve mikroyapıya etkisi”, **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, 23, 251-259 (1999).
71. Gunaraj V., Murugan N., “Prediction and comparison of the area of the heat-affected zone for the bead-on-plate and bead-on-joint in submerged arc welding of pipes”, *Journal of Materials Processing Technology*, **Faculty of Mechanical Engineering, Kumaraguru College of Technology, Coimbatore**, India , 95, 246- 261 (1999).
72. Yun P., Wuzhu C., Zuze X., ”Study of High Toughness Ferrite Wire for Submerged Arc Welding of Pipeline Steel”, *Materials Characterization*, **Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University**, Beijing, 47, 67-73 (2001).
73. Külahlı, M. E., “Tozaltı Kaynak Yöntemi”, **Oerlikon Kaynak Bilimi**, İstanbul, 2, 82-85 (1985).
74. Ogborn, J. S., “Submerged arc welding”, **ASM Handbook**, 6, 202-204 (1993).
75. McPherson, N. A., Chi, K., Mclean, M. S., and Baker, T. N., “Structure and properties of carbon steel to duplex stainless steel submerged arc welds”, **Materials Science and Technology**, 19, 219-226 (2003).
76. Sieurin, H., Sandstrom, R., “Austenite reformation in the heat-affected zone of duplex stainless steel 2205”, **Materials Science and Engineering**, 250-256 (2006).
77. Fersini, M., Sorrentino, S., Zilli, G., “Duplex Stainless Steel for Bridges Construction: Comparison between SAW and Laser-GMA Hybrid Welding”, **Welding In The World**, 54, 123-133 (2010).
78. Luo, J., Dong, Y., Li, L., Wang, X., “Microstructure of 2205 duplex stainless steel joint in submerged arc welding by post weld heat treatment”, **Journal of Manufacturing Processes**, 16, 144-148 (2014).
79. Luo, J., Yuan, Y., Wang, X., and Yao, Z., “Double-Sided Single-Pass Submerged Arc Welding for 2205 Duplex Stainless Steel”, **Journal of Materials Engineering and Performance**, 22 (9): 2477 (2013).
80. Graziano, U., Firrao, D., Taveri, G., “Characterization of Welded Joints (MIG and SAW) on LDX 2101 Duplex SS”, **Procedia Engineering**, 484-491 (2015).
81. Fabiola, A., Perez, M., Breda, M., Calliari, I., Yerania, G., Medina, P., Sandström, R., “Detrimental Cr-rich Phases Precipitation on SAF 2205 Duplex Stainless Steels Welds After Heat Treatment”, **Soldagem and Inspeção**, 21 (2):165-171 (2016).

82. Swierczynska A., Labanowski, J., Michalska, J., Fydrych, D., “Corrosion behavior of hydrogen charged super duplex stainless steel welded joints”, *Materials and Corrosion*, 68, 1037-1045 (2017).
83. Ju’nior, R. C., Esteves, L., Santos, N. F., Oliveira, I. R., Mendes, D. S., Lins, V. F. C., and Modenesi, P. J., “Influence of Heat Input and Cold Wire Feeding Rate on Pitting Corrosion Resistance of Submerged Arc Welding Duplex Stainless Steel Welds” *JMEPEG*, 28, 1969-1976 (2019).
84. Kayakök, V., “Tozaltı ve Mag kaynak yöntemlerinde kaynak ağzı- Nüfuziyet ilişkisinin incelenmesi ve ekonomik yönden kıyaslanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2009).
85. Bonnefois, B., Soullignac, P., “Submerged Arc Welding of High Alloyed Duplex Stainless Steel”, Joining/Welding 2000, *Proceedings of the International Conference IIVV*, Netherlands, 245-252 (1991).
86. Heuser, H., “Schweissen von Duplex-Stählen”, *Jahrbuch Schweisstechnik*, 93, 69-78, Düsseldorf. (2000).
87. Karlsson, L., “Welding Duplex and 20. Süper Duplex Stainless Steels”, *Svetsaren*, 48 (2): 5- 12 Sweden, (1994).
88. Mercado, A., Lopez, V., and Munoz, M., “Influence of the chemical composition of flux on the microstructure and tensile properties of submerged-arc welds”, *Journal of Marerials Processing Technology*, 169, 346-351 (2005).
89. Tekin, N., “Paslanmaz Çelik Malzeme ile Düşük Karbonlu Alaşımsız Çelik Malzemelerin Tozaltı Kaynak Metodu İle Birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).
90. Erbay, C., “Tozaltı ark kaynağında kaynak parametrelerinin mikroyapı ve nüfuziyet etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (1999).
91. Gülenç, B., Kahraman, N., “Wear behaviour of bulldozer rolles welded using a submerged arc welding process”, *Materials and Design*, 537-542 (2003).
92. NDT programmed instruction handbook., “Magnetic particle testing”, *Genaral Dynamics convair division*, 1 (2003).
93. NDT programmed instruction handbook., “Ultrasonic testing”, *Genaral Dynamics convair division*, 1-3 (2003).
94. NDT programmed instruction handbook., “Radiographic testing”, *Genaral Dynamics convair division*, 1-5 (2003).

95. Özakin, N., “AH ve DH kalite gemi saclarının değişik kaynak yöntemleri ve kaynak pozisyonlarındaki mekanik özelliklerinin ve mikro yapılarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Zonguldak, 55-78 (2010).
96. Diken S., “Co90Fe10 İnce Filmlerin Manyetik ve Yapısal Özelliklerine Altın Alt Tabaka Etkisi” Yüksek Lisans Tezi, **Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kilis, (2013).
97. Özergin, E., “Elektrodepozisyon Tekniği İle Büyütölen CoFeCu Filmlerin Yapısal, Manyetik ve Manyetodirenç Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir, (2008).
98. Akay, A., Kaya, Y., Kahraman, N., “Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştiren X60, X65 ve X70 Çeliklerin Kaynak Bölgesinin Etüdü”, **Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi**, 3 (2): 34-42 (2013).
99. Akay, A., Kaya, Y., Kahraman, N., “Farklı Özellikteki Malzemelerin Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Birleştirmelerin Tahribatlı ve Tahribatsız Muayenesi”, **Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi**, 17 (1): 83-94 (2013).
100. Dündar, B., ”Tozaltı kaynak yönteminde altlık olarak kullanılan kaynak yöntemlerinin kaynak yeterliliklerinin ve maliyetlerinin karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 58-76 (2010).
101. Sridhar, P., Biswas, P., Mahanta, P., “Influence of welding current on bead profile and mechanical properties of double sided submerged arc welding of AISI 304 austenitic stainless steel”, **Materials Today: Proceedings**, (2019).
102. Gülsün, M., “Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Tozaltı Kaynak Yöntemi İle Kaynaklanabilirliği ve Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 93-95 (2009).
103. Asarkaya, M., “Gemi insasında kullanılan kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü**, Sakarya, 54-86 (2006).
104. Saoudi, A., Fellah, M., Sedik, A., Lerari, D., Khamouli, F., Atoui, L., Bachari, K., “Assessment and statistical correlation of mechanical properties of double sided single pass submerged arc welded line pipe steel”, **Engineering Science and Technology an International Journal**, (2019).
105. Yang, Y., “The Effect Of Submerged Arc Welding Parameters On The Properties Of Pressure Vessel and Wind Turbine Tower Steels” Master's thesis, **University of Saskatchewan Department of Mechanical Engineering**, Saskatoon, 101-129 (2008).

106. Keshav, P., and Dheerendra, D., “Some investigations on microstructure and mechanical properties of submerged arc welded HSLA steel joints”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36, 475-483. (2008).
107. Durgutlu, A., Kahraman, N., ve Gülenç, B., “Tozaltı ark kaynağında kaynak tozunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, *Gazi Üniv. End. Sanatlar Eğitim Fak. Dergisi*, 1-8 (2002).
108. Kaya, Y., Kahraman, N., Durgutlu, A., Gülenç, B., “Ferritik Paslanmaz Çelik İle Düşük Karbonlu Çelik Malzemelerin Farklı Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması”, *International Iron and Steel Symposium*, Karabük, 779-788, (2012).
109. Perez, M., F. M., Breda, M., Calliari, I., Medina, P. G., Sandstrom, R., “Detrimental Cr-Rich Phases Precipitation On SAF 2205 Duplex Stainless Steels Welds After Heat Treatment” *Soldagem and Inspeção*, 21 (2): 165-171 (2016).
110. Peasura, P., “Investigation of the Effects of Submerged Arc Welding Process Parameters on the Mechanical Properties of Pressure Vessel Steel ASTM A283 Grade A” Welding Technology Laboratory, *Department of Production Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology*, Bangkok, 4-7 (2017).
111. Kahraman, N., Gülenç, B., Akça, H., Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Ostenitik Paslanmaz Çelik ile Düşük Karbonlu Çeliğin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17 (2): 75-85 (2002).
112. Tusek J., Kampus Z. ve Suban M., “Welding of tailored blanks of different materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, 119 (1-3): 180-184, (2001).

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin KÜÇÜKÖNER 1985 yılında Tarsus'ta doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini Tarsus'ta tamamlamıştır. 2009 yılında Dumlupınar Üniversitesi'nde teknisyen olarak çalışmaya başlamıştır. Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği Bölümü'nden 2014 yılında mezun olmuştur. 2015 yılından itibaren Gazi Üniversitesi Kaynak ve Birleştirme Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkez Müdürlüğünde teknisyen olarak çalışmaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Gazi Üniversitesi Kaynak ve Birleştirme
Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi
Teknik Okullar / ANKARA
Tel : (544) 550 80 54
E-posta : huseyin.kucukoner@gazi.edu.tr