

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI ÇELİKLERİN ARK KAYNAK YÖNTEMLERİYLE
BİRLEŞTİRİLMESİ MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Orhun DEMİRAL

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Necat ALTINKÖK

Ekim 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

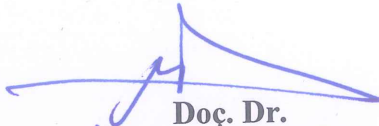
FARKLI ÇELİKLERİN ARK KAYNAK YÖNTEMLERİYLE
BİRLEŞTİRİLMESİ MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

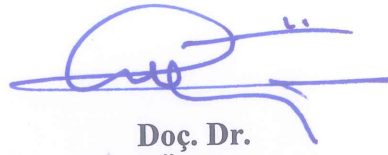
YÜKSEK LİSANS TEZİ

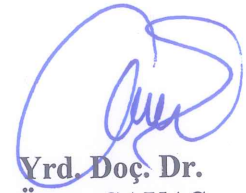
Orhun DEMİRAL

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 21.10/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr.
Necat ALTINKÖK
Jüri Başkanı


Doç. Dr.
Uğur ÖZSARAC
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Ömer SAVAŞ
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Orhun DEMİRAL

27.10.2017

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Necat ALTINKÖK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Tezin modelleme bölümünde yardımcı esirgemeyen Öğr. Gör. Selçuk ŞİRİN hocama teşekkür ederim.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı çalışanlarından Arş.Gör.Dr. İbrahim ALTINSOY ve Arş.Gör.Dr. Tuba YENER'e, mikro yapı fotoğraflarının çekilmesinde yardımcı olan Uzm. Fuat KAYIŞ'a, mekanik deneyler için Termal Sprey Laboratuvarını kullanmama yardımcı olan kıymetli hocam Prof.Dr. Fatih ÜSTEL'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bugüne kadar gölgeleri altında olduğum, maddi ve manevi açıdan beni bir gün bile yalnız bırakmayan annem Nevin DEMİRAL'a ve babam Hüseyin DEMİRAL'a, kıymetli ablam Orçin KARAYEL'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmam sırasında yardımları dokunan değerli arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Kaynak Teknolojisinin Önemi	1
1.2. Kaynak İşleminde Modellemenin Önemi	2

BÖLÜM 2.

KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Tozaltı Kaynak Tekniği	4
2.1.1. Tozaltı kaynak makinaları	6
2.1.2. Tozaltı kaynak parametreleri	8
2.1.2.1. Kaynak verisinin seçimi	8
2.1.3. Tozaltı kaynak telleri	9
2.1.4. Tozaltı kaynak tozları	10
2.1.5. Tozaltı kaynak usulünün avantajları	12
2.1.6. Tozaltı kaynak usulünün dezavantajları	14
2.1.7. Tozaltı ark kaynağının başlıca kullanım alanları	14
2.2. Elektrik Ark Kaynak Yöntemi ve Prensipleri	15
2.2.1. Bazik elektrod ile elektrik ark kaynak tekniği	15

2.2.2. Kaynak makinaları	16
2.2.3. Kaynak elektrodları	18
2.2.3.1. Örtülü elektrodlar.....	18
2.2.3.2. Elektrod örtü maddeleri	18
2.2.4. Örtü türleri	18
2.2.4.1. Rutil elektrodlar.....	19
2.2.4.2. Oksit elektrodlar	20
2.2.4.3. Selülozik elektrodlar	20
2.2.4.4. Bazik elektrodlar	22
2.2.5. Bazik elektrodlar	21
2.2.5.1. Bazik elektrodların kullanım alanları	22
2.2.5.2. Bazik elektrodların kullanımasında dikkat edilecek hususlar	23
2.3. Taguchi Yöntemi ile Modelleme	25
2.3.1. Ortogonal dizi seçimi	29
2.3.2. Sinyal – Gürültü oranı (S/N)	29
2.3.3. Varyans analizi	30
2.3.3.1. Kareler toplamı (varyasyon)	30
2.3.3.2. Serbestlik derecesi	31
2.3.3.3. Varyasyon.....	32
2.3.3.4. F testi	32
2.3.3.5. Faktörlerin toplam değişime etkilerinin yüzdesi	33
2.3.4. Doğrulama deneyleri	33

BÖLÜM 3.

MATERYAL VE YÖNTEM	34
3.1. Giriş	34
3.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler	34
3.3. Kaynak Makinaları ve Özellikleri	36
3.3.1. Tozaltı kaynak makinası	36
3.3.2. Elektrik ark kaynak makinası	37
3.4. Mekanik İşlemler ve Makinalar	38

3.4.1. Sertlik makinası ve özellikleri	38
3.4.2. Çekme makinası ve özellikleri	39
3.4.3. Eğme makinası ve özellikleri	40
3.5. Makro ve Mikro Yapı İncelemeleri	41
3.5.1. Makro yapı inceleme makinası ve özellikleri	41
3.5.2. Mikro yapı inceleme makinası ve özellikleri	43
3.5.3. SEM makinası ve özellikleri	44

BÖLÜM 4.

ARAŞTIRMA BULGULARI	46
4.1. Giriş	46
4.2. X70 ve St 52 Çelik Malzemelerinin Kaynak İşlemi	46
4.3. Sertlik Testi Sonuçları	47
4.4. Çekme Deneyi Sonuçları	52
4.5. Eğme Testi Sonuçları	55
4.6. Makro ve Mikro Yapı incelemeleri	58
4.6.1. Makro yapı incelemeleri	58
4.6.2. Mikro yapı incelemeleri	59
4.7. Mekanik Deneyler Kırık Yüzey İncelemeleri	75
4.8. Taguchi Deney Sonuçları	81

BÖLÜM 5.

TARTIŞMA VE SONUÇ	86
5.1. Sonuç	86
5.2. Öneri	88

KAYNAKLAR	90
-----------------	----

ÖZGEÇMİŞ	96
----------------	----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Amper
AC	: Alternatif Akım
API	: Amerikan Petrol Enstitüsü
DC	: Doğru Akım
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektrometre
HV	: Vickers
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
mm	: Milimetre
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
V	: Volt

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Tozaltı kaynak yönteminin şematik gösterimi	5
Şekil 2.2. Elektrik ark kaynak yönteminin şematik gösterimi	15
Şekil 2.3. Ark boyunun şematik gösterimi	24
Şekil 2.4. Bazik elektrodun, kraterin ön kısmında tutuşturulması	24
Şekil 2.5. Bazil elektrod ile ark tutuşturma	25
Şekil 3.1. ARL 3460 Spektrometrik analiz cihazı	35
Şekil 3.2. Esab A6 Masterac tozaltı kaynak makinası	36
Şekil 3.3. Magmaweld Monostick 150i Inverter elektrik ark kaynak makinası ...	37
Şekil 3.4. Wilson Hardness marka 402MVD model Vickers sertlik cihazı	38
Şekil 3.5. DIN 50125'e uygun olarak hazırlanmış çekme ve eğme numuneleri boyutları	39
Şekil 3.6. Zwick – Roell marka çekme cihazı.....	40
Şekil 3.7. Zwick – Roell marka eğme cihazı	41
Şekil 3.8. Zeiss marka makro yapı inceleme cihazı	42
Şekil 3.9. Metaserv 2000 marka zımparalama cihazı	43
Şekil 3.10. Nikon marka Eclipse L150 model optik mikroskop	43
Şekil 3.11. Metaserv Buehler marka parlatma makinası	44
Şekil 3.12. Joel marka JSM – 6060LV model SEM cihazı	45
Şekil 4.1. Farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen X70 ve St 52 çelik malzemeleri	47
Şekil 4.2. Vickers sertlik ölçümleri alınan bölgeler	48
Şekil 4.3. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilen X70 çeliği Vickers sertlik değerleri	48
Şekil 4.4. Bazik elektrod ile birleştirilen X70 çeliği Vickers sertlik değerleri	49
Şekil 4.5. Bazik elektrod ile birleştirilen X70 çeliğinin kaynak metalinin EDS analizi sonucu.....	50

Şekil 4.6. Tozaltı kaynak tekniği ile kaynaklanan St 52 çeliğinin Vickers sertlik değerleri	51
Şekil 4.7. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş St 52 çeliğinin kaynak metalinin EDS analizi sonucu.....	52
Şekil 4.8. Bazik elektrod kullanılarak elektrik ark kaynağı tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliği çekme deneyi sonucu.....	53
Şekil 4.9. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin çekme deneyi sonucu.....	54
Şekil 4.10. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş St 52 çeliğinin çekme deneyi sonucu	54
Şekil 4.11. Bazik tip elektrod kullanılarak elektrik ark kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin eğme testi sonucu.....	56
Şekil 4.12. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin eğme testi sonucu.....	57
Şekil 4.13. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş St 52 çeliğinin eğme testi sonucu.....	57
Şekil 4.14. Tozaltı kaynak tekniği ile kaynaklı X70 çeliğinin makro yapı görüntüsü.....	58
Şekil 4.15. Tozaltı kaynak tekniği ile kaynaklı St 52 çeliğinin makro yapı görüntüsü.....	59
Şekil 4.16. Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin makro yapı görüntüsü.....	59
Şekil 4.17. X70 ve St 52 çelik numunelerinin ana malzemelerinin 60 µm optik görüntüleri	60
Şekil 4.18. X70 ve St 52 çelik numunelerinin ana malzemelerinin 15 µm optik görüntüleri.....	61
Şekil 4.19. X70 ve St 52 çelik numunelerinin ITAB'ın 60 µm optik görüntüleri...	62
Şekil 4.20. X70 ve St 52 çelik numunelerinin ITAB'ın 15 µm optik görüntüleri...	63
Şekil 4.21. X70 ve St 52 çelik numunelerinin kaynak metalinin 60 µm optik görüntüleri	64
Şekil 4.22. X70 ve St 52 çelik numunelerinin kaynak metalinin 15 µm optik görüntüleri.....	65

Şekil 4.23. Bazık elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin mikro yapı fotoğrafları.....	66
Şekil 4.24. Tozaltı kaynaklı St 52 çeliğinin mikro yapı fotoğrafları	67
Şekil 4.25. Tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin mikro yapı fotoğrafları	68
Şekil 4.26. Tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin ana malzemesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi	69
Şekil 4.27. Bazık elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin ana malzemesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi	70
Şekil 4.28. Tozaltı kaynaklı St 52 çeliğinin ana malzemesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	71
Şekil 4.29. Tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin ITAB'ın SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	71
Şekil 4.30. Bazık elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin ITAB'ın SEM görüntüsü ve EDS analizi	72
Şekil 4.31. Tozaltı kaynaklı St 52 çeliğinin ITAB'ın SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	73
Şekil 4.32. Tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin kaynak metalinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	73
Şekil 4.33. Bazık elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin kaynak metalinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	74
Şekil 4.34. Tozaltı kaynaklı St 52 çeliğinin kaynak metalinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	75
Şekil 4.35. Bazık elektrod ile kaynaklanmış X70 çelik numunesinin kırık yüzeyinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü.....	76
Şekil 4.36. Bazık elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin kırık yüzey SEM görüntüsü ve belirlenen noktalardan alınan EDS nokta analiz sonuçları.....	77
Şekil 4.37. Tozaltı kaynaklı X70 çelik numunesinin kırık yüzeyinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri.....	78
Şekil 4.38. Tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin kırık yüzey SEM görüntüsü ve belirlenen noktalardan alınan EDS nokta analiz sonuçları.....	79
Şekil 4.39. Tozaltı kaynaklı St 52 çelik numunesinin kırık yüzeyinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri.....	80

Şekil 4.40. Tozaltı kaynaklı St 52 çeliğinin kırık yüzey SEM görüntüsü ve belirlenen noktalardan alınan EDS nokta analiz sonuçları.....	81
Şekil 4.41. Minitab programı tarafından oluşturulan S/N eğrileri.....	84



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Tozaltı kaynak tellerinde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri...	10
Tablo 3.1. X70 ve St 52 çelik malzemelerin kimyasal analizi.....	35
Tablo 3.2. X70 ve St 52 çelik malzemelerin mekanik özellikleri	35
Tablo 3.3. Deneyde kullanılan tellerin kimyasal bileşimi	35
Tablo 3.4. Deneyde kullanılan tozların kimyasal bileşimi	36
Tablo 3.5. Tozaltı kaynak parametreleri	37
Tablo 3.6. Bazik elektrod elektrik ark kaynak parametreleri	37
Tablo 4.1. L ₁₆ ortogonal dizisine göre deney tasarımı	82
Tablo 4.2. L ₁₆ ortogonal dizisine göre yapılan deneylerden elde edilen sertlik sonuçları	83
Tablo 4.3. Deney parametrelerinin sertliğe etkisinin gösterildiği varyans analizi (ANOVA) tablosu	84

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Tozaltı kaynağı, Bazik elektrod ile ark kaynağı, Taguchi (ANOVA) Modelleme

Bu çalışmada X70 ve St 52 çelik malzemelerinin tozaltı kaynak tekniği ve bazik elektrodla elektrik ark kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan X70 ve St 52 çelik malzemelerin ARL 3460 Spektrometrik analiz cihazı ile kimyasal bileşimleri belirlendi. Numunelerin sertlik davranışlarını tespit etmek için enine 15 noktadan alınan sertlik ölçümleri yapıldı. En yüksek sertlik değeri 310 HV_{0,2} olan bazik elektrod ile birleştirilmiş X70 çeliğinde ölçüldü. DIN 50125 standartlarına göre hazırlanan numunelere maksimum çekme mukavemeti ve % uzama değerlerini belirlemek için çekme deneyi ve eğme deneyi testleri uygulandı. En yüksek çekme mukavemeti değeri bazik elektrod ile birleştirilmiş X70 çeliğinde 665 MPa olarak ölçüldü. En yüksek eğme mukavemeti değerine tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinde 761 MPa olarak ölçüldü. En düşük % uzama değerine bazik elektrod ile birleştirilmiş X70 çeliğinde % 15,99 olarak ölçüldü.

Taguchi modellemesinin amacı, oluşturulan ortogonal dizi sayesinde minimum sayıda deney yaparak, deney parametrelerinin sonuca etkisini tespit etmektir. Tozaltı kaynak tekniği kullanılarak birleştirilen X70 ve St 52 malzemelerinin, amperin ve kaynak hızının, sertliğe etkisini tespit edebilmek için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Literatüre göre kaynak hızı arttıkça ve amper düştükçe sertlik artmaktadır. Elde edilen Taguchi modellemesi sonuçlara göre, X70 malzemeden ölçülen sertlik değerlerinin, St 52'ye göre daha yüksek olduğu tespit edildi. Bu çalışmada hesaplanan “P” değeri, 0,0042<0,05 olduğu için elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak anlamlı olduğu kanıtlandı. Varyans analizine göre sertliğe en yüksek etkisi olan parametre, kaynak hızı (%50,4) olarak hesaplandı. Diğer etkili parametre ise malzeme seçimi (%40,2), en düşük etkiye sahip olan parametre de amper (%5,3) olarak tespit edildi. Son olarak ta varyans analizi tablosuna göre hata oranı %4,1 olarak tespit edildi. Bunun anlamı ise sonuçların %95,9 oranında güvenilir olduğudur.

COMBINING DIFFERENT STEEL MATERIALS WITH ARC WELDING METHODS AND RESEARCHING ABOUT MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE

SUMMARY

Keywords: Submerged Arc Welding, Basic Electrode, Electric Arc Welding, Taguchi Method

In this study, submerged arc welding and electric arc welding with basic electrode techniques of X70 and St 52 steel materials had been combined. Chemical analysis of X70 and St 52 steel materials that has been used in experimental studies, had been detected with ARL 3460 spectrometric analysis device. To detect hardness values of the samples, hardness tests had been applied to 15 different with sections. The peak point of the results was measured on X70 steel which has been welded by basic electrode techniques as 310 HV_{0,2}. For detecting of maximum tensile strength and % elongation tension test and bend tests had been applied to the samples. Test samples had been prepared by DIN 50125 standards. The maximum value of tensile strength had been measured 665 Mpa at X70 steel which was welded by basic electrode technique. Maximum bending strength was measured 761 Mpa at X70 steel material which had been welded by submerged arc welding technique. Maximum elongation value also measured % 15,99 at X70 steel which was welded by basic electrode technique.

The purpose of Taguchi modelling is performing minimum tests and experimenting the effects of test parameters on final results via making up an orthogonal series. Taguchi method had been used for detecting the effect of amper and weld speed on hardness results on X70 and St 52 materials, which had been welded by submerged arc welding. Depending literature hardness is increasing higher weld speed and low amper. Provided Taguchi method results had been showed that X70 material hardness is higher comparing St 52 material. In this study, obtained results are statically meaningful depending on calculated 'p' value is $0,0042 < 0,05$. Welding speed (% 50,4) calculated the most effective parameter on hardness by variant analyses. Another effective parameter is material selection (% 40,2), and the less effective parameter was amper (%5,3). Finally depending on variant analyses table failure rate % 4,1 and that means that the results are reliable by % 95,9.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Kaynak Teknolojisinin Önemi

Gelişen sanayide kullanılan malzemelerin çeşitliliğinin artması farklı işlem gerektiren yerlerde bağlantıların kullanılması ile birlikte kaynak işleme bağımlılıkta her geçen gün artmasına neden olmuştur. Özellikle büyük parçaların birleştirilmesinde bu dönemde birleştirme yöntemi olarak en yaygın kullanım kaynaktır. Bu sebepten ötürü kaynak işleminin doğru yapılması bütün yapının güvenilirliği açısından büyük önem arz etmektedir [1].

Sanayinin gelişmesinde en büyük artışların yaşandığı dönemler savaş dönemleridir. Diğer devletlerden üstün gelmek için farklı arayış yollarına gidilmiştir. Bunun sonucunda da teknolojinin gelişimi büyük sıçramalar yapmıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında tankerlerle petrol taşınması sekteye uğrayınca Amerika Birleşik Devleti petrolün uzun mesafelere boru yoluyla taşınması keşfetmiş ve petrol piyasasında büyük bir patlama olmuştur. Kaynak teknolojisi de bu boru hatlarına ayak uydurarak gelişimini arttırmıştır.

Kaynak işlemi, özellikle de ark kaynak işlemi; mikroyapısal olarak elektromanyetik hareket, artık gerilmeler, kaynak metali kimyası, faz dönüşümü, ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) mikro yapısı ve yapısal olarak da ısı transferi, metal-gaz-toz reaksiyonları, kaynak banyosu akışkanlığı, plazma – metal etkileşimleri gibi anlaşılması zor olguların etkileşimlerinin birleştiği karmaşık bir işlemdir.

Son zamanlarda bilim adamları ve bu konu ile ilgilenen araştırmacılar sadece kaynak yapısının yüzeyi değilde, kaynak işlemini kolaylaştıran yardımcı bir araç olarak

kullanılmaktadır. Bu özellikle uzamaların ve artık gerilmelerin belirlenmesinde kullanılmaktadır [2].

1.2. Kaynak İşleminde Modellemenin Önemi

Modellemenin gelişmesi, deneysel çalışma ve bir takım masraflara gerek duyulmaksızın sonuçların bilgisayar tabanlı tahmin edilebilmesini günümüzde sağlamıştır. İlk olarak 1940' ların başlarında Rosenthal tarafından analitik çözümlemelerle başlamıştır. 1980'lerde bilgisayar teknolojisinin gelişimi nümerik modellemelerin anlaşılmasına, geliştirilmesine ve bu bağlamda kontrollü çalışmaların yapılmasına zemin hazırlamıştır.

Kaynak işlemi parametreleri bilgisayar tabanlı modelleme ile bir ilişki kurarak kaynak işlemini tanımlamaktadır. Kaynak parametrelerinin doğruluğu deneysel çalışmalar sonucunda oluşan verilerin, nümerik modelleme ile yapılan sonuçların mukayesesi ile olmaktadır [3].

Matematiksel modelleme fiziksel bir sistemin analizini yapmak için ihtiyaç duyulan denklem ve eşitliklerin kullanılması ile oluşmuş modellemeye denir. Çeşitli fiziksel sistemlerin analitik ifadelerini kullanmak bazı kabuller sayesinde mümkün olmaktadır. Bu analitik ifadeler sayesinde matematiksel modelleme basit ve kolay bir şekilde kurulur ve hesaplanabilir. Bazı karmaşık ifadelerin modellemesi zor olduğu için bilgisayar modellemesi kullanılması önemli bir çözüm yolu sağlamaktadır. Bilgisayar modellemesi milyonlarca verinin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Bilgisayar modellemesi birçok mühendislik dalında kullanım alanı bulmaktadır.

Bu çalışmada farklı özelliklere sahip çelik malzemelerin farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi sağlanmıştır. Elde edilen birleştirmelere kimyasal analiz uygulaması yapılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerin makro ve mikro yapı, sertlik özelliklerini incelemesi için bir takım metalografik işlemlere tabi tutulmuştur. Birleştirmelerin mekanik özelliklerinin araştırılması için belli standartlarda numuneler hazırlanmış ve çekme deneyi ve eğme testleri uygulanmıştır. Çekme deneyi ve eğme deneyi ile elde

edilen kırık yüzeylerin mikro yapıları incelenmiştir. Kaynak işleminin ve sonrasında elde edilen sertlik sonuçların uygunluğunun sağlanması için Taguchi modellemesi yapılmış ve sonuçlar ile tahmin edilen değerler arasında uygunluk görülmüştür.



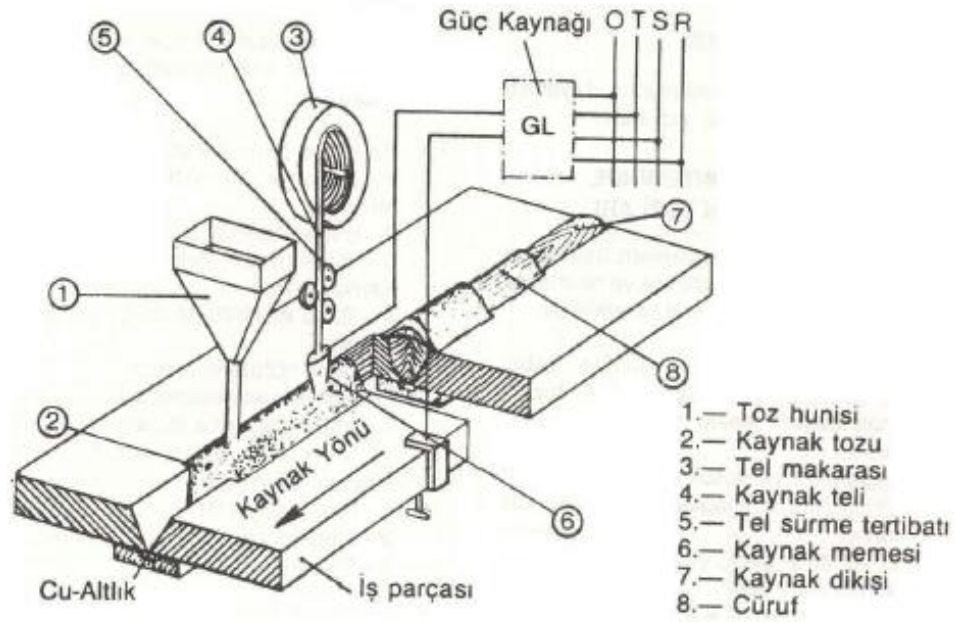
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Tozaltı Kaynak Tekniğı

Metalik bir malzemeyi ısı ve basıncı tek tek veya ikisini aynı anda kullanarak ve aynı türden ergime aralığı içerek bir malzeme ekleyip ya da eklemeyip yapılan birleştirme tekniğine metal kaynağı, eklenen malzemeyi sadece ısı ile bölgesel olarak ergitip, bir ilave metal kullanarak veya kullanmayarak yapılan birleştirme işlemine ise ergitme kaynağı denilir. Kaynaklı birleştirmeler için gerekli olan ısınn elektrotlar ve iş parçası kısmında kalan bölgede oluşturduğu ark yardımıyla yapılan ergitme kaynak türüne de elektrik ark kaynağı denir. Elektrik ark kaynağı kısaca, bir elektrod ile iş parçası kısmında arkı oluşturarak, bir kaynak teli kullanmak şartıyla yapılan kaynak yöntemine denir. Kaynak işlemi, havaya açık kaynak teknikleri ile yapılabildiğı gibi birleştirilecek parçalardaki üzerini kapatacak şekilde katı maddelerin karışımı altında da yapılabilir. Bu tür bir toz karışımı altında yapılan kaynak çeşitlerine tozaltı kaynağı denir. Sürekli olarak tozun altında yazmasından dolayı bu yöntem tozaltı kaynak yöntemi denilmiştir [4].

Tozaltı kaynak yöntemi, kaynağın ihtiyaç duyduğu ısınn, iş parçası ve biten elektrotlar arasında oluşan ark (veya arklar) sayesinde oluşan bir kaynak yöntemidir. Ark, kaynak ağzına sürekli olarak bir kanaldan sevk edilen toprak alkali ve silikat metalleri barındıran özel bir toz karışımı altında kaynak yerine el değmememiş olarak iletilen bir tel elektrod ile iş parçası arasında yanar. Arkın oluşturduğu ısı elektrodu, ana metali ve kaynak tozunu ergiterek kaynak ağzını dolduran kaynak banyosunu oluşturur. Arkın oluşturduğu sıcaklık altında gayriihtiyar bir parça toz ergiyerek dikişi koruyan bir cüruf şeklini alır. Tozaltı kaynağında elektrik, ergimiş metal ve ark ile ergimis cüruftan oluşan kaynak banyosundan geçer. Oluşan bu toz örtüsü altında (cüruf), kaynak banyosu atmosferin olumsuz etkilerine karşı korunur. Buna ek olarak

cüruf kaynak banyosu ile tepkimeye girer ve kaynak banyosundaki metali arındırır. Ark tozun altında kaldığından kaynak sıçramaları engellenmiş olur ve bu sayede tel - elektrot sarfıyatı da azalır. Şekil 2.1.'te tozaltı kaynak yönteminin şematik olarak gösterimi verilmiştir [5 – 7].



Şekil 2.1. Tozaltı kaynak yönteminin şematik gösterimi [8]

Tozaltı kaynak yöntemi çok geniş bir çalışma parçası serisi için kullanılabilir. Yöntem, gemilerdeki yapısal elemanlar, basınçlı kaplar imalatı, köprü kirişleri, masif su boruları, ince levha kabukları vb. gibi uygulamaların kısa - kaynak ve dolgu kaynağına uygundur. Buna ek olarak, bu yöntem kaplama uygulamaları için özellikle etkilidir. Örneğin, yumuşak karbon çeliğini paslanmaz çelik malzemelerle kaplarken veya daha yumuşak bir alt tabakaya sert malzemeler katarken bu kaynak yöntemi kullanılabilir.

Tozaltı kaynak yöntemi genellikle fabrika atölyelerinin iç mekanlarda yapılır. Açık havada çalışmak, her zaman, derz veya çatlak içine giren istenmeyen nem seviyeleri riskini taşır ve kaynağın gözenekliliğine neden olur. Tozaltı kaynak yöntemi açık havada gerçekleştirilirse, çalışma alanı üzerinde bir çatı inşaatı gibi özel tedbirler alınmalıdır.

Tozaltı ark kaynağında, boşluklar mümkün olduğunca daha az geçişle doldurulabiliyorsa daha etkili bir birleştirme sağlanmış olunur. Yumuşak çelikte çalışırken iş parçası ters çevrilebilir ve eğer malzeme çok kalın değilse, çoğunlukla eklemin her iki yanından bir damla şeklinde uygulanır. Temel malzeme alaşımlı çelik ise, çok geçişli bir prosedür gereklidir. Bu işlem maliyetlerinde bir artışa neden olur, ancak birçok iş parçasında tozaltı kaynağı, manuel kaynak yapmaktan daha uygun maliyetli olduğu için işlem yeterince caziptir. Buna ek olarak, otomatik kaynakla daha az kaynak hatası oluşmaktadır [9].

Yüksek bir hızla katottan yayılan elektronların anodu bombardıman etmesi sonucunda oluşan ark, hem elektrodun hem de ana metalin ergimesini sağlar. Bu sayede elektrodun ana metal üzerine nüfuziyeti sağlanmış olur. Buna göre, akım oluşması için elektrodla ana metal arasında temas olması gerekir, temas olmadığı sürece akım geçmez. Numune ile elektrot birbirine temas etmesi durumunda kısa devre akımı diye adlandırılan bir akım geçmesi sağlanır. Bu kısa devre akımı tüm devrenin ısınmasına neden olur. Fakat, bu ısınma özellikle tepkinin çok yüksek olan kısımlarında yani temasın iyi olmadığı elektrod ucunda toplanır. Bu uç ısınır ve kızarmaya başlar [6, 11].

2.1.1. Tozaltı kaynak makinaları

Elektrik ark kaynağında doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) ile kaynak yapabilme imkanı bulunduğundan, kaynak makineleri de DC akım AC akım olarak iki ana gruba ayrılırlar. Kaynak jeneratörleri, benzin-dizel-elektrik motoru enerji üreterek kaynağa ihtiyaç olan elektrik akımını üretebilirler fakat verimleri düşük seviyelerde olmaktadır. Kaynak redresörlerinin verimleri, jeneratörlerine oranla % 55.70 daha fazla olup, enerji sarfıyatı oldukça azdır. Kaynak transformatörlerinin (şebeke akımını kaynak akımına çeviren) verimi ise % 95.75 olup oldukça yüksek yüksektir. Çalışma gerilimleri de yüksektir [12].

Her kaynak yöntemi özelliğine göre kaynak makinesi gerekir. Bu nedenle istenilen özellikte kaynak yapacak kaynak makinesi seçilmelidir [13]. Kaynak makinelerinden istenilen özellikler de kaynak karakteristiğine uygun yönde olmalıdır. Kaynak akım

şiddeti ayarlama ekipmanına sahip olmalı ve kaynak sırasında akım şiddetinin sabit tutulmasını özelliğinde olmalıdır. Kaynak makinesi çalışma sırasında kararlı bir ark ve sürekli bir ark oluşturmalıdır. Bu belirtilen özelliklerin gerçekleşmesinden akım sürecinin dinamik ve statik karakteristiği sorumludur. Bu elektriksel karakteristikler seçilmiş makinenin belirtilen kaynak yöntemine uygun olduğunu gösterir.

Statik karakteristik, kesintisiz ark sırasında makinenin gerilime bağlı olarak akımdaki değişmeyi verir. Dinamik karakteristik ise, akım ile gerilimin kısa zaman aralığındaki değişimini anlamlandıran karakteristiklerdir. Sabit akımlı üreteçler, DC ve AC türü akım üretebilme yeteneğine sahiptirler [6].

Kaynak tozu ayrıca ısı yalıtımı etkisine sahiptir ve dolayısıyla yaydaki ısı kayıplarını azaltır. Sonuç olarak, gerçek kaynak işlemi için girilen enerjiden daha fazlasına maruz kalmış bir yay içeren süreçler için olduğu gibi elde edilebilir. Termal verimlilik daha yüksektir ve kaynak oranı daha hızlıdır. Tozaltı kaynakların, örtülü elektrod kaynağı için yaklaşık% 75'e karşı, yaklaşık% 90'lık bir ısı verime sahip olduğu bulunmuştur

Tozaltı kaynağında, DC (doğru akım) ve AC (alternatif akım) kullanılmaktadır. DC akımda + ve - kutuplama yapma seçeneği vardır. DC (+) akım kutuplama yapılarak yüksek nüfuziyet, yüksek gerilim, yüksek hızlarda kaynak yapabilme ve buna bağlı olarak gözenek oluşuma karşı yüksek direnç elde edilebilir [9].

Tozaltı kaynağı güçlü otomatik bir kaynak yöntemidir. Bir paso ile 80 mm, iki paso ile 180 mm ve çok paso ile 300 mm kalınlığa kadar parçalara kaynak işlemi yapılabilmektedir. Kaynak yapılabilen en ince sac kalınlığı, 1,2 mm'dir. Bu kaynak yönteminde normal el ark kaynağına göre elektrod teli daha fazla bir akım şiddeti ile yüklenebilir. Bu sebepten dolayı, geniş metal banyosu ve derin nüfuziyetli dikişler elde edilir.

Meselâ 4 mm çap boyutuna sahip bir el elektrodu ark kaynağında 150-190 Amper (A) dolaylarında akımla birleştirme işlemi uygulanırken, tozaltı ark kaynağında bu ara 400-650 A'lık bir akım ile birleştirme yapılabilmektedir [16].

Sabit gerilimli (yatay karakteristikli) kaynak makinesinin sağlayabileceği min. – max. akım şiddeti ile sınırlandırılmış bir çalışma bölgesi bulunur. Bu bölgeye akım ayar alanı denir. Sabit gerilimli kaynak akım üreteçlerinde ark boyutunda ufak bir miktarda değişimine karşın akım şiddetinde olan değişim çok daha fazladır [6].

DC güç ünitesi (sabit gerilimli akım üretebilen), sabit hızda tel sürme sistemi ile birlikte kullanıldığı zaman, birleştirme işlemi süresince gerilimin sabit kalması sağlanabilir. Güç kaynağı farketmez akım seçilmiş olan ark gerilime göre çalışır. Tel hızı sabittir. Ark boyutunun değişimleri, kaynak akımının artırması ve azalması gibi ani değişimler ile dengelenir [13].

Akım yoğunluğunun 59 A/mm^2 'den fazla olduğu yüksek hızlı, ince çaplı tel kullanımının sahip olduğu kaynak tekniklerinde, yüksek hızlı akım değerlerindeki değişimler için sabit gerilimli (yatay karakteristikli) güç kaynağı kullanımı zorunludur [6].

2.1.2. Tozaltı kaynak parametreleri

2.1.2.1. Kaynak verisinin seçimi

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan parametreler kaynak yöntemlerinin ve sonuç olarak oluşturulan birleştirme bağlantısının kalitesini belirleyen en önemli etkenlerdir. Kaynak verileri, birleştirilecek iş parçasının türü ve parça geometrisi göz önüne alınarak belirlenirler. İyi derece nüfuziyet ve kaynağın doğru şeklini sağlamak için ideal kaynak verisi seçilmelidir. Bu temel gereksinimden yola çıkarak dolgu teli boyutunun, ark voltajının, kaynak akımının ve kaynak hızının uygun değerleri seçilir. Bu bağlayıcının ucundaki kaynak verileri tabloları, doğru kaynak verilerinin seçimi için bir dizi kılavuz verir. Yapılan seçimlerin deneme kaynaklarına göre denenmesi, böylece iş parçası ile çalışıldığında kaynağın başarısız olmasının önüne geçilmesi önerilir. Bunun yanı sıra akım türü ve kutuplaşma, kullanılan telin çapı, serbest tel uzunluğu, kaynak yapılan düzlemin eğimi, elektrot açısı, elektrotlar arası mesafe ve toz yığılma yüksekliği gibi ikincil kaynak parametreleri vardır. Bu parametreler

birbirleri ile bağlantılı olup, birinin değişmesi azru edilen dikiş ulaşmak için bir veya birkaç parametrenin değişimine gidilmesi gerekir. Bu sebeple tüm bu kaynak dikişine etki eden parametrelerin bilinmesi ve kontrol altında tutulması iyi bir dikiş formu elde edilmesi anlamına gelir [6].

Güleç ve çalışma arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, kaynak pozisyonunun tokluk değerlerini etkilediği ve bu değerlerin çentik darbe dayanımını düşürdüğü gözlenmiştir. Ayrıca dikiş formunu etkilediği, bazı kritik durumlarda yetersiz ergime ile yetersiz kaynak banyosu oluştuğu, bazı pozisyonlarda da kaynak kökünde iyi birleşme olmadığı tespit edilmiştir [21].

2.1.3. Tozaltı kaynak telleri

Tozaltı kaynak tekniğinde kullanılan elektrodlar, kaynak teli olarak isimlendirilir. Kullanılan teller elektrik ark ocağında üretilir. Kimyasal bileşimi, kaynak yapısını ve kaynak yerinin metalurjik güvenliği bakımından içeriğinde yüksek oranda Mangan barındıran, yüksek kalitedeki çelik tellerdir. Genellikle çapları 1,2-12 milimetre (mm) arasındadır. Kaplama kaynaklarında, dikdörtgen kesitli şekilde üretilirler. Tozaltı kaynak telleri, kaynak sırasında hem temas ucundan tele akım geçişini kolaylaştırmak hem de elektrotların paslanmasını önlemek amacıyla genellikle bakır ve bronz kaplanmaktadır [2].

Tozaltı kaynak tellerinin yüzeyleri düz ve pürüzsüz olmalıdır. Yağ, pislik ve tufal bulundurmamalıdır ve kaynak işlemi bitene kadar bu şekilde korunmalıdır. Yağ, pas ve tufal akımın geçişinin zorlaştırmaktadır, bu da enerji sarfiyatını arttırmakta ve oluşan dikişin hatalı çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca temas eden uçların çabuk aşınmasına neden olmaktadır [5, 23].

Yüksek manganlı olarak üretilen tozaltı kaynak tellerinde fosfor ve kükürt element seviyelerinin her element için %0,03'ün altında olması gerekir. Tozaltı kaynak telleri içerisine ayrıca karbon, silisyum, manganez, krom, nikel gibi alaşım elementleri de

katılır. Tablo 2.1.'te tellerin bileşiminde bulunan diğer elemanların % değerleri ve kaynak dikişindeki etkileri verilmiştir [2, 26].

Tablo 2.1. Tozaltı kaynak tellerinde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri [2]

Alaşım Elementi	% Sınırları	Etkisi
Karbon (C)	0,05 - 0,25	Sertliği artırır, çekme dayanımını yükseltir.
Silisyum (Si)	0,05 - 0,45	Deokside eder, işlenebilme yeteneğini artırır. Kaynak kabiliyetini artırır.
Manganez (Mn)	0,05 - 3,0	Sertliği kısmen yükseltir, çekme ve çentik-darbe dayanımını artırır, uzamayı artırır.
Molibden (Mo)	0,5 - 1,0	Isıya dayanımı artırır.
Krom (Cr)	1,0 - 2,9	Sertliği yükseltir, ısıya dayanımı artırır.
Nikel (Ni)	1,0 - 2,0	Düşük sıcaklıklarında çalışma dayanımı artırır.

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılacak kaynak telinin seçiminin yanında kaynak tozuna da dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu nedenden dolayı kaynak metalinin bileşiminin belirlenmesinde, hem tozun bileşimi hem de telin bileşimi göz önünde bulundurularak şöyle seçimler yapılabilir. Alaşımlı bir tel seçmek, alaşımsız bir tel ile alaşımlı bir kaynak tozu karışımı seçmek, alaşımsız bir telden ibaret kompoze bir elektrod ve alaşım elemanı ihtiva eden bir örtü kullanmak [28, 29].

2.1.4. Tozaltı kaynak tozları

Tozaltı kaynak işleminde kullanılan kaynak tozlarının ergimeyen kısmı emilerek yeniden kaynak işleminde kullanılır. Emme sonucunda tozların tane büyüklüğü dağılımında, mutlak bir değişim ortaya çıkmasını önlemek için, kullanılan tozun yaklaşık yarısı kadar yeni kurutulmuş toz ilavesi önerilir. Tekrar kullanılmak için alınan tozun pisliklerden arındırılmış olması gerekir [30].

Kullanılan tozların kimyasal bileşimi, dış etkilere bağlı olarak kimyasal reaksiyon sonucu özelliklerinde değişiklikler meydana gelebilir. Bu değişiklikler uzun süreli depolamalarda artmaktadır. Kaynak tozları dış etkilere bünyesine atmosferden az miktarda da olsa nem alır. Nem, gözenek oluşumu ve hidrojen difüzyonu ile soğuk çatlak oluşmasına neden olur. Bunun önüne geçmek için, kaynak tozu kullanılmadan önce $250\pm 50^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat süre ile kurutulmalıdır. Eğer kurutulacak toz aglomere kaynak tozu ise, $350\pm 50^{\circ}\text{C}$ 'de 3 saat süre ile kurutulmalıdır [31].

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak tozları, örtülü elektrotlardaki örtünün fonksiyonu yerine getirir. Kaynak işlemine fiziksel ve metalurjik olarak etki eder. Fiziksel olarak, kaynak tozlarının birleştirme işlemindeki en önemli iki görevi, kaynak banyosu üzerinde örtü oluşturarak dış etkenlere karşı korumak ve arka kararlılık sağlamaktır. Buna ek olarak dikişe uygun bir form verme ve dikişin yavaş soğumasını sağlamaktır. Ayrıca, kaynak dikişinin yavaş soğumasını sağlayarak ve gerektiğinde kaynak banyosuna alaşım elementleri girdisi sağlayarak kaynak dikişi formunu mekanik özellik açısından istenilen değerlerde oluşmasını sağlamaktır. Metalurjik tesire ana metal ve kaynak telinin de etkisileri vardır. Ana metal, kaynak teli ve tozun bileşimi, dikişin yapısına etki eden üç önemli unsurdur. Tozun koruyucu tabakası altında yapılan birleştirmeler; alışılmadık şekilde iyi işlenebilirlik, korozyon dayanımı ve düşük azot içeriğine sahiptir [32].

Kaynak tozları, kaynak dikişinin mekanik dayanımını istenilen değerlerde oluşturmak için gerektiğinde kaynak banyosuna alaşım elementi girdişi sağlar. Kaynak tozları kaynak metalini alaşımlama yeteneklerine göre sınıflandırılabilir. Kaynak tozunun alaşımlama özelliğini ifade eden nötrlük derecesi, kaynak metalindeki özellikle Mn ve Si içeriğinin değişimini önceden belirleyebilmek için yararlı bir etkidir. Nötrlük derecesi, aynı şartlarda elde edilen iki farklı kaynak metalinin içeriğindeki Mn ve Si miktarlarındaki farklılıkların belirlenmesi ile elde edilir.

Nötr kaynak tozu kullanımında, kullanılan kaynak telinin kimyasal bileşimi deoksidasyon ve kaynak metalinin alaşımlandırılması görevini etkiler. Bu sebepten kaynak dikişinde gözenek ve sıcak çatlak oluşma riski yüksektir. Aktif tozların

bünyesinde Si ve Mn içeriği vardır. Bu elementlerin bulunması kaynak metalinde gözenek ve çatlak oluşumunun önüne geçmektir. Aktif tozlar düşük Si ve Mn içerikli tellerle birlikte kullanılır.

Alaşımli tozlar kaynak metalinin alaşımlandırılması için bünyelerinde Mn ve Si bileşenleri barındıran tozlardır. Kullanılan alaşımlı tozların miktarı ark gerilimini ve ark uzunluğunu doğrudan etkilediği için sürekli gözlem altında tutulmalıdır. Alaşımlı tozlar normal karbonlu tellerle beraber kullanılırlar ve bu da ekonomik bir üstünlük sağlar. Alaşımlı tozlar genellikle düşük alaşımlı öelıkların birleştirilmesinde kullanılır.

Tozaltı kaynak uygulamalarında ortaya çıkan metalurjik olaylar büyük önem taşımaktadır. Tozların redüklenerek kaynak dikişine geçmesi kaynak karaktestiğini, mekanik açıdan dikişin formunu ve sıcaklık gibi birçok özelliğe etki etmektedir. Kaynak sırasında tozlarda bulunan SiO_2 redüklenerek kaynak dikişine Si girişı olur. SiO_2 miktarındaki artış dikişe geçen Si miktarını arttırır. Kaynak dikişindeki Mn/Si oranı dikişin mekanik özellikleri için önemlidir. Bu Mn/Si oranı en az 2/1 olmalıdır. Bu oran 3/1'e kadar da çıkabilir.

Mn – Si oranının kaynak teli ve tozunun etkisi olduğu kadar, çalışma tekniğı ile de ilgilidir. Kaynak parametreleri mangan ve silisin tozdan kaynak yerine geçişine tesir eder. Kaynak parametrelerinden en fazla akım gerilimi, akım şiddeti ve kaynak hızı kimyasal reaksiyonları etkilemektedir. Akım şiddeti arttıkça mangan ve silisin yanma oranı artar. Böylece dikiş bileşimine giren mangan ve silis miktarı azalır. Akım gerilimi arttıkça kaynak dikişinin ihtiva ettiği mangan ve silis miktarı artar [13].

2.1.5. Tozaltı kaynak usulünün avantajları

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan akım şiddeti 200-2400 A arasında değışiklik göstermektedir. Ayrıca çok telli kullanımlarda bu değıer 3000 A'e kadar çıkmaktadır. Bu tozaltı kaynak yöntemine çok yüksek bir ergime gücü kazandırmaktadır. Kaynak hızı ise 6-300 m/s arasında da ayarlanabilmektedir.

Tozaltı kaynak yönteminde kaynak akım şiddetinin yani akım yoğunluğunun çok yüksek olmasını nedeni ile derin kaynak nüfuziyeti elde edilmekte ve paso sayısının azalması bu da kullanılan elektrod sayısının azalmasına neden olmaktadır. Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynak ağzı açmadan tek paso ile 18 mm ve kaynak ağzı açarak da iki paso ile 150 mm kalınlığındaki parçalar kolaylıkla birleştirilmektedir.

Kullanılan toz elektrik arkını örttüğü için dışarıya ısıyı az iletir ve iyi bir yalıtkan vaziyefi görmektedir. Bu sebepten sarf edilen elektrik enerjisinin büyük bir kısmı faydalı hale getirilir. Örtülü elektrod ile yapılan kaynakta elektriğin %25'i, tozaltı kaynağı ile yapılan kaynak işleminde elektriğin %68'i direk kaynak için yararlanılmaktadır.

Tozaltı kaynak yönteminde yüksek akım yoğunluğu nedeni ile ergiyen metalin 2/3'ü ana metal ve 1/3'ü de ilave metaldir. Bu nedenden ilave metal yani elektrod sarfiyatı düşüktür.

Kaynak dikişi yapısının düzgün ve müessir bir şekilde cüruflla kaplanması emniyetli bir katılaşma sağlamaktadır. Bu sayede kaynak banyosunun gaz salması kolaylaşmakta, birim boydaki akım şiddetinin yüksekliği de soğuma hızını yavaşlatacağından geçiş bölgesinde sertleşme olasılığı zayıflayacaktır. Ergimiş viskoz cüruf kaynak dikişi formunun düzgün olmasını sağlamakta ve aynı zamanda dikişin kenarlarındaki yanma oluklarının oluşmasına izin vermemektedir. Birleştirme bölgesinde herhangi bir hata ve cüruf kalıntısı olmadığından daha emniyetli dikişler elde edilmektedir.

Tozaltı kaynak yönteminde kumanda ve elektromanyetik sistemler kaynakçı varlığını ortadan kaldırmaktadır. Bu kaynak yönteminde kaynakçı dikiş kalitesine etki eden bir faktör olmadığı için kaliteli bir kaynakçıya da ihtiyaç yoktur. Bu sayede kaynakçı daha az yorulacak ve bu da maliyete yansıyacaktır.

Ark bölgesinde oluşan cürufun oluşturduğu atmosfer altında çok yüksek hızlarda bile yöntemin uygulanmasına sürekliliğinin devam etmesine imkan sağlamaktadır.

Tozaltı kaynak yönteminde ark tamamen tozun altında olduğu için ısıma ve ultraviyole gibi göze zarar vericek bir etken olmadığından özel gözlük ve kaynak esnasından gaz ve toz oluşumu da az olduğu için özel maskelere gerek yoktur. Bu hususlarda kaynakçı için rahat bir çalışma şekli sağlamaktadır [2, 17].

2.1.6. Tozaltı kaynak işleminin dezavantajları

Tozaltı kaynak yönteminde diğer yöntemler gibi birçok dezavantajı vardır. Pahalı makine ve donanıma gerek duyulması ile yatırım giderleri yüksektir. İnce sacların birleştirmesi için uygun bir yöntem olmamaktadır. Kısa boylu ve karışık dikiş şekilleri için geliştirilen yarı otomatik tozaltı kaynak makinası bütün ihtiyaçları bir arada bulundurmamaktadır. Tozaltı kaynak yöntemi ile yatay pozisyonda iyi sonuçlar elde edilmiştir, dikey ve korniş pozisyonları için özel tertibatlar geliştirilmiştir. Tavan pozisyonunda kaynak yapmak bu kaynak makinalarıyla mümkün olmamaktadır [19, 36].

2.1.7. Tozaltı ark kaynağının başlıca uygulama alanları

Tozaltı kaynak yöntemi yüksek kalite özelliği, derin nüfuziyet sağlaması, birim zamanda dolgu miktarının yüksek olması her türlü işe adapte edilmesi ve kaynak işleminin kolay yapılabilmesi açısından çelik fabrikalarında tercih edilir bir kaynak metodudur.

Tozaltı kaynak yöntemi ağızlı teçhizat endüstrisinde, gemi inşaatında, basınçlı kap, kazan ve tüp yapımında, çelik konstrüksiyon elemanlarının üretiminde geniş çapta kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra bir tamir yöntemi olarak da özellikle iş makinalarının aşınmış tekerlerinin ve paletlerinin doldurulmasında kullanılmaktadır.

Diğer tozaltı kaynak yöntemi uygulamaları şu şekilde sıranabilir:

Ağır otomotiv sanayinde, basınçlı kap, kazan ve LPG tülerinin imalatında, çelik konstrüksiyon imalatında, profil (I, H, T vb.) imalatında, lokomotif sanayinde, gemi

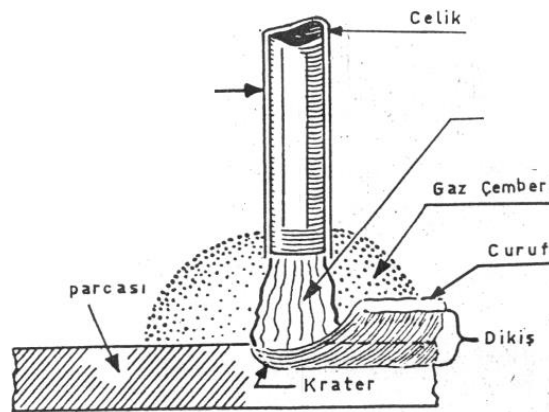
inşaat sanayinde, demiryolu inşasında, kaynaklı boru imalatında, aşınan makine parçaları tamiri ve dolgu işleminde, kiriş, dirsek ve uzun kaynak gerektiren kolonların imalatında, korozyona ve oksidasyona dayanıklı kaplama işlemlerinde kullanılır [2, 5, 40].

2.2. Elektrik Ark Kaynak Yöntemi ve Prensibi

2.2.1. Bazik elektrod ile elektrik ark kaynak tekniği

Kaynağın önemli üç unsuru diye isimlendireceğimiz bu temel elemanlar elektrik ark kaynağında, ark, elektrod ve kaynak makinesi tarafından karşılanmaktadır. Ayrıca kaynakçıyı oluşabilecek kazalara karşı korumak, birleştirilen parçaların bir arada tutulması, kaynak yerini ayarlayabilmek ve çalışma şartlarını iyileştirebilmek için bir takım ek yardımcı araç ve gereçlere ihtiyaç vardır.

Elektrik ark kaynağında gereken ısı, elektrik arkı tarafından karşılanmaktadır. Kaynak ağzını doldurabilmek için gerekli olan ilave kaynak metalinin katılma şekli ve kaynak yerinin havanın dış etkilerine karşı koruma biçimlerine göre birçok ark kaynak yöntemi geliştirilmiştir. Bugün en çok kullanılan kaynak yöntemi elektrik ark kaynak yöntemleridir. Şekil 2.2.'te elektrik ark kaynak yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Elektrik ark kaynak yöntemi şematik gösterimi [41]

Örtülü elektrod kullanılarak yapılan elektrik ark kaynağında ark, iş parçası ve eriyen elektrod arasında yanar. Aynı zamanda eriyen elektrod kaynak metali haline geçer.

Elektrod örtüsü de yanarak kaynak metaline katılır. Bu sırada çıkan gaz dış etkilere karşı dikiş formunu ve ark bölgesini korur. Ayrıca elektrod örtüsüne katılan alaşım elementleri dikiş formuna geçerek istenilen özelliklerde kaynak birleştirmesi elde edilebilmektedir. Örtülü elektrod ile yapılan elektrik ark kaynağı yöntemi şuan en basit ve popüler kaynak yöntemidir. Bu tekniği uygulama, demir esaslı veya demir dışı metal ve alaşımlarının kaynağından 1.2 mm'den daha kalın iş parçalara, istenilen pozisyonda birleştirme işlemi uygulanabilmektedir [42 - 44].

Örtülü elektrod kullanarak yapılan elektrik ark kaynağında, teknik donanım dışında kaynakçının bilgi ve deneyimi de kaynak işleminde büyük önem arz etmektedir. Düzgün ve kaliteli aynı zamanda hızlı bir kaynak işlemi kaynakçının bilgisine bağlıdır. Kaynakçının dikiş kalitesi üzerine etkisini ortadan kaldırmak konusunda yapılan çalışmalar sonunda iki farklı yoldan gidilerek bugün tozaltı ve gazaltı kaynak yöntemleri geliştirilmiştir [45].

2.2.2. Kaynak makinaları

Kaynak makinalarının hedefi kaynak arkını kesintisiz oluşturacak akım gerilimini ve şiddetini sağlamaktır. Aydınlatma veya endüstriyel şebelerden çekilen elektrik akımı ile birleştirme yapmak mümkün olmamaktadır. Şebeke geriliminin voltajı kaynak işlemi için yüksektir. Ayrıca alternatif akım da ölüm tehlikesi vardır. Elektrodun tutuşturulması ve ergiyen metal damlalarının kaynak banyosuna eklenmesi sırasında akım şiddeti artar ve damlalar patlayarak çevreye saçılır [25].

Elektrik ark kaynağında kullanılan kaynak makinalarının işlevi kaynak için gerekli elektirik enerjisinin yanında, her kaynak makinasının uygulanan kaynak yöntemine göre önemli bir takım koşulları yerine getirmesi gerekir. Şebeke tarafından beslenen kaynak makinaları gerilimi boşta çalışma gerilimine çevirmesi aynı zamanda kaynak şiddetini ayar donanımına sahip olması çalışma esnasında kaynak akım şiddetinin sabit tutulması gibi özelliklere sahip olması gerekir. Bu özellikler kaynak makinasının statik ve dinamik karakteristiklerine bağlıdır.

Bir kaynak makinasının statik ve dinamik karakteristikleri tamamen elektriksel karakteristikleridir. Ve seçilmiş bir kaynak tekniği için uygun olup olmadığını belirtirler.

Akım şiddeti ile gerilimi arasındaki bağıntıyı statik karakteristik olarak adlandırılmaktadır. Dinamik karakteristik ise çalışma sırasında ani yük değişimlerine göre makinanın davranışının belirler. İyi bir kaynak makinası ani yük değişimlerine hızlı bir şekilde uyum sağlayabilmelidir. Bir kaynak makinasının karakteristiği laboratuvar ortamında yapılan kısa testlerle saptanabilir.

Elektrik ark kaynağı makinaları genellikle yüksek gerilim düşük akımdaki şebeke gerilimini düşük gerilim yüksek akıma çeviren makinalardır. Ark gerilimi 25 – 55 Volt (V) ve akım şiddeti de 10 – 600 A arasındadır. Bütün kaynak makineleri kullanılan elektrodun çapına uygun bir akım şiddetini sağlayan bir ayar donanımlarına sahiptirler.

Örtülü elektrod ile yapılan kaynak doğru akım ve alternatif akım ile yapılabilir. Doğru akım kullanılması durumunda elektrod negatif kutba veya pozitif kutba bağlanabilir. Her iki akım türünün kendine özgü avantajları vardır. Doğru akım kullanılması durumunda, kutuplama kaynak nüfuziyetini ve dikişin formunu etkileyen önemli bir etmendir. Pozitif kutuplama negatif kutuplamaya göre daha derin bir nüfuziyet elde edilirken, negatif kutuplama durumunda da pozitif kutuplamaya göre elektrodun ergime gücü yüksetir. Genellikle kutuplama elektrodun türü belirler. Bazı tip karakterli elektrodlar pozitif kutuplama ile kullanılırlar.

Alternatif akım kullanılması durumunda, bu tür akımın karakterine bağlı olarak her iki kutuplama da düzgün halde gerçekleşir. Ülkemizde ve Avrupa’da 50 Hertz’lik alternatif akım kullanıldığında kaynak dikişinin nüfuziyeti doğru akım kullanımındaki doğru ve ters kutuplamanın ortalaması bir değerdedir [24].

2.2.3. Kaynak elektrodları

2.2.3.1. Örtülü elektrodlar

Bu tip elektrodlar ilk olarak, İsveçli Oscar Kjelberg tarafından 1904 yılında üretilmiş olan örtülü elektrodlarda, çıplak kaynak telinin üzerine sarma, daldırma ve ekstrüzyon ile geçirilmiş bir örtü maddesi vardır. Örtülü elektrodları üretebilmek için, yukarıda izah edilmiş yöntemlerin hepsi tatminkar neticeler vermesine rağmen, birçok üstün özellikleri nedeni ile üretim tekniği olarak, ekstrüzyon yöntemini uygulamaktadır.

2.2.3.2. Elektrod örtü maddeleri

Kaynak tekniğinin ve dolayısıyla elektrodların gelişimini bu örtünün icadına borçluyuz. Bir elektrodun kaynak karakteristiği tamamen örtünün kimyasal bileşimine bağlıdır. Biriken kaynak metali miktarı, kaynak dikişinin nüfuziyeti bir seviyeye kadar bu örtü bileşimi ile kontrol altında tutulabilir. Kaynak dikiş formu, yüksekliği ve yüzey düzlüğü yine örtü bileşimi ile değiştirilerek arzu edilen şekilde ayarlanabilir.

Elektrod örtüsünü oluşturan bileşimlerin cinsleri karışıktır. Günümüzde, artık elektrod örtüleri çelik üretim prosesleri ile yakından ilgili bir bilim dalı haline gelmiştir. Elektrod standartları, kaynak metalinin mekanik özellikleri ve elektrodun kullanılma karakteristiği ile istenilen konularda metalin analizi limitini belirtir. Elektrod formülü imalatçının kontrolü altındadır. Günümüzde ticari elektrodlarda en fazla kullanılan örtü malzemeleri şöyle sıralanabilir [25].

2.2.4. Örtü türleri

Elektrod örtüleri oluşturulurken bu maddeler belirli seviyelerde harmanlanır ve daha sonra önceden belirlenmiş bir yöntem uygulanarak elektrod çekirdeğine ilave edilir. Yalnız bu maddelerin birbirleri ile harmanlanmasında belirli kurallar vardır. Her tip elektrod örtüsü için özellikle esas bileşenlerin bazı oranlar çerçevesinde kalması gerekmektedir. Aksi taktirde elektrod örtüsü kendinden istenilen özellikleri yerine

getiremez hale gelir. Bu harman seviyeleri uzun yılların tecrübesi neticesinde formüllere dökülmüştür. Örtülü elektrodlar, örtülerin barındırdıkları esas bileşenin cinsine, cürufalarının bazik veya asidik durumuna göre değişik gruplara ayrılmıştır [25].

2.2.4.1. Rutil elektrodlar

Bu tip elektrodların örtü ağırlığının yaklaşık olarak %35'ini titandioksit oluşturur. Bunun yanında ek olarak elektrodların kullanılabilirliğini kolaylaştıran iyonlaştırıcı maddeler içerirler. Feldspat, kuartz, düşük oranda selüloz, ferromanganze ve bağlayıcı olarak da cam suyu (sodyum ya da potasyum silikat) içerirler. Titanyumoksit kullanımı kolay kararlı bir ark oluşturur. Aynı zamanda iyi bir cüruf yapıcıdır ve cürufun kolay kalkmasını sağlar. Sıçrama kaybı çok azdır. Örtünün bileşimindeki katkı maddelerini ayarlamakla viskozitesi ve yüzey gerilimi değiştirilebilmekte, sadece oluk pozisyonuna veya tüm pozisyonlarda uygun elektrodlar üretmek mümkün olmaktadır.

Çok yönlü kullanımlara imkan sağlayan bu elektrodlar çeşitli kalınlıklarda: ince, orta ve kalın tipte imal edilmektedir. Bu kalınlıklar cürufun şeklini, kalınlığını ve içindeki elementlere ve miktarlarına etki etmektedir. Örtü kalınlığı arttıkça kaynak metali ergiyerek, incelen damlalar halinde gelir. Aynı zamanda örtü kalınlığının artması kaynağın mekanik özelliklerini iyileştirir. Biriken dikişin oksijen ihtivası orta seviyede olduğu için dikişin profili düzgündür. Yapı çelikleri için uygun dikiş profiline sahip mekanik özellikleri iyi olan birleşkeler yine de yüksek çekme dayanımlarına ulaşması mümkün olmamaktadır. Bunun sebebi kaynak metalinin hidrojen içeriğinin 25 – 30 ml/100gram gibi yüksek bir seviyede olmasıdır. Bu değer istenilen hidrojen sınırının üstündedir.

Bu tip örtüler, kahverengiden siyaha doğru değişen, ani katılaştıran bir cüruf oluştururlar. Cürufun özellikleri, örtüyü oluşturan malzemelerin türüne ve miktarına bağlıdır. Örtünün bileşimine katılan feldspat ve asbest gibi silis içerikli malzemeler akıcı cüruf veren titandioksit ile karıştırılarak cürufun istenilen akıcılıkta kalmasını sağlarlar.

Fakat örtü etkili bir temizleyici değildir. Esas metalin fazla miktarda istenmeyen elent içermeyen durumlarda tercih edilir.

Rutil elektrodlarda doğru akım ve alternatif akımla kaynak yapmak mümkün olmaktadır. Bu elektrodlar universal türlerdir, her pozisyonda kaynak yapmayı olanaklı kılarlar, tutuşturulması kolay olup aynı zamanda yumuşak bir ark ile sakin çalışma ortamı sağlarlar [25].

2.2.4.2. Oksit elektrodlar

Bu tip elektrodların örtüsünün %60'lık kısmını demiroksitten oluşmaktadır. Demiroksit içeren elektrodların kaynağı oldukça akıcıdır ve düzgün görünüşlü dikişler elde edilir. Yüksek akım yüklenme kabiliyetine sahip olduklarından, kaynak sırasında yüksek sıcaklıktan dolayı cüruf ve metal bu yüzden çok akıcı hala gelir. Ancak yatay ve oluk pozisyonlardan kullanılırlar [51].

2.2.4.3. Selülozik elektrodlar

Bu tip elektrodların %30'luk kısmını selülozik madde oluşturmaktadır. Yandıkları zaman CO₂ ve H gazı ortaya çıkan organik maddeler bulunur. Çıkan gazların insan sağlığına zararlı etkilerinde dolayı kapalı alanda kullanılmaları sakıncalıdır. Bu organik bileşenler ark sıcaklığı seviyelerinde birbirinden ayrılarak hidrojen gazı oluştururlar. Ortaya çıkan hidrojen gazı ark bölgesindeki havanın yerini alır. Hidrojenin havanın yerini alması sonucu yüksek ark gerilimi ve bunun sonucunda yüksek nüfuziyet derinliği oluşur.

Selülozik elektrod kullanılarak yapılan kaynak dikişi üzerinde ufak bir miktarda cüruf tabakası oluşur. Sıçrama kaybı artar. Diğer elektrodlara nazaran selülozik elektrodlarla yapılan kaynak dikişlerinde aralık doldurma kabiliyeti oldukça iyidir. Her pozisyonda kaynak işlemi için uygundur. Özellikle dik ve tavan pozisyonlarında kaynak yapılabilmesi için, kaynak metalinin çabuk katılaşmasını sağlayan örtü bileşimine

sahiptirler. Diğer elektrodlar kadar kaynak metalinin ergime hızı yüksek olmadığından, düz pozisyonlarda da kullanılır [52].

2.2.4.4. Bazik elektrodlar

Düşük hidrojen içeriği nedeni ile düşük hidrojenli elektrodlar olarak da adlandırılan bazik elektrodlar, düşük sıcaklıklarda yapılan kaynak işleminde bile kaynak metalinin yüksek mukavete sahip olmasını sağlamaktadır. Diğer tip elektrodlara göre birçok alanda üstünlük gösteren bazik elektrodlar, diğer bölümde ayrıntılı olarak yer almaktadır [25].

2.2.5. Bazik elektrodlar

Bazik elektrodların tarihi 2. Dünya savaşı sırasında zırhlı plakaların kaynak yapılması ile başlamaktadır. Düşük hidrojenli elektrodlar diye de adlandırılan bu tip elektrodlar örtüsünde yüksek oranda kalsiyum karbonat veya kalsiyum florid bulundurmaktadır. Örtünün bileşiminde bulunan karbonatlar yalnız başlarına kullanılmazlar. Yalnız başlarına kullanıldığı takdirde meydana gelen cüruf kaynak metalini örtemez. Kalsiyum florür cürufu, diğer cüruf yapıcı minerallere oranla daha iyi gaz emişini ve banyonun oksidasyonunu sağlar. Örtüsünde bulundurduğu toprak alkali karbonatlar, cürufun sıvı iken çok akışkan yapması nedeni ile bu akışkanlığı engellemek için örtüye bir miktar silikat veya rutil ilavesi yapılmaktadır. Ayrıca yine de bu akışkanlığı engellemek için örtü bileşimine zirkonyum oksit veya zirkonyum silikat ilave yapılmaktadır. Örtüsü bu şekilde olan elektrodlar zirkon bazik elektrodlar olarak isimlendirilir. Cürufun akışkanlığını ayarlamak, örtünün bünyesindeki zirkonyum oksit ve silikat yerine rutil veya ilmenit eklenmesi ile mümkündür. Fakat bu durumda örtü, bazik türden çok içerisine kalsiyum florür eklenmiş rutil elektrod özelliği taşımaktadır. Bu tip örtüsü olan elektrodlar rutil bazik elektrod olarak isimlendirilmektedir [25].

Bazik elektrodların bazı tipleri alternatif akım ile bazıları ise doğru akım makinalarında kullanılabilir. Doğru akım makinalarında daima artı kutupta kutuplanır.

Birçok alanda diğer elektrodla göre daha üstündür. Mekanik özellikleri de diğer elektrodla göre üstündür. Aralık doldurma yeteneği yüksek bu tip elektrodla soğuk ve sıcak çatlamaya karşı hassasiyeti olmadıklarından 0°C'nin altında kaynak yapılabilme olanağı sağlamaktadır. Bilhassa 0°C'nin altındaki sıcaklıklarda çentik darbe mukavemeti çok iyidir. Diğer elektrod tiplerine göre kaynak dikişi daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. Aynı zamanda elde edilen kaynak metalinin zaman içinde muhafaza etme kabiliyeti oldukça iyidir [11].

Bazik elektrodla örtülerinde bağlayıcı olarak sodyum ve potasyum silikat içerirler. Bu bağlayıcı silikatların bünyesinde barındırdıkları nemi tamamen uzaklaştırmak için 250-300°C'lik kurutma işlemine tabi tutulur. Örtü higromoskopik özelliğe sahip olduğundan dolayı, bu tip elektrodla kullanımından önce en az iki saat 250°C'lik bir sıcaklıkta kurutulmalıdır. Ve kuru bir yerde muhafaza edilmelidir.

Nemli olan elektrodla gözenek oluşumunun kolay olduğu bilinir. Hidrojen içeriği az olan bazik elektrodla bu daha belirgindir. Bazik örtü ağırlığının yaklaşık %0,35 mertebesinde nem gözenek oluşumu için yeterlidir.

Nemi iyi bir şekilde uzaklaştırılmış bazik elektrodla düşük hidrojenli kaynak dikişleri verirler. Ulusal Kaynak Enstitüsünün edinmiş olduğu tecrübeler sonucu hidrojen azamisini şu şekilde belirlemiştir: Selülozik elektrodla sıvı halde 100 gram metalde 27 cm³ hidrojen doymuşluğu, oksit ve rutil örtülü elektrodla toplam hidrojen oranı doymuş hidrojen oranının yarısı yani 100 gram metalde 12-15 cm³'dür. Bazik örtüde ise bu oran 100 gram metalde 8 cm³'ü geçmemektedir. Özlü elektrodla ise bazik elektrodla yarısı kadardır. Ayrıca yayılabilen hidrojenin toplam hidrojene göre yüzdesi selülozik ve rutil elektrodla %50, baziklerde %20-25, oksitlerde ise bu değer %10 mertebesinde [56].

2.2.5.1. Bazik elektrodların kullanım alanları

Her türlü kaynak pozisyonuna uygun olan bazik karakterli örtülü elektrodların genel olarak kullanım alanları: gemi sanayi, kazan ve basınçlı kap, çelik konstrüksiyon, donanım sanayi ve makine olmaktadır. Ayrıca:

- Rijit konstrüksiyonların kaynağında,
- Farklı oranda karbon içeren çeliklerin birleştirilmesinde,
- Bileşimi bilinmeyen karbonlu ve hafif alaşımlı çeliklerin her türlü birleştirilmesinde,
- Karbon, azot, kükürt gibi elementleri yüksek oranda içeren çeliklerin birleştirilmesinde,
- Çatlama hassasiyeti bakımından kalın kesitlerin birleştirilmesinde,
- Gazı alınmamış ve deokside olmamış çeliklerin röntgen muayenesine tabi tutulacak kaynaklarda,
- 0°C'nin altındaki sıcaklıklarda çalışan makine, donanım ve yapıların birleştirilmesinde kullanılır.

2.2.5.2. Bazik elektrodların kullanılmasında dikkat edilecek hususlar

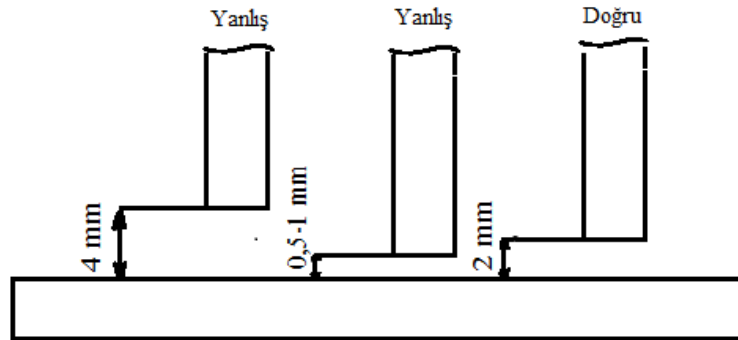
Diğer tip elektrodlara göre birçok alanda üstünlükleri bulunan bazik tip elektrodlar ancak belirli kurallar uygulandıktan sonra asıl istenilen şekilde kullanılabilir. Bu kurallar: öncelikle neme hassasiyeti bulunan elektrodların kullanılmadan önce en az iki saat 250°C'de kurutulmalıdır. Kurutulma işlemi uygulanan elektrodlar fırından çıkarıldıktan sonra, ağır uygulamalarda özellikle alaşımlı çeliklerin kaynağında, en fazla bir iki saat içinde tüketilmelidir. Bu tüketilme ömrü deniz kıyısı gibi çok nemli bölgelerde daha kısa tutulmalıdır [57].

Bazik elektrodlar ile yapılan birleştirme işleminde akım şiddeti mümkün olduğunca yüksek tutulmalıdır. Akım şiddetinin yüksek tutulması elektrodun tutuşma kolaylığını sağladığı gibi verilen ısıнын yüksek olması sebebi ile kaynak banyosunun uzun süre sıvı halde kalmasını sağlar. Bu ise gazların kolay bir şekilde uzaklaşmasını ve dikişin

gözeneksiz olmasını sağlar. Ancak yüksek amperde sıçrama kaybı fazladır. Örtünün bileşimine %5-50 arasında demir tozu katılması sıçrama kayıplarını en aza indirilebilir.

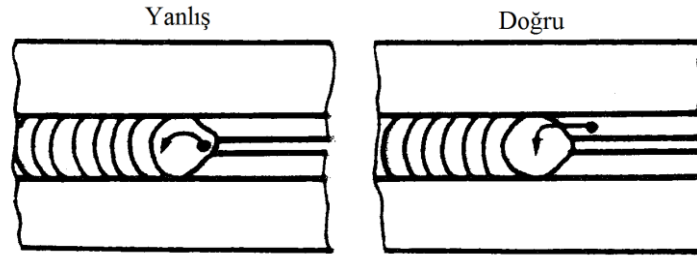
Akım şiddetini kontrol altına alabilmek için ilave bir ampermetre kullanılması önerilir. Çünkü kaynak makinaları üzerindeki skala taksimatları yeteri kadar hassas değildir. Kaynakçı elektrodun iş parçasına yapışmayacağı bir seviyede akım şiddetini seçmelidir. Bu seçilen akım şiddetinde elektrod kızarmadan kullanılmalıdır [11].

Bu tip elektrodlar ile yapılan birleştirme işlemi sırasında ark boyu kısa tutulmalıdır. Aksi halde ayrışarak CO₂ oluşturan kalsiyum karbonat banyoyu koruyamaz. Ark boyunun kısa tutulması halinde ise eriyen ana metalin kaynak bölgesine giridişi çok fazla olur uygulamalarda kullanılan en uygun ark boyu, elektrod tel çapının yarısıdır. Şekil 2.3.'te ark boyunun şematik olarak gösterimi verilmiştir [59].



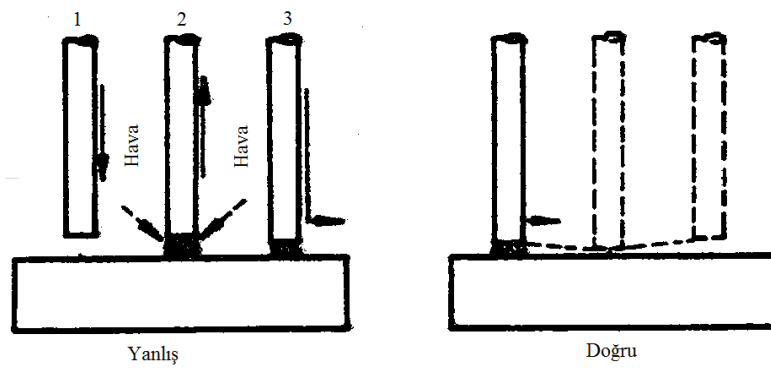
Şekil 2.3. Ark boyunun şematik gösterimi

Bazık tip elektrod kullanarak birleştirme yapılırken ark, önceden bitmiş olan elektrodun kraterinden beş altı milim kadar ön veya yan tarafa tutuşturulmalı ve bir önceki elektrodun cürufunun temizlenmiş olan kraterine getirilerek kaynak işlemine devam edilmelidir. Aksi taktirde elektrod ucunun krater cürufuna dalması kaynak dikişinde gözenek oluşmasına neden olur. Şekil 2.4.'te bazık elektrod ile kaynak sırasında kraterin ön kısmında tutuşturulmasının şematik olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. Bazik elektrodun, kraterin ön kısmında tutuşturulması

Şekil 2.5.'te bazik elektrod ile arkın tutuşturulması şematik olarak gösterilmiştir. Tutuşturma işlemi, elektrod iş parçası ile temas ettirilip geri çekilerek yapılmalıdır. Aynı kirbit yakar gibi tutuşturmalı ve parçaya teğet olarak çekilmelidir. Buna dikkat edilmediği takdirde kaynak banyosu hava emebilir ve bu da gözenek oluşmasına neden olabilmektedir [25].



Şekil 2.5. Bazik elektrod ile ark tutuşturma [13]

2.3. Taguchi Yöntemi ile Modelleme

Günümüz teknolojisinden geri kalmamak ve ekonomik kolların üstesinden gelebilmek için, yatırımcılar yüksek kaliteli fakat bunun yanı sıra düşük maliyetli ürünler üretmeye zorlanmaktadır. Bu konuda, alıcının gün geçtikçe artan beklentileri ve teknolojik gelişmeler, üretiyici kalite geliştirme konusunda farklı yöntemler kullanmaya itmiştir. Bu sayede ürün üretim sürecinin istenilen özelliklerdeki kalite karakteristiklerini tek tek ele alarak geliştirilmeye çalışılmıştır [62].

Bir ürünün kalitesinin arttırmak için, bu ürünün kalitesine etki eden bütün faktörlerin belirlenmesi gerekir. Kalite – faktör sayısı – düzeyler denklemi bir şirketin en korkulu problemlerinde sadece birisidir. Çünkü, tasarımcı en uygun faktörü belirleyebilmek için birçok veriyi doğru analiz etmeli ve faktör seviyelerini iyi belirlemelidir. Bu faktörler tek başına veya birlikte olabileceklerinden sonuçlar aşamasında durum karmaşık hale gelebilir. Faktör sayısının artması klasik deney tasarım tekniklerinin her ne kadar iyi sonuçlar vermesinin yanında maliyetleri de bir o kadar fazladır. Bu da klasik deney tasarımlarının kullanımlarını azaltmıştır. Deney sayısının artması firmaları zaman ve maliyet açısından direkt sonuca yöneltmektedir. Bu konuda problemin çözümü için uygun bilimsel yaklaşımlar geliştirmek ve bu gelişmeleri uygulamak tasarımcıya büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Deney tasarımı ilk olarak 1920’li yılların başlarında İngiliz istatistikçi Ronald Fisher tarafından tarım alanında araştırmalar yaparken bulunmuştur. Ve zaman geçtikçe geliştirilmeye çalışılmıştır. Ronald Fisher buna ek olarak deney verilerinin analizi için şuan günümüzde kullanılan varyans analizi (ANOVA) yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem kısa sürede Amerika’da tarım alanlarının gelişebilmesi için kullanılmıştır [63].

Ishikawa Kaoru Japonya’da toplam kalite anlayışının gelişmesinde önemli hareketler gerçekleştirmiştir. Ishikawa Kaoru kalite denetim çabalarının evriminde üç aşamaya bölmüştür. Bunlar geleneksel muayene, istatistiksel kalite denetimi, ürün – süreç tasarımı olmak üzere üç aşamadır. Ürün – süreç tasarım kalitesinin geliştirilmesi konusunda en büyük katkıyı Genichi Taguchi yapmıştır. Genichi Taguchi 1940’lı yıllarda ürün – süreç tasarımı kalitesinin gelişmesinde rol oynayan bir makine mühendisidir. Özellikle istatistiksel deney tasarımına dayalı kalite geliştirme için Taguchi felsefe ve metodolojiyi geliştirmiştir [64].

Son on beş yılda Taguchi yöntemleri ürün kalitesinin ve süreç performansının iyileştirilmesinde başarılı olduğu bilinmektedir. Birçok Taguchi deneyinde tek kalite karakteristiklerinin iyileştirilmesi çalışılmıştır. Üretim süresince çoklu kalite karakteristiklerinin iyileştirilmesinde yangın olmamakla birlikte Taguchi yöntemi araştırmacılarının küçük bir kısmı bu konu ile ilgilenmişlerdir [65].

Çok yanıtlı bir deneyler sonucu elde edilen verilerin incelenmesi, verilerin değişken bir yapıya sahip olduğundan dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Yani her bir veri toplu halde incelenmelidir. Verilerin tek tek incelenmesi aralarında var olan bir takım kombinasyonları anlamsız hale getirmektedir [66].

Genel olarak bakıldığında Taguchi methodu, ürün ve proses performansını etkilen zor etkilere karşı duyarsızlaştırarak ürün kalitesini düşük maliyetlerde geliştiren klasik deney tasarımının geliştirilmiş halidir.

Bu yöntem kalite kontrolünü sadece üretim sırasında ve sonrasında değil aynı zamanda üretimden önce de önemini vurgulayarak deney tasarımını ve analizini geliştirmiştir. Dünyada üretim süreci spesifikasyonlarını belirlemekte ve bu spesifikasyonlara göre tasarım geliştirmektedir. Bu tasarım sayesinde ürün üretim sürecinin bu spesifikasyonlara göre gerçekleştirilmesinde yardımcı olmaktadır [67].

Taguchi kalite anlayışının ya da felsefesinin görüşü üretim sürecinin teknik tarafıyla ilgilenmektedir. Bu yöntem ürünlerin gürültüden etkilenmesini en aza indirmeye çalışan bir yöntem olarak kendini bir araç olarak kullanmaktadır. Ürün üretim sürecini etkileyen her bir etkene karşı oluşabilecek değişikliğin azalması için çalışılmaktadır [68].

Taguchi yöntemi, ürün üretim sürecinde, değişkenliğe neden olan ve bu değişkenleri kontrol etmeyi zorlaştıran faktörleri bulup, bu faktörlere karşı kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerini seçerek, ürün üretim sürecindeki değişiklikleri en aza indirmek için tasarlanmış bir deney tasarım yöntemidir [69]. Taguchi metoduna göre kalite kayıp fonksiyonu (Denklem 2.1) ifade edilmiştir.

$$L = k(y - m)^2 \quad (2.1)$$

Deney tasarım yöntemi, değişimin kaynaklarını bulmakta ve tasarım – süreç optimizasyonu elde etmede önemli bir yer almıştır. Genichi Taguchi bu fonksiyonlara ek olarak ürün süreç tasaramının oluştuğunu söylemiştir.

Sistem Tasarımı: Mühendis temel bir fonksiyonel prototip tasarımı üretmek için bilimsel ve mühendislik bilgilerini kullanır. Bu prototip tasarımı, ürün tasarımı aşamasını ve proses tasarım aşamasını içerir. Ürün tasarım aşamasında; malzeme seçimi, malzemenin bileşenleri ve geçici ürün parametre değerleri belirlenir. Proses tasarım aşamasında proses dizilerinin analizi, üretim ekipmanlarının seçimi ve geçici proses parametre değerleri incelenmektedir. Sistem tasarımı ilk işlevsel bir tasarım olduğundan, kalite ve maliyet bakımından optimum seviyeden daha düşük olabilir. Sistem tasarımının ardından parametre tasarımı yapılır.

Parametre Tasarımı: Parametre tasarımından elde edilen optimal işlem parametre değerlerinin çevresel koşulların ve diğer gürültü faktörlerinin değişimine duyarlı olmaması beklenmektedir. Bu adımda Taguchi'nin geliştirmiş olduğu ortogonal diziler ve gürültü oranı (S/N - Signal/Noise) analizi hesabı da yapılabilir. Aynı zamanda parametre bloklamaları da yapılmaktadır [70]. Parametre tasarımına en uygun tasarım deney tasarımıdır.

Tolerans Tasarımı: Son olarak, tolerans tasarımı, parametre tasarımı tarafından tavsiye edilen optimum ayarlar etrafındaki toleransları belirlemek ve analiz etmek için kullanılır. Tolerans tasarımı, parametre tasarımı ile elde edilen azaltılmış varyasyonların istenilen ürün performansını karşılamıyorsa gereklidir. Değişiklikler, istenen ürün performansı üzerinde büyük bir negatif etki yaratan ürün parametrelerinde veya süreç parametrelerinde toleransları sıkılaştırmayı içerir. Tipik olarak sıkılaştırma toleransları, maliyeti artırmak için daha kaliteli malzeme, parça veya makine satın alması anlamına gelir [71. 72].

Taguchi yaklaşımında sistem tasarımı ve parametre tasarımı yüksek kalite elde etmenin yanında aynı zamanda maliyeti düşürme imkanını ortaya çıkartır. Tolerans tasarımı ise yüksek kalite için yüksek maliyet gerektirir [73]. Bu sebeple sistem tasarımı ve parametre tasarımı çok önemlidir. Taguchi parametre tasarımı için deney tasarımının uygulanmasını uygun bulmuştur.

2.3.1. Ortogonal dizi seçimi

Deneyler için uygun bir ortogonal dizi seçmek için, toplam serbestlik dereceleri hesaplanmalıdır. Serbestlik dereceleri, hangi seviyenin daha iyi olduğunu belirlemek için yapılması gereken işlem parametreleri arasındaki karşılaştırmaların sayısı ve özellikle de ne kadar iyi olduğunu belirtir. Örneğin, iki seviyeli bir işlem parametresi bir derecelik serbestlik derecesine sahiptir. İki proses parametresi arasındaki etkileşim ile ilişkili serbestlik dereceleri, iki proses parametresi için serbestlik derecelerinin çarpımı ile verilir.

Serbestlik dereceleri bilinince, bir sonraki adım, belirli göreve uyan uygun bir ortogonal dizi seçmektir. Ortogonal dizi için serbestlik dereceleri, işlem parametreleri için olanlardan büyük veya en azından eşit olmalıdır [45]. Ortogonal deney dizileri faktör seviyelerini tek tek ele almak yerine bunları bir bütün halinde eş zamanlı değişimine olanak sağlar. Örneğin 3 seviyeli 5 faktörlü bir deneyde kombinasyonlar kullanıldığında $5^3 = 625$ tane deney yapılması gerekirken ortogonal tablolarla bu sayı 36'ya düşmektedir [43, 75].

2.3.2. Sinyal – Gürültü oranı (S/N)

Taguchi yönteminde deney değeri ile istenen değer arasındaki sapmayı hesaplamak için bir kayıp fonksiyonu tanımlanmıştır [45]. Taguchi, gürültü faktörlerinin işlem performansı üzerindeki etkisini ölçmek için kullanılabilecek sinyal-gürültü oranları (S/N) adlı bir istatistik sınıfı önermiştir. S/N oranlarını maksimize ederek, kayıp fonksiyonları en aza indirgenir. Bu S/N oranları, değişkenlik miktarını ve ortalama cevaba yakınlığı hesaba katar. S/N fonksiyonu olarak ifade edilen üç farklı amaca uygun fonksiyon türü vardır. Sonucun en düşük en iyi olduğu durum, en yüksek (büyük) en iyi olduğu durum ve nominal en iyi olduğu durum olarak ayrılır [43].

En yüksek en iyi fonksiyon performan durumu (Denklem 2.2) şu şekilde ifade edilir;

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (2.2)$$

En düşük en iyi olduğu durumlarda (Denklem 2.3);

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (2.3)$$

Nominal en iyi olduğu durumlarda (Denklem 2.4);

$$S/N = -10\log\left(1/n\sum_{i=1}^n \frac{\bar{y}^2}{s^2}\right) \quad (2.4)$$

Burada y_i = Performans karakteristiğinin i. gözlem değeri $n = 1$ denemedeki test sayısı, $\bar{y}$ = Gözlem değerlerinin ortalaması, S^2 = Gözlem değerlerinin varyansı olup S/N oranı büyüdükçe hedef etrafında ürün varyansı küçülür [43].

2.3.3. Varyans analizi

Varyans analizi (ANOVA) amacı, hangi işlem parametrelerinin kalite karakteristiğini önemli derecede etkilediğini araştırmaktır. Bu, çok tepkili sinyalin gürültü oranının toplam ortalamasından kare sapmalarının toplamı ile ölçülen çok yanıtı sinyalin toplam değişkenlik oranını, işlem parametresinin ve hatalarının her birinin ayırarak gerçekleştirilir [45]. Deney tasarımı sonrası, mevcut veri kümesinin varyans hesabı yapılır. Aşağıdaki formüller kullanılır.

2.3.3.1. Kareler toplamı (varyasyon)

A ve B faktörleri ve AXB etkileşimleri dikkate alınarak toplam varyasyon denklemi (Denklem 2.5), (Denklem 2.6) ve (Denklem 2.7)'te verilmiştir;

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AXB} + SS_C \quad (2.5)$$

SS_T = Toplam kareler toplamı, SS_A = A parametresine ait kareler toplamı, SS_B = B parametresine ait kareler toplamı, SS_{AXB} = AXB etkileşimine ait kareler toplamı, SS_C = C parametresine ait kareler toplamı

$$SS_T = [\sum_{i=1}^n y_i^2] - \frac{T^2}{N} \quad (2.6)$$

N = Gözlemlerin toplam sayısı, y_i = i gözlem, T = Tüm gözlemlerin toplamı

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{K_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (2.7)$$

K_A = A parametresinin seviye sayısı, A_i = A_i seviyesindeki gözlemlerin toplamı, n_{A_i} = A_i seviyesi altındaki gözlem sayısı

ANOVA tablosunda yer alan hata varyasyonu denklemi (Denklem 2.8);

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AXB} \quad (2.8)$$

2.3.3.2. Serbestlik derecesi

Serbestlik derecesi ANOVA tablolarının hazırlanmasında gerekli olan bir başka niceliktir. Toplam serbestlik derecesi deneme sayısının bir eksiğine eşittir. Toplam serbestlik derecesi (Denklem 2.9)'ta verilmiştir.

$$v_T = N - 1 \quad (2.9)$$

A ve B faktörünün serbestlik derecesi faktör seviyelerinin bir eksiğidir ve (Denklem 2.10), (Denklem 2.11)'te gösterilmiştir.

$$v_A = k_A - 1 \quad (2.10)$$

$$v_B = k_B - 1 \quad (2.11)$$

Etkileşimlerin serbestlik dereceleri iki faktörün serbestlik derecelerinin çarpımına eşittir ve (Denklem 2.12)'te gösterilmiştir.

$$v_{AXB} = (v_A) \cdot (v_B) \quad (2.12)$$

Hata serbestlik derecesi ise toplam serbestlik derecesinden faktörlerin serbetlik derecelerinin çıkarılması ile bulunmaktadır. (Denklem 2.13)'te hata serbestlik derecesi formülü görülmektedir.

$$v_e = v_T - v_A - v_B - v_{AXB} \quad (2.13)$$

2.3.3.3. Varyans

Hata varyans değeri ANOVA tabloları oluşturmak için gereklidir. Aşağıda verilen (Denklem 2.14)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$V_e = \frac{SS_E}{v_e} \quad (2.14)$$

Her bir faktörün ise varyans değeri, faktörün varyasyonunun serbestlik derecesine bölünmesi ile bulunur. (Denklem 2.15)'te herhangi bir A faktörüne ait varyans formülü verilmiştir.

$$V_A = \frac{SS_A}{v_A} \quad (2.15)$$

2.3.3.4. F testi

F testi değeri ANOVA tablolarında faktörlerin etkinliklerini ortaya koymaya yarar. (Denklem 2.16)'te herhangi bir A faktörün ait F test formülü verilmiştir.

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (2.16)$$

ANOVA tablosunda yer alan niceliklerin yorumunun yapılması da bir dizi prosedüre dayanmaktadır. F tablo değerleri hesaplanır ve F testi değerleri ile karşılaştırılır. Eğer

hesaplanan F test değeri tablolardaki F (F tablo) değerinden büyük ise faktörün proses ve ürün üzerinde etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Fakat diğer türlü F test değeri F (F tablo) değerinden küçük ise faktörün proses ve ürün üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucu çıkarılır. Tablolardaki F tablo değeri ise hatanın serbestlik derecesi ile faktörün serbestlik derecelerinin kesiştiği yerdeki değerdir [42].

2.3.3.5. Faktörlerin toplam değişime etkilerinin yüzdesi

(Denklem 2.17) ve (Denklem 2.18) faktörlerin toplam değişim olan etkilerinin hesaplanması için kullanılır. Ve bu sayede sisteme etki eden faktörlerin etkinlik yüzdeleri belirlenebilmektedir.

$$SS'_A = SS_A - (V_e) \cdot (V_A) \quad (2.17)$$

$$P = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \quad (2.18)$$

2.3.4. Doğrulama deneyleri

Bütün bir dizi işlemi gerçekleştirdikten sonra Taguchi deneysel tasarımında doğrulama deneyleri yapılır. Proses için optimum şartları belirlemek için hesaplanan değerlerin grafiksel olarak gösterimleri yapılır. Belirlenen bu optimum şartlar tahmini olarak kalite karakteristiği ve güven aralığı belirlemede bize ön bilgi sağlar. Kalite karakteristikleri belirlenen değerlerin güven aralığı içerisinde olup olmadıkları kontrol edilir. Hesaplanan değerlerin güven aralığı içerisinde olması durumunda deneyin doğru yapıldığı fakat güven aralığının altında veya üstünde kaldığı durumlarda deneysel modellemede bir hatanın olduğunu gösterir. Bu durumda deneysel veriler tekrar gözden geçirilerek yeni bir hesaplama oluşturulur [47].

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu çalışmada, petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanılan Amerikan Petrol Enstitüsü (API) 5L standardında X70 ve genel boru çelikleri standardındaki St 52 çelikleri kullanılmıştır. X70 ve St 52 malzemeleri farklı tel ve toz kullanılarak tozaltı kaynak tekniği ve bazik örtülü elektrod ile elektrik ark tekniği ile birleştirilmiştir. Farklı kaynak tekniği ile birleştirilen numunelere öncelikle yüzey ve yüzey altı kusurların belirlenmesinde deneyimli bir kaynakçı yardımıyla göz ile muayenesi yapılmıştır. Bunun yanında kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek için sertlik, çekme deneyi ve eğme deneyi testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynak bölgelerinde meydana gelen yapısal değişimlerin belirlenmesi ve incelenmesi için kaynaklı numuneler üzerinde makro ve Vickers yapı çalışmaları ile kaynak metalinde elementel analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonuçlarının uygunluğunu belirlemek için Taguchi yöntemi kullanılarak modellenmesi yapılmıştır.

3.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada 130x130x20 mm kalınlığında petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanılan düşük alaşımlı, ince taneli, yüksek mukavemetli X70 ve genel boru çeliklerinden St 52 çeliği kullanıldı. Şekil 3.1.'te görülen ARL 3460 Spektrometrik analiz cihazı ile deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri belirlendi. X70 ve St 52 çeliklerinin kimyasal bileşimi Tablo 3.1'te gösterilmektedir. Malzemelerin mekanik özellikleri ise Tablo 3.2.'te verilmektedir.



Şekil 3.1. ARL 3460 Spektrometrik analiz cihazı

Tablo 3.1. X70 ve St 52 çelik malzemelerin kimyasal analizleri

Malzeme	Kimyasal Bileşim (%)										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V	Fe
St 52	0,22	1,6	0,55	0,04	0,035				0,02		Kalan
X70	0,074	1,413	0,188	0,009	0,003	0,172	0,169	<0,0001	0,027	0,044	Kalan

Tablo 3.2. X70 ve St 52 çelik malzemelerin mekanik özellikleri [49]

Malzeme	Çekme Dayanımı	Uzama
	(MPa)	(%)
X70	620±5	32.1±2
St 52	490±5	20±2

Deneylerde Magmaweld tipi International Organization for Standardization (ISO) standartlarına göre sırayla E 50 6 Mn1Ni B 42 H5 (TS EN ISO 2560 – A) bazık elektrod ve S2Mo teli kullanıldı. Kullanılan bu ilave malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 3.3.’te verilmektedir.

Tablo 3.3. Deneyde kullanılan tellerin kimyasal bileşimi [50, 51]

Tel Cinsi	Kimyasal Bileşim (%)										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V	Fe
E 50 6 Mn1Ni B 42 H5	0,05	1,3	0,35	<0,02	<0,02		1				
S2Mo	0,06	1,4	0,4	0,006	0,007	0,07	0,05	0,5	0,08	0,01	Kalan

Ayrıca toz altı tekniği kullanılarak yapılan birleştirmelerde koruyucu toz olarak, kaynak işlemine fiziksel ve metalurjik bakımdan etki eden LN 761 ve P 223 kaynak tozu kullanılmış ve kimyasal bileşimleri de Tablo 3.4.'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Deneyde kullanılan tozların kimyasal bileşimi [50, 51]

Tozaltı Kaynak Tozu	Kimyasal Bileşim (%)									
	SiO ₂	MnO	MgO	CaF ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	NaO	Alaşımlar elementi
P 223	23	4	21	21	20	4	2	1	2	2
LN 761	45	19	22	5	2	2	2	1		2

3.3. Kaynak Makinaları ve Özellikleri

3.3.1. Tozaltı kaynak makinesi

Tozaltı kaynak işlemi Şekil 3.2.'te görülen Esab A6 Mastertrac marka kaynak makinesi 30 volta ve 500 ampere ayarlanarak GeKa S2Mo standardında elektrod teli ile 4,2 m/dak, tel ve 82 cm/dak kaynak hızı ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminde kaynak banyosunu havanın zararlı etkilerinden korumak amacıyla LN 761 ve P 223 tip kaynak tozu kullanılmıştır. Tozaltı kaynak parametreleri Tablo 3.5.'te verilmiştir.



Şekil 3.2. Esab A6 Mastertrac tozaltı kaynak makinesi

Tablo 3.5. Tozaltı kaynak parametreleri

Elektrod Sınıf	Elektrod Çap (mm)	Akım Tipi	Akım Oranı	Voltaj Oranı	Kaynak	
					Hızı (cm/dk)	Isı Girdisi (J/mm)
SFA-5,23	4	DC(+)	800-1000	28-33	80 - 100	3046

3.3.2 Elektrik ark kaynak makinası

Elektrik ark kaynak işlemi Şekil 3.3.'te görülen Magmaweld Monostick 150i Inverter kaynak makinası 30 volta ve 180 ampere ayarlanarak, 4 mm çapında Magmaweld marka E 50 6 Mn1Ni B 42 H5 standardında bazik elektrod teli ile 7 m/dak, tel ve 7 cm/dak kaynak hızı ile gerçekleştirilmiştir. Bazik elektrod ile elektrik ark kaynak parametreleri Tablo 3.6.'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Magmaweld Monostick 150i Inverter elektrik ark kaynak makinası

Tablo 3.6. Bazik elektrod elektrik ark kaynağı parametreleri

Elektrod Sınıf	Elektrod Çap (mm)	Akım Tipi	Akım Oranı	Voltaj Oranı	Kaynak Hızı (cm/dk)	Isı Girdisi (J/mm)
SFA-5,5	4	DC(+)	170-210	25-30	06.Ağu	6300

3.4. Mekanik İşlemler ve Makinalar

3.4.1. Sertlik makinası ve özellikleri

Sertlik deneyi Wilson Hardness marka 402MVD model, Vickers, Brinell, Rockwell cinsinden makro ve Vickers ölçümler yapabilen bir cihaz yardımıyla yapılmıştır. Şekil 3.4.'te Vickers sertlik cihazı görülmektedir.

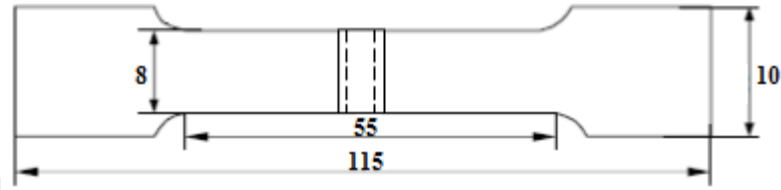


Şekil 3.4. Wilson Hardness marka 402MVD model Vickers sertlik cihazı

Sertlik ölçme işleminde Vickers (HV) sertlik ölçme yöntemi kullanılmış ve sertlik ölçme esnasında 100g yük uygulanmıştır. Kaynak metalinin yukarıdan aşağıya doğru 10 yerinden ve numunenin sağından soluna doğru kaynak metali, ITAB ve ana metal olmak üzere toplamda 15 yerinden ölçüm alınarak Vickers sertlikler ölçülmüştür.

3.4.2. Çekme makinası ve özellikleri

Çekme ve eğme testleri için numuneler Alman Standartlar Enstitüsü (DIN) 50125 standartlarına göre hazırlanmıştır. Şekil 3.5.'te DIN 50125 standartına göre hazırlanmış çekme ve eğme testi numuneleri boyutları görülmektedir.



Şekil 3.5. DIN 50125'e uygun olarak hazırlanmış çekme ve eğme testi numunesi boyutları

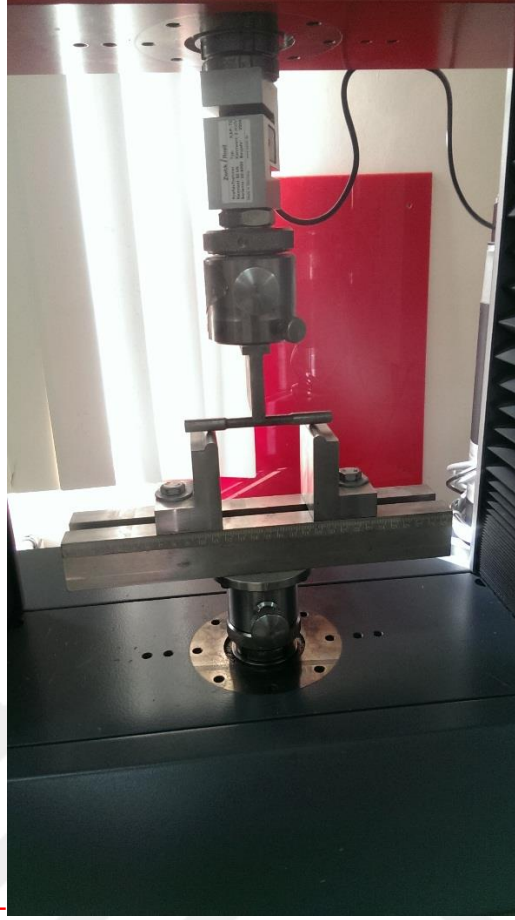
Bu çekme numuneleri 50 KN yük kapasitesine sahip Zwick-Roell marka çekme cihazında test edilmiştir. Çekme cihazı Şekil 3.6.'te görülmektedir. Deneylerde maksimum çekme mukavemeti ve % uzama değerlerine bakılarak, ortalama değerler belirlenmiştir. Çekme hızı 0,5 mm/s süre ile 3'er tane numune kullanıldı.



Şekil 3.6. Zwick-Roell marka çekme cihazı

3.4.3. Eğme makinası ve özellikleri

Kaynaklı numunelere eğme testleri ise yine aynı cihazda eğme deneyi işlemi hazırlanan aparat ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7.'te görülen Zwick-Roell marka deney cihazı kullanıldı. Basma hızı 0,5 mm/s seçildi ve 3'er tane numune çekildi.



Şekil 3.7. Zwick-Roell marka eğme cihazı

3.5. Makro ve Mikro Yapı İncelemeleri

3.5.1. Makro yapı inceleme makinası ve özellikleri

Numunelerin yüzeylerinde kir ve pislik olup olmadığını anlayabilmek için makro yapı incelemeleri yapıldı. Makro yapı incelemeleri Şekil 3.8.'te görülen ZEISS marka makine ile alındı.



Şekil 3.8. Zeiss marka makroyapı inceleme cihazı

Hazırlanan numuneler zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutuldu. Şekil 3.9.'ta görülen zımparalama işlemi Metaserv 2000 marka makinede yapıldı. Numuneler standart metalografik numune hazırlanma tekniklerine uygun olarak sırasıyla 60, 120, 200, 400, 800 ve 1200 gritlik zımpara kağıtlarıyla su ile birlikte yapıldı. Zımparalama işleminden sonra parlatma işlemi uygulandı. Parlatma işlemi çuha adı verilen bezle $0,3\mu$ ' luk alümina pasta ile yüzeyler parlatıldı. Zımparalama, parlatma işlemlerinden sonra dağlama işlemi %3 HNO₃ (Nital) çözeltisiyle dağlanılarak numuneler hazır hale getirildi.



Şekil 3.9. Metaserv 2000 marka zımparalama makinesi

3.5.2. Mikro yapı inceleme makinesi ve özellikleri

Mikro yapı incelemeleri Şekil 3.10.'te görülen Nikon marka, Eclipse L150 model optik mikroskop ile yapıldı. Makro yapı incelemelerinde yapılan işlemler aynı şekilde yapıldı. Hazırlanan numuneler zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutuldu.



Şekil 3.10. Nikon marka Eclipse L150 model optik mikroskop

Numunelerin parlatma işleminde Metaserv Buehler marka parlatma makinası kullanıldı. Şekil 3.11.'te parlatma makinası görülmektedir.



Şekil 3.11. Metaserv Buehler marka parlatma makinası

3.5.3. SEM makinası ve özellikleri

Uygun metalografik standartlarda hazırlanmış numunelerin geçiş bölgelerini (kaynak dikişi – ITAB, ITAB – ana metal), kaynak dikişini, ITAB bölgesinin ve ana metal mikro yapılarının incelenmesi ve yorumlanması için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. Mikro yapıların görüntülendiği Joel marka JSM-6060LV model SEM cihazı Şekil 3.12.'te görülmektedir. Ayrıca numuneler üzerindeki elementel kompozisyonu belirlemek için enerji dağılımlı spektrometre (EDS) nokta analizi uygulandı. EDS nokta analizi SEM cihazı ile birlikte çalıştığı için, element kompozisyonu aynı cihaz üzerinden yapıldı.



Şekil 3.12. Joel marka JSM-6060LV model SEM cihazı

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

Farklı tel ve toz kombinasyonları kullanılarak yapılan tozaltı kaynak tekniği ve bazik örtülü elektrotlu elektrik ark kaynak tekniği ile birleştirilen parçaların, yüzey kusurlarının belirlenmesi için gözle muayeneye tabi tutuldu. Gözle muayene işlemleri, standartlar için uygun bir ortamda ve uzman bir personel tarafından yapıldı. Muayene sonucunda, herhangi bir hataya ve kusura rastlanmadığı belirlendi ve kayıtlara geçti.

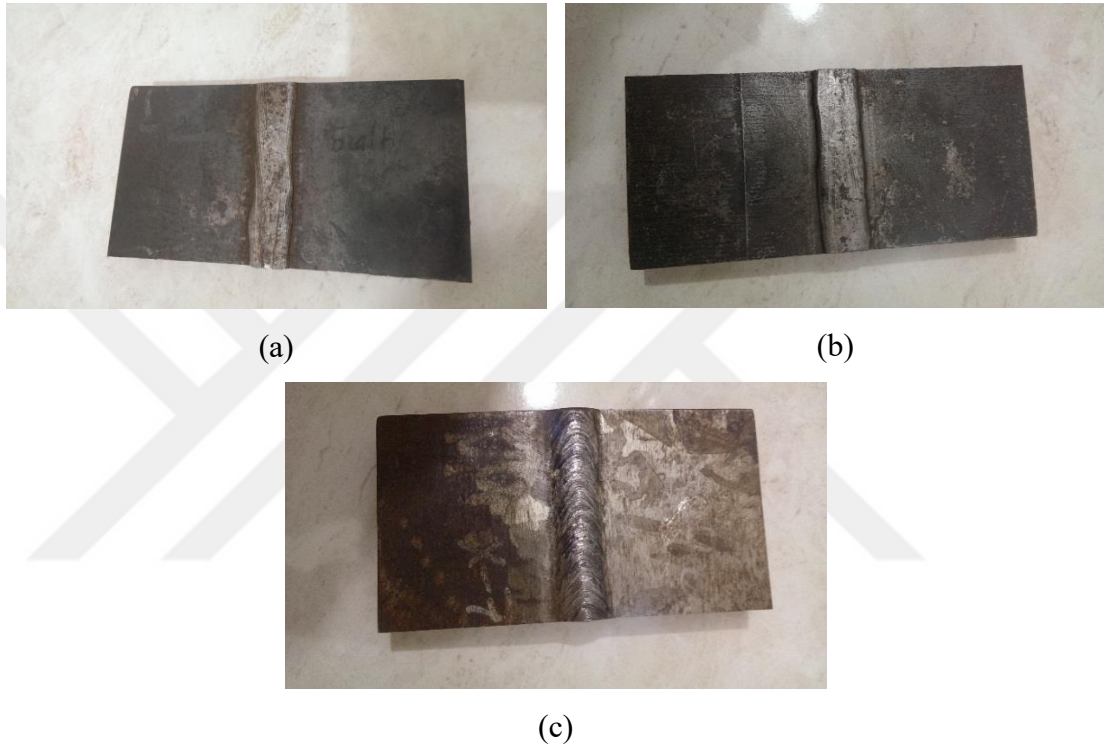
Birleştirme işlemlerinde herhangi bir hata olmadığı belirlenen numuneler, tahribatlı muayeneler için bir takım zımparalama, parlatma ve dağlama gibi metalografik işlemlere tabi tutuldu. Metalografik işlemlerden sonra optik ve sem cihazları ile mikro yapılar gözlendi. Kimyasal kompozisyonun belirlenmesi için EDS nokta analizi uygulandı. Tahribatsız muaynelere hazır olan numuneler çekme ve eğme testlerine tabi tutuldu. Kırık yüzeyin mikro yapısı ve kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi için yapılan uygulamalar aynı cihaz ile elde edildi. Taguchi yöntemi ile sertlik sonuçları üzerine modelleme çalışmaları yapıldı.

4.2. X70 ve St 52 Çelik Malzemelerinin Kaynak İşlemi

API 5L standartlarındaki X70 çeliği, S2Mo kaynak teli ve P 223 tipi kaynak tozu ile tozaltı kaynak tekniği yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Aynı standartlardaki X70 çeliği E 50 6 Mn1Ni B 42 H5 tipi bazik elektrodla elektrik ark tekniği kullanılarak birleştirilmiştir. Genel yapı çelikleri standartındaki St 52 çeliği, S2Mo kaynak teli ve LN 761 tipi kaynak tozu ile toz altı kaynak tekniği yöntemiyle birleştirilmiştir. Bütün

kaynak işlemleri deneysel çalışmalar bölümünde verilen parametreler içerisinde yapılmıştır.

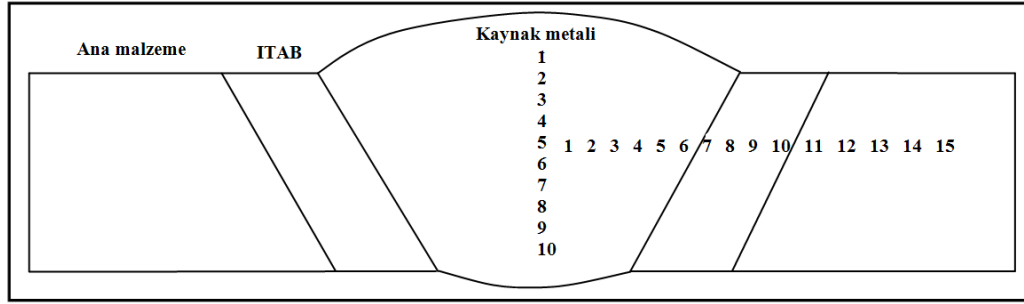
130x130x20 mm ölçülerinde, kimyasal analizleri farklı ve farklı kaynak teknikleri için kullanılmak üzere X70 ve St 52 parçaları hazırlanmıştır. Birleştirilen parçalar Şekil 4.1.'te verilmiştir.



Şekil 4.1. a) X70 çelik malzemesi tozaltı kaynağı, b) St 52 çelik malzemesi tozaltı kaynağı, c) X70 malzemesi bazik elektrod ile ark kaynağı

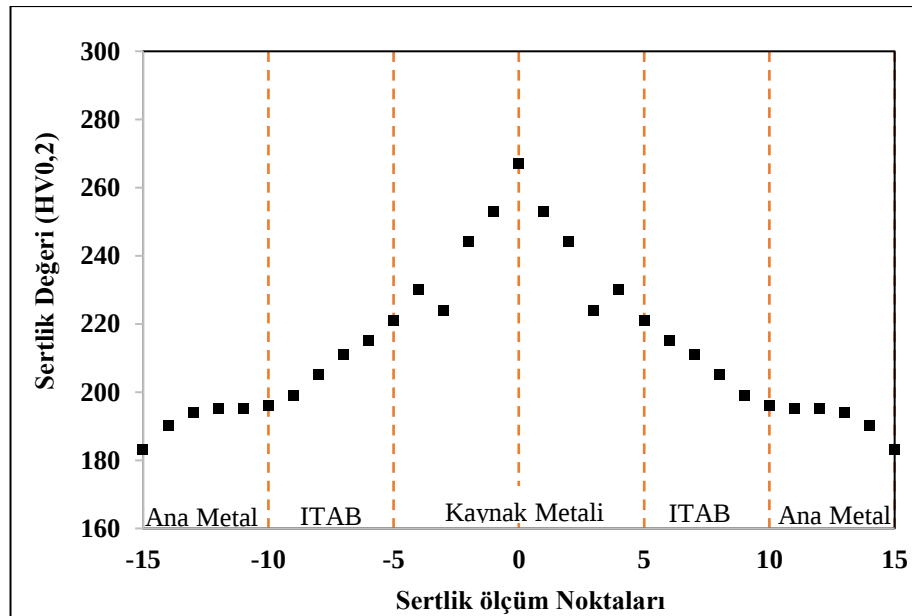
4.3. Sertlik Testi Sonuçları

Sertlik ölçümleri Şekil 4.2.'te şematik olarak gösterilen noktalardan yapıldı. Enine 15 noktadan alınan sertlik ölçümleri kaynak işlemi sonucunda oluşan farklı mikro yapıların (kaynak metali, ITAB, ana metal) sertlik davranışını tespit etmek için yapıldı. Kaynak metali içerisinde 10 farklı noktadan boyuna alınan sertlik ölçümleri ise, kaynak pasolarının kaynak metali sertliği üzerine etkilerini tespit etmek için yapıldı.



Şekil 4.2. Vickers sertlik ölçümleri alınan bölgeler

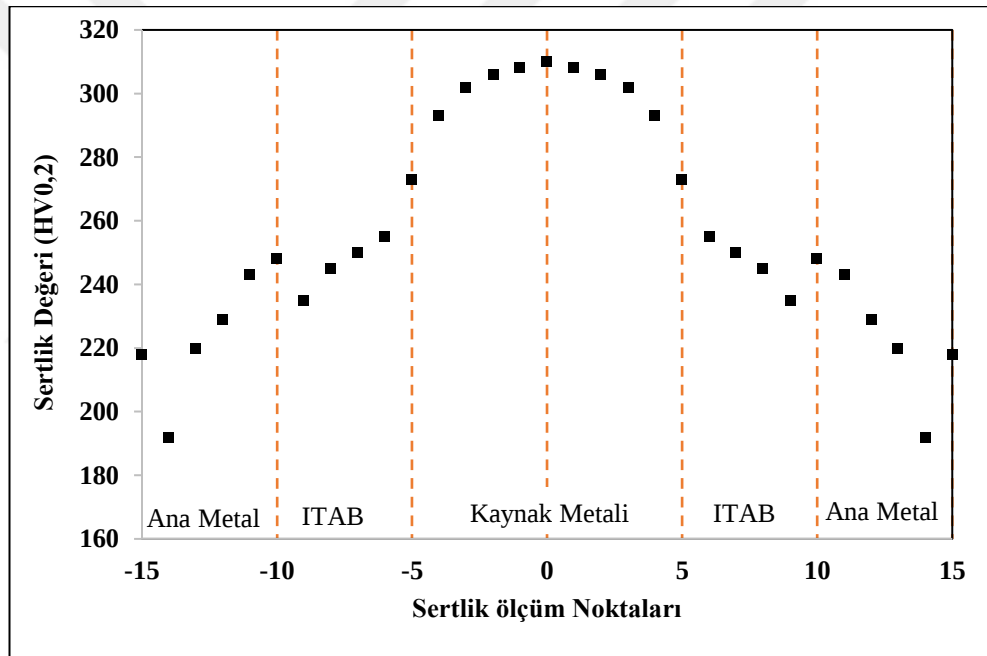
Vickers sertliği, Wilson Hardness marka 402MVD model sertlik test cihazı ile ölçülmüştür. Mikro girinti sertliği testi sırasında 100 g'lık bir yük ve 15 saniye bekleme süresi uygulanmıştır. Şematik olarak gösterilen noktalardan ölçülen sertlik değerlerinin ortalaması alınarak her bir numune için belirlenir ve bunun dâhilinde grafikler elde edilir. Tozaltı kaynak tekniği ile kaynaklı X70 çeliğinin Vickers sertlik sonuçları Şekil 4.3.'te verilmiştir. Bazı tip elektrod kullanılarak elektrik ark tekniği ile kaynaklı X70 çeliğinin Vickers sertlik sonuçları Şekil 4.4.'te verilmiştir. Tozaltı kaynak tekniği ile kaynaklı St 52 çeliğinin Vickers sertlik sonuçları Şekil 4.6.'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Tozaltı kaynağı ile birleştirilen X70 çeliği Vickers sertlik değerleri

Şekil 4.3.'te tozaltı kaynağı ile birleştirilmiş X70 çeliğinin sertlik değerleri gösterilmektedir. Ana metal malzemesinin sertliği yaklaşık 193 HV_{0,2}'dir.

0 - 5 mm arasında kaynak merkezinden bir mesafede bulunan, erimiş zonda işlenmemiş ve sürtünme sonrası işleme tabi tutulmuş tozaltı kaynaklarının sertlik azalması gözlemlenmekte ve ortalama değeri yaklaşık 40 HV_{0,2} olarak ölçülür ve bu değer yaklaşık olarak %10'luk bir düşüşü temsil etmektedir. Tozaltı kaynaklı erimiş bölgede gözlenen sertlik zirveleri, kaynak soğutma sırasında oluşan bazı yeniden çökelmeye bağlıdır. Kaynak dolgusu ve termo-mekanik olarak etkilenen bölgelerde elde edilen sertlik artışı tozaltı kaynak işlemi ile olmuştur. Benzer sonuçlar bulunmuştur [52, 53]. Kaynak metalinde yaklaşık 250-270 HV_{0,2} arasında maksimum sertlik vardı. ITAB'ın sertliği, yaklaşık 200-220 HV_{0,2} olan X70 boru çeliğinden daha yüksektir.

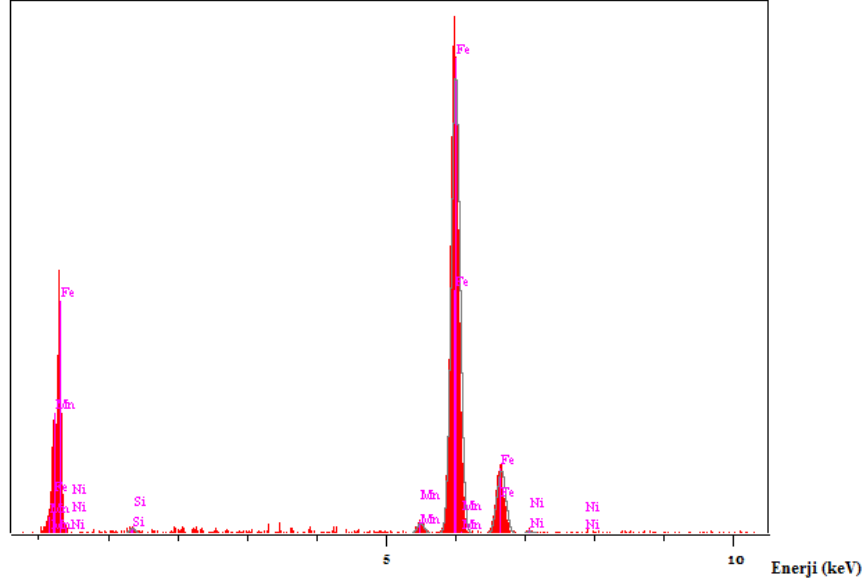


Şekil 4.4. Bazik elektrod ile birleştirilen X70 çeliğinin Vickers sertlik değerleri

Şekil 4.4.'te bazik tip elektrod kullanılarak elektrik ark kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin sertlik değerleri gösterilmektedir. Ana metal malzemesinin sertliği yaklaşık 226 HV_{0,2}'dir.

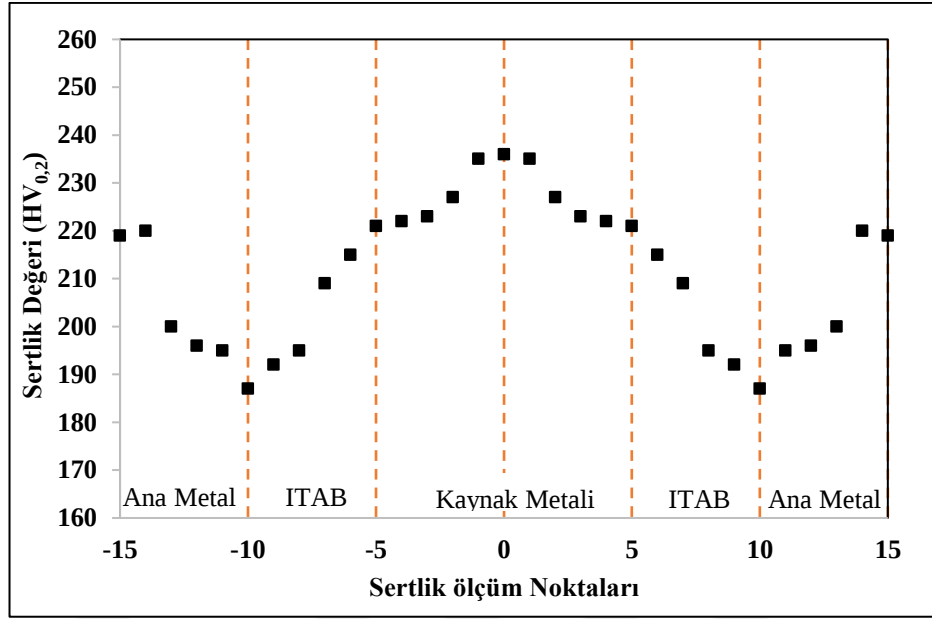
Kaynak metal sertliğinin, bazik tip elektrod kullanılarak elektrik ark kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin tozaltı kaynak yöntemiyle ile birleştirilmiş X70 çeliğine oranla daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Kaynak metalinden ana metale doğru

giderken sertlik değerlerinde azalma olduğu bunun kaynak metali içeriğindeki C atomlarının yüksek olmasından kaynaklandığı EDS analizlerinde belirlenmiştir. Bazı tip elektrod kullanılarak elektrik ark kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin kaynak metalinin EDS analizi Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Bazı elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin kaynak metalinin EDS analizi

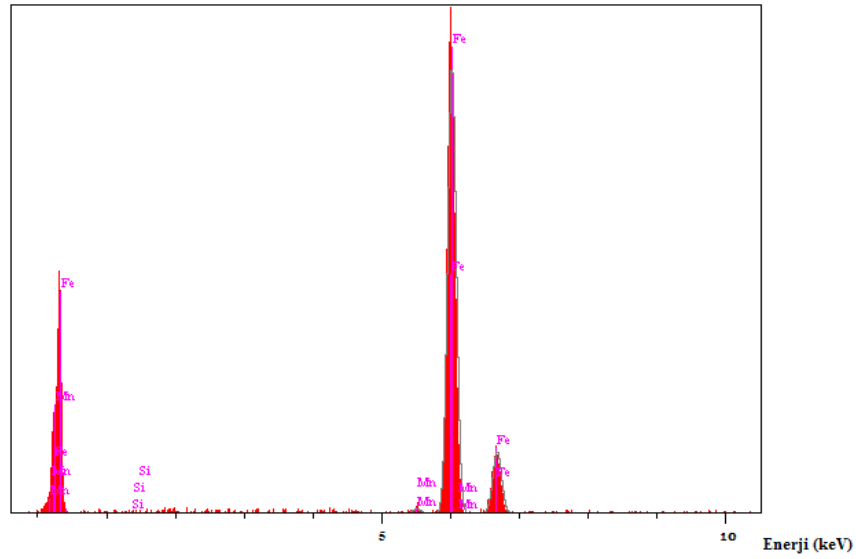
Farklı kaynak yöntemleri kullanılarak kaynaklanmış aynı malzemelerin en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metalinde oluşmasına, yüksek ısı girdisi ve hızlı soğuma neticesinde oluşan ince taneli yapıların sebep olduğu düşünülmektedir. Kaynak metalinde yaklaşık 310-320 HV_{0,2} arasında maksimum sertlik vardı. ITAB'ın sertliği, yaklaşık 240-260 HV_{0,2} olan X70 taban çeliğinden daha yüksektir.



Şekil 4.6. Tozaltı kaynağı ile kaynaklanan St52 çeliğinin Vickers sertlik değerleri

Şekil 4.6.'te tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş St 52 çeliğinin sertlik değerleri gösterilmektedir. Ana metal malzemesinin sertliği yaklaşık 200 HV_{0.2}'dir.

Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş St 52 çeliğinin sertlik grafiği incelendiğinde diğer kaynak yöntemleri ile aynı şekilde sertlik grafiklerinin oluştuğu gözlenmiştir. Kaynak metalinin sertliği, ITAB ve ana malzemedan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kaynak metalinin sertliğinin diğer bölgelerden daha yüksek olması kaynak sırasında kullanılan ilave malzemelerden kaynaklandığını EDS nokta analizden belirlendi. ITAB bölgesinin sertliğinin ana malzemeye göre yüksek olmasının sebebi ise kaynak sırasında ısıdan etkilendiği için geç soğumasından kaynaklı tane irileşmesindendir. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş St 52 çeliğinin kaynak metalinin EDS analizi Şekil 4.7.'te verilmiştir.



Şekil 4.7. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş St 52 çeliğinin kaynak metalinin EDS analizi

Farklı kaynak yöntemleriyle birleştirilen farklı malzemelerin sertlik grafikleri incelendiğinde, genel olarak kaynak metalinin, ITAB ve ana malzemeden daha sert olduğu gözlenmektedir. Ana malzemede en yüksek Vickers sertlik değeri bazik tip elektrod kullanılarak elektrik ark kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 malzemesinde 225,9 $HV_{0,2}$ olarak ölçülmüştür. En düşük Vickers sertlik değeri ise tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 malzemesinde 192,5 $HV_{0,2}$ olarak ölçülmüştür. Kaynak metalinde ise en yüksek Vickers sertlik değeri bazik tip elektrod kullanılarak elektrik ark kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 malzemesinde 318 $HV_{0,2}$, en düşük Vickers sertlik değeri ise tozaltı kaynağı ile birleştirilmiş X70 malzemesinde 225,3 $HV_{0,2}$ olarak ölçülmüştür. Benzer sonuçlar bulunmuştur [19].

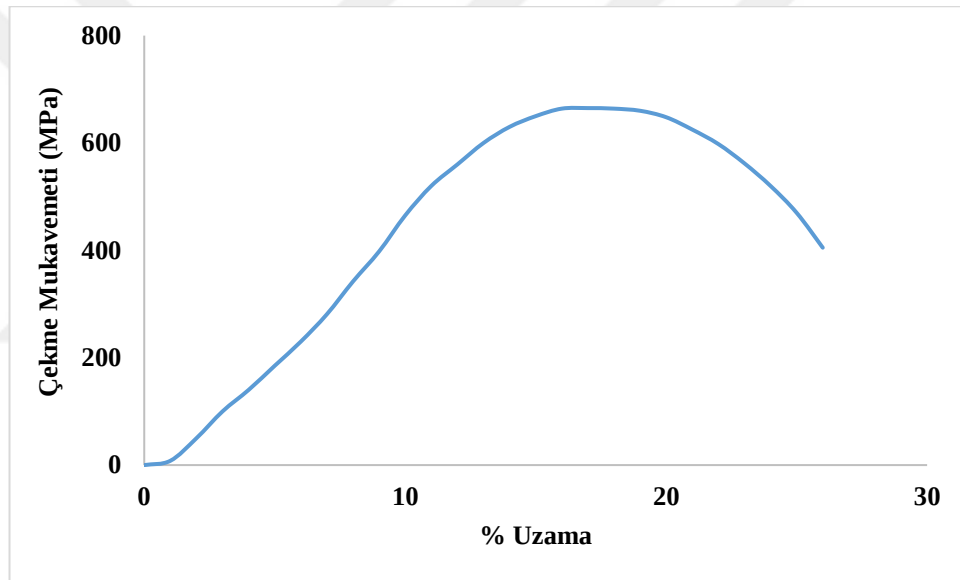
4.4. Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneyi, malzemelerin oda sıcaklığında tek doğrultuda sabit bir hızla kopuncaya kadar uygulanan ve malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan bir tahribatlı muayene yöntemidir. Malzemelerin çekme, kopma mukavemetleri, % uzama, tokluk gibi verilere çekme deneyi sonucunda ulaşılır [5].

Kaynaklı numunelerin çekme deneyinde, kaynak dikişinde ve ITAB bölgelerinde kopma istenmemektedir. Kaynak dikişinde veya ITAB bölgesinde oluşan bir kopma

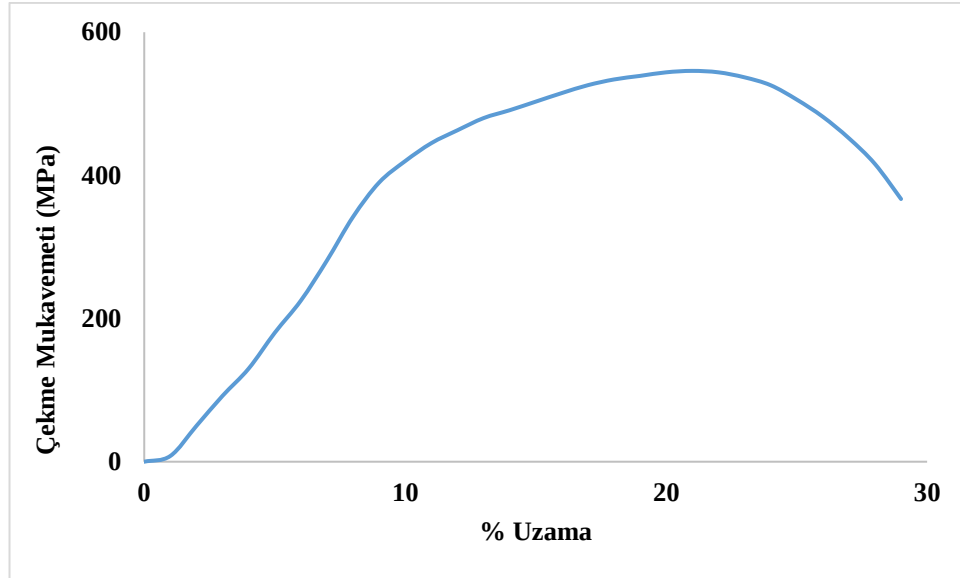
kaynak esnasında ilave metal azlığı veya tek pasoda standarların dışında geniş bir kaynak yapılması sonucunda kaynak metali içerisinde oluşan mikrosegregasyonlardır [55].

Çekme deneyi numuneleri DIN 50125 standardına göre hazırlanmış ve çekme deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 4.8.'te bazik tip elektrod kullanılarak elektrik ark kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliği çekme deneyi sonucu verilmiştir. Şekil 4.9.'te tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin çekme deneyi sonucu verilmiştir. Şekil 4.10.'te tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş St 52 çeliğinin çekme deneyi sonucu verilmiştir.



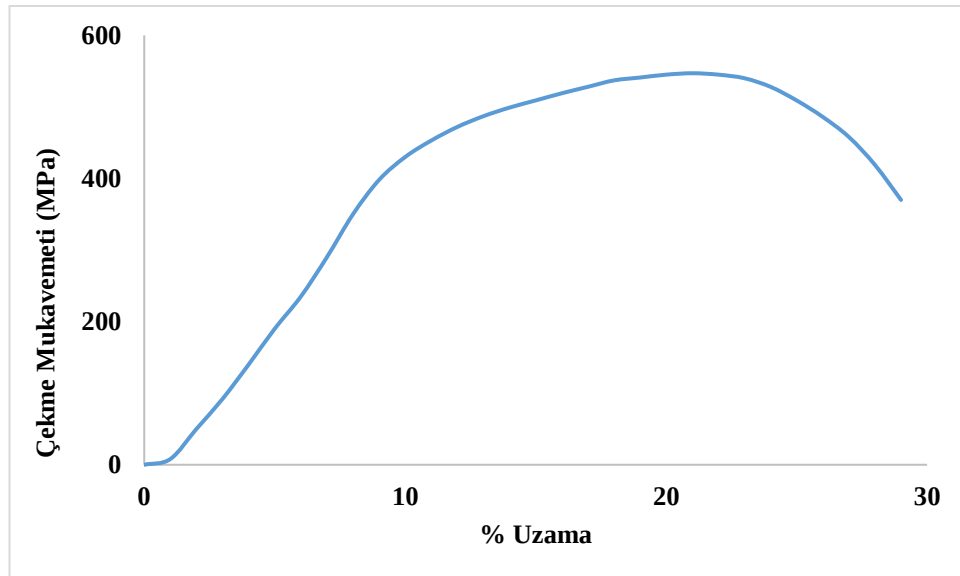
Şekil 4.8. Bazik tip elektrod kullanılarak elektrik ark kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliği çekme deneyi sonucu

X70 ve St 52 çeliklerinin akma mukavemeti ve maksimum çekme mukavemeti, kaynaklanmamış orijinal numunelerde sırasıyla 485 MPa, 620 MPa ve 335 MPa, 490 MPa olarak hesaplandı. X70 numunesinin tozaltı kaynak tekniği ve bazik tip elektrodlu elektrik ark tekniği kaynaklı eklemelerinde maksimum çekme mukavemeti sırasıyla 546 MPa ve 665 MPa olarak ölçüldü.



Şekil 4.9. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin çekme deneyi sonucu

St 52 numunesinin tozaltı kaynak tekniği kaynaklı eklemelerinde maksimum çekme mukavemeti ise 547 MPa olarak ölçüldü. X70 ve St 52 çeliklerin % uzama değerleri sıra ile % 32.1 ve % 20'dir. X70 numunesinin tozaltı kaynak tekniği ve bazik tip elektrodlu elektrik ark kaynak tekniği ile kaynaklı eklemelerin % uzama değerleri sıra ile 29 ± 2 ve 26 ± 2 olarak ölçüldü.



Şekil 4.10. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş St 52 çeliğinin çekme deneyi sonucu

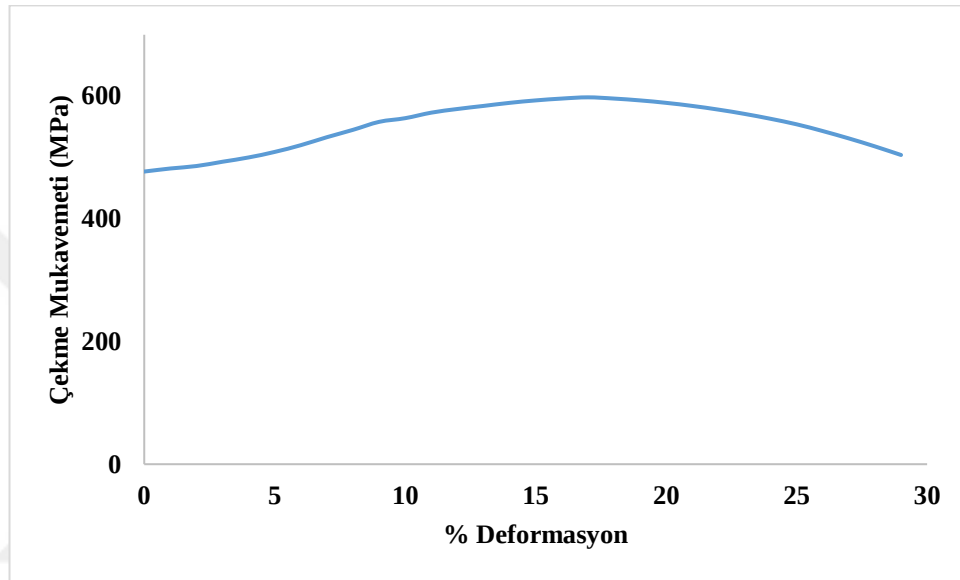
Kaynaklı birleştirmelerin maksimum çekme değerleri, ana malzemenin çekme değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. % uzama değerleri ise tam tersine ana malzemedeki değerler kaynaklı birleştirmelerin değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Kaynaklı numunelerin % uzama değerlerinin deney sonuçlarında düşük çıkmasının nedeni, kaynaklı bölgenin çekme deneyi sırasında deformasyona uğramamasıdır. Bu kaynaklı bölgelerin çekmeye karşı göstermiş oldukları direnç çekme mukavemet değerini arttırırken % uzama değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Kaynaklı numunelerin birleştirilmesi sırasında kaynak metali ve çevresinde oluşan hızlı ısınma ve soğuma sonucunda tanelerin yapısında değişiklere neden olmuştur. Yüksek ısı girdisi ve hızlı soğuma sonucu oluşan ince taneli yapılar çekme deneyi sırasında yüksek sertlik değerleri oluşturmuştur. Bu oluşan ince ve iğnemsı yapıların mekanik özellikleri arttırıcı yönde etkilediği bilinmektedir. İnce yapılı taneler yüksek dayanma direncine sahip oldukları için kopma bu tanelerde değil de daha iri tanelere sahip olan ana malzemede olmuştur. İnce taneli yapıların çekme sırasında gösterdikleri direnç yüksek olduğundan % uzama değerleri de bu denli düşük çıkmaktadır. Tane boyutunun mukavemetli ile arasında ters bir bağıntı vardır. Tane boyutu arttığı zaman birleştirilen numunelerin mukavemet değerleri azalmakta, tane boyu azaldığı zaman birleştirilen numunelerin mukavemet değeri artmaktadır. Benzer sonuçlar bulunmuştur[53, 58]. .

4.5. Eğme Testi Sonuçları

DIN 50125 standartlarına göre hazırlanan numuneler eğme testine tabi tutulmuştur. Eğme testi kaynaklı birleştirmelerde, kaynak dikişi ile çevresi arasında iyi bir bağlantı olup olmadığının anlaşılması için uygulanır. Eğme testinde sünek bir malzeme test ediliyorsa yüksek basma mukavemetine karşı dayanım göstermekte ve kırılmadan eğilmektedir. Fakat gevrek bir malzeme test ediliyor ise yüksek basma mukavemetine karşı dayanamayıp belli bir seviyede kırılmaktadır. Malzeme sünek veya gevrek olsun kalınlığı artar ise yine basma değerlerindeki yüklerde artar. Benzer sonuçlar bulunmuştur [5, 53].

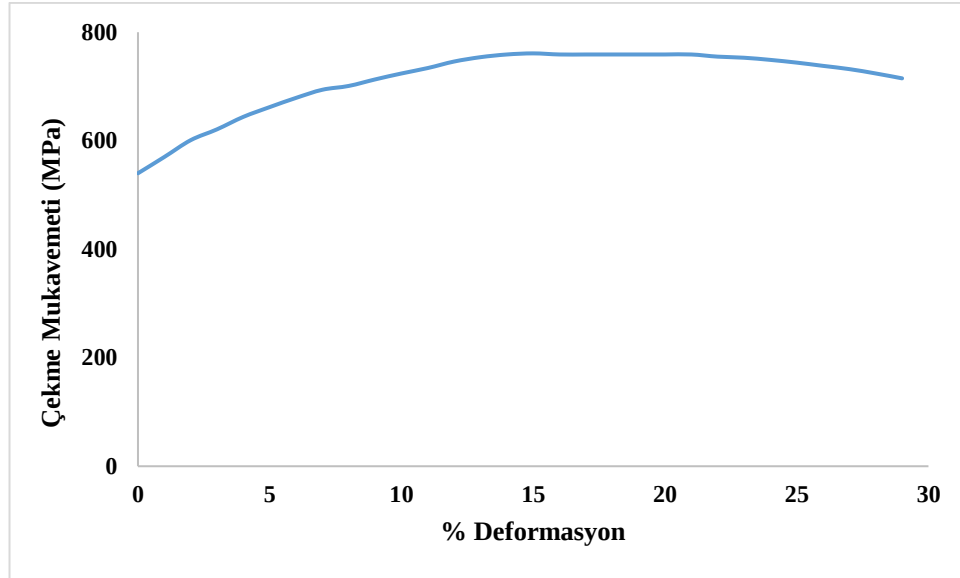
Numunelere eğme testlerinden sonra göz ile yapılan muayenede, kaynak dikişi ve çevresinde herhangi bir yırtık veya çatlama olmadığı belirlendi. Bu sonuç kaynak

işlemlerinin düzgün bir şekilde yapıldığını ve servis şartlarında kullanılabileceğini gösterir [53]. Şekil 4.11.'te bazik tip elektrod kullanılarak elektrik ark kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin eğme testi sonucu verilmiştir. Şekil 4.12.'te tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin eğme testi sonucu verilmiştir. Şekil 4.13.'te tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş St 52 çeliğinin eğme testi sonucu verilmiştir.



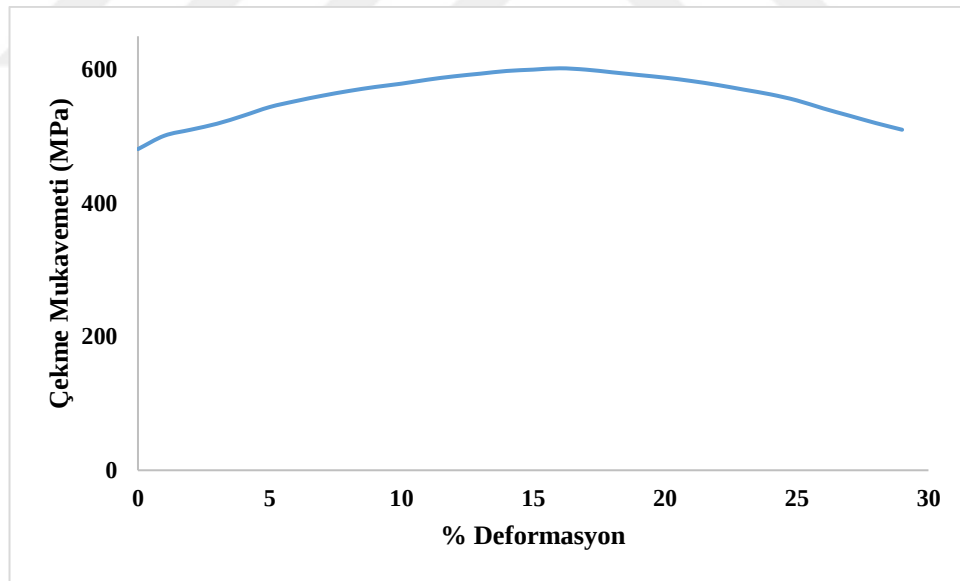
Şekil 4.11. Bazik tip elektrod kullanılarak elektrik ark kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin eğme testi sonucu

Eğme testleri sonucu oluşturulan şekiller incelendiğinde en yüksek eğme testi değeri tozaltı kaynak tekniği kullanılarak birleştirilen X70 numunesininidir. Tozaltı kaynaklı X70 numunesinin eğme testi değeri 759 MPa'dır. Bu değeri tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş St 52 numunesi 605 MPa ile takip etmektedir.



Şekil 4.12. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 çeliğinin eğme testi sonucu

En düşük eğme testi değeri ise bazik elektrod tipi kullanılarak yapılan elektrik ark tekniği ile birleştirilmiş X70 numunesininidir. Bazik elektrod ile birleştirilmiş X70 numunesinin eğme testi değeri 598 MPa'dır.



Şekil 4.13. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş St 52 çeliğinin eğme testi sonucu

Literatürde tozaltı kaynak tekniği kullanılarak yapılan birleştirmelerde, numunelerin eğilmesi sonucu herhangi bir hasara uğramadan kalmaları sünek bir birleştirme yapıldığını göstermiştir [55].

4.6. Makro ve Mikro Yapı İncelemeleri

4.6.1. Makro yapı incelemeleri

Metalografik işlemlere tabi tutulan numunelerin küçük bir büyütme yada çıplak gözle incelemeler makro yapı incelemeleri olarak adlandırılır. Şekil 4.14., Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'te X70 ve St 52 çeliklerin farklı kaynak teknikleri ile birleştirilmiş numunelerinin metalografik işlemler sonrası makro yapı görüntüleri nüfuziyetleri verilmiştir.

Makro yapı görüntüleri incelendiğinde kaynak metali, ITAB ve ana metalin açıkça görüldüğü anlaşılmıştır. Ayrıca kaynak metali tanelerinin ana metalden başlayarak yüksek ısının etkisi ile merkeze doğru yönlendiği gözlenmiştir. Makro yapı görüntülerinden her bir numune için birleştirmede tam nüfuziyet sağlandığı belirlenmiştir. Makro düzeyde herhangi bir gözenek, çatlak, cüruf kalıntıları vb. kaynak hatasına rastlanmamıştır. Bu sonuç birleştirme işlemlerinde doğru parametrelerin seçildiğini doğrulamıştır. Ayrıca yüksek ısı girdisi, hızlı soğuma etkilerinden ITAB'ın genişçe bir alan kapladığı açık bir şekilde görülmektedir.

Nüfuziyet değerleri her bir numune için ayrı ayrı ölçülüp belirlenmiştir. Tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin nüfuziyet oranı 2,78 mm, tozaltı kaynaklı St 52 çeliğinin nüfuziyet oranı 2,90 mm ve bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin nüfuziyet oranı 2,98 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.14. Tozaltı kaynak tekniği ile kaynaklı X70 çeliğinin makro yapı görüntüsü



Şekil 4.15. Tozaltı kaynak tekniği ile kaynaklı St 52 çeliğinin makro yapı görüntüsü

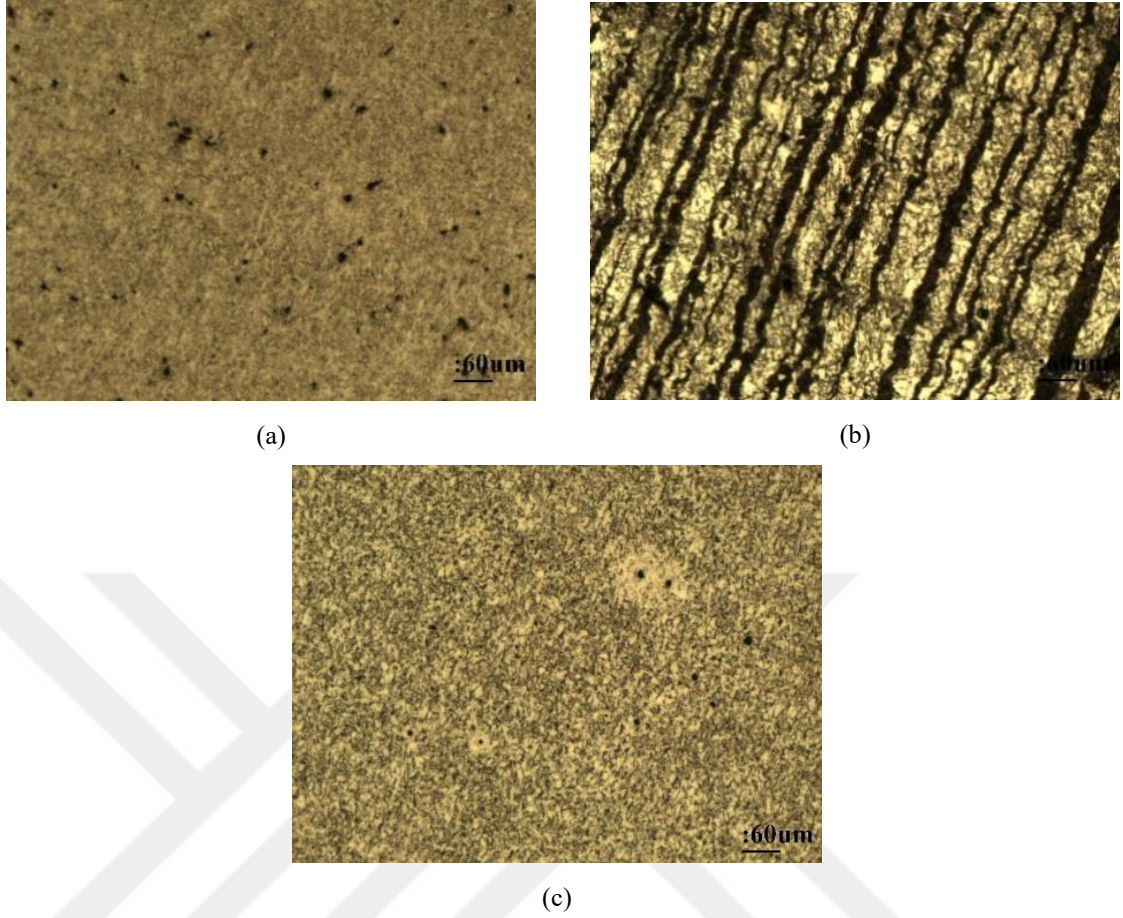


Şekil 4.16. Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin makro yapı görüntüsü

4.6.2. Mikro yapı incelemeleri

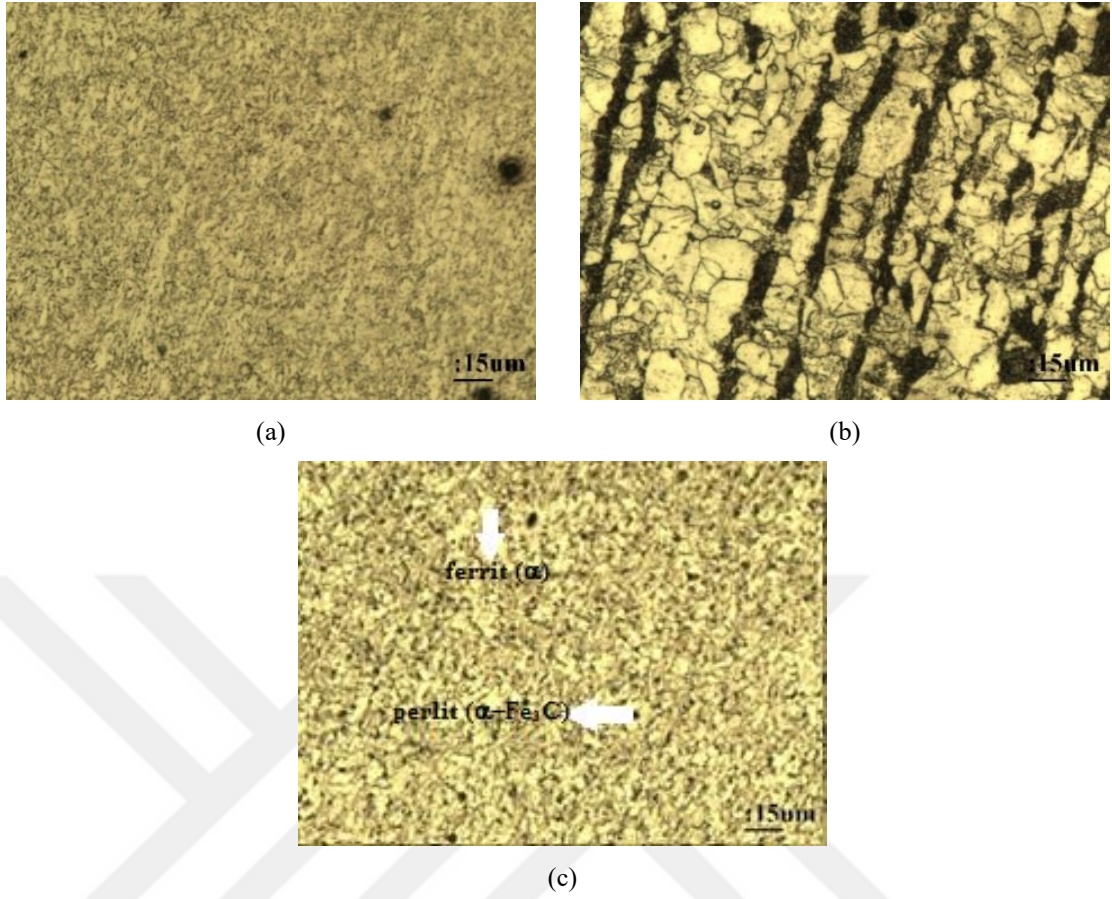
Metalografik olarak bir takım işlemler sonrası hazırlanan numunelerin daha derin bilgiler öğrenebilmek için mikro yapı incelemelerine tabi tutuldu. Numunelerin mikroyapı görüntüleri için Leica marka optik mikroskop ve Joel marka JSM-6060LV model SEM cihazı kullanılmıştır. Numunelerin kimyasal kompozisyonlarını belirlemek içinde aynı SEM cihazında EDS nokta analizi yapılmıştır.

Her bir numune için ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgelerinden farklı büyütmelerde görüntüler alınmıştır. Şekil 4.17., Şekil 4.18., Şekil 4.19., Şekil 4.20., Şekil 4.21., Şekil 4.22.'te farklı kaynak teknikleri ile birleştirilmiş X70 ve St 52 çeliklerinin mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.17. ve Şekil 4.18.'ta farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmiş X70 ve St 52 çelik malzemelerinin ana malzemesinin farklı büyütmelerdeki optik görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.17. X70 ve St 52 çelik numunelerinin ana malzemelerinin 60µm optik görüntüleri; a) Tozaltı kaynaklı X70 çeliği, b) Tozaltı kaynaklı St 52 çeliği, c) Bazık elektrod ile kaynaklı X70 çeliği

Şekil 4.17. incelenip optik görüntülere bakıldığında ana malzemelerin aynı tip ince taneli yapılara sahip olduğu gözlenmektedir. İnce taneli yapıların perlit ve ferritten oluşmuş yapılar tipik eş eksenli yapılar olduğu söylenebilir. Beyaz yerler ferrit fazını siyah yerler ise perlit fazını oluşturmaktadır [5]. Benzer sonuçlar bulunmuştur [19]. Şekil 4.18.'te daha büyük büyütmedeki optik mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Bu büyütmedeki optik mikro yapı görüntüleri yapı hakkında bilgi edinebilmemiz için bizlere daha iyi ayrıntı sunmaktadır.

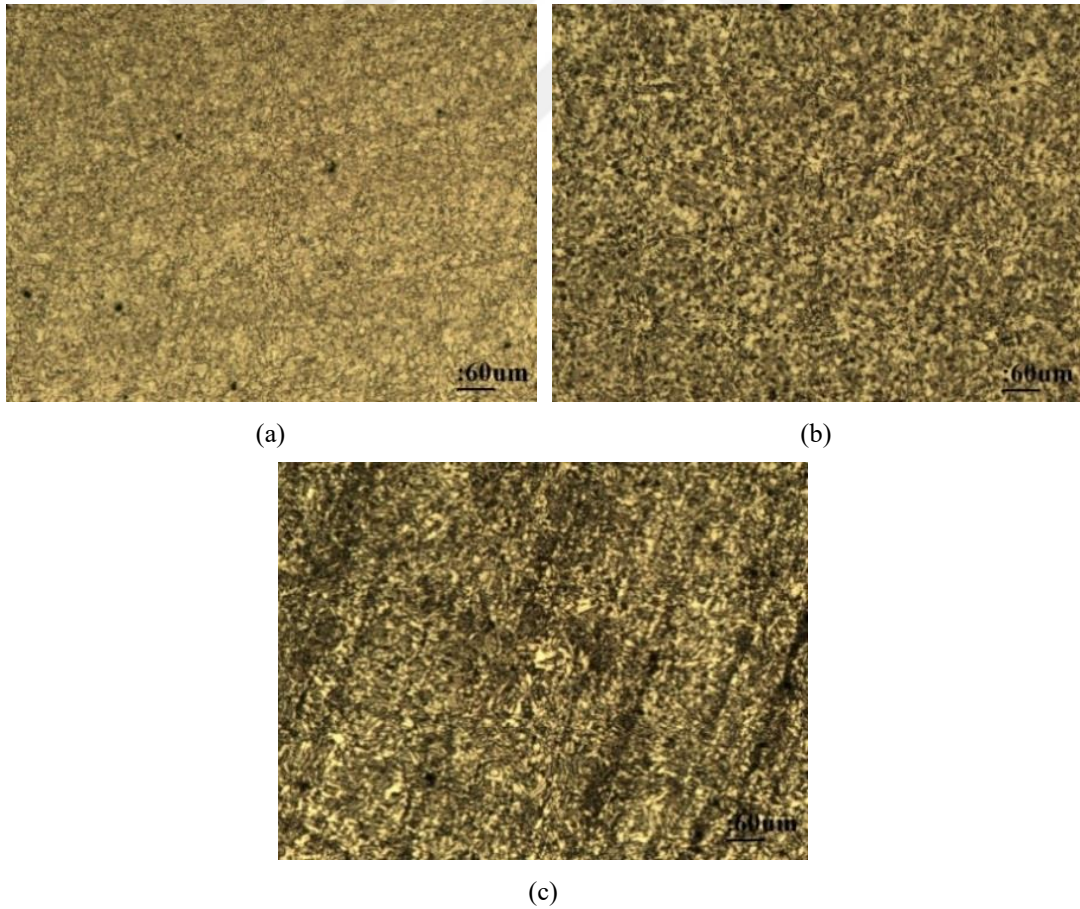


Şekil 4.18. X70 ve St 52 çelik numunelerinin ana malzemelerinin 15µm optik görüntüleri; a) Tozaltı kaynaklı X70 çeliği, b) Tozaltı kaynaklı St 52 çeliği, c) Bazık elektrod ile kaynaklı X70 çeliği

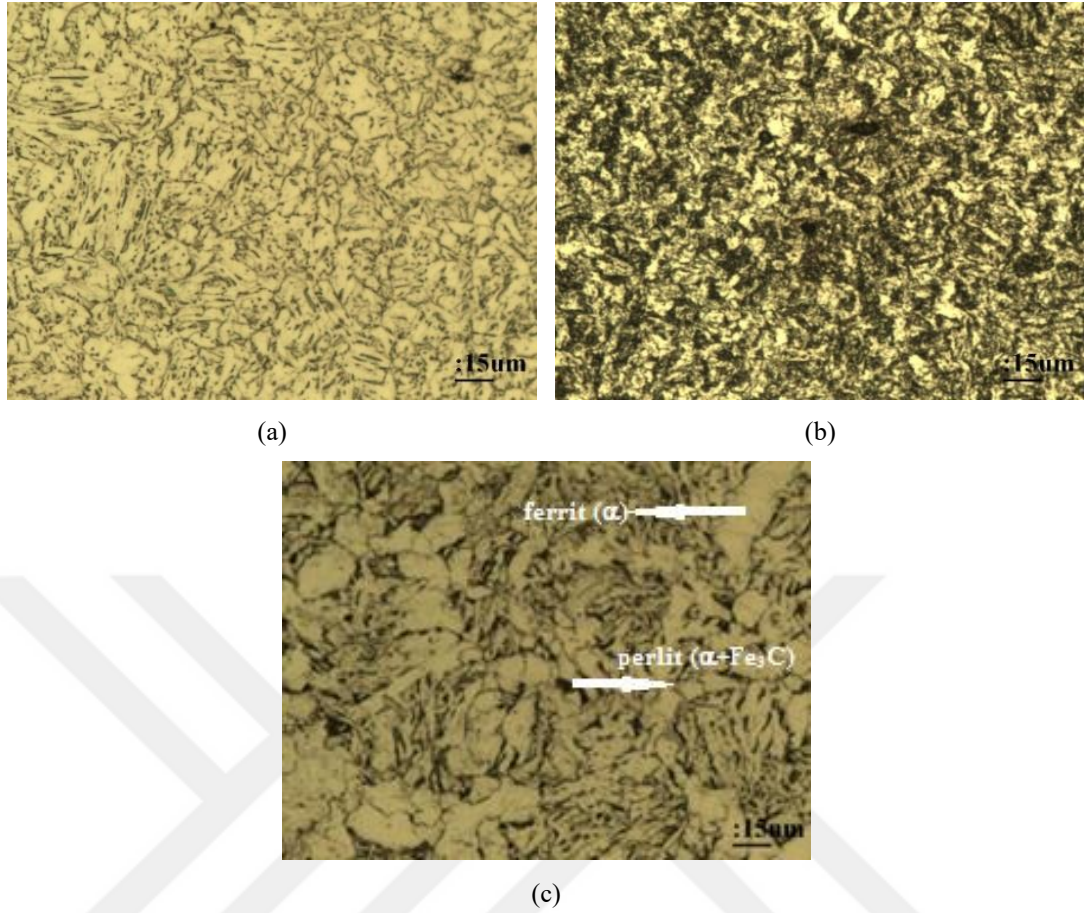
Şekil 4.18. incelenip optik görüntülere bakıldığında ana malzeme mikro yapılarının birbirlerine benzer yapılar sergiledikleri görülmektedir. Şekil 4.18. (a) - (c) görüntüleri incelendiğinde birbirinin aynısı mikro yapı büyüklükleri görülmektedir. Her iki görüntüdeki malzeme X70 çeliği malzemesidir. X70 çeliği ana malzemesi herhangi bir ilave eklemeler içermediği için birbirinin aynısı yapı sergilemesi optik mikro yapı görüntülerinin doğru alındığının kanıtıdır. Optik mikro yapı görüntülerine bakıldığında göze çarpan bir başka ayrıntı da mikro yapı boyutunun en yüksek Şekil 4.18. (b) kodlu görüntüdeki St 52 çeliğinin mikro yapısıdır. St 52 çeliği daha iri yapılı tanelerden oluşmuştur. Literatürde ince taneli yapıların sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca yine literatürde malzemelerin ayrı ayrı çekme mukavemet değerleri verilmiş ve X70 çeliğinin daha yüksek çekme mukavemet değerine rastlanmıştır. Yine burada optik mikro yapı görüntülerinin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir.

Şekil 4.18. incelendiğinde daha ayrıntılı bir yapıya ulaşıldığı için içerisinde olan ferrit ve perlitik yapıların görünürlüğü daha da artmıştır. Şekil 4.18. (c) kodlu görüntüde bu ferrit ve perlitik yapılar ok çıkarılarak gösterilmiştir. Ferrit yapısı (α) olarak ve perlit yapısı da ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.19. ve Şekil 4.20.'ta X70 ve St 52 çeliklerinin ITAB'ın farklı büyütmelerdeki optik mikro yapı görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.19. incelendiğinde ITAB'ların aynı tip ince taneli yapılara sahip olduğu gözlenmektedir. İnce taneli yapıların perlit ve ferritten oluşmuş yapılar tipik eş eksenli yapılar olduğu söylenebilir. Bu büyütmedeki mikro yapı görüntüleri daha çok yapının nasıl dağıldığını inceleyebilmek ve bunun hakkında bilgi toplayabilmek için alınır. Mikro yapılar incelendiğinde ince taneli yapıların homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Şekil 4.20.'te daha büyük bir büyütmedeki optik mikro yapı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.19. X70 ve St 52 çelik numunelerinin ITAB'ın 60µm optik görüntüleri; a) Tozaltı kaynaklı X70 çeliği, b) Tozaltı kaynaklı St 52 çeliği, c) Bazık elektrod ile kaynaklı X70 çeliği



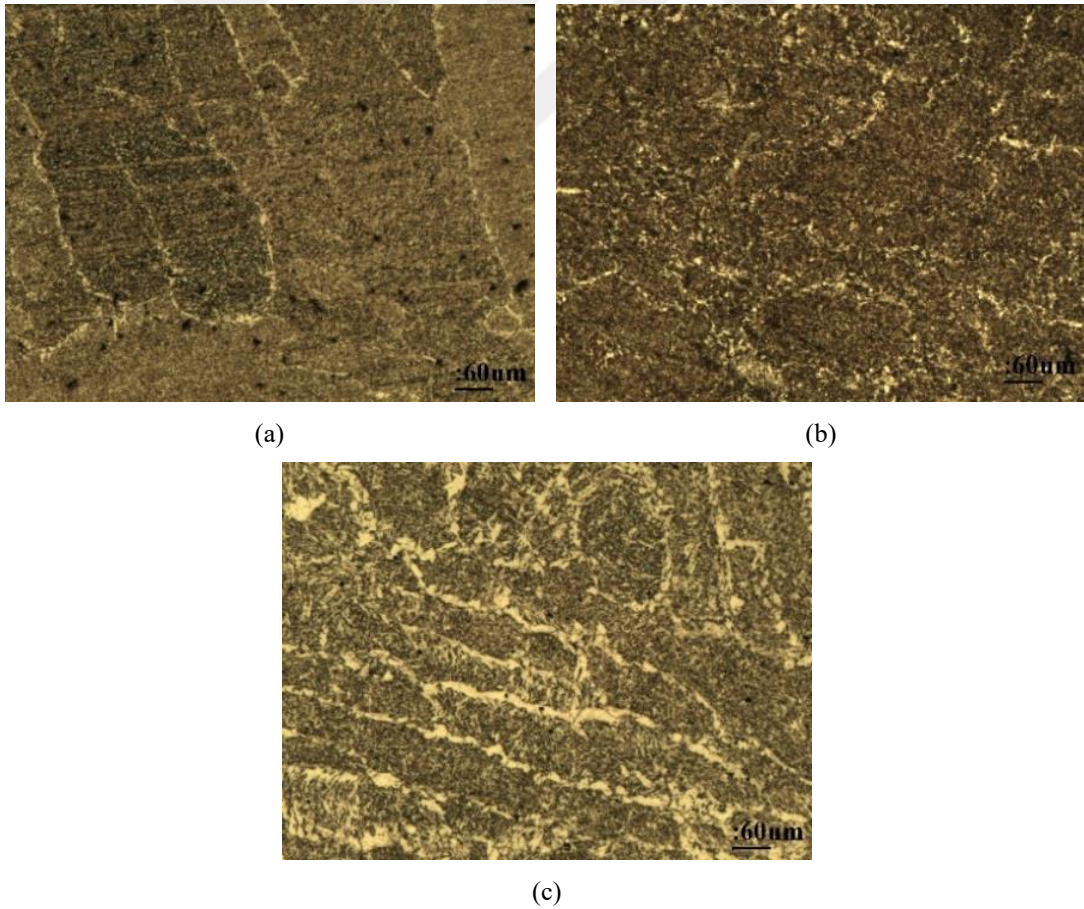
Şekil 4.20. X70 ve St 52 çelik numunelerinin ITAB'ın 15 µm optik görüntüleri; (a) Tozaltı kaynaklı X70 çeliği, (b) Tozaltı kaynaklı St 52 çeliği, c) Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliği

Şekil 4.20. incelendiğinde numunelerin ITAB'larının optik görüntülerine bakıldığı zaman ana malzemeye ve kaynak metali mikroyapılarına göre tanelerin daha iri, ferrit ve perlit yapılarının olduğu gözlenmiştir. Ayrıca tane yapısı içerisinde yer yer iğnemsî widmanstatten yapılarının olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuçlar bulunmuştur [5].

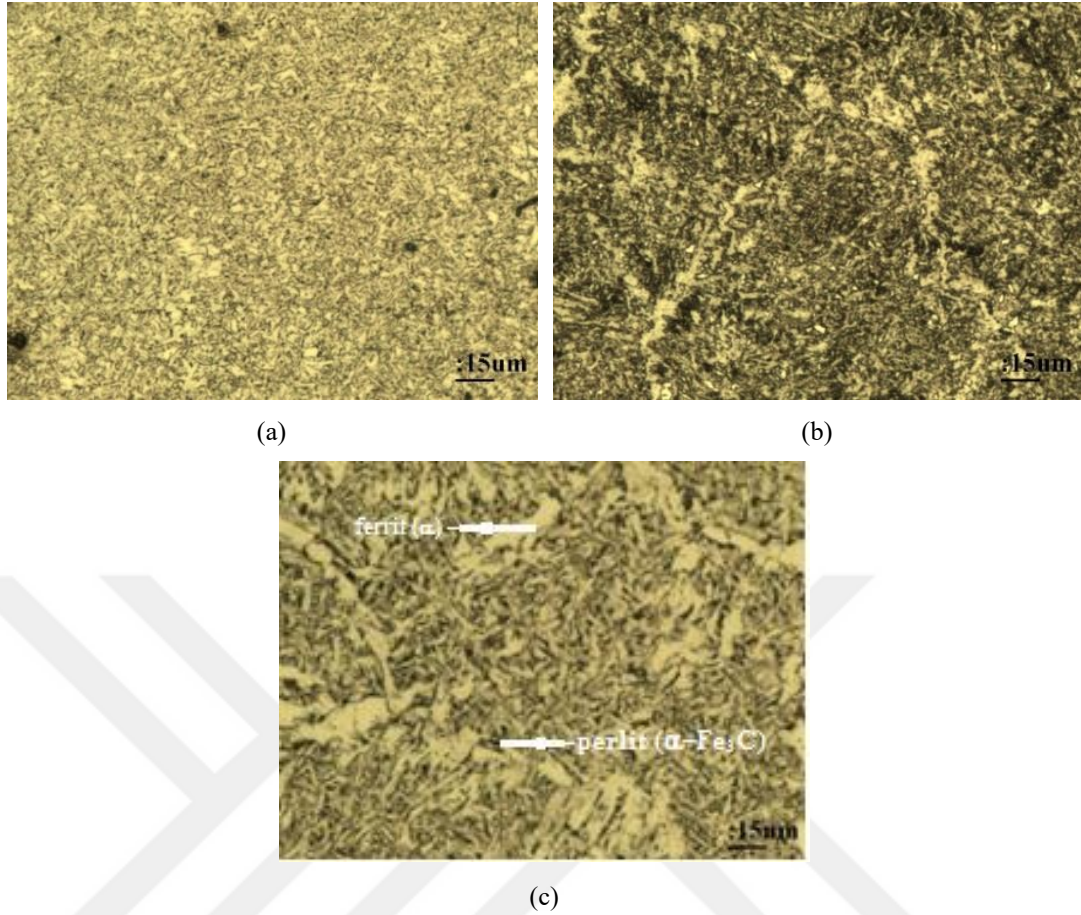
Birleştirme sırasında bu bölge yüksek ısı girdisi sonucunda etkilenir ve ısının tesiri altında kalan bölgesi yani ITAB olarak adlandırılır. Bu yüksek ısı girişi soğumayı yavaşlatır ve bu yavaşlayan soğumanın etkisiyle daha kaba yapıların olduğu ITAB optik görüntülerinden görülmektedir. ITAB yapılarının her numune için benzer büyüklükte olduğu ve ana metale doğru yönlendiği gözlenmiştir. Benzer sonuçlar bulunmuştur [64].

Şekil 4.20.'te daha ayrıntılı bir görüntü olduğu için ferrit ve perlit bölgeleri göz ile rahat bir şekilde seçilmektedir. Şekil 4.20. (c) kodlu görüntüde bu ferrit ve perlitik yapılar ok çıkarılarak gösterilmiştir. Ferrit yapısı (α) olarak ve perlit yapısı da ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.21. ve Şekil 4.22.'ta X70 ve St 52 çeliklerinin kaynak metalinin farklı büyütmelerdeki optik görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.21. incelendiğinde mikro yapıların benzer ferrit ve perlitik ince yapıların olduğu görülmüştür. Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliği kaynak metal görüntüsü diğerlerine göre daha yönlenmiş şekilde görülmektedir. Bu yönlenme nüfuziyeti arttırmaktadır. Nüfuziyet görüntüleri incelenip bakıldığında nüfuziyet oranının bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinde daha fazla olduğu ölçülmüştür. Bu da kaynak işlemlerinin doğruluğunun optik mikro yapı görüntülerinin doğruluğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 4.21. X70 ve St 52 çelik numunelerinin kaynak metalinin 60 µm optik görüntüleri; a) Tozaltı kaynaklı X70 çeliği, b) Tozaltı kaynaklı St 52 çeliği, c) Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliği

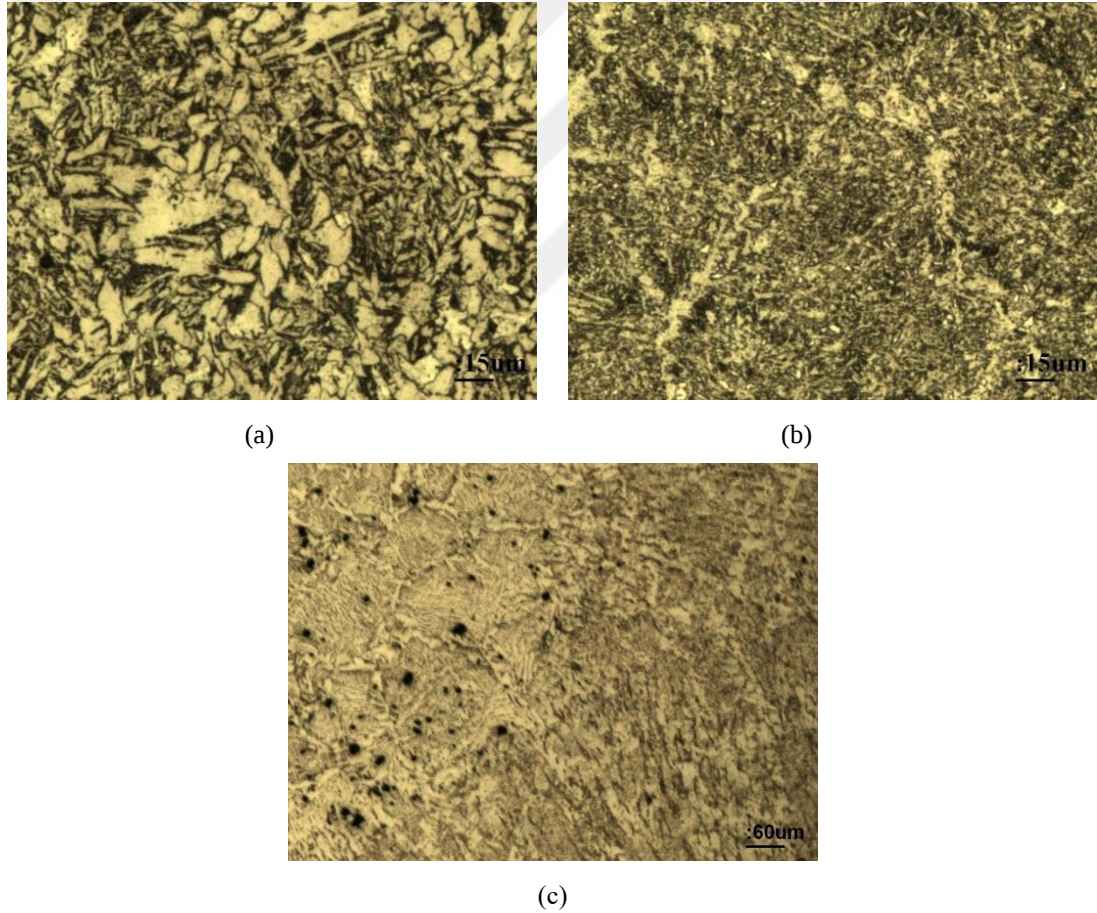


Şekil 4.22. X70 ve St 52 çelik numunelerinin kaynak metalinin 15 µm optik görüntüleri; a) Tozaltı kaynaklı X70 çeliği, b) Tozaltı kaynaklı St 52 çeliği, c) Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliği

Birleştirme işlemleri sonucu oluşan kaynak metalinin yapısını bozan ve tokluğunu düşüren martenzitik yapı istenmez. Farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen farklı numunelerin optik görüntülerine bakıldığında zaman bu martenzitik yapının oluşmadığı gözlenmiştir. Gözlemlenen bütün yapılarda ITAB ve ana malzemedeki gibi ferrit ve perlit mikroyapılar görülmüştür. Numunelerin kaynak metalleri incelendiğinde diğer bölgelere oranla daha ince yapıların oluştuğu ve ısı akış yönüne ters yönde yönlendiği görülmüştür. Birbirlerinden farklı kimyasal analize sahip her numunenin kaynak metali mikroyapıları incelendiğinde benzer yapıların olduğu görülmektedir [19, 57, 64]. Tozaltı kaynak tekniği ile birleştirilmiş X70 numunesinin kaynak metallerinin mikroyapıları diğer numunelerin mikroyapılarından daha ince yapıya sahip olduğu görüldü.

Şekil 4.22.'te daha ayrıntılı bir görüntü olduğu için ferrit ve perlit bölgeleri göz ile rahat bir şekilde seçilmektedir. Şekil 4.22. (c) kodlu görüntüde bu ferrit ve perlitik yapılar ok çıkarılarak gösterilmiştir. Ferrit yapısı (α) olarak ve perlit yapısı da ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) olarak gösterilmiştir.

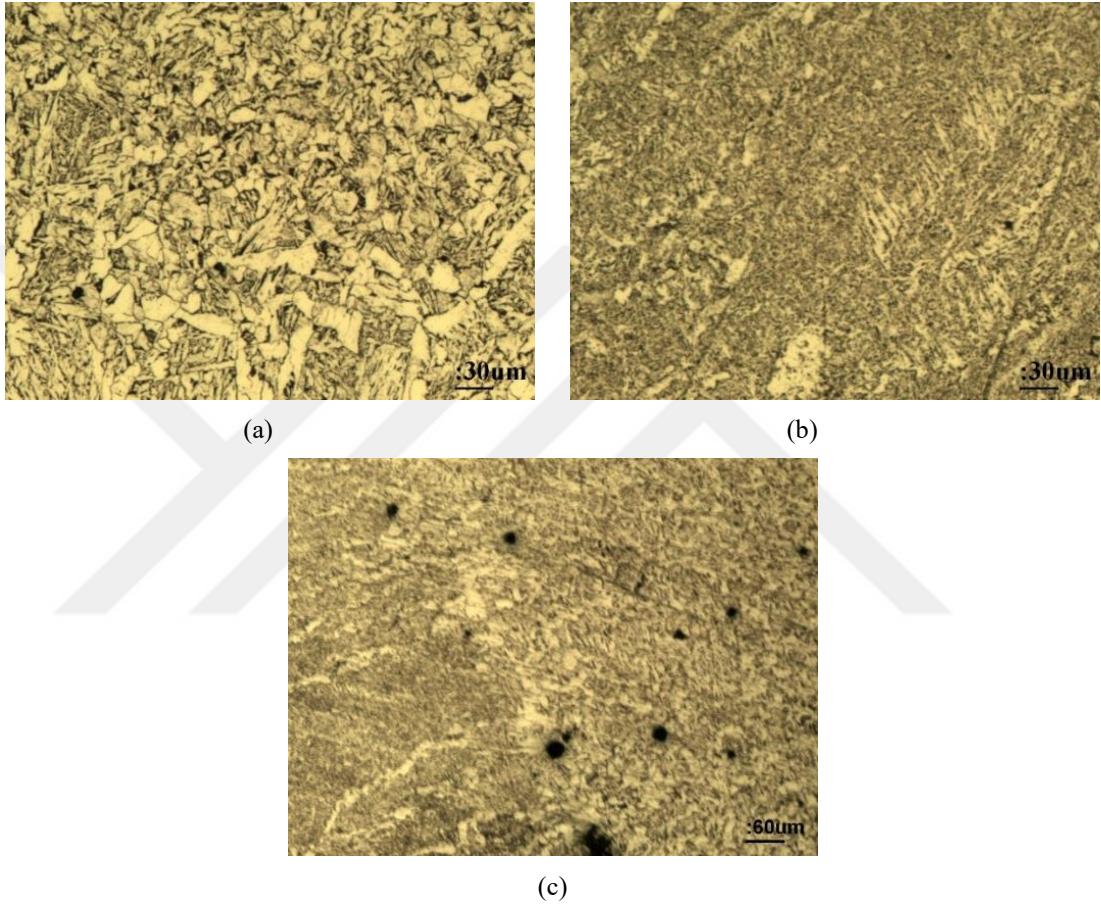
Şekil 4.23., Şekil 4.24. ve Şekil 4.25.'ta farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmiş X70 ve St 52 çelik malzemelerin ITAB, kaynak metali ve ITAB – kaynak metali geçiş bölgelerinin mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Görüntüler genel olarak incelendiğinde, tüm birleştirilmiş malzemelerin ITAB, kaynak metalleri ve kaynak ergime sınırına yakın bölgelerin benzer yapıda görüntüler sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 4.23. Bazı elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin mikro yapı fotoğrafları; (a) ITAB (b) Kaynak metali, (c) ITAB – Kaynak geçiş bölgesi

Şekil 4.23. incelendiğinde ITAB – kaynak metali geçiş bölgesinin görüntüsüne bakıldığında tanelerin ITAB bölgesinde iri, kaynak metali bölgesinde daha ince olduğu

görülmektedir. Aynı şekilde (a) ve (b) kodlu görüntüler tane yapıların görüntülerinin ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. ITAB ve kaynak metali mikro yapılarının neden farklı büyüklüklerde olduklarını bir önceki bölümde anlatmıştık. Alınan bu geçiş bölgesi optik mikro yapı görüntülerinin doğru olduğunun aynı şekilde kaynak işleminin düzgün sorunsuz bir şekilde yapıldığının kanıtıdır.

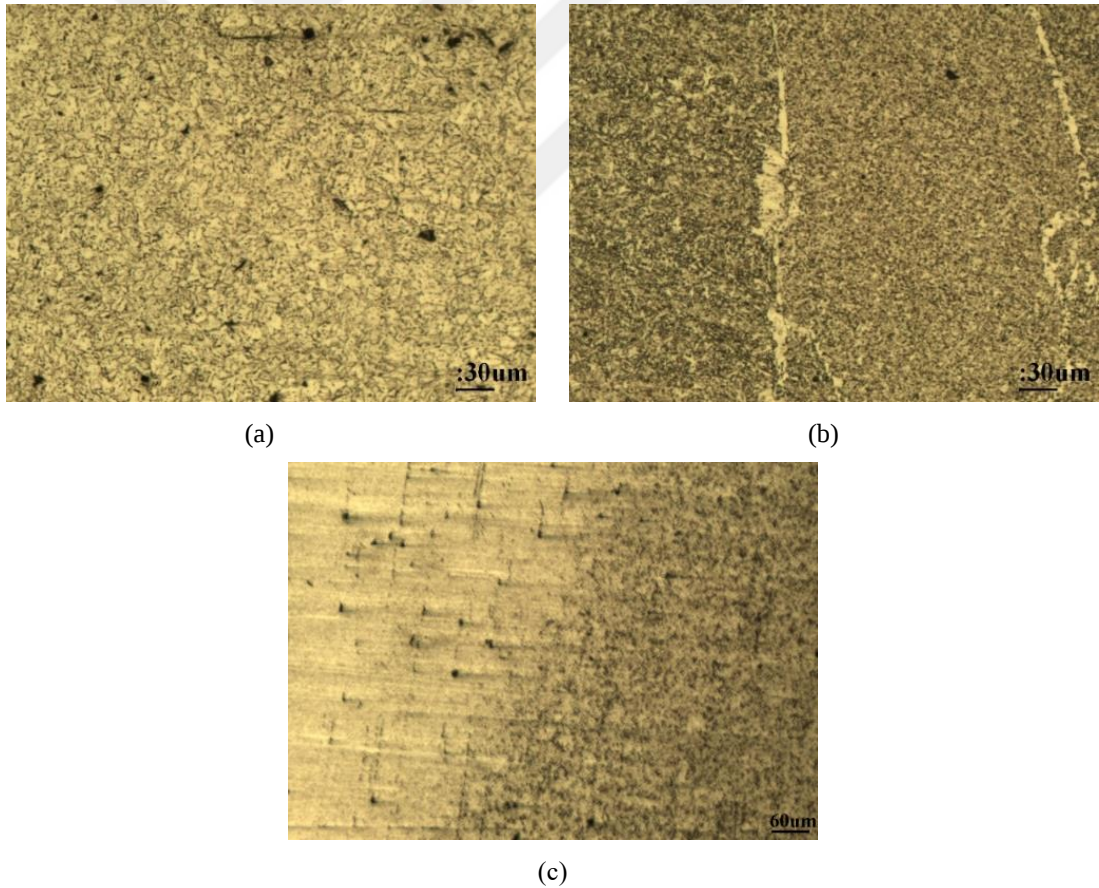


Şekil 4.24. Tozaltı kaynaklı St 52 çeliğinin mikro yapı fotoğrafları; (a) ITAB (b) Kaynak metali, (c) ITAB – Kaynak geçiş bölgesi

Şekil 4.24.'te görülen mikro yapılar incelendiğinde ITAB tane yapısının büyüdüğü, kolonsol yapıda olduğu ve ana metale doğru uzadığı gözlenmektedir. Tozaltı kaynak tekniğinde düşük hızlarda kaba ve kolonsal taneler elde edilirken, yüksek hızlarda ince ve düzensiz tane yapıları elde edildiği bilinmektedir [64].

Farklı tel ve toz kombinasyonları hariç tüm birleştirme işlemlerinde ısı girdisi aynı olduğundan ITAB ve kaynak metalleri tane boyutları birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

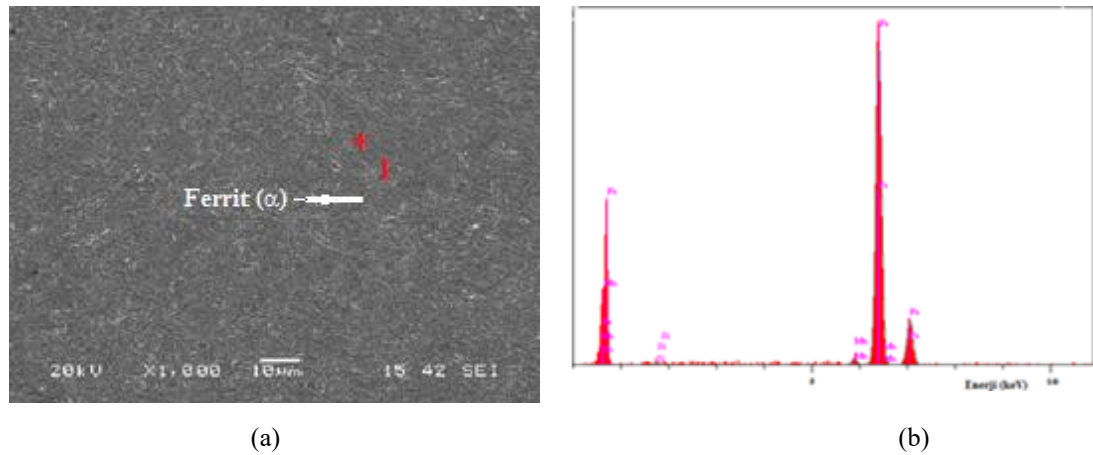
Şekil 4.24. (c) kodlu mikro yapı görüntüsü incelendiğinde ITAB bölgesinde iri, kaynak metali bölgesinde daha ince olduğu görülmektedir. ITAB bölgesinden kaynak metali bölgesine geçildiğinde nasıl bir tane küçülmesi olduğu görülmüştür. Aynı şekilde (a) ve (b) kodlu görüntüler tane yapıların görüntülerinin ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. ITAB ve kaynak metali mikro yapılarının neden farklı büyüklüklerde olduklarını bir önceki bölümde anlatmıştık. Alınan bu geçiş bölgesi optik mikro yapı görüntülerinin doğru olduğunun aynı şekilde kaynak işleminin düzgün sorunsuz bir şekilde yapıldığının kanıtıdır.



Şekil 4.25. Tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin mikro yapı fotoğrafları; (a) ITAB (b) Kaynak metali, (c) ITAB – Kaynak geçiş bölgesi

Şekil 4.25. incelendiğinde kaynak metali mikro yapılarının daha sık ince yapılar olduğu, ITAB mikro yapılarının daha iri ayrı yapılar olduğu görülmektedir. Şekil 4.25. (c) kodlu mikro yapı görüntüsü incelendiğinde ITAB bölgesinde iri, kaynak metali bölgesinde daha ince olduğu görülmektedir. ITAB bölgesinden kaynak metali bölgesine geçildiğinde nasıl bir tane küçülmesi olduğu görülmüştür. Aynı şekilde (a) ve (b) kodlu görüntüler tane yapıların görüntülerinin ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. ITAB ve kaynak metali mikro yapılarının neden farklı büyüklüklerde olduklarını bir önceki bölümde anlatmıştık. Alınan bu geçiş bölgesi optik mikro yapı görüntülerinin doğru olduğunun aynı şekilde kaynak işleminin düzgün sorunsuz bir şekilde yapıldığının kanıtıdır.

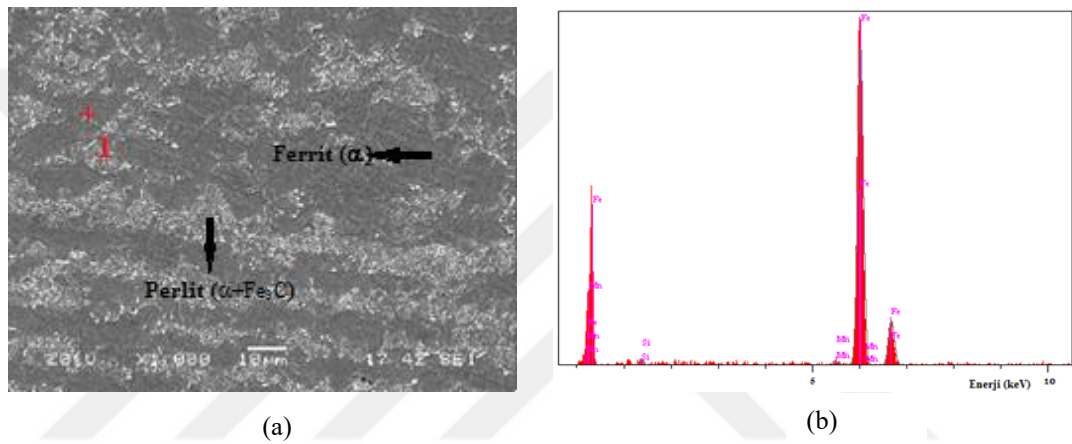
Farklı kaynak teknikleri ile birleştirilmiş X70 ve St 52 çeliklerin ana malzeme, ITAB ve kaynak metallerinin Şekil 4.26., Şekil 4.27., Şekil 4.28., Şekil 4.29., Şekil 4.30., Şekil 4.31., Şekil 4.32., Şekil 4.33. ve Şekil 4.34.'ta SEM görüntüleri ve EDS nokta analizleri verilmiştir. Şekil 4.26., Şekil 4.27. ve Şekil 4.28.'te çeliklerin ana malzemelerinin SEM görüntüleri ve belirtilen noktalardan alınan EDS nokta analizleri görülmektedir.



Şekil 4.26. Tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin ana malzemesinin (a) SEM görüntüsü, (b) EDS analizi

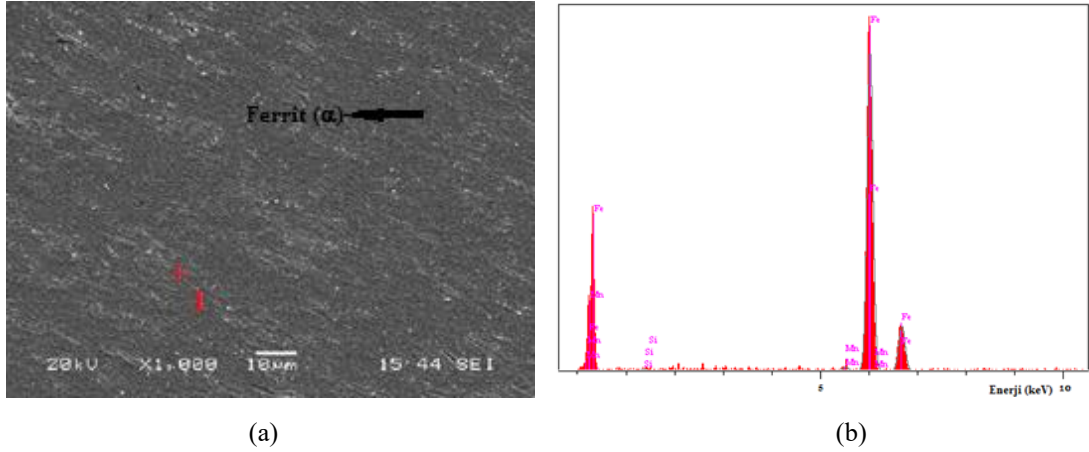
SEM görüntülerinin yanlarında verilen EDS nokta analizleri o malzemenin belirtilen noktalarından alınan kimyasal analiz sonuçlarını vermektedir. SEM mikroyapı görüntüleri incelendiğinde numunelerin ana malzemelerinin birbirine benzer mikroyapılar gösterdiği görülmektedir.

Şekil 4.26. incelendiğinde genel bir ferrit ve perlitik yapıların görüldüğü belirlenmiştir. Ferrit bölgesi ok çıkartılarak ferrit (α) olarak işaretlenmiştir. SEM görüntüsünde belirtilen noktadan EDS analiz sonucu Şekil 4.26.(b)'te verilmiştir. EDS sonucu incelendiğinde yapının büyük bir çoğunluğunu Fe atomu oluşturmaktadır. Düşük seviyelerde Mn ve Si atomuna rastlanmıştır. Materyal ve yöntem bölümünde X70 ve St 52 çelik malzemelerinin kimyasal analiz sonuçlarından bahsetmiştik. X70 çelik malzemesinin yapısında düşük seviyelerde Mn ve Si atomu olduğu bilinmektedir. Alınan EDS analizi sonucu bu durumu kanıtlamıştır.



Şekil 4.27. Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin ana malzemesinin (a) SEM görüntüsü, (b) EDS analizi

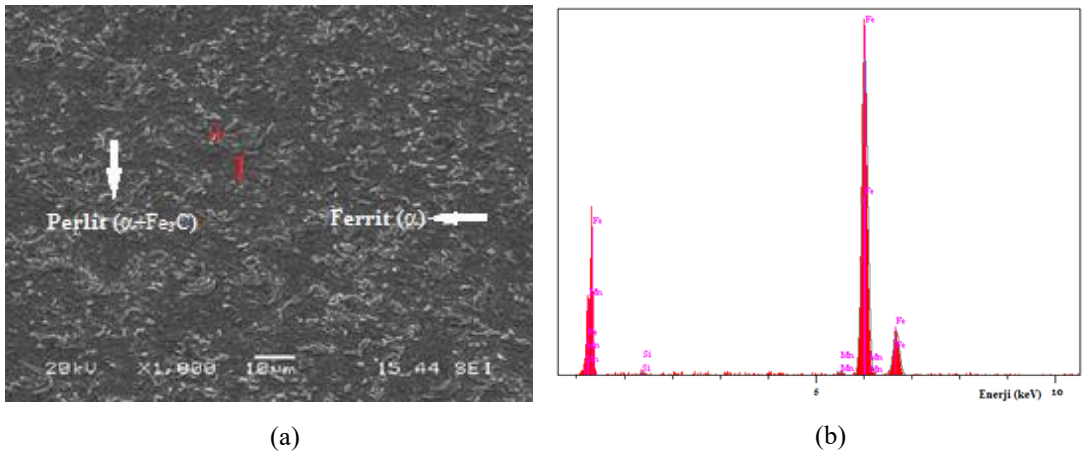
Şekil 4.27. incelendiğinde genel mikroyapıları, karmaşık ferrit ve perlitik yapılardan oluşmaktadırlar. Bu ferrit ve perlitik yapılar ok çıkarılarak gösterilmiştir. Ferrit yapısı (α) olarak ve perlit yapısı da (α +Fe₃C) olarak gösterilmiştir. SEM mikro yapı görüntüsü üzerinde belirtilen noktadan alınan EDS sonucu Şekil 4.27.(b)'te görülmektedir. Ana malzemelerin genel kimyasal bileşikleri ağırlıklı olarak Fe ve düşük seviyelerde Mn ve Si atomuna rastlanmıştır. Materyal ve yöntem bölümünde X70 ve St 52 çelik malzemelerinin kimyasal analiz sonuçlarından bahsetmiştik. X70 çelik malzemesinin yapısında düşük seviyelerde Mn ve Si atomu olduğu bilinmektedir. Alınan EDS analizi sonucu bu durumu kanıtlamıştır.



Şekil 4.28. Tozaltı kaynaklı St 52 çeliğinin ana malzemesinin (a) SEM görüntüsü, (b) EDS analizi

Şekil 4.28. incelendiğinde genel mikroyapıları, karmaşık ferrit ve perlitik yapılardan oluşmaktadırlar. Bu ferrit yapılar ok çıkarılarak gösterilmiştir. Ferrit yapısı (α) olarak gösterilmiştir. SEM mikro yapı görüntüsü üzerinde belirtilen noktadan alınan EDS sonucu Şekil 4.28.(b)'te görülmektedir. EDS sonuçlarına bakıldığında malzemenin büyük bir çoğunluğu Fe atomundan oluşmaktadır. Düşük seviyelerde Si ve Mn atomuna da rastlanmıştır. Materyal ve yöntem bölümünde St 52 çelik malzemesinin kimyasal analiz sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlarda St 52 çeliği içerisinde düşük seviyelerde Si ve Mn atomuna rastlanmıştır. Bu da alınan SEM ve EDS analiz sonuçlarının doğru olduğunun kanıtıdır.

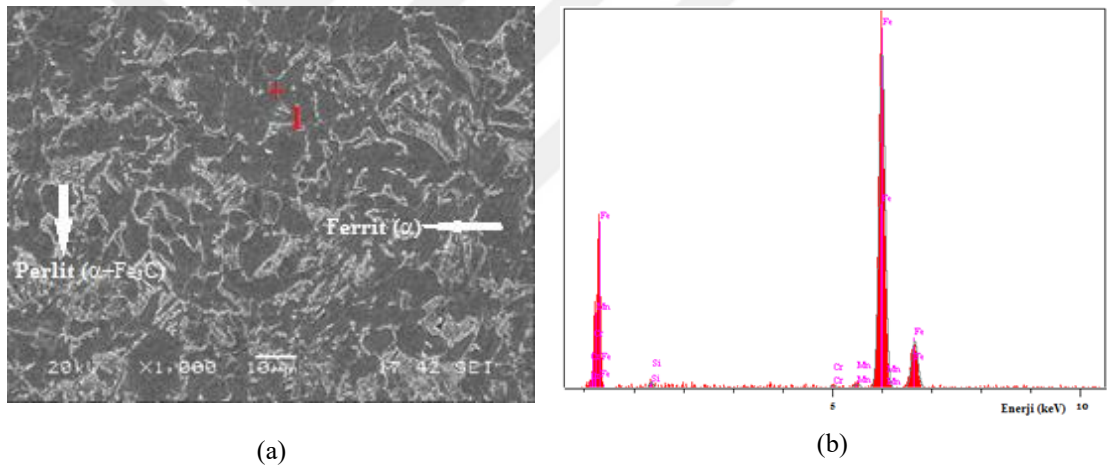
Şekil 4.29., Şekil 4.30. ve Şekil 4.31.'te numunelerin ITAB'larının SEM görüntüleri ve belirtilen noktalardan alınan EDS nokta analizleri sonucu görülmektedir.



Şekil 4.29. Tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin ITAB'ın (a) SEM görüntüsü, (b) EDS analizi

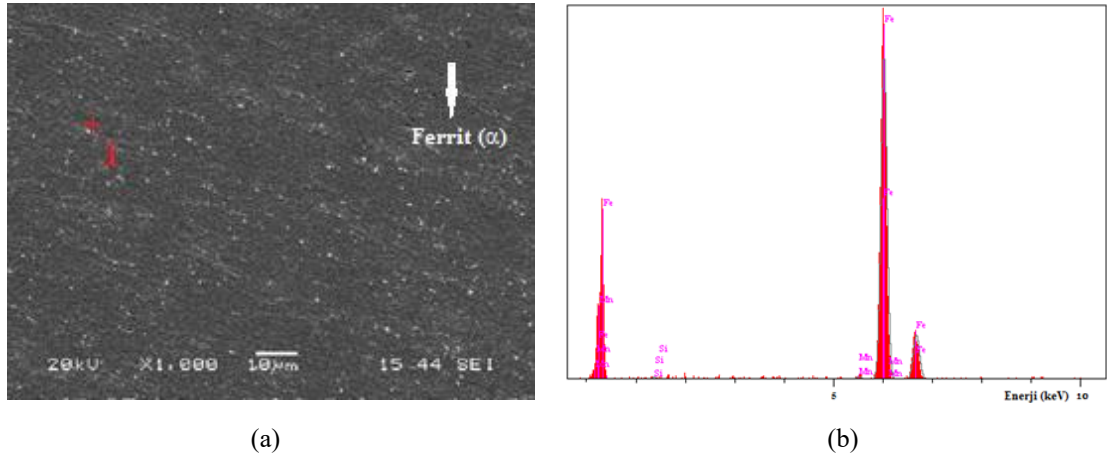
Genel olarak bakıldıklarında ana malzemelerin mikroyapılarına oranla ITAB mikroyapılarının daha büyük tane yapılarına sahip olduğu gözlenmiştir. ITAB yapısının ana malzemelere oranla daha büyük tane yapılara sahip olma nedenlerini bir önceki bölümde anlatmıştık.

Şekil 4.29. incelendiğinde genel mikroyapıları, karmaşık ferrit ve perlitik yapılardan oluşmaktadırlar. Bu ferrit ve perlitik yapılar ok çıkarılarak gösterilmiştir. Ferrit yapısı (α) olarak ve perlit yapısı da ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) olarak gösterilmiştir. SEM mikro yapı görüntüsü üzerinde belirtilen noktadan alınan EDS sonucu Şekil 4.29.(b)'te görülmektedir. EDS sonuçlarına bakıldığında malzemenin büyük bir çoğunluğu Fe atomundan oluşmaktadır. Düşük seviyelerde Si, Mn ve Cr atomuna da rastlanmıştır. Bu farklı elementlerin oluşu kaynak sırasında ilave metalden gelmektedir.



Şekil 4.30. Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin ITAB'ın (a) SEM görüntüsü, (b) EDS analizi

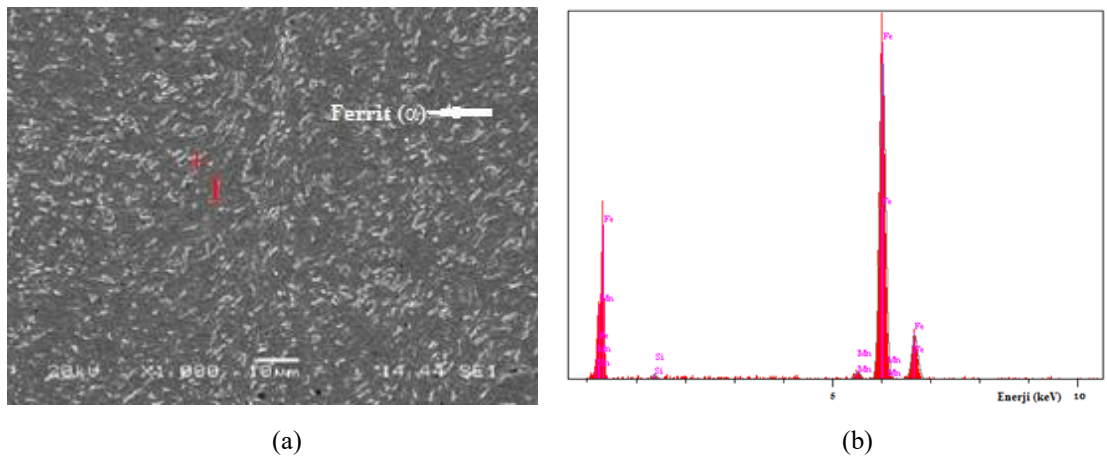
Şekil 4.30. incelendiğinde genel mikroyapıları, karmaşık ferrit ve perlitik yapılardan oluşmaktadırlar. Bu ferrit ve perlitik yapılar ok çıkarılarak gösterilmiştir. Ferrit yapısı (α) olarak ve perlit yapısı da ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) olarak gösterilmiştir. SEM mikro yapı görüntüsü üzerinde belirtilen noktadan alınan EDS sonucu Şekil 4.30.(b)'te görülmektedir. EDS sonuçlarına bakıldığında malzemenin büyük bir çoğunluğu Fe atomundan oluşmaktadır. Düşük seviyelerde Si, Mn ve Cr atomuna da rastlanmıştır. Bu farklı elementlerin oluşu kaynak sırasında ilave metalden gelmektedir.



Şekil 4.31. Tozaltı kaynaklı St 52 çeliğinin ITAB'ın (a) SEM görüntüsü, (b) EDS analizi

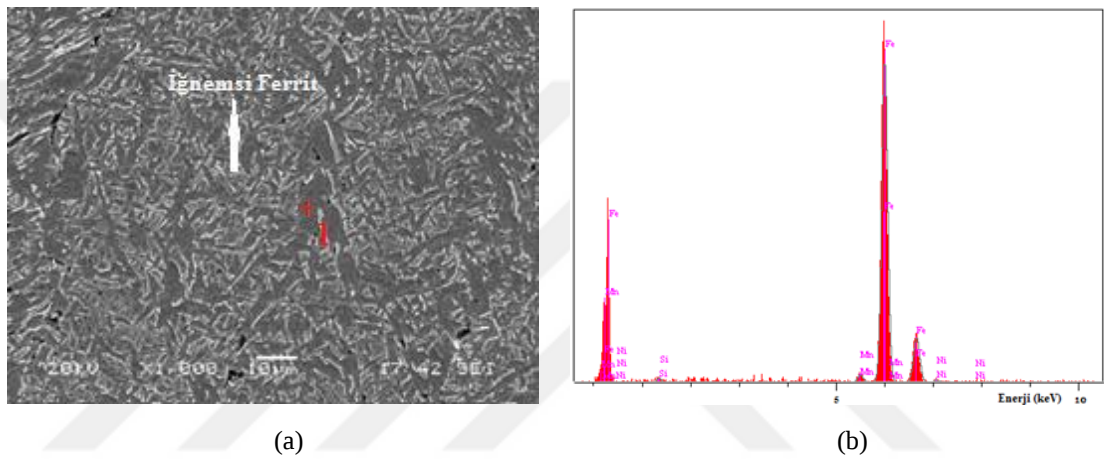
Şekil 4.31. incelendiğinde genel mikroyapıları, karmaşık ferrit ve perlitik yapılardan oluşmaktadır. Bu ferrit yapılar ok çıkarılarak ferrit (α) olarak gösterilmiştir. SEM mikro yapı görüntüsü üzerinde belirtilen noktadan alınan EDS sonucu Şekil 4.31.(b)'te görülmektedir. EDS sonuçlarına bakıldığında malzemenin büyük bir çoğunluğu Fe atomundan oluşmaktadır. Düşük seviyelerde Si, Mn ve Cr atomuna da rastlanmıştır. Bu farklı elementlerin oluşu kaynak sırasında ilave metalden gelmektedir.

Şekil 4.32., Şekil 4.33. ve Şekil 4.34.'te numunelerin kaynak metalinin SEM görüntüleri ve belirtilen noktalardan alınan EDS nokta analizleri görülmektedir. Kaynak metali mikroyapıları incelendiğinde yine ferrit ve perlitik yapılardan oluştuğu söylenebilir. Tanelerin iriliği ITAB bölgesindeki tanelere göre daha küçük fakat ana malzemeye göre daha büyük yapılıdır.



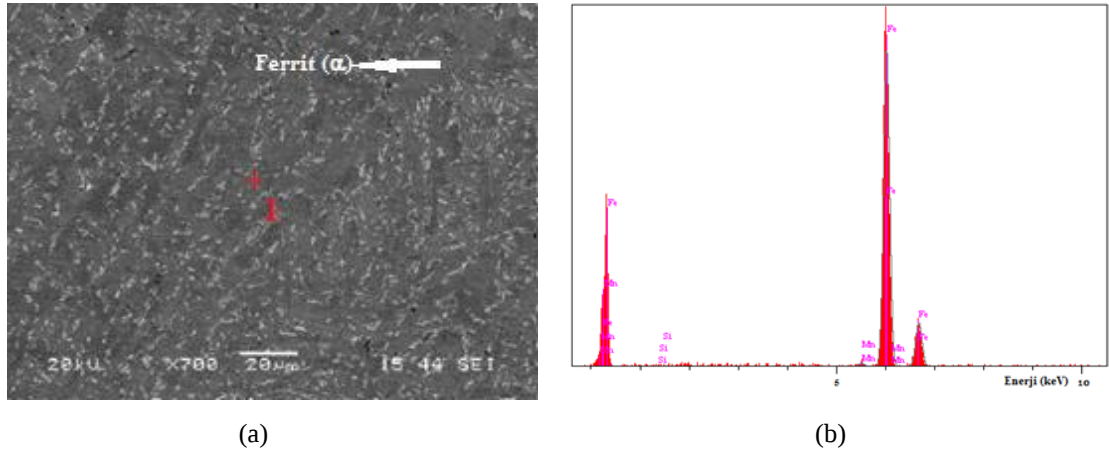
Şekil 4.32. Tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin kaynak metalinin (a) SEM görüntüsü, (b) EDS analizi

Şekil 4.32. incelendiğinde yapıların tipik eş eksenli ferrit ve perlitik yapıdan oluştuğu görülmektedir. Bu ferrit yapılar ok çıkarılarak ferrit (α) olarak gösterilmiştir. SEM mikro yapı görüntüsü üzerinde belirtilen noktadan alınan EDS sonucu Şekil 4.32.(b)'te görülmektedir. EDS sonuçlarına bakıldığında malzemenin büyük bir çoğunluğu Fe atomundan oluşmaktadır. Düşük seviyelerde Si ve Mn atomuna da rastlanmıştır. Bu farklı elementlerin oluşu kaynak sırasında ilave metalden gelmektedir. Alınan SEM görüntüsü ve EDS sonuçlarının doğru olduğu ve aynı zamanda kaynak işleminde doğru ve düzgün sorunsuz bir şekilde yapıldığını kanıtlamıştır.



Şekil 4.33. Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin kaynak metalinin (a) SEM görüntüsü, (b) EDS analizi

Şekil 4.33. incelendiğinde yapıların tipik eş eksenli ferrit ve perlitik yapıdan ve iğnemsî ferrit yapısından oluştuğu görülmektedir. Bu iğnemsî ferrit yapısı ok çıkarılarak gösterilmiştir. SEM mikro yapı görüntüsü üzerinde belirtilen noktadan alınan EDS sonucu Şekil 4.33.(b)'te görülmektedir. Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin EDS nokta analizini incelendiğinde yapının büyük bir bölümünü Fe atomu oluşturmaktadır. Ana malzemede olmayan Ni elementine rastlanmıştır. Ayrıca Mn ve Si element değerlerinde de artma olduğu belirlenmiştir. Bu da kaynak esnasında kullanılan ilave telin yapısından geldiğinin göstergesidir. Alınan SEM görüntüsü ve EDS sonuçlarının doğru olduğu ve aynı zamanda kaynak işleminde doğru ve düzgün sorunsuz bir şekilde yapıldığını kanıtlamıştır.

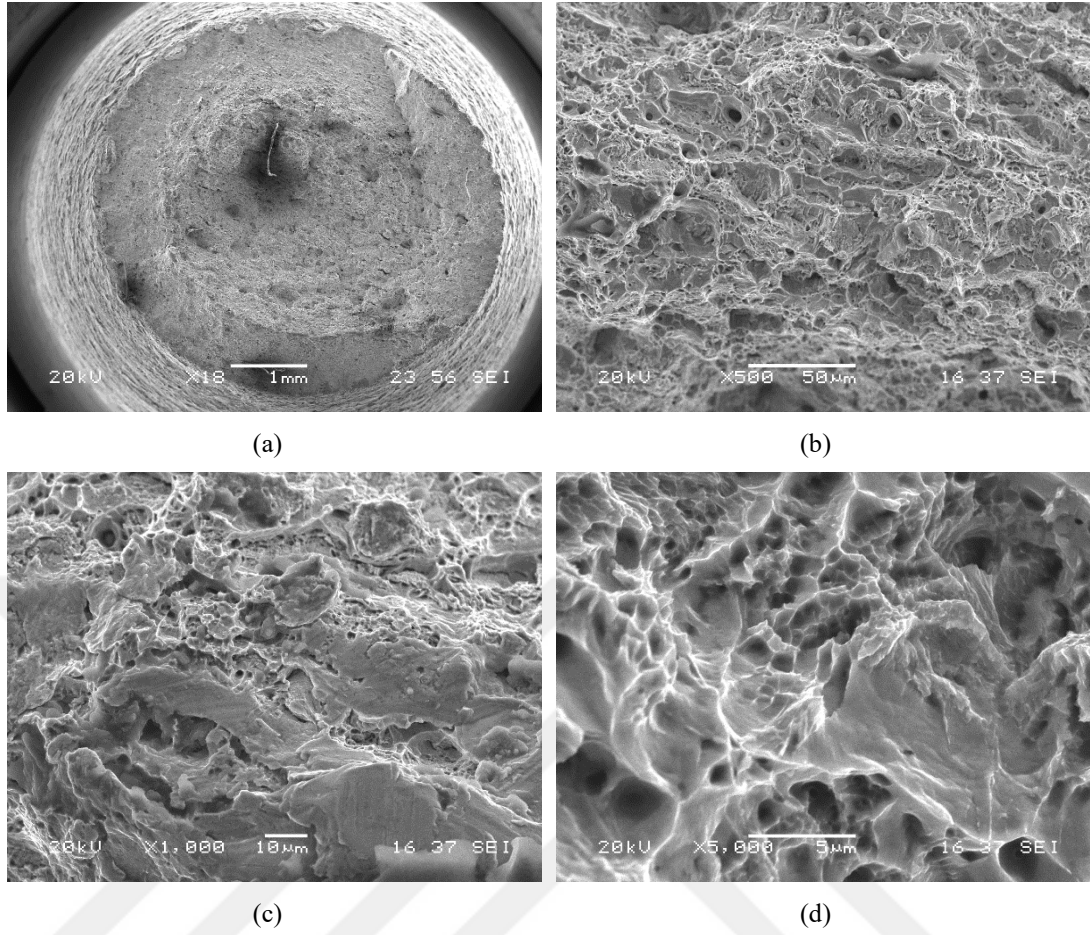


Şekil 4.34. Tozaltı kaynaklı St 52 çeliğinin kaynak metalinin (a) SEM görüntüsü, (b) EDS analizi

Şekil 4.34. incelendiğinde yapıların tipik eş eksenli ferrit ve perlitik yapıdan oluştuğu görülmektedir. Bu ferrit yapılar ok çıkarılarak ferrit (α) olarak gösterilmiştir. SEM mikro yapı görüntüsü üzerinde belirtilen noktadan alınan EDS sonucu Şekil 4.34.(b)'te görülmektedir. EDS sonuçlarına bakıldığında malzemenin büyük bir çoğunluğu Fe atomundan oluşmaktadır. Aynı durum tozaltı kaynak tekniği ile kaynatılmış X70 ve St 52 çeliklerinde de gözlenmiştir. İlave malzemeler kaynak metalinin kimyasal yapısını değiştirdiği EDS nokta analizlerden kanıtlanmıştır [61, 64]. EDS analiz sonuçları gösteriyor ki X70 ve St 52 çeliklerini birleştirmek için yapılan farklı kaynak işlemleri sorunsuz olarak geçmiş. Aynı zamanda kaynak işlemlerinin doğru yapıldığı kanıtlanmıştır. Benzer sonuçlar bulunmuştur [69, 73].

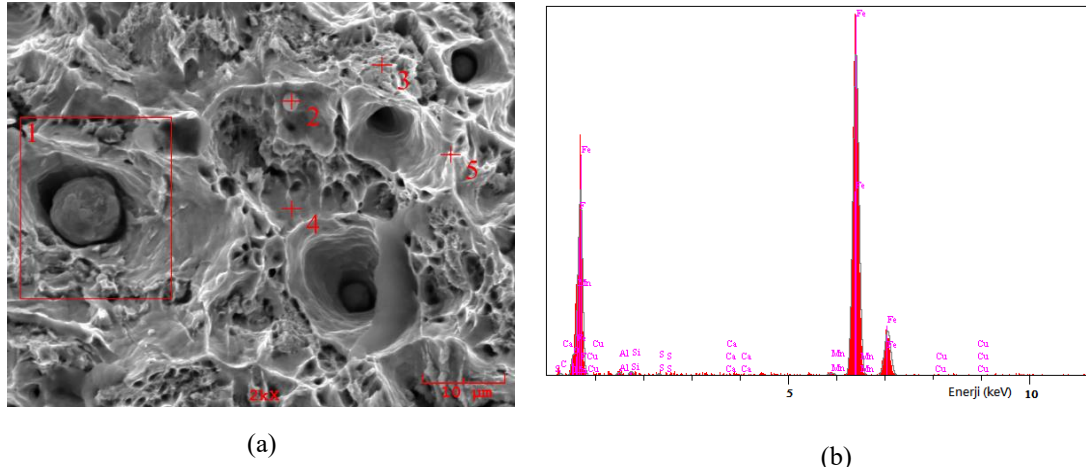
4.7. Mekanik Deneyler Kırık Yüzey İncelemeleri

Çekme deneyi sonrası farklı kaynak teknikleri ile kaynatılan X70 ve St 52 çelik numunelerin kırılan yüzeylerinin incelemesi yapılmıştır. Bu kırık yüzeylerin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri alınmış ve belirlenen noktalardan EDS nokta analizleri alınmıştır. Şekil 4.35., Şekil 4.37. ve Şekil 4.39.'te farklı kaynak teknikleri ile birleştirilen X70 ve St 52 çelik numunelerin kırılan yüzeylerinin farklı büyütmelerde çekilmiş SEM mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Şekil 4.36., Şekil 4.38. ve Şekil 4.40.'te ise bu numunelerin kırılan yüzeylerin alınan EDS analizleri ve bu noktaların SEM fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 4.35. Bazık elektrod ile kaynaklanmış X70 çelik numunesinin kırık yüzeyinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri

Şekil 4.35.'te bazık elektrod ile kaynaklanmış X70 çelik numunesinin kırık yüzeyinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.35. incelendiğinde bazık elektrod ile kaynaklı X70 numunesinin çekme deneyi sonrası sünek kırıldığı gözlenmiştir. SEM fotoğraflarındaki mikroboşluklar sünek kırılma olduğunun kanıtıdır. Şekil 4.35.(c)'de tane içi çatlama bölgeleri göze çarpmaktadır. Çekme mukavemeti - % uzama grafiğine bakıldığında malzemenin uzama miktarının fazla olduğu bunun göstergesidir. Şekil 4.36.'te SEM görüntüsü ve belirlenen noktalardan alınan EDS nokta analiz sonuçları verilmiştir [74].

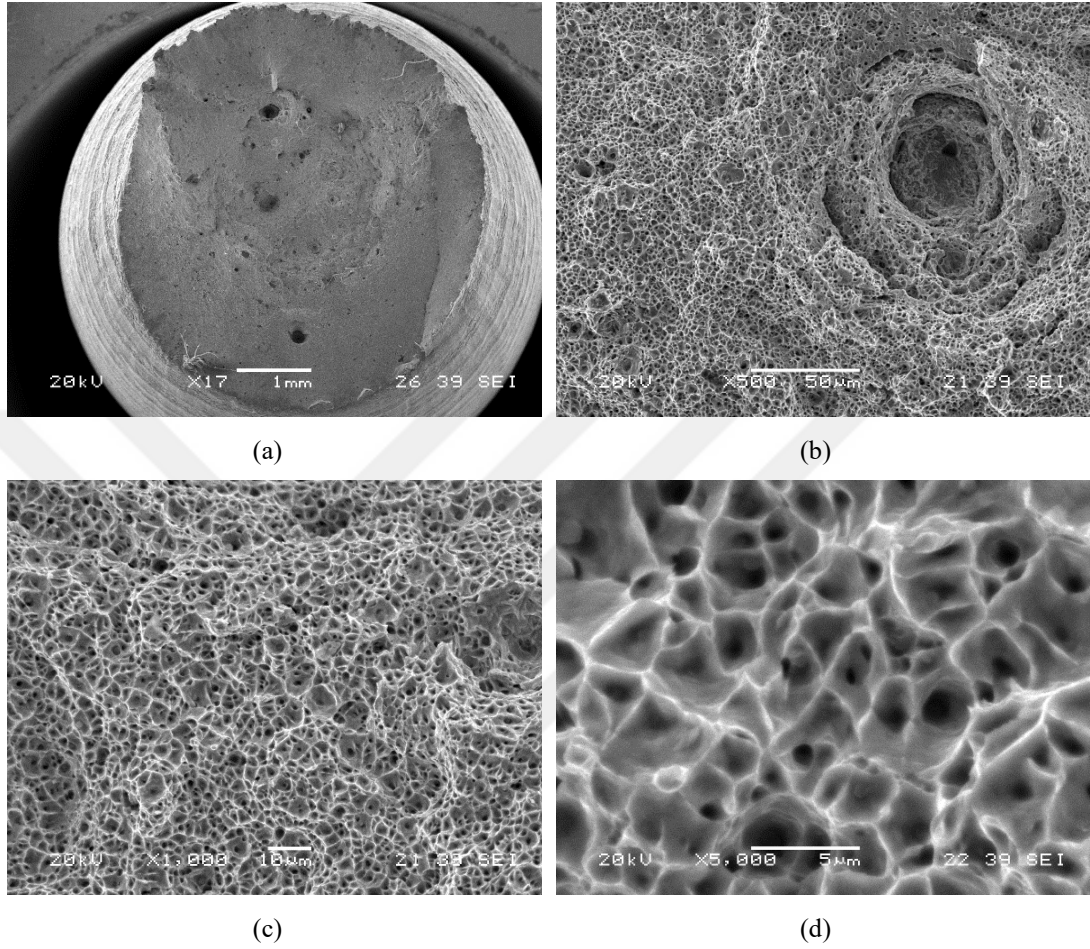


Şekil 4.36. Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin kırık yüzey SEM görüntüsü ve belirlenen noktalardan alınan EDS nokta analiz sonuçları

Şekil 4.36.’teki SEM fotoğrafında EDS analizi için belirlenen beş nokta gözükmemektedir. Bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinin EDS analiz sonucuna bakıldığında ağırlıklı olarak Fe atomuna ulaşılmış ve ayrıca Al, Ca, Cu, S elementlerine rastlanmıştır.

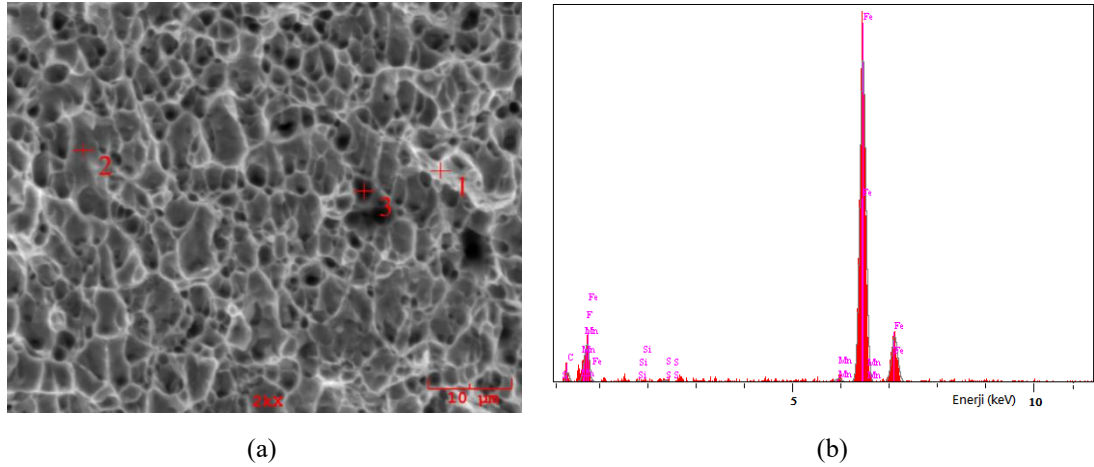
Çekme deneyi testi sonucunda bütün numuneler ana malzeme bölgesinden kopmuştur. Ana malzemeden kopma sebebi birleştirme işlemi sonrasında kaynak metalinin daha ince yapılı ve daha sert bir yapı oluşturmasıdır. Bu EDS sonuçlarına bakıldığı zaman da ana malzeme içerisine olan ve aynı değerlere sahip olan Si ve Mn atomu değerine rastlanmıştır. Kırılan yüzeyden alınan EDS sonucu X70 malzemesinin ana malzemesinden alınan EDS sonuçları ile benzer olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar da materyal ve yöntem bölümünde yapılan kimyasal analizinin, kaynak işleminin, çekme deney testinin ve bunun sonucunda olan kırık yüzeylerin SEM ve EDS analizi sonuçlarının doğru olduğunu hiçbir sorun olmadan yapıldığını kanıtlamıştır.

Şekil 4.37.'te tozaltı kaynaklı X70 çelik numunesinin kırık yüzeyinin farklı büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.37. Tozaltı kaynaklı X70 çelik numunesinin kırık yüzeyinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri

Şekil 4.37.'te tozaltı kaynak tekniği ile kaynaklı X70 çeliğinin farklı büyütmelerdeki kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.37. incelendiğinde tozaltı kaynaklı X70 çeliği çekme deneyi sonucunda sünek kırıldığı belirlenmiştir. SEM mikroyapı fotoğraflarındaki sünek kırılmanın karakteristik özelliği olan mikroboşluklar sünek kırılma olduğunu göstermektedir. SEM görüntülerindeki mikroboşluklar sünek kırılma olduğunun kanıtıdır. Deneysel bulgular bölümündeki çekme mukavemeti - % uzama grafiği sonucuna bakıldığında malzemenin uzama miktarının fazla olduğu bunun göstergesidir. Şekil 4.38.'te tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin SEM görüntüsü ve belirlenen noktalardan alınan EDS analizi sonucu verilmiştir.

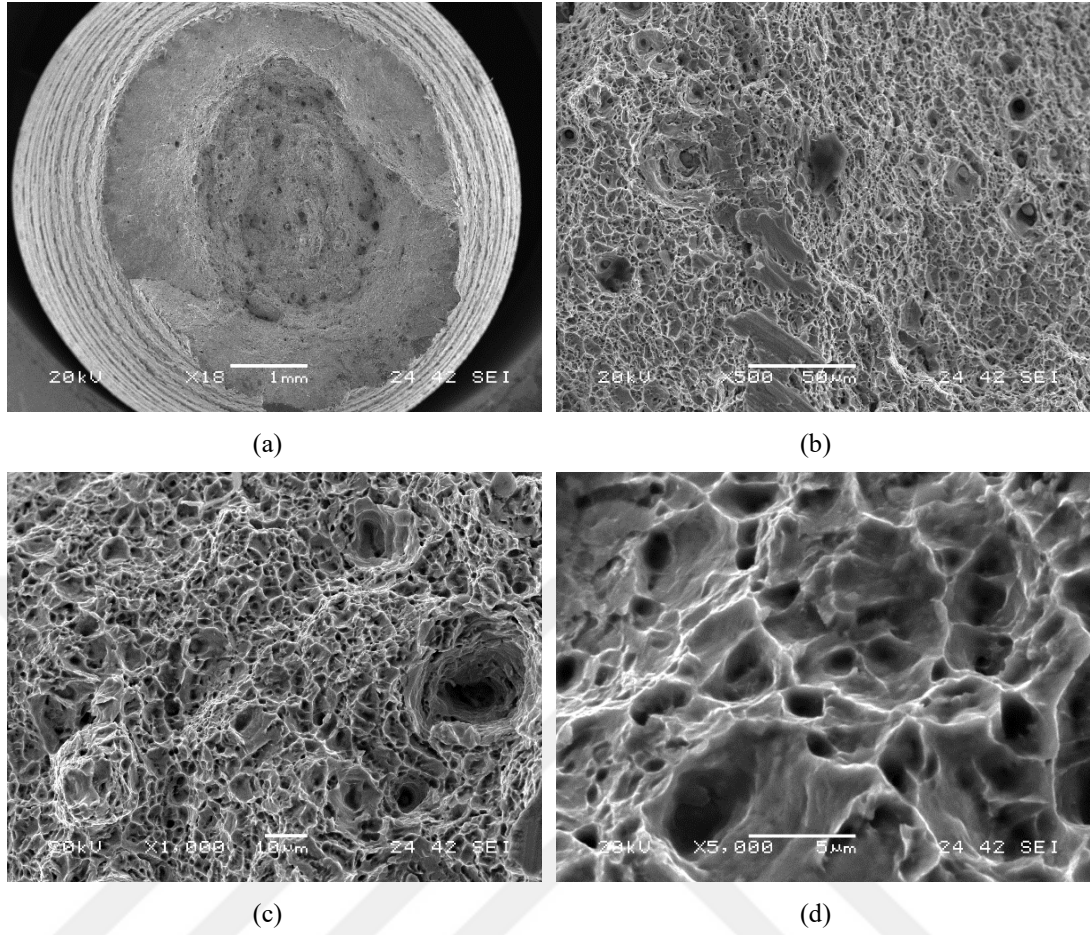


Şekil 4.38. Tozaltı kaynaklı X70 çeliğinin kırık yüzey SEM görüntüsü ve belirlenen noktalardan alınan EDS nokta analiz sonuçları

Şekil 4.38. incelendiğinde SEM görüntüsündeki EDS analizi için belirlenen 3 nokta gözükmemektedir. Şekil 4.38.(b)'de bu üç noktadan alınan EDS sonuçları görülmektedir. EDS sonucu incelendiğinde 1, 2 ve 3 numaralı noktaların büyük bir bölümde Fe atomuna rastlanmıştır. 3 numaralı koyu bölgede C oranı diğer bölgelerde göre daha fazladır.

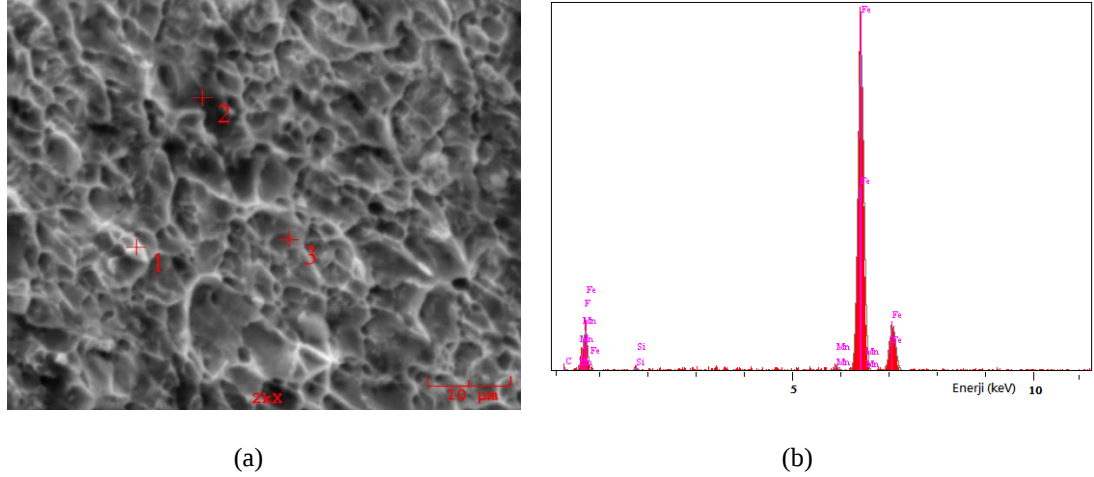
Çekme deneyi testi sonucunda bütün numuneler ana malzeme bölgesinden kopmuştur. Aynı şekilde tozaltı kaynaklı X70 çeliği de ana malzeme bölgesinden kopmuştur. Ana malzemedan kopma sebebi birleştirme işlemi sonrasında kaynak metalinin daha ince yapılı ve daha sert bir yapı oluşturmasıdır. Bu EDS sonuçlarına bakıldığı zaman da ana malzeme içerisine olan ve aynı değerlere sahip olan Si ve Mn atomu değerine rastlanmıştır. Kırılan yüzeyden alınan EDS sonucu X70 malzemesinin ana malzemesinden alınan EDS sonuçları ile benzer olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar da materyal ve yöntem bölümünde yapılan kimyasal analizinin, kaynak işleminin, çekme deney testinin ve bunun sonucunda olan kırık yüzeylerin SEM ve EDS analizi sonuçlarının doğru olduğunu hiçbir sorun olmadan yapıldığını kanıtlamıştır.

Şekil 4.39.'te tozaltı kaynaklı St 52 çelik numunesinin kırık yüzeyinin farklı büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.39. Tozaltı kaynaklı St 52 çelik numunesinin kırık yüzeyinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri

Şekil 4.39.'daki SEM fotoğrafları incelendiğinde tozaltı kaynaklı St 52 çelik numunesinin sünek kırıldığı, sünek kırılmanın karakteristik özelliği olan mikroboşluklar göstermektedir. Şekil 4.39.(b)'de tane içi çatlamlar göze çarpmaktadır. SEM görüntülerindeki mikroboşluklar sünek kırılma olduğunun kanıtıdır. Deneysel bulgular bölümündeki çekme mukavemeti - % uzama grafiği sonucuna bakıldığında malzemenin uzama miktarının fazla olduğu bunun göstergesidir. Şekil 4.40.'te ise SEM görüntüsü ve belirlenen noktalardan alınan EDS nokta analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.40. Tozaltı kaynaklı St 52 çeliğinin kırık yüzey SEM görüntüsü ve belirlenen noktalardan alınan EDS nokta analiz sonuçları

Şekil 4.40.'teki SEM fotoğrafında EDS analizi için belirlenen 3 nokta gözükmemektedir. EDS analiz sonucu incelendiğinde üç farklı noktada ağırlıklı olarak Fe elementine rastlanmıştır. 1 ve 2 numaralı bölgelerdeki C ve F değerleri 3 numaralı bölgeye göre daha yüksek çıkmıştır. X70 çeliği EDS analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında C oranının St 52'de daha fazla olduğu ve bu sonucun kimyasal bileşim sonuçları ile aynı olduğu belirlenmiştir. EDS analiz sonuçları bu olayı ispatlamıştır.

4.8. Taguchi Deney Sonuçları

Taguchi yöntemi, performansı, kaliteyi ve maliyeti optimize etmek için basit, verimli ve sistematik bir yaklaşım sağlar. Yöntemin ana ilkesi, oluşturulan ortogonal dizi sayesinde minimum sayıda deney yaparak, deney parametrelerinin sonuca etkisini tespit etmektir.

Tozaltı kaynak tekniği ile kaynatılan X70 ve St 52 malzemelerinin, amperin ve kaynak hızının, sertliğe etkisini tespit edebilmek için Minitab programı tarafından L_{16} ortogonal dizi oluşturulmuştur. Tablo 4.1.'te L_{16} dizisine göre hazırlanmış deney tasarım tablosu verilmiştir.

Tablo 4.1. L₁₆ ortogonal dizisine göre deney tasarımı

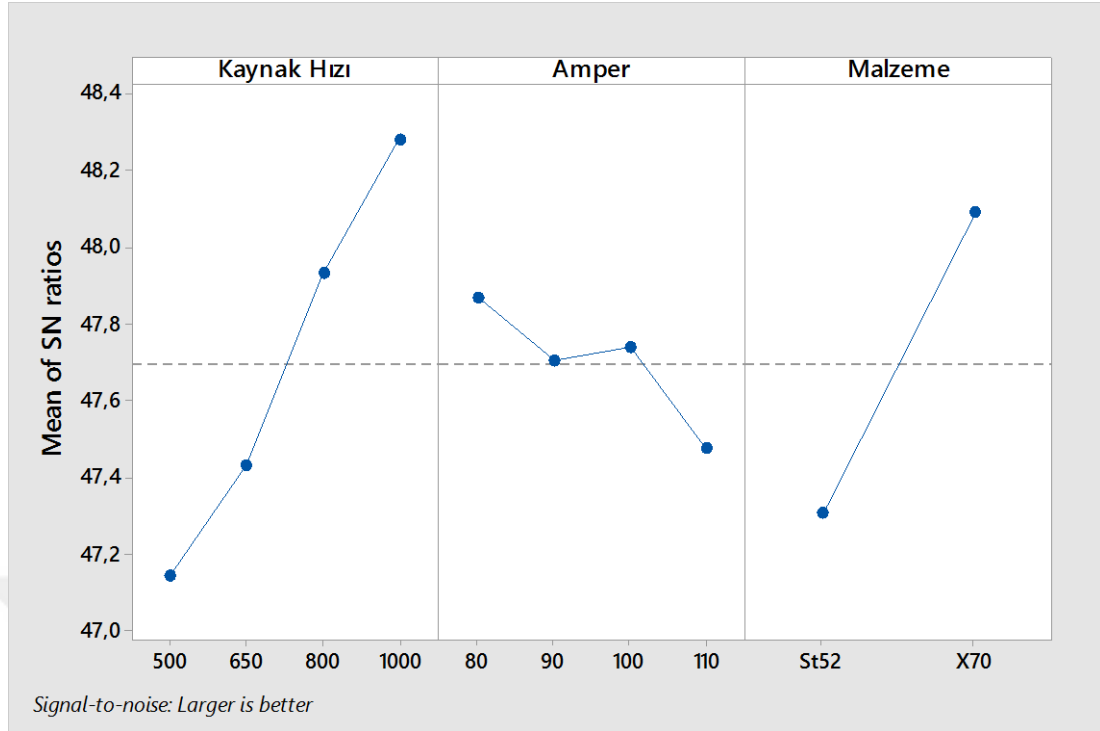
Kaynak Hızı	Amper	Kaynak Malzemesi
500	80	St52
500	90	St52
500	100	X70
500	110	X70
650	80	St52
650	90	St52
650	100	X70
650	110	X70
800	80	X70
800	90	X70
800	100	St52
800	110	St52
1000	80	X70
1000	90	X70
1000	100	St52
1000	110	St52

Tablo 4.1.'te verilen listeye göre deneyler yapılmış ve kaynak bölgelerinden sertlikler alınmıştır. L₁₆ ortogonal dizisine göre yapılan deneylerden elde edilen sertlik sonuçları Tablo 4.2.'te verilmiştir.

Tablo 4.2. L₁₆ ortogonal dizisine göre yapılan deneylerden elde edilen sertlik sonuçları

Deney Parametreleri			Sertlik Sonuçları	
Kaynak Hızı (A)	Amper (B)	Kaynak Malzemesi (C)	Kaynak Bölgesi	ITAB
500	80	St52	223	192
500	90	St52	221	187
500	100	X70	244	198
500	110	X70	223	194
650	80	St52	227	195
650	90	St52	223	192
650	100	X70	248	200
650	110	X70	244	195
800	80	X70	266	229
800	90	X70	261	201
800	100	St52	236	215
800	110	St52	235	209
1000	80	X70	278	244
1000	90	X70	270	233
1000	100	St52	247	228
1000	110	St52	244	223

Taguchi deney tasarım yöntemi, deney parametrelerinin sonuçlara etkisini tespit edebilmek için sinyal-gürültü (S/N) oranından yararlanmaktadır. Taguchi yöntemine göre, S/N oranı en yüksek olan parametreler en iyi sonucu vermektedir. Minitab programı tarafından hesaplanan S/N eğrileri Şekil 4.41.'te verilmiştir.



Şekil 4.41. Minitab programı tarafından oluşturulan S/N eğrileri

Bu grafiğe en iyi sertlik sonuçlarının $A_4B_1C_2$ parametrelerinde olduğu tespit edilmiştir. Literatüre göre kaynak hızı arttıkça ve amper düştükçe sertlik artmaktadır. Bu sonuçlar literatürle örtüşmektedir. Aynı zamanda bu grafiğe göre, X70 malzemeden ölçülen sertlik değerlerinin, St 52 ye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Varyans analizi, faktörlerin deney sonuçlarına katkısını ölçen bir yöntemdir [75].

Tablo 4.3. Deney parametrelerinin sertliğe etkisinin gösterildiği varyans analizi (ANOVA) tablosu

Source	DF	SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Yüzde Etki (% E)
Kaynak Hızı	3	3,0758	3,0758	1,02528	33,16	0,000	% 50,4
Amper	3	0,3259	0,3259	0,10864	3,51	0,042	%5,3
Malzeme	1	2,4551	2,4551	2,45506	79,41	0,000	%40,2
Residual Error	8	0,2473	0,2473	0,03092			%4,1
Total	15	6,1041					%100

Tablo 4.3. incelendiğinde bizim için önemli olan değer “P” değeridir. “P” değerinin 0,05’ten değerinden düşük bulunması sonucun istatistiksel olarak anlamlı olduğunu

göstermektedir [76]. Bu çalışmada hesaplanan “P” değeri, $0,0042 < 0,05$ olduğu için elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak anlamlıdır. Bir diğer önemli parametre ise “Yüzde Etki”dir. Bu parametre, deney parametrelerinin sonuçlara etkisinin yüzdesini vermektedir ve şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$\%E = \frac{SS_d}{SS_T} \quad (4.18)$$

Burada SS_d ; faktörün hata kareleri ortalaması, SS_T ise toplam hata kareleri ortalamasıdır. Varyans analizine göre sertliğe en yüksek etkisi olan parametre, Kaynak hızı (%50,4) olarak hesaplanmıştır. Diğer etkili parametre ise malzeme seçimi (%40,2), en düşük etkiye sahip olan parametre de Amper (%5,3) olarak tespit edilmiştir. Son olarak ta varyans analizi tablosuna göre hata oranı %4,1 olarak tespit edilmiştir. Bunun anlamı ise sonuçların %95,9 oranında güvenilir olduğudur.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanılan Amerikan Petrol Enstitüsü (API) 5L standardında X70 ve genel boru çelikleri standardındaki St 52 çelikleri kullanılmıştır. X70 ve St 52 malzemeleri farklı tel ve toz kullanılarak tozaltı ve bazik örtülü elektrod ile elektrik ark tekniği ile birleştirilmiştir. Farklı kaynak tekniği ile birleştirilen numunelerde yüzey ve yüzey altı kusurlarına rastlanmamıştır. Bunun yanında kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek için sertlik, çekme deneyi ve eğme deneyi mekanik testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynak bölgelerinde meydana gelen yapısal değişimlerin belirlenmesi ve incelenmesi için kaynaklı numuneler üzerinde makro ve mikro yapı çalışmaları ile kaynak metalinde elementel analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışma Vickers sertlik sonuçlarının uygunluğunu belirlemek için Taguchi yöntemi kullanılarak modellenmesi yapılmıştır.

Sonuç olarak çalışmamız sonucunda elde edilen önemli bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- a) Kullanılan farklı kaynak teknikleri ile birleştirilmeye çalışılan X70 ve St 52 çelik malzemelerine öncelikle kimyasal analiz uygulandı. Kaynak edilebilirlikleri araştırıldı ve herhangi bir sorun çıkmadığı anlaşılan çelik malzemeler birleştirilmiştir.
- b) Çelik malzemeler belirtilen tel ve toz kombinasyonları ve önceden belirlenmiş kaynak parametreleri dahilinde kaynatıldı. Kaynak işlemi sonucunda herhangi bir kusura rastlanmadı.

- c) Farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen çelik malzemelerin makro yapılarının ve nüfuziyet derinliklerinin incelenmesi için bir dizi metalografik işlemlere tabi tutuldu.
- d) Metalografik işlemler sonrası makro yapı ve nüfuziyet görüntüsü alınan numunlerin en geniş nüfuziyet derinliğine bazik elektrod ile birleştirilmiş X70 çeliğinde 2,98 mm olarak ölçüldü.
- e) Malzemelerin mikro yapılarının tespiti için optik mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskopları (SEM) ile mikro yapılar elde edildi. Elde edilen mikro yapıların kimyasal bileşimi tespiti için EDS analiz çalışmaları yapıldı. Çekilen mikro yapı ve alınan EDS analiz sonuçlarının birbirleri ile örtüştüğü ve yapılan bu çalışmanın doğru olduğu kanıtlandı.
- f) Birleştirilen malzemelerin içlerinde mekanik dayanımları belirlemek için DIN 50125 standartlarında çekme ve eğme numunleri hazırlandı.
- g) Çekme deney testi uygulanan numunlerin hepsi ana malzeme bölgesinde koptu. Kaynak metali bölgesinden kopmadıkları tespit edildi.
- h) Çekme testleri sonunda en yüksek maksimum çekme mukavemeti değerine bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinde 665 MPa olarak ölçüldü.
- i) Çekme testleri sonucunda % uzama değeri en düşük olan yine bazik elektrod ile kaynaklı X70 çeliğinde 27 ± 2 olarak elde edildi.
- j) Eğme testleri sonunda en yüksek maksimum eğme mukavemet değerine tozaltı kaynak tekniği ile kaynaklı X70 çeliğinde 761 MPa olarak tespit edildi.

- k) Mekanik testler sonucunda çekme deneyi testi sonunda tüm numuneler ana malzeme bölgesinden kırıldığı tespit edildi. Bu da kaynak işlemlerinin sorunsuz olarak yapıldığını göstermiştir. Mekanik herhangi bir sorun olmadığı anlaşılmıştır.
- l) Çekme testi sonrası kırılan yüzeylerin mikro yapı incelemeleri için numunelere Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile mikro yapı görüntüleri elde edildi.
- m) Kırık yüzey kimyasal analiz çalışmaları için EDS analiz uygulamaları yapıldı. Elde edilen mikro yapı görüntüleri ve alınan EDS analiz sonuçlarının birbirleri ile örtüştüğü belirlendi. Bu da malzeme içerisindeki elementlerin olduğunu kanıtlamıştır.
- n) Tozaltı kaynak tekniği ile kaynatılan X70 ve St 52 malzemelerinin, amperin ve kaynak hızının, sertliğe etkisini tespit edebilmek için Taguchi modellemesi yapıldı.
- o) Taguchi methodu kullanılarak hazırlanan deney tasarımı sonucunda hesaplanan “P” değeri, $0,0042 < 0,05$ olduğu için elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak anlamlıdır.
- p) Varyans analizine göre sertliğe en yüksek etkisi olan parametre, kaynak hızı (%50,4) olarak hesaplandı. Diğer etkili parametre ise malzeme seçimi (%40,2), en düşük etkiye sahip olan parametre de amper (%5,3) olarak tespit edildi. Son olarak ta varyans analizi tablosuna göre hata oranı %4,1 olarak tespit edildi. Bunun anlamı ise sonuçların %95,9 oranında güvenilir olduğu belirlendi.

5.2. Öneriler

- a) Diğer örtülü elektrodlar kullanarak birleştirme işlemi yapılabilir.
- b) Eğme sonuçlarının Taguchi methodu ile modellenmesi yapılabilir.
- c) Çekme sonuçlarının Taguchi methodu ile modellenmesi yapılabilir.

- d) Darbe deneyi çalışmaları yapılabilir.
- e) Kırılma tokluğu çalışmaları yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Durgutlu, A., Kahraman, N., Gülenç, B., Bakır ve çelik levhaların örtülü elektrod ve tıg kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi ve arayüzey özelliklerinin incelenmesi. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 20(2): 183 – 189, 2005.
- [2] Kaya, F., Ark kaynak yöntemiyle birleştirilen çelik malzemelerin nümerik olarak modellenmesi. Sakarya Üniversitesi, Metal Eğitim Fakültesi, Metal Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [3] Anık, S., Kaynak tekniği (Çeliklerin kaynak kabiliyeti). İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 1975.
- [4] Tülbentçi, K., Tozaltı kaynak yönteminin üstünlükleri ve uygulama alanları, kaynak dünyası, Gedik Yayınları, İstanbul, 18 – 21, 1988.
- [5] Akay, A. A., Farklı özellikteki malzemelerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin tahribatlı ve tahribatsız muayenesi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitim Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [6] Ada, H., Petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların tozaltı ve spiral kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [7] Akkaş, N., Tozaltı köşe kaynağında yapay zeka teknolojileri kullanarak dikiş geometrisinin modellenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [8] Kaluç, E., Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Cilt-1 Ergitme esaslı kaynak yöntemleri. TMMOB yayınları, 1 – 358, 2004.
- [9] Şirin, K., Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral boru üretiminde kaynak parametrelerinin kaynak dikiş kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2004.
- [10] Oğuz, B., Ark Kaynağı El Kitabı, Murat Matbaası, 562s, 1975.
- [11] Anık, s., Tülbentçi, K., Ark Kaynakçısının El Kitabı, Gedik Holding Yayını, 59 – 73, 1989.

- [12] Tülbentçi, K., Kaluç, E., Kaynak teknolojisinde yeni nesil akım reteleri: Inverterler, I. Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongresi, Ankara, 93-102, 1997.
- [13] Anık, S., Kaynak Tekniği El Kitabı, Yöntemler ve Donanımlar, Gedik Eğitim Vakfı Yayınları, 250s, 1991.
- [14] şirin, M, ř., Ergitme esaslı kaynak yöntemleri ile boru imalinde kaynak parametreleri dikiş formu ve ITAB arasındaki ilişkinin incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2001.
- [15] Gülenç, B., Candan, İ., Kahraman, N., Mig – Mag kaynağı ile birleştirilen boruların tahribatlı ve tahribatsız muayenesi. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 21(4): 631 – 637, 2006.
- [16] Kayakk, V., Tozaltı ve Mag kaynak yöntemlerinde kaynak ağzı – nüfuziyet ilişkisinin incelenmesi ve ekonomik yönden kıyaslanması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [17] Anık, S., Tülbentçi, K., Tozaltı Kaynak Tekniği, Kaynak Teknolojisi, Gedik Kaynak Sanayi, T.K.C. Yayınları, 1969.
- [18] Anık, S., Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Ergr Matbaası, 1983.
- [19] Kılınçer, S., Düşük karbonlı çeliklerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin ve mekanik özelliklerin incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 1998.
- [20] Sacks, J.R., Welding: Principles and Pratices Revised, 869-879, 1981.
- [21] zgktğ, T., Tülbentçi, K., Anık, S., Kaynak Teknolojisi, Eğitim Yayınları, 1976.
- [22] Klahlı, E., Kaynak Bilimi, Oerlikon Yayınları, 20(2), 1988.
- [23] Erengin, A., Ark esaslı kaynak yöntemleriyle yapılan uygulamalarda, kutuplama durumu ile ilave malzeme – ergime verimi ilişkişinin incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [24] Megep., Tesisat Teknolojisi ve İklimlendirme Elektrik Ark Kaynağı – 1, 2007.
- [25] Kaluç, E., Tülbentçi, K., Anık, S., rtl Elektrod İle Elektrik Ark Kaynağı. Gedik Eğitim Vakfı, Gedik Holding Yayını, 296s, 1991.
- [26] Gramoover, P. M., Fundamentals of Modern Manufacturing, Material. Process and Systems, 1025p, 2010.
- [27] Gour, M. L., Principles of Welding Technology. Third Edition, British Library Cataloguing in Publication Data.

- [28] Oerlikon., Kaynak Bülteni, 1975.
- [29] Eryürek, B. İ., Çelikler için Örtülü Elektrod Seçimi. Askaynak Yayınları, 50s, 2006.
- [30] Tülbentçi, K., TS 563/Eylül 1989'a göre Örtülü Elektrodların İşaretlenmesi. Gedik Holding Kaynak Dünyası, 1012s, 1990.
- [31] Kenyon, W., Welding and Fabrication Technology. Pitman Books Ltd, 1982.
- [32] Oğuz, B., Karbonlu ve Alaşımlı Çeliklerin Kaynağı. Oerlikon Yayınları, 488s, 1987.
- [33] Anık, S., Tülbentçi, K., Elektrik Ark Kaynağı, Böhler A.Ş. Yayını, 1982.
- [34] Aslanlar, S., Kaynak teknolojisi ve uygulamalar – elektrik ark kaynak ve gaz eritme kaynak teknolojisi. 212s, 2009.
- [35] Aytekin, Ç. G., Robotik gazaltı köşe kaynak işleminin taguchi yöntemi ile eniyilenmesi. Balıkesir Üniversitesi, İ.İ.B.F. Dergisi, 2011.
- [36] Aytaç, A., İlivan, M., Öztürk, U., Taguchi ve klasik deneysel tasarım yöntemlerinin karşılaştırılması: ince film kaplamaların aşınma davranışı. Meslek Yüksekokullarının Elektronik Dergisi, 2016.
- [37] Saat, M., Kalite denetiminde Taguchi yaklaşımı. Gazi Üni. İ.B.F. Dergisi, 1(2): 97 – 108, 2000.
- [38] Kumar, P., Quality optimization (multi-characteristics) through taguchi's technique and utility concept. Qual.Reliab. Engng. 1(16): 475-485, 2000.
- [39] Baynal, K., Terzi, Ü., Taguchi yöntemi ve bulanık mantık kullanılarak üretim parametrelerinin eşzamanlı eniyilenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, XXIV Ulusal Kongresi, 2004.
- [40] Barker, T. B., Engineering quality by design-interpreting the Taguchi approach (statistics, a series of textbooks and monographs). Marcel Dekker, 250p, 1990.
- [41] Kağncıoğlu, C. H., Üretim öncesi kalite kontrolünde Taguchi yöntemi ve kükürtdioksit giderici sitrat yöntemine uygulanması. Eskişehir Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayımlanmamış Doktora Tezi, 1998.
- [42] Ross P. J., Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design. McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [43] Gökçe, G., Taşgetiren, S., Kalite için deney tasarımı. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(1): 71-83.

- [44] Olgun, O. M., Özdemir, G., Determination of improvement priorities in education with importance-satisfaction analysis and taguchi method: a case study. Pamukkale Üni. Müh. Bilim Dergisi, 19(2): 81-87, 2013.
- [45] Tarng, Y. S., Yang, W. H., Application of the Taguchi method to the optimization of the submerged arc welding process. Materials and Manufacturing Processes, 13(3): 455-467, 1998.
- [46] Gunter, B., A perspevtive on the taguchi method. Quality progress, 44 – 52 pp, 1987.
- [47] Savaş, Ö., Alüminyum esaslı in – situ borür takviyeli kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Bölümü, Doktora Tezi, 2010.
- [48] Kong, T., Taguchi methods in experimental. The Advantage Group, Inc, 139 – 148, 1996.
- [49] www.hascelik.com.tr, Erişim Tarihi: 09.09.2017.
- [50] www.oerlikon.com.tr, Erişim Tarihi: 24.07.2017.
- [51] www.gedik kaynak.com.tr, Erişim Tarihi: 24.07.2017.
- [52] Ada, H., Petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların tozaltı ve spiral kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [53] Akay, A. A., Kaya, Y., Kahraman, N., Tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilen X60, X65 ve X70 çeliklerin kaynak bölgesinin etüdü. Karaelmas Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 3(2): 34-42, 2013.
- [54] Kaya, Y., Kahraman, N., Durgutlu, A., Gülenç, B., Ferritik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çelik malzemelerin farklı kaynak yöntemleriyle birleştirilebilirliğinin araştırılması. International Iron & Steel Symposium, Karabük, 779-788, 2012.
- [55] Asarkaya, M., Gemi inşasında kullanılan kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [56] Dündar, B., Tozaltı kaynak yönteminde altlık olarak kullanılan kaynak yöntemlerinin kaynak yeterliliklerinin ve maliyetlerinin karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.

- [57] Ada, H., Aksöz, S., Fındık, T., Çetinkaya, C., Gülsün, M., Tozaltı kaynak yöntemiyle birleştirilen petrol ve doğalgaz borularının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi, 19 (3): 275-282, 2016.
- [58] Kahraman, N., Gülenç, B., Durgutlu, A., Toz altı ark kaynağı ile kaynaklanan düşük karbonlu çeliklerde serbest tel uzunluğunun mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisinin araştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 18(3): 473-480, 2005.
- [59] Aksöz, S., Ada, H., Özer, A., Tozaltı ark kaynak yöntemiyle üretilen API 5L X70 kalite çelik boruların mikroyapı ve mekanik özellikleri. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 5(1): 55-64, 2017.
- [60] Ada, H., Aksöz, S., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B., Candan, İ., API 5L X65 çeliklerinin Mag kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(1): 8 – 16, 2016.
- [61] Lehto, P., Remes, H., Saukkonen, T., Hänninen, H., Romanoff, J., Influence of grain size distribution on the Hall–Petch relationship of welded structural steel. Materials Science and Engineering (A), 592, 28–39, 2014.
- [62] Kara, R., Tane boyutunun HMK kafesli metallerin temel mekanik özelliklerine etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, 2005.
- [63] Mahmutoglu Z., Çimenoglu M., % 0.03 Nb ve % 0.05 V'lu bir boru hattı çeliğinde mikroyapı – mekanik özellik ilişkisi. İ.T.Ü. Mühendislik Dergisi, 2(6): 1-5, 2003.
- [64] Bal, E., Doğalgaz boru hatları için yüksek gerilimli kaynak ana malzemesi teknolojisinin geliştirilmesi (BORKAY). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [65] Erden, A. M., Gündüz, S., Çalgül, U., Boz, M., Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen alaşımsız ve hardoks çeliklerin mikro yapı ve sertlik özelliklerinin araştırılması. Gaziantep Üniversitesi, Uluslar arası kaynak teknolojileri konferansı ve sergisi, 1(1): 784 – 791, 2016.
- [66] Akay, A. A., Kaya, Y., Kahraman, N., Farklı özellikteki malzemelerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin tahribatlı ve tahribatsız muayenesi. SAÜ. Fen Bil. Der., 17(1): 85-96, 2013.
- [67] Durgutlu, A., Gülenç, B., Tülbentçi, K., Ark kaynağında kaynak hızının nüfuziyete ve mikro yapıya etkisi. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 23(1): 251-259, 1999.

- [68] Zhu, Z. X., Marimuthu, M., Kuzmikova, L., Lil, H. J., Barbaro, F., Zheng, L., Bai, M. Z., Jones, C., Science and Technology of Welding and Joining, 18(1): 45 – 51, 2013.
- [69] Gençkan, H. D., Bal, E., Çınar, F. Ş., Taptık, Y. İ., Koçak, M., Orbital kaynak teknolojisi kullanılarak kaynak edilen X65 ve X70 çelik boruların mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi. İ.T.Ü. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10(4): 45-56, 2014.
- [70] Zhu, Z., Kuzmikova, L., Li, H., Barbaro, J. F., The effect of chemical composition on microstructure and properties of intercritically reheated coarse-grained heat-affected zone in X70 steels, Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, 45 (1): 229 – 235, 2013.
- [71] Kong, D., Wu, Y., Long, D., Zhou, C., Tension fracture behaviors of welded joints in X70 steel pipeline. Theoretical & Applied Mechanics Letters 1, 031008, 2011.
- [72] Bordbar, S., Alizadeh, M., Hashemi, S. H. Effects of microstructure alteration on corrosion behavior of welded joint in API X70 pipeline steel. Materials and Design, 45: 597 – 604, 2013.
- [73] Bordbar, S., Alizadeh, M., The influence of microstructure on the protective properties of the corrosion product layer generated on the welded API X70 steel in chloride solution. Corrosion Science, 70: 170 – 179, 2013.
- [74] Uysal, A. K., Petrol ve doğalgaz boruhattı çeliklerinin hidrojen nedenli çatlama davranışı. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği, Doktora Tezi, 2010.
- [75] Gore, Y. V., Choudari, C. M., Narkhede, B. E., Investigation of Solidification Affecting Parameters of Sand Casting using ANOVA. Int. J. Sci. Technol. Eng., 1(12): 29 – 34, 2015.
- [76] Kul, S., Interpretation of Statistics Results: What is the P Value and Confidence Interval?. Plevra Bul., 8(1): 11–13, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

Orhun Demiral, 09.09.1991 yılında İzmir’de dünyaya geldi. Babasının mesleğinden dolayı ilkokul 1 ve 2. sınıfları Diyarbakır, 3,4 ve 5. sınıfları Bolu'nun Mengen ilçesinde bitirdi. Orta okulu eğitimini Bolu merkezde tamamladı. Liseyi Giresun’da tamamladı. 2009 yılında Giresun Hamdi Bozbağ Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2009 yılının sonlarında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümüne yerleşti. Burayı 2013 yılında bitirdi. Yine aynı bölümden yüksek lisans eğitimine başladı. Annesi ve babası sağdır. Bir ablası vardır.