İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FREKANS İNDÜKSİYON KAYNAKLI ÇELİK BORULARDA MEYDANA GELEN ÇATLAKLARA TRIZ YAKLAŞIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve SEYYİTOĞLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FREKANS İNDÜKSİYON KAYNAKLI ÇELİK BORULARDA MEYDANA GELEN ÇATLAKLARA TRIZ YAKLAŞIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve SEYYİTOĞLU
(506171418)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK

HAZİRAN 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506171418 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Merve SEYYİTOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "YÜKSEK FREKANS İNDÜKSİYON KAYNAKLI ÇELİK BORULARDA MEYDANA GELEN ÇATLAKLARA TRİZ YAKLAŞIMI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK**	.....
	İstanbul Teknik Üniversitesi	
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU**	.....
	İstanbul Teknik Üniversitesi	
	Dr. Öğr. Üy. Işıl ÇEVİKER KERTİ	.....
	Yıldız Teknik Üniversitesi	

Teslim Tarihi : 4 Mayıs 2020

Savunma Tarihi : 1 Haziran 2020

Aileme ve arkadaşlarıma,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenim sürecim boyunca akademik açıdan benden desteklerini esirgemeyen çok değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Başım her sıkıştığında kapısını çaldığım ve değerli bilgilerinden yararlandığım çok değerli Prof. Dr. Servet Timur'a teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans tezimde üzerimde büyük emeği olan, gerek çalışmalarıma yaptığı katkılar, gerekse manevi destekleri ile hep yanımda hissettiğim dostum Ar. Gör. Mehtap Arslan'a teşekkür ederim. Bilgi ve birikimleri ile tezime katkıda bulunan Prof. Dr. Hüseyin Çimenoğlu ve Ar. Gör. Mertcan Kaba'ya katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca tez sürecim boyunca her konuda desteğini hissettiğim aileme ve hep yanımda olan erkek arkadaşım Hüseyin Vatansever'e teşekkürlerimi sunarım.

Üniversite hayatımın en önemli parçası, hayatımın her anında desteklerini hissettiğim kardeşim dediğim dostlarım; Esra Tanısalı, Sadık Nazlı ve Yasemin Bahadır'a sonsuz teşekkürler. Son olarak bugüne kadar benim gibi tek başına hayat mücadelesi veren, her zaman dik duran ve Yüce Mustafa Kemal Atatürk'ün izinden giden tüm kadınlara sonsuz saygılarımı sunarım.

Haziran 2020

Merve SEYYİTOĞLU
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL BİLGİLER **3**
2.1 Küresel Petrol Sektörünün Görünümü 3
2.1.1 Karada (Onshore) petrol sondaj uygulamaları 5
2.1.2 Denizde (Offshore) petrol sondaj uygulamaları 5
2.1.3 OCTG 6
2.2 Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynağı ile Boru Üretimi 9
2.2.1 Hammadde kabülü 10
2.2.2 Bant dilme 10
2.2.3 Bant boşaltma ve akümülasyon 11
2.2.4 Form verme 12
2.2.5 Yüksek frekans indüksiyon kaynağı 12
2.2.6 Metalografi işlemi 16
2.2.7 Homojenizasyon tavı 17
2.2.8 Kalibrasyon 18
2.2.9 Boy kesme ve doğrultma 18
2.2.10 Hidrotest 19
2.2.11 Görsel kontrol ve ultrasonik test 19
2.2.12 Sertleştime Isıl İşlemi 21
2.3 Kaynak Kalitesine Etki Eden Parametreler 23
2.4 Kaynak Hataları 27
2.4.1 Soğuk kaynak 27
2.4.2 Yetersiz nüfuziyet 27
2.4.3 Cüruf çatlağı 28
2.4.4 Boşluklar ve kalıntılar 29
2.4.5 Çatlaklar 32
2.5 TRIZ 37
2.5.1 Tanımı ve Tarihçesi 37
2.5.2 Metodolojisi 39
2.5.3 TRIZ Araçları 41
3. MALZEME VE YÖNTEM **43**
3.1 Malzeme 43
3.1.1 Numunenin hazırlanması 43
3.1.1 Numunenin fiziksel ve mekanik özellikleri 43

3.1.2 Numunenin kimyasal özellikleri 44
3.2 Yöntem 45
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEMELER 47
4.1 Yapısal İncelemeler 47
4.2 Problem Çözme Yöntemi: TRIZ 52
4.2.1 Problemin tanımlanması 52
4.2.2 Çözümün geliştirilmesi 52
4.2.1 Çözüm alternatifleri ve seçimi 55
5. GENEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER 63
6. ÖNERİLER 65
KAYNAKLAR 67
ÖZGEÇMİŞ 71

KISALTMALAR

ERW : Elektrik Ark Kaynağı
HFI : Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynağı
BP : İngiliz Petrolleri (British Petroleum)
API : Amerikan Petrol Endüstrisi (American Petroleum Industry)
OCTG : Petrol Alanı Boru Ürünleri (Oil Country Tubular Goods)
AC : Alternatif Akım
ITAB (HAZ) : Isı Tesiri Altındaki Bölge (Heat Affected Zone)
kHz : Kilohertz
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
EDS : Enerji Dispersiv Spektrum (Energy Dispersive Spectrometry)
OES : Optik Emisyon Spektrometresi
EAF : Elecktrik Ark Ocağı
H_2S : Hidrojen Sülfür
SMYS : Spesifik Minimum Akma Mukavemeti
TRIZ : Yaratıcı Problem Çözme Teorisi
NDT : Tahribatsız Muayene Yöntemleri (Non-Destructive Techniques)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Problem kategorileri[51]. 39
Çizelge 2.2 : TRIZ tekniğinin kullanıldığı örnek çalışmalar[46]. 40
Çizelge 3.1 : Numunelerin mekanik özellikleri. 44
Çizelge 3.2 : Malzemelerin kimyasal kompozisyonu (%ağ.). 44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : 2015 yılı küresel birincil enerji tüketim oranları[4]. **3**
Şekil 2.2 : 1990-2035 kaynak bazında dünya enerji talebi[4]. **4**
Şekil 2.3 : 1998, 2008 ve 2018 yıllarındaki petrol rezervlerinin dünya üzerindeki dağılımı[6]. **4**
Şekil 2.4 : Karasal bölgede petrol sondaj uygulaması[8]. **5**
Şekil 2.5 : Denizde petrol sondaj uygulaması[8]. **6**
Şekil 2.6 : OCTG boru çeşitleri[10]. **6**
Şekil 2.7 : Dikişsiz boru üretim akışı[12]. **8**
Şekil 2.8 : Yüksek frekans indüksiyon kaynağı ile boru üretim akış şeması[14]. **10**
Şekil 2.9 : Hammadde kabulü[17]. **10**
Şekil 2.10 : Bant dilme hattı[15]. **11**
Şekil 2.11 : Bant boşaltma[17]. **11**
Şekil 2.12 : Akümülasyon[17]. **12**
Şekil 2.13 : Form verme makaraları[9]. **12**
Şekil 2.14 : Yüksek frekans indüksiyon kaynağı ilüstrasyonu(a) ve yüksek frekans kaynağının izlediği yol(b).'P' ise burada kaynağın başladığı APEKS noktasıdır.[2]. **14**
Şekil 2.15 : Isıtılan bant kenarlarının birleşimine kadar olan ısı değişimi[21]. **14**
Şekil 2.16 : İmpederin yüksek frekans akımına etkisi[22]. **15**
Şekil 2.17 : Yüksek frekans yüzey etkisi (penetrasyon derinliği mavi ile belirtilmiştir.)[22]. **15**
Şekil 2.18 : Yüksek frekans yakınlaşma etkisi (akım debisi sarı, manyetik alan mavi kesikli çizgi ile gösterilmiştir.)[22]. **16**
Şekil 2.19 : Metalografi aşamaları[17]. **17**
Şekil 2.20 : Homojenizasyon tavı[17]. **18**
Şekil 2.21 : Kalibrasyon makaraları[17]. **18**
Şekil 2.22 : Hidrotest[17]. **19**
Şekil 2.23 : Görsel kontrol[17]. **20**
Şekil 2.24 : Otomatik ultrasonik test işlemi[26]. **20**
Şekil 2.25 : Ultrasonik test ekranı[26]. **21**
Şekil 2.26 : Sıcaklık-Zaman-Dönüşüm Diyagramı[28]. **21**
Şekil 2.27 : Boruya su verme işlemi[29]. **22**
Şekil 2.28 : Isıl işlem grafiği. **22**
Şekil 2.29 : Temperleme[29]. **23**
Şekil 2.30 : Plastik deformasyon sırasında birleşme (kaynak) çizgisi etrafındaki akış çizgileri ve akma açıları[33]. **24**
Şekil 2.31 : V-açıklığını gösteren illüstrasyon[9]. **25**
Şekil 2.32 : Bant kenarı paralelliğini gösteren illüstrasyon[35]. **26**
Şekil 2.33 : Kaynak baskısı sonrası ITAB[33]. **26**
Şekil 2.34 : Soğuk kaynak makro görüntüsü[37]. **27**

Şekil 2.35 : Yetersiz nüfuziyet sonrası ikiye ayrılan kaynak dikişi[37]. **28**
Şekil 2.36 : Cüruf çatlağı 50X mikro görüntüsü[37]. **28**
Şekil 2.37 : Cüruf çatlağı 100X mikro görüntüsü[37]. **28**
Şekil 2.38 : Yüksek frekans kaynağında görülen tipik kalıntı örnekleri[38]. **29**
Şekil 2.39 : Kalıntı örneklerinin kimyasal kompozisyonları[38]. **30**
Şekil 2.40 : Oksit inklüzyonlarının oluşumunu gösteren Ellingham diyagramı[38]. **31**
Şekil 2.41 : $MnO\text{-}SiO_2$ ikili faz diyagramı[38]. **32**
Şekil 2.42 : Yüzey çatlağı mikro görüntüsü[40]. **32**
Şekil 2.43 : Segregasyon çizgisi üzerinde meydana gelen çatlak[37]. **33**
Şekil 2.44 : Segregasyon çatlağının 50X büyütmedeki görüntüsü[37]. **33**
Şekil 2.45 : Yorulma ve yüksek gerilime uğrayarak ilerleyen Hook çatalğı[36]. **34**
Şekil 2.46 : Hook çatlağının SEM-EDS görüntüsü[38]. **35**
Şekil 2.47 : Hook çatlağı oluşumunun şematik gösterimi[38]. **35**
Şekil 2.48 : Oksit kalıntılarının nükleasyonu ve stress altında sebep oldukları çatlak[43]. **37**
Şekil 2.49 : TRIZ'in kronolojik süreci[47]. **38**
Şekil 2.50 : TRIZ'in problem çözme metodolojisi[47]. **40**
Şekil 2.51 : Mühendislik parametreleri[47]. **41**
Şekil 2.52 : 40 buluşçu prensip[47]. **42**
Şekil 3.1 : Kaynak bölgesinde çatlak tespit edilen borulardan bir tanesi. **44**
Şekil 4.1 : M215 nolu numunenin farklı büyütmelerde mikro ve makro görüntüsü. **47**
Şekil 4.2 : M213 nolu numunenin makro görüntüsü. **47**
Şekil 4.3 : Üretim akış şeması. **52**
Şekil 4.4 : Balık kılçığı diyagramı. **53**
Şekil 4.5 : Nedenlerin önceliklendirilmesi. **54**
Şekil 4.6 : Neden-Nasıl ağaç diyagramı. **55**
Şekil 4.7 : Zararlı yan etki ve sıcaklığa yönelik çelişkiler matrisinden problemin çözümüne dair alınan kesit. **56**
Şekil 4.8 : Hız ve mukavemete yönelik çelişkiler matrisinden problemin çözümüne dair alınan kesit. **58**
Şekil 4.9 : Verimlilik ve üretilebilirliğe yönelik çelişkiler matrisinden problemin çözümüne dair alınan kesit. **59**
Şekil 4.10 : Üretimin doğruluğu ve zaman israfı yönelik çelişkiler matrisinden problemin çözümüne dair alınan kesit. **61**

YÜKSEK FREKANS İNDÜKSİYON KAYNAKLI ÇELİK BORULARDA MEYDANA GELEN ÇATLAKLARA TRIZ YAKLAŞIMI

ÖZET

Dünyada en çok kullanılan yenilenemeyen enerji kaynaklarından biri petroldür. Son yıllarda petrolün yerini yenilenebilir enerji kaynakları almaya çalışsa da petrole olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Petrole olan bu bağlılık daha fazla petrol rezervleri açılmasına ve ham petrolün çıkarılması için kullanılacak ekipmanlara olan ihtiyacın da artmasına sebep olmaktadır. Bu ekipmanların arasında en önemli paydaya sahip olanlar ise borulardır. Rezervin açılmasından, sondajın yapılması ve petrolün aktarılmasına kadar olan her süreç, bu süreç için özel çap ve et kalınlıklarında dikişli veya dikişsiz üretilmiş borularla sağlanmaktadır. Dikişli üretim yöntemlerinden biri olan Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynağı (HFI) diğer dikişli üretim yöntemlerine göre sarf malzeme kullanılmaması ve kolay uygulanabilir olması açısından daha avantajlıdır. Sıcak haddelenmiş çeliğin plastik deformasyonla şekil alıp, boru halini aldıktan sonra kaynaklanmasından oluşan bu prosesi etkileyen birçok kaynak parametresi vardır. Bunlar; ana malzeme yani kullanılan sıcak haddelenmiş çeliğin yapısını etkileyen parametreler, kaynağın voltaj, amper ve ısı girdisini kontrol etmeye yarayan fiziksel parametreler ve kaynaklandıktan sonraki metalin kimyasal özelliklerini etkileyen parametrelerdir. Eğer bu parametreler optimize edilmez ise doğru bir kaynak işlemi yapılamamakta ve kaynak hatalarıyla karşılaşılmaktadır. 1972 yılında İran Körfezi'nde iletim borularında meydana gelen hasar ve 1974'de Suudi Arabistan iletim hattında meydana gelen hasarlar birçok araştımacıyı çelik borulardaki hasar mekanizmalarını incelemeye ve test sonuçlarını araştırmaya itmiştir. O yıllardan günümüze literatüre birçok çalışma kazandırılmış ve kaynak hataları azaltılmaya çalışılmıştır.

Bu tez kapsamında, yüksek frekans indüksiyon kaynaklı borulardaki çatlaklar metalürjik olarak ve mühendislik problemlerinin çözümlerinde kullanılan TRIZ methodu ile incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, su verme ve temperleme işlemlerinden sonra hasarsız muayene yöntemlerinden biri olan ultrasonik testte kaynak bölgesi içerisinde çatlak olduğu tespit edilmiş borulardan alınan numuneler ile çalışılmıştır. Numuneler zımparalama, parlatma ve dağlama gibi numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuş ve akabinde optik ve elektron mikroskopisi yöntemleri ile analiz edilmiştir. Numunelerin kimyasal analizleri için Optik Emisyon Spektroskopisi (OES) ve Enerji Dispersiv Spektrum (EDS), çatlağın karakteristik özelliklerini yüksek büyütmelerde gözlemlemek için optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

Kaynak dikişi bölgesinin martenzitik yapıda olduğunun gözlenmesi çatlağın sertleştirme ısıl işlemleri sonrasında oluştuğunu doğrular niteliktedir. Ayrıca çatlak borunun iç yüzeyinden başlayarak dışa doğru ilerlemiştir. Bu durum borunun dış çevresinin soğutulmasıyla gerçekleştirilen su verme işleminin borunun dış kısmında basma ve iç kısımda çekme gerilimleri oluşturduğunu göstermektedir. Literatür araştırmalarında edinilen bir diğer bilgi ise Mn/Si oranının mangan ve silisyum

kompleks oksitlerini kaynak bölgesinden uzaklaştırmak adına bu oranın en az 8 olmasıdır. İncelenen numunelerin tümünde bu değer 8'in altında olup, kaynak bölgesinde ve çatlak çevresine yapılan SEM-EDS analizi de mangan ve silisyumca zengin oksit partiküllerinin varlığını doğrulamıştır.

Yapılan yapısal incelemelerin yanı sıra karşılaşılan bu probleme TRIZ metodu kullanılarak çözümler getirilmesi hedeflenmiştir. Problemin tanımlanması ve nedenlerin araştırılması için çeşitli kalite araçları kullanılmış ve çözümler üretilmeye çalışılmıştır. Çözümlerde karşılaşılan çelişkilere TRIZ metodu içerisinde bulunan 39X39 mühendislik matrisi kullanılarak yenilikçi fikirler üretilmesi amaçlanmıştır. Bu matrisin sağladığı 40 buluşçu prensip arasında yer alan fikirler uygulanabilirliğine ve problemin çıkış sebebine uyumluluğuna bağlı olarak kendi içinde irdelenmiş ve çeşitli öneriler verilmiştir. Tüm bunlara ek olarak bir mühendislik problemine etkili bir problem çözme tekniği olan TRIZ kullanılarak yaklaşılmış ve elde edilen yapısal inceleme sonuçları ve TRIZ yaklaşımının korelasyonu sağlanmıştır.

UTILIZING THE METHOD OF TRIZ FOR CRACKINGS IN HIGH FREQUENCY INDUCTION WELDED STEEL PIPES

SUMMARY

One of the most used non-renewable energy sources in the world is petroleum. Although renewable energy sources have tried to take the place of petroleum in recent years, the need for petroleum has been increasing day by day. This commitment to petroleum leads to more petroleum reserves to open and the need for equipment to be used for the extraction of crude oil. The most important piece among this equipment is pipes. Every process from the opening of the reserve to drilling and the transfer of the petroleum proceeds with welded or seamless pipes in special diameter and wall thickness for this process. High-Frequency Induction Welding (HFI), which is one of the seamed pipe production methods, is more advantageous in terms of no consumables usage and easy application, compared to other seamed pipe production methods. There are many welding parameters that affect this process, in which the hot rolled steel formed by plastic deformation and given the shape of the pipe. These are the parameters affecting the structure of the main material, namely the hot-rolled steel, the physical parameters affecting the voltage, current, heat input of the welding process, and the parameters affecting the chemical properties of the metal after welding. If these parameters are not being optimized, a correct welding process cannot be performed and welding defects are encountered. In 1972, the damage in the transmission pipes in the Persian Gulf and in 1974, the damage in transmission line in Saudi Arabia led many researchers to investigate the damage mechanisms in steel pipes and to investigate the test results. Since then, many studies have been gained to literature, and welding failures have been tried to be reduced. The most common welding defects in high-frequency induction welding are reported in the open literature as cold weld, lack of fusion, black penetrators, hook cracks, pores, and inclusions.

In this study, cracking in the electrical resistance welded steel pipes were investigated in detail and the TRIZ method was used as an engineering problem-solving technique. Cracking in the welded steel pipes was detected by non-destructive tests such as ultrasonic test (UT) after quenching and tempering processes. After sample preparation techniques like grinding, polishing, and etching, welded samples were analyzed by optical and electron microscopy methods. For chemical analysis of the pipes, Optic Emission Microscopy (OES) was used. According to OES results, the steel was Carbon-Manganese steel and that was named J55 according to the American Petroleum Industry 5L standard. The crack was detected at the weld seam of the pipes. Optical microscope (OM) images are clearly demonstrated that the crack initiated at the inner surface of the pipes and propagated through the outer surface. In OM studies, inclusions were also detected in the welding zone, which exhibited a martensitic microstructure. Optical and scanning electron microscope (SEM) investigations also revealed inclusions inside of the crack. Welding zone and crack were analyzed by using SEM equipped with energy dispersive spectrometry (EDS) and it was found that inclusions comprise manganese, silicon, and oxygen elements. In the literature, the

formation of such type of inclusions was reported when heat input of the welding was higher and the ratio of Mn/Si in the steel was not higher than 8:1. Manganese(II) oxide (MnO)-Silicon dioxide (SiO2) binary phase diagram shows the melting temperature of the complex oxide is mainly dependent on the ratio of Mn/Si. Complex oxides which have lower melting temperature tend to remain smaller in size and move away from the welding zone during the welding operation. According to the binary phase diagram, the oxides which have Mn/Si ratio is 8 have the lowest melting temperature so the steel composition which has Mn/Si ratio minimum 8 must be preferred in order to minimize the number of oxide inclusions.

Detection of the crack by non-destructive tests only after quenching and tempering processes suggests that crack was formed after the hardening process. Additionally, initiation of the crack at the inner surface of the pipe can be accompanied by the heat treatment processes. Since the pipe is quenched by water spraying from the outer shell, compression stresses are formed on the outer surface of the pipe and tensile stresses are formed on the inner surface of the pipe. The crack started from inside of the pipe, which was subjected to tensile type thermal stresses, and propagated to outside of it. It also indicates that thermal stresses caused the crack formation and propagation.

On the basis of microstructural analysis, it is concluded that complex oxides located in the weld seam and thermal stresses (especially tensile thermal stresses at the inner surface) resulted in cracking of the welded pipes.

On the other hand of structural analysis, was aimed to bring solutions to the problem with using TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving) method. Various quality tools were used to identify the problem and investigate its causes, and solutions were tried to produce. It is aimed to generate innovative ideas within the 39x39 TRIZ engineering contradiction matrix. Defined ideas within 40 inventive principles were provided from the matrix that has been examined within itself and depending on its compatibility with the reason to reveal the problem and feasibility.

In addition, the cracking problem in the welded steel pipes was investigated with the TRIZ method, as an effective problem-solving technique. Correlation of the obtained microstructural analysis results and TRIZ approaches were achieved.

As a result of the TRIZ study, in order to improve the process and avoid the welding failures, some solutions were obtained. These are calculating the optimum heat input by taking some parameters such as current, potential, and line speed into consideration, and providing the new raw material that has Mn/Si rate is equal or larger than 8:1. Also, in the quenching part, the pipe should be cooled homogenously, this could be obtained by cooling the pipe by rotational motion and supporting it by applying modeling and simulation of the process before running the system. Another important solution is nondestructive evolution during the process running. It is urgent to detect the failure before it results in a catastrophe.

In addition, the whole process should be optimized and monitorable especially in the case of oil drilling and transmission pipe production line which has vital importance in the industry. Normalizing and tempering have also significance since they affect the microstructure namely the mechanical properties of the materials. By taking this crucial effect into account, it is strongly recommended that all heat treatment furnaces must be controlled and in the case of emergency, they give audial or visual warnings.

TRIZ recommends several beneficial solutions to numerous industrial processes. As a consequence of the thesis study, it obviously is seen that TRIZ solves the problems

professionally and it formes the background of problem-solving not just applying the analytical methods but problem-solving techniques.

1. GİRİŞ

Doğal gaz ve petrol iletiminde kullanılan boru hatları, ülkemizde ve dünyada stratejik öneme sahiptir. Dünya çapında %70'lik bir paya sahip olan boru hatlarıyla ham petrol ve rafine edilmiş diğer petrol ürünleri dışında LPG, anhidrat amonyak ve gazolin gibi çok çeşitli tehlikeli sıvılar taşınmaktadır. Bu hatlarda meydana gelen hasarlar hava, su ve toprak kirliliğinden, insanların yaralanması ve hayat kayıplarına kadar birçok ciddi hasara sebep olmaktadır. Bu yüzden boru hattı hasarları çok kritik ve tehlikelidir [1].

Boru hatlarında kullanılan ve OCTG (Oil Country Tubular Goods) olarak adlandırılan boruların üretimi için kullanılan yöntemler değişkenlik göstermekle birlikte; 1970 yılından beri yaygın olarak yüksek frekans kaynağı kullanılmaktadır. Ancak, bu teknikle ve bu teknikle elde edilen kaynaklar ile ilgili akademik literatürde çok fazla bilgi mevcut değildir. Özellikle, indüksiyon kaynaklarının özellikleri, iyi tanımlanmış olmasına rağmen, kaynak sonrası özellikler basitçe anlaşılamamaktadır. Bu, parametreleri kontrol etmek için mevcut metotların net olmadığı anlamına gelmektedir [2].

Literatür azlığındaki bir diğer sebep ise petrol ve boru sektöründeki tüm akademik yayınların şirketlerin gizlilik politikası gerekçesiyle kısıtlanmasıdır.

Bu çalışma kapsamında literatürde yüksek frekans kaynağı ile ilgili tüm detaylar bir araya getirilmiş ve literatüre saha gözlemleri de eklenmiştir. Kaynak parametreleri irdelenmiş ve bu kaynak parametrelerinin değişiminde meydana gelen kaynak hataları detaylı bir şekilde aktarılmıştır. Ayrıca saha çalışmalarında karşılaşılan güncel bir kaynak hatasına alışılagelmiş metalürjik yaklaşımla ve yenilikçi problem çözme tekniğiyle yaklaşılıp bu iki yöntem çözüm önerileri değerlendirilmiştir.

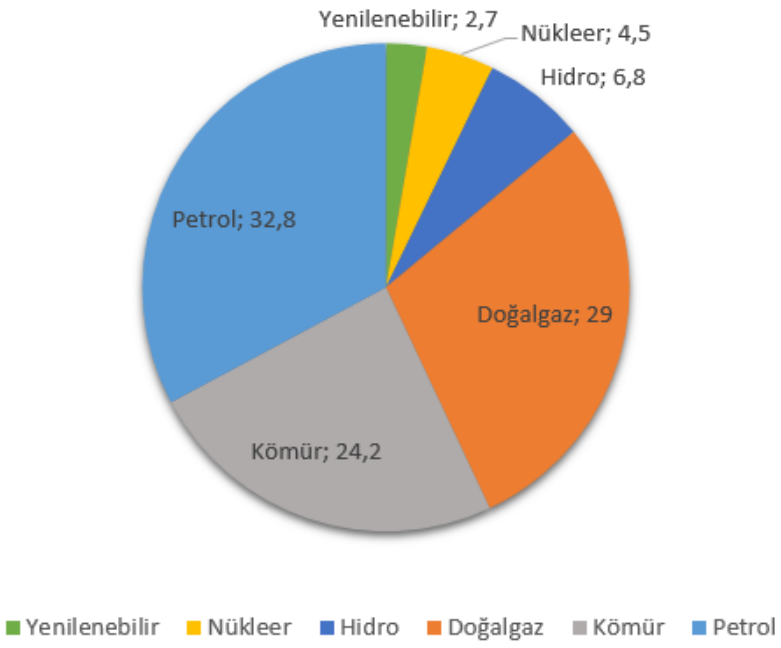
Bu tez, yüksek frekans kaynağı kullanılarak kaynaklanan, kaynak bölgesi tavlandıktan sonra, su verme ve temperleme ısıl işlemleri ile sertleştirilen boruların çatlak içeren numunelerinin fiziksel, kimyasal, metalürjik ve kalitesel incelemelerini içermektedir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Küresel Petrol Sektörünün Görünümü

İnsanlar günlük hayatlarında evlerini ısıtmak ya da soğutmak için ne kadar elektrik kullanacağını belirlemek gibi enerji konusunu içeren konularda kararlar alırlar. Ya da harcayacakları enerjiyi düşünerek gün içinde sürecekleri yolu tahmin eder, arabalarını seçerken buna dikkat ederler. Çoğu insan ülkeyi yönetecek liderleri seçerken yeni enerji kaynakları için yaptığı girişimleri ve ülkede var olan enerji kaynaklarını değerlendirebilme potansiyelini göz önünde bulundurur. Bütün bu kararlar küresel enerji tüketimini etkiler ve doğal kayaklara olan ihtiyacı arttırır [3].

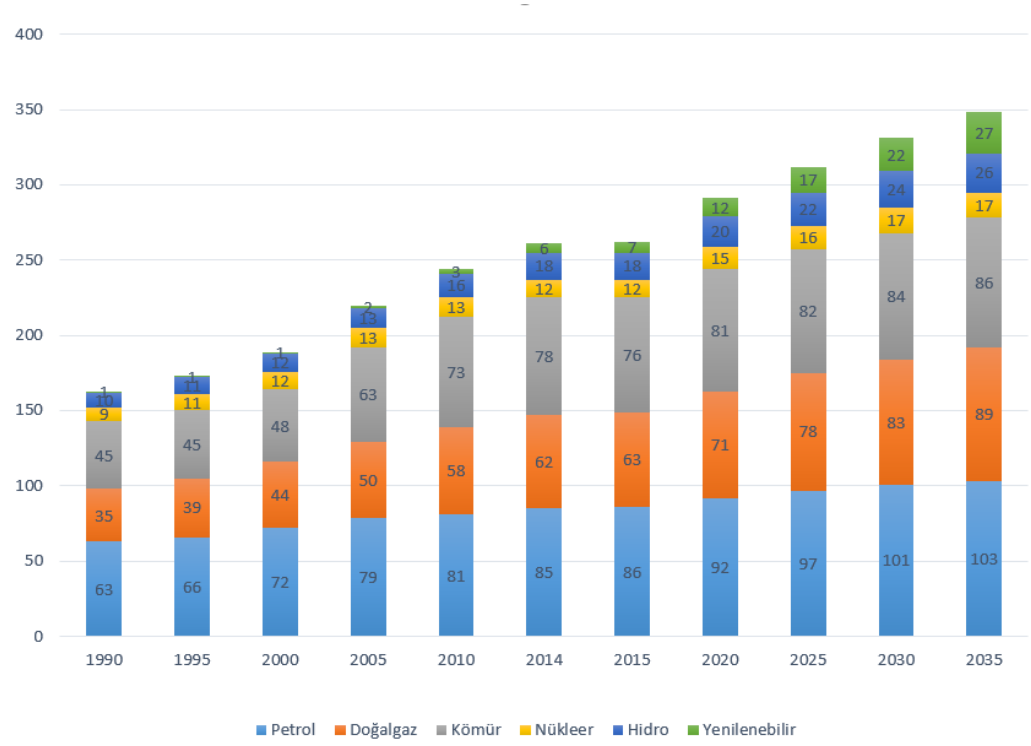
BP Enerji Outlook to 2035 verilerine göre bugün dünyada tüketilen enerji, çok sayıda enerji kaynağından elde edilirken; petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil kaynaklar, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi bu kaynakların %87'sini oluşturmaktadır [4].



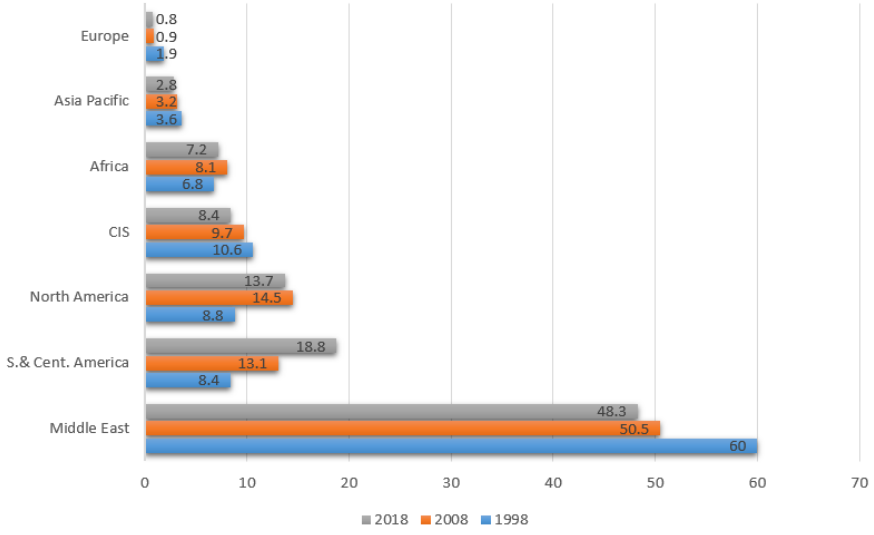
Şekil 2.1 : 2015 yılı küresel birincil enerji tüketim oranları[4].

BP Enerji 2015 verilerine göre petrol dünya enerji ihtiyacının %32,8'ini karşılamaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı, ABD Enerji İdaresi, BP, Exxon Mobil gibi çeşitli uluslararası kurum ve kuruluşlar tarafından yapılan projeksiyonlara göre

petrolün birincil enerji üretim kaynakları içerisindeki önemi önümüzdeki yıllarda daha da artacaktır. Şekil 2.2' de dünyadaki enerji talebinin yıllara bağlı olarak değişimi gösterilmiştir [5].



Şekil 2.2 : 1990-2035 kaynak bazında dünya enerji talebi[4].



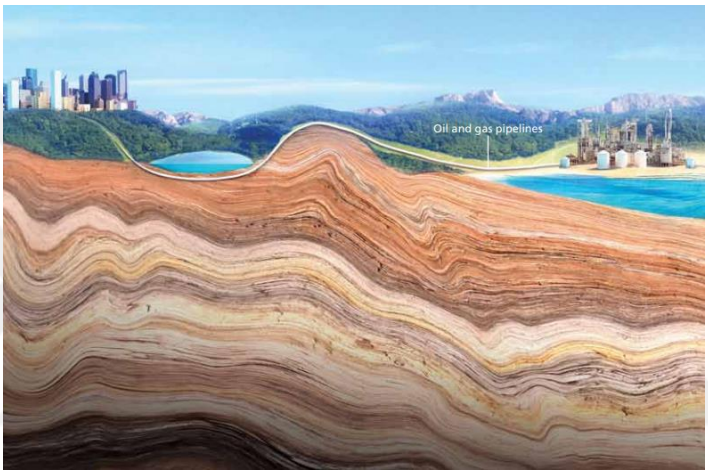
Şekil 2.3 : 1998, 2008 ve 2018 yıllarındaki petrol rezervlerinin dünya üzerindeki dağılımı[6].

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi dünya üzerinde kanıtlanmış petrol rezervleri 1998 yılında 1141.2 trilyon varil iken yıllar içinde bu sayı artmış, 2018 yılında 1729.7 trilyon varil

olarak belirlenmiştir. Geçmişte karasal alanda gerçekleştirilen petrol arama çalışmalarına teknolojinin de gelişmesiyle derin deniz çalışmaları eklenmiş ve bu durum artışta önemli rol oynamıştır [5].

2.1.1 Karada (Onshore) petrol sondaj uygulamaları

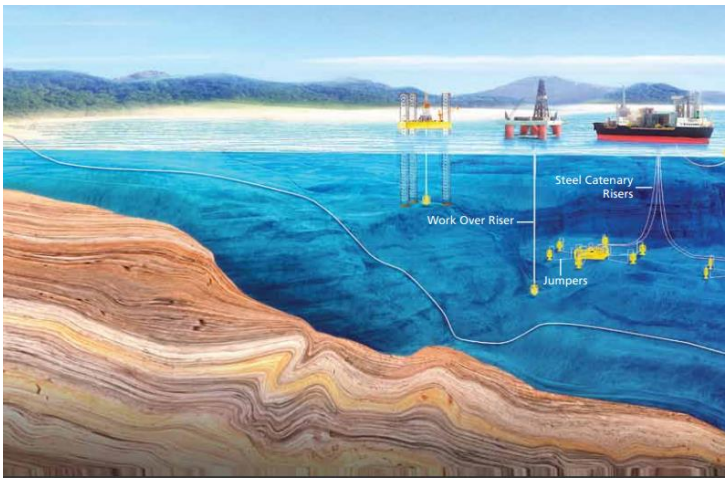
Onshore sondaj çalışmaları kuru alandaki tüm sondaj çalışmalarını kapsamaktadır. Dünya üzerindeki petrol çalışmalarının %70'i bu uygulamayla gerekleşmektedir. Şekil 2.4' de görüldüğü gibi karada petrol üretimi yer altındaki petrole ulaşmak için bir delik açılmasını gerektirir. Deniz içindeki çalışmalar gibi platform gerektirmez, petrolün depolanması ve aktarılması direkt toprak üzerinde gerçekleşir [7].



Şekil 2.4 : Karasal bölgede petrol sondaj uygulaması[8].

2.1.2 Denizde (Offshore) petrol sondaj uygulamaları

Bu sondaj tekniği okyanus sularında kullanılmaktadır. Global petrol üretiminin %30'u bu teknik ile elde edilmektedir. Bu teknik farklı derinlikteki rezervler için de uygulanabilirlik göstermektedir. 1950'lerde 200 metre ile sığ sularda başlayan sondaj uygulamaları, derin deniz çalışmaları ile günümüzde 4000 metre derinliğe ulaşmıştır. Açık deniz sondajı karadaki işleme benzer olarak Şekil 2.5'de görüldüğü gibi bir başlangıç kuyusu deliğinin açılmasıyla başlar. Deliğin derinliği petrolün deniz tabakası altındaki konumuna bağlıdır. Ham petrol operasyon için kullanılan özel platform tipine bağlı olarak çeşitli sistemler kullanılarak dışarı pompalanır [7].

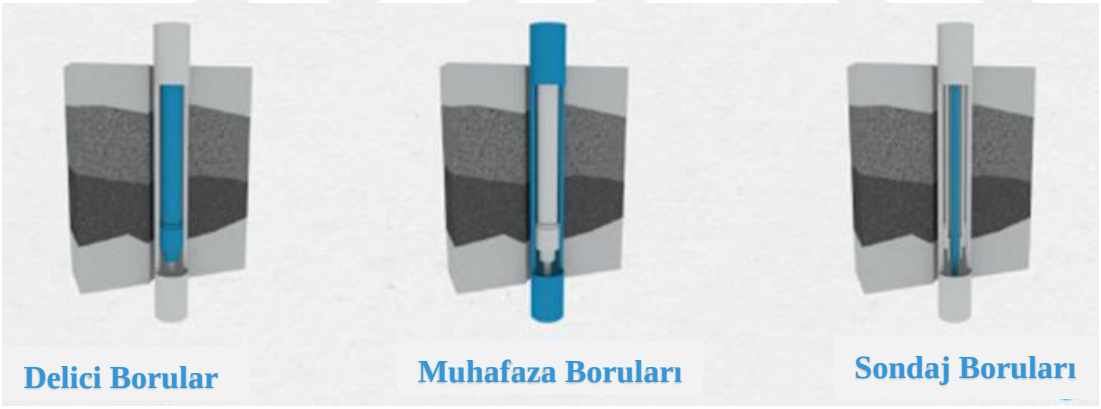


Şekil 2.5 : Denizde petrol sondaj uygulaması[8].

2.1.3 OCTG

OCTG, kara ve denizde gerçekleşen petrol sondaj uygulamalarında kullanılan, API (Amerikan Petrol Endüstrisi) standartlarına göre üretilmiş metal ürünlerin toplamına verilen addır [9].

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, OCTG içerisinde 3 tip boru bulunmaktadır. Bunlar; delici borular, sondaj boruları ve muhafaza borularıdır [10].



Şekil 2.6 : OCTG boru çeşitleri[10].

2.1.3.1 Delici borular

Delici borular matkap ucuna kuvvet uygulayan ve delme sıvısını aktaran dayanıklı dikişsiz çelik borulardır. Bu borular delme sıvısının delikten aşağıya doğru pompalanmasını sağlamak için oyuk oluşturmaktadırlar. Asıl görevleri petrol sondaj ve muhazafaza borusu için boşluk oluşturmaktır. Bu borular sondaj yapılırken yüksek tork, kendi ağırlıklarından ötürü eksenel gerginlik ve sondaj sıvısının tahliyesi esnasında iç basınç etkisi altındadırlar [10].

2.1.3.2 Sondaj boruları

Muhafaza boruları içinden geçen borulardır. Petrolün yeryüzüne çıkarken içinden geçtiği borulardır. OCTG ailesinin en basiti olan bu borular genellikle taşıma ve depolama sırasında kolaylık sağlaması açısından 9 m'lik iki ucu dişli olacak şekilde üretilir. Sondaj esnasında montajlanır ve kuyuya verilir [10].

2.1.3.3 Muhafaza boruları

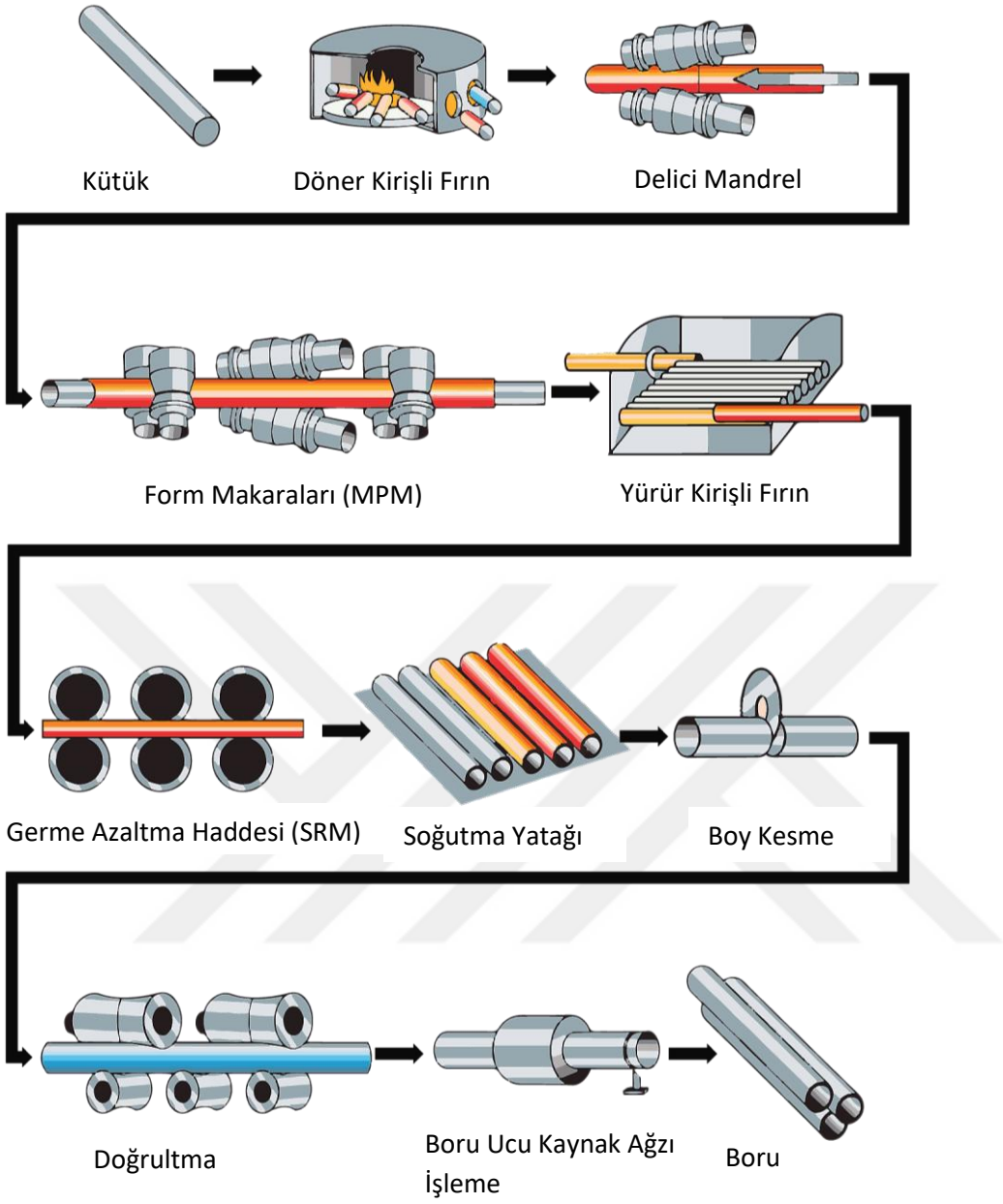
Petrole ulaşmak için zemine kazılan asıl delik olan sondaj deliğini hizalamak için kullanılan borulardır. Delme boruları gibi eksenel gerilime maruz kalırlar. İçlerinden geçen sondaj borusunu dışarıdaki baskıya karşı korurlar. Ayrıca sızıntı oluşması durumunda, petrolün toprağa ya da denize yayılımını engellerler [10].

Muhafaza boruları sektörde petrol kazık boruları olarak da adlandırılmaktadırlar. Kazık boruları dikişsiz (seamless) ve dikişli (welded) olarak ikiye ayrılırlar [9].

Dikişsiz boru üretimi:

Şekil 2.7'de akış şeması verilmiş olan dikişsiz boru üretimi, müşterinin belirttiği spesifikasyonda çelik tedarikçisinden alınan kütüğün döner tabanlı fırınlarda yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmasıyla başlar. Ana boru olarak da bilinen silindirik boşluk, döner delici mandreli kütüğün ortasında tutmaya yarayan makara seti düzeni ve döner delici mandrel yardımıyla oluşur. Mandrelin dış çapı üretilecek borunun iç çapına eşittir. İkincil form makaralarıyla boru istenilen dış çap ve et kalınlığına getirilir [11].

Mandrel ile içi boşaltılırken strese maruz kalan boru yürür kirişli fırınlarda tavlanır. Boru formunu kalibre makaraları ile alır ve soğumaya bırakılır. Soğuyan boru istenilen boylarda kesilir, doğrultma makaralarından geçer ve gerekli boru ucu operasyonu yapıldıktan sonra gönderime hazır hale gelir [12].



Şekil 2.7 : Dikişsiz boru üretim akışı[12].

Dikişli boru üretimi:

Dikişli borular sürekli döküm yöntemiyle üretilmiş çelik bobinlerden ya da plakalardan üretilirler. Plakadan üretilecek dikişli borularda plakaya dairesel form plaka büküm makinesiyle verilir. Eğer boru bobinden üretilecekse üretim sürekli devam edecek ve boru şekli makaralar (roller) ile verilecektir. Silindir şeklini almış borular kaynak dolgu malzemesi kullanılarak ya da dolgu malzemesiz kaynatılırlar. Dikişsiz borular ile kıyaslandığında kaynaklı borularda boru çapında bir üst sınır olmaması ve ucuz olması dikişli boruları daha avantajlı hale getirmektedir [12].

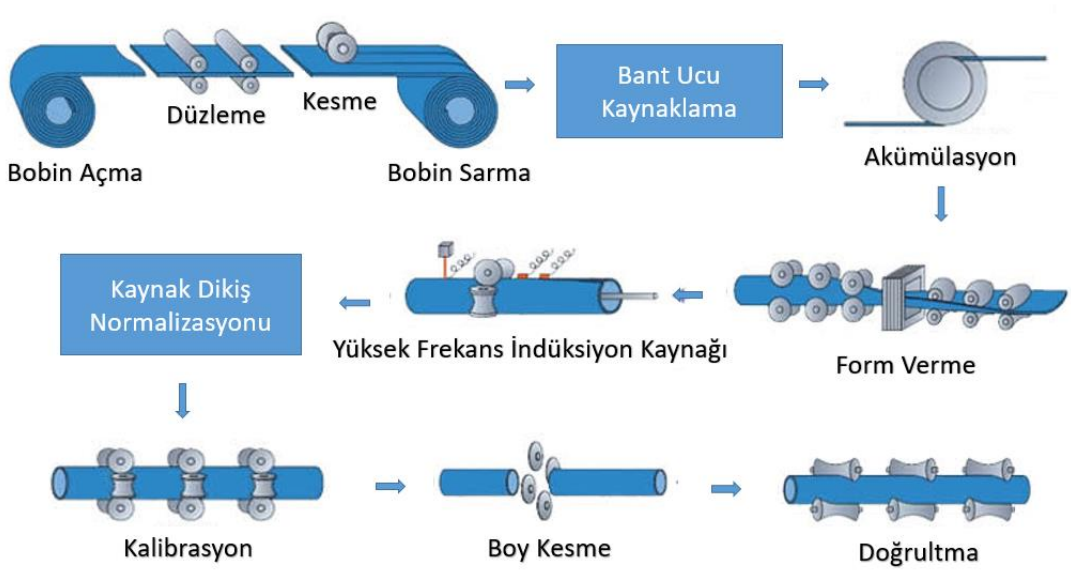
Dikişli boru üretiminde farklı kaynak yöntemleri kullanılır. Bunlar;

- SAW (Submerged Arc Welding) – Tozaltı Ark Kaynağı
- EFW (Electrical Fusion Welding) – Elektrik Füzyon Kaynağı
- ERW (Electrical Resistance Welding) – Elektrik Direnç Kaynağı
- HFW (High Frequency Induction Welding) – Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynağı[12]

2.2 Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynağı ile Boru Üretimi

Yüksek frekans kaynağı, yüksek mukavemetli sıcak haddelenmiş çeliklerden petrol ve gaz transportunda kullanılan boruları üretmek için kullanılan modern üretim yöntemidir. Bu teknoloji ile uzunlamasına (longitudinal) boru üretimi herhangi bir sarf malzemesi kullanılmadan gerçekleştirilir [13].

Şekil 2.8'de yüksek frekans kaynağı ile dikişli boru üretim akış şeması verilmiştir. Aşağıda detaylı olarak incelenecek olan yüksek frekans indüksiyon kaynağı kısaca şöyle özetlenebilir: Üretim sıcak haddelenmiş çeliğin bobin olarak üretime girişiyle ve boru çapına göre belirli genişlikte dilimlenip tekrar sarılmasıyla başlamaktadır. Sarılan bant tekrar açılır ve akümülasyon makinasına yüklenir. Birkaç bant arka arkaya kaynaklanarak süreç sürekliğini sağlamak adına makinaya yüklenmektedir. Yüklenen bant form makaralarında soğuk deformasyon uygulanarak boru haline gelir. Boru haline gelen bandın iki ucu yüksek frekans indüksiyon kaynağı kullanılarak kaynatılır. İç ve dış cürufu alınarak kaynak bölgesi bölgesel homojenizasyon fırınlarında tavlanır. Kalibrasyon makaralarında boruya baskı uygulanarak istenilen dış çapa getirilir. Belirtilen boylarda kesilen borunun iki ucuna kaynak ağzı açıldıktan sonra olası hata tespiti için hidrotest ve ultrasonik test uygulanır. Test sonuçları uygun olan borular müşteriye sevk edilmek üzere stoğa alınır. Yüksek mukavemet istenen petrol boruları ise su verme ve temperleme işlemi ile sertleştirilmek üzere ısıl işlem bölümüne sevk edilir [9].



Şekil 2.8 : Yüksek frekans indüksiyon kaynağı ile boru üretim akış şeması[14].

2.2.1 Hammadde kabülü

Çelik tedarikçilerinden gelen sıcak haddelenmiş ham madde Şekil 2.9'da görüldüğü gibi stok sahasına alınır. Bant et kalınlığı, genişliği ölçülür ve çelik kalitesi kontrol edilir. Boru izlenebilirliğini sağlamak için hammadde sisteme kayıt edilir. Gelen çelik kalitesi ile uyumunu belirlemek için kimyasal ve mekanik testlere tabi tutulur. Ham maddenin kimyasal kompozisyonu kaynaklanabilirliğini etkilediğinden önemli bir parametredir. Ayrıca bant boru formunu alırken soğuk deformasyona maruz kalacağı için yüksek akma mukavemeti istenir [9].



Şekil 2.9 : Hammadde kabulü[17].

2.2.2 Bant dilme

Üretilecek boru çapına ve bant genişliğine göre, takım çeliklerinden yapılmış disk biçimli bıçaklar alt ve üst millere dizilir. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, dilme bıçakları arasından geçen bant, kesme ve koparma kuvvetleri ile kesilir. Daha sonra dilinmiş

bantlar ayırıcı parçalar yardımıyla bant sarıcıya sarılır ve işlem bittikten sonra vinç yardımıyla bant sahasına ya da bant boşaltmaya alınır [15].



Şekil 2.10 : Bant dilme hattı[15].

2.2.3 Bant boşaltma ve akümülasyon

Üretilecek boru çapına göre dilinmiş olan bant, bant boşaltma bölgesine alındıktan sonra Şekil 2.11'de görülen bant boşaltma makarasına yüklenir. Çevresinde dönebilen bant boşaltma makarası, bandı akümülasyon bölgesine iletmekle görevlidir. Bant sürekliliğini sağlamak adına akümülasyonda bulunan bandın sonu ile yeni yüklenen bandın ucu birbirine kaynaklanır, kaynak türü bant kalitesine göre değişmektedir bunlar; gazaltı, elektrot veya oksi-gaz kaynağı yöntemleri olabilir [16].



Şekil 2.11 : Bant boşaltma[17].

Bant boşaltmadan iletilen dilimlenmiş bant akümülasyon bölgesinde depolanır. Akümülasyonun asli görevi üretimin sürekliliğini sağlamaktır, bu amaçla akümülasyon bölgesinde Şekil 2.12'de görüldüğü gibi bir miktar dilimlenmiş bant

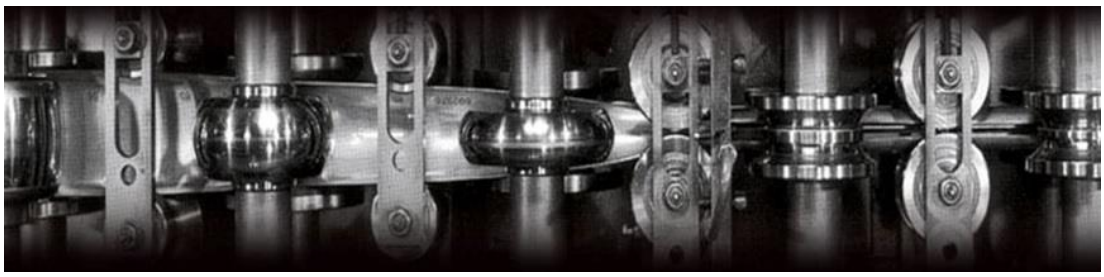
bulundurulur, bu yedek bant dilimlenmiş bant değişim sırasında üretimin devam etmesini sağlar [17].



Şekil 2.12 : Akümülasyon[17].

2.2.4 Form verme

Akümülasyondan düz formda gelen dilimlenmiş bant, plastik şekil verme işlemiyle marakalar tarafından şekillendirilir. Şekillendirme genel olarak 2 kademede yapılır. 1. Kademe Şekil 2.13'de görülen büyük radyüslü makaralarla form verme işlemidir. Burada dikey ve yatay makara grupları banda alttan, üstten ve yanlardan baskı uygulamaktadır. Böylece bant dikdörtgen formdan silindirik forma geçmiş olur [15].



Şekil 2.13 : Form verme makaraları[9].

2. Kademede kaynak bölgesi yüzeyini genişleterek mukavemetli bir boru üretmek için, dairesel şekil almış olan sacın uçlarına kılıçlı makaralar tarafından baskı uygulanır. Kılıçlı makaraların görevi uçların düzeltilmesi ve kaynak ağzının açılmasıdır [16].

2.2.5 Yüksek frekans indüksiyon kaynağı

Micahel Faraday tarafından keşfedilmiş olan indüksiyon, bakır gibi iletken malzemelerin bobini ile başlamıştır. Bobin boyunca ilerleyen akım debisi, bobin etrafında manyetik alan meydana getirmektedir. Manyetik alanın yönü bobin

içerisinde dolanan akımın yönüne bağlıdır, bu yüzden bobin içerisinde bulunan alternatif akım frekansı manyetik akımın aynı oranda değişiminin bir sonucudur. Yani, 60 Hz AC akımı manyetik alanın 60 kez yön değiştirmesi demektir [18].

Yüksek frekans 100 ile 800 kHz arasında değişen AC akımıdır ve bu akımın saniyede 100 000 ile 800 000 arasında yön değiştirmesi anlamına gelmektedir [19].

İletken bir malzeme, bir iş parçası, değişen manyetik alana yerleştirildiğinde iş parçasında Farday Kanunu (2.1) gereği voltaj oluşur. İndüklenen voltaj elektronların akışına yani akıma neden olur. İş parçasından geçen akım bobin içinden geçen akımın tersi yönde hareket eder. Bu, iş parçasındaki akım frekansının, bobin içindeki akımın frekansı kontrol edilerek kontrol edebileceği anlamına gelmektedir [18].

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \tag{2.1}$$

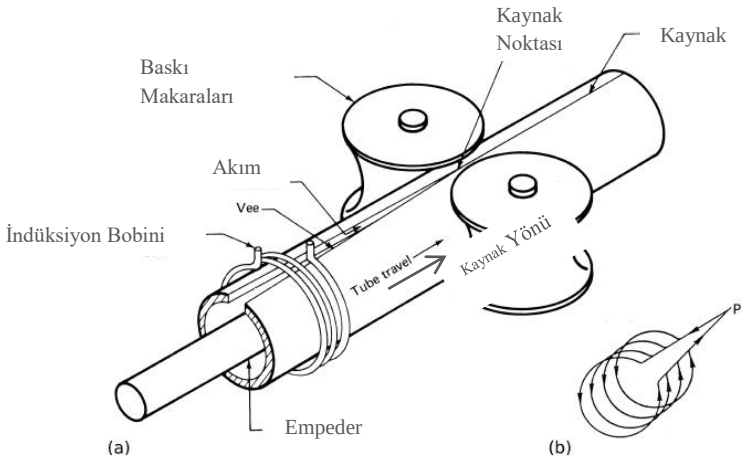
Bir başka kaynağa göre indüksiyon gücün iş parçasına temas etmeden alternatif manyetik alan sayesinde iletilmesidir. İndüksiyon bobini bu manyetik alanı 2.2'de belirtilen eşitliğe göre üretir,

$$P_i = k \,.\sqrt{f}\,.\, A_W^2 \tag{2.2}$$

burada, P_i indüklenen güç ($kWcm^{-2}$), k sabit ve A_W ise indüksiyon bobininin her cm sinde dönen akımı temsil etmektedir. f ise frekanstır [2].

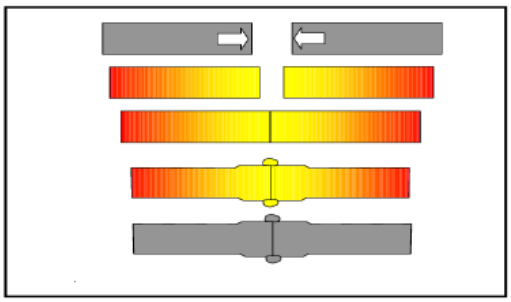
Akım ortam içinden akarken, elektronların hareketine bir miktar engel olur. Bu direnç ısı olarak ortaya çıkar, buna Joule Isıtma Etkisi denir. Akım, elektronların akışına daha dirençli olan malzemelerin içinden geçtikçe malzeme daha fazla ısı yayar. Böylece indüklenmiş bir akım kullanarak yüksek iletken malzemeleri çelik, bakır vb. ısıtmak mümkündür. Bu olay endüktif ısıtma olarak adlandırılmaktadır [18].

Yüksek frekans indüksiyon boru kaynağı işleminde, Şekil 2.14'de gösterildiği gibi açık kaynaklı boruya kaynak bölgesinin hemen önüne yerleştirilmiş olan indüksiyon bobini tarafından yüksek frekanslı akım yüklenir. Borunun kenarları bobin boyunca ilerlerken birbirinden ayrı durur. Boru kenarları, birleşme noktası kaynak noktasının biraz gerisinde açık bir kaynak giriş açısı (VEE) oluşturur. İndüksiyon bobininden indüklenen akımın çoğunluğu yolunu biçimlendirilmiş bandın kenarlarını izleyip bant kenarlarının birbirine değdiği ilk nokta olan APEX'den geçerek tamamlar [20].



Şekil 2.14 : Yüksek frekans indüksiyon kaynağı ilüstrasyonu(a) ve yüksek frekans kaynağının izlediği yol(b).'P' ise burada kaynağın başladığı APEKS noktasıdır[2].

Şekil 2.15'te görüldüğü gibi, yüksek frekans akım yoğunluğu kaynak noktasına yakın yan yüzeylerde ve birleşim noktasında en yoğundur. Yan yüzeyler APEKS noktasına geldiğinde kaynak tutacak kadar hızla ısınma meydana gelir. Kaynak makaraları ısınmış kenarları bastırarak kaynağı tamamlar [21].

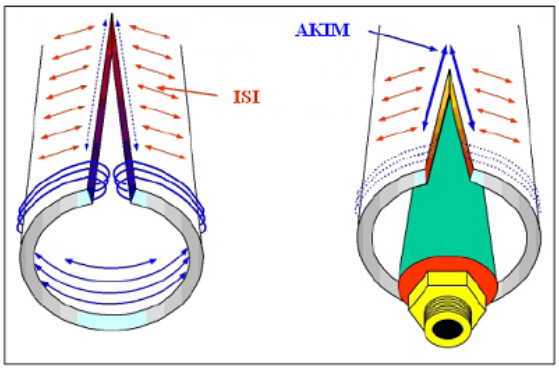


Şekil 2.15 : Isıtılan bant kenarlarının birleşimine kadar olan ısı değişimi[21].

Yüksek frekans kaynağında kullanılan ve Şekil 2.14a'da gösterilen indüksiyon bobini endüstride İndüktör olarak bilinmektedir. Çok iyi bir iletken malzeme olan bakırdan yapılan bu indüktörler boru çapına uygun çap ve genişlikte olmalıdır. Ayrıca indüktörlerin ömrünün ve veriminin yüksek olması için çok iyi soğutulması gereklidir [20].

Yüksek frekans kaynağında kullanılan başlıca elemanlardan bir diğeri ise İmpederdir. İmpederin görevi Şekil 2.16'da da görüldüğü gibi boru üzerinde indüklenen akımın V açıklığından içeriye akmasını önleyerek, akımın bant kenarlarında odaklanarak sadece V açıklığı yüzeyinde akmasını sağlamaktır. İmpeder içerisinde başlangıçtaki iletkenliği 3000 Gauss, doyum noktasındaki iletkenliği 3500 Gauss ve Curie noktası sıcaklığı 180°C olan ferrit çubuk bulunmaktadır. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip

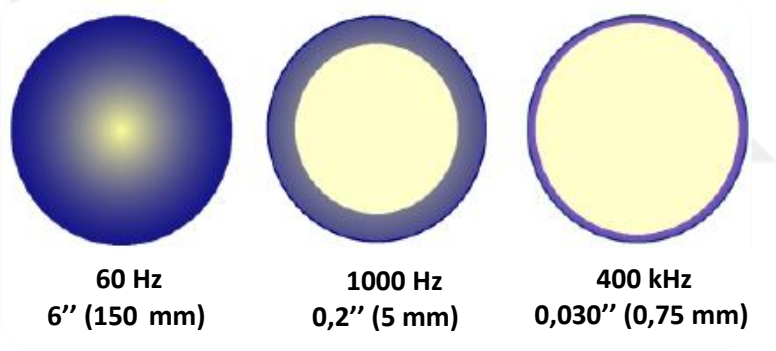
olan ferrit, demir, mangan ve çinko gibi alaşımlardan oluşan ve toz metalürjisi ile üretilen bir seramik malzemedir. İyi bir impeder kuvvetli manyetik alanlarda manyetik doygunluğa ulaşmadan çalışabilme özelliğine sahip olmalıdır [15].



Şekil 2.16 : İmpederin yüksek frekans akımına etkisi[22].

Yüzey ve yakınlaşma etkisi:

1990'ların ortalarında bir üretim yöntemi olarak kullanılmaya başlanan yüksek frekans kaynağı iki önemli olay içermektedir. Bunlar yüzey etkisi ve yakınlaşma etkisidir [23].



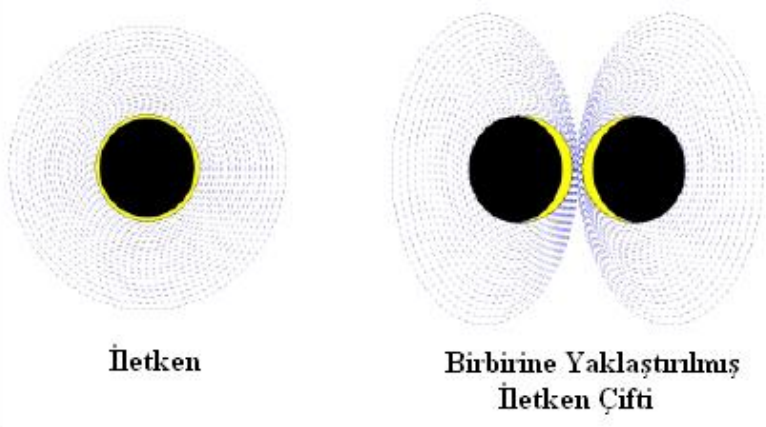
Şekil 2.17 : Yüksek frekans yüzey etkisi (penetrasyon derinliği mavi ile belirtilmiştir.)[22].

Yüzey etkisi, frekans arttıkça akımın iletken yüzeyinde toplanması eğilimidir. İletken yüzeyinde yüksek frekanstan kaynaklı olarak sadece çok ince bir tabakada elektrik akımı ve manyetik alan oluşur. Şekil 2.17'de görüldüğü gibi ince tabakada ısınma meydana gelmektedir [22].

Bu ince tabaka *penetrasyon derinliği* olarak adlandırılmakta ve 2.3'de verilen eşitlikte ε ile gösterilmektedir. ε cm cinsinden aşağıda belirtilen eşitlik yardımıyla hesaplanır;

$$\varepsilon = 5030 \sqrt{\frac{\varrho}{\mu f}} \qquad (2.3)$$

burada birimi (Ω cm) olan rezistivite ϱ ile ve iletkenin yapıldığı malzemeye göre değişkenlik gösteren relatif geçirgenlik μ ile gösterilmektedir [2].



Şekil 2.18 : Yüksek frekans yakınlaşma etkisi (akım debisi sarı, manyetik alan mavi kesikli çizgi ile gösterilmiştir.)[22].

Bir iletken başka bir iletkene yaklaştırıldığında, elektromanyetik yakınlaşım etkisinden dolayı akım yoğunluğu kendi içinde yeniden düzenlenir. Eğer iletkenler üzerinde akan akımlar birbirine ters yönde ise, bu iki akım birbirlerine en yakın noktada (iletkenlerin içi yüzeyinde) yoğunlaşır [24]. Bir başka deyişle birbirlerine yakınlaşan iletkenler arasındaki manyetik alan çizgileri geçebilecek daha az yer buldukları için birbirilerine geçerler. Şekil 2.18'de birbirine yaklaşan iki iletken çifti ve manyetik alan çizgilerinin dağılımı özetlenmiştir [22].

Özetle birbirine yakınlaşan iki bant ucu yüzey ve yakınlaşma etkisiyle metalin ergime noktasına kadar ısıtılır ve kaynak baskı makaralarıyla bu iki uç birbirlerine bastırılır [17].

2.2.6 Metalografi işlemi

Kaynak sonrasında kaynatılmış borunun kesit bölgesinden numune alınarak Şekil 2.19'da verilen zımparalama, parlatma ve dağlama adımları izlenir. Daha sonra Optik Mikroskop altında malzemenin ITAB'ı incelenir ve Makro görüntüsü alınır. Mikro analizde malzemenin lif akış açıları, iç çapak ve dış çapak miktarı, bant kenarlarının birleşme durumu ve kaynak esnasındaki baskı miktarı analiz edilebilmektedir. Mikro analiz 50X-200X arasındaki büyütmelerde yapılırken, makro analiz için 5X büyütme yeterlidir. Kaynak sonrasında, ısıl işlemden hemen önce yapılan bu analizle kaynak parametrelerinin kontrolü sağlanmaktadır [17].



Şekil 2.19 : Metalografi aşamaları[17].

2.2.7 Homojenizasyon tavı

Yüksek karbonlu, yüksek alaşımlı ve et kalınlığı yüksek çelikler kullanılıyorsa, kaynak sırasında oluşan termal iç gerilmeleri gidermek ve gevrek kırılmayı engellemek için kaynak sonrası ısıl işlem uygulanır. Bu işlem ile kalıntı stresler giderilirken alınan termal enerji metalin tane sınırlarının kaymasında, dislokasyonların giderilmesinde, boşluk ve kayma düzlemlerinin oluşmasında kullanılır. Isıl işlem sonrasında kalıntı stres azalır, mukavemet ve sertlik artar [2].

Yüksek frekans kaynağı kullanıldığında en çok ısınan bölgeler bandın uç kısımları (dış ve iç) ITAB'ın çekme mukavemetini ve tokluğunu azaltır. Kaynak bölgesinin tavlanması, ITAB'ın mukavemetinin malzemeye yakın bir mukavemete tekrar gelmesine yardımcı olmak için yapılır. Isının etkisiyle irileşen (course) taneler daha homojen (fine) bir dağılıma geçerler [25].

Şekil 2.20'de gösterilen, kaynak bölgesinin tavlanmasında kullanılan fırın indüksiyon fırını olup kaynak prosesinde olduğu gibi çeliğin kaynak bölgesini manyetik akımla ısıtmaktadır. Kaynaklanan boru ilk olarak 300 ˚C, daha sonra 800 ˚C ve en son 1100-1300˚C sıcaklıklı tav fırınlarından geçerek atmosfer koşullarında soğumaya bırakılır [17].



Şekil 2.20 : Homojenizasyon tavı[17].

2.2.8 Kalibrasyon

Boruya nihai ölçülerini ve ovalitesini veren işleme kalibrasyon denir. Şekil 2.21'de görüldüğü gibi kalibrasyon işlemi makaralar yardımıyla gerçekleştirilir. Genelde dört pasajdan oluşan bu makaralar yatay ve dikey olarak boru çapını eşit olarak azaltır, nihai boru çapına son pasajdan sonra ulaşılır [17].



Şekil 2.21 : Kalibrasyon makaraları[17].

2.2.9 Boy kesme ve doğrultma

Boy kesme işlemi, yırtarak kesim yapan testere veya soğuk kesim testere ile yapılır. Bu işlemden sonra boru, doğrultma makaralarına doğru yönlendirilir. Testere işleminde bozulan doğrusallık, doğrultma makaralarında düzeltilir [17].

2.2.10 Hidrotest

Yapılan kaynağın kullanım yerine bağlı olarak içinden geçen sıvının ya da gazın basıncına dayanımını test etmek için hidrotest işlemi uygulanır. İşlemin amacı, kullanım şartlarını simüle etmektir. Şekil 2.22'de görüldüğü üzere üretilen boru hidrotest sistemine gelir, iki ucundan kapatılarak içerisine basınç oluşturması için bor yağlı su verilir. Uygulanan basınç üretim standardına veya müşterinin isteklerine göre belirlenir [17].



Şekil 2.22 : Hidrotest[17].

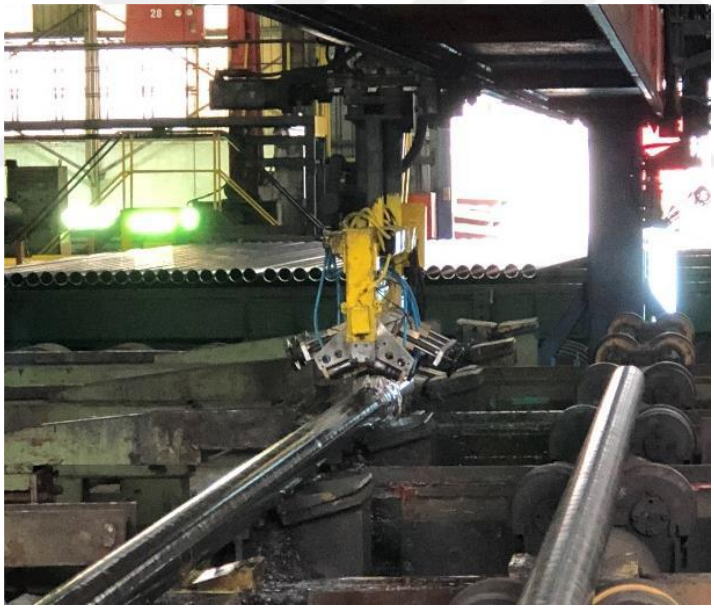
2.2.11 Görsel kontrol ve ultrasonik test

Hidrotest işlemini başarıyla geçen boruların içerisine Şekil 2.23'teki gibi görsel kontrol yapılır bunun sebebi çapak, keskin kenar ve makara izi tespitidir. Görsel kontrolde fark edilemeyen hidrotest kaynaklı mikro çatlakları tespit etmek için Şekil 2.24 ve 2.25'te verilen ultrasonik test işlemi uygulanır [17].

Ultrasonik test işleminde; muayene yapılacak borunun kaynak bölgesi probun altına getirilerek, prob boru boyunca hareket ettirilir. Set edilen eşik (threshold) değerini geçen hatalı borular hata sinyali (sinyal lambası ve sesli uyarı) verir. Hatalı bölge Şekil 2.25'teki gibi işaretlenir ve et kalınlığı azaltılmayacak şekilde zımparalanır veya taşlanır [26].

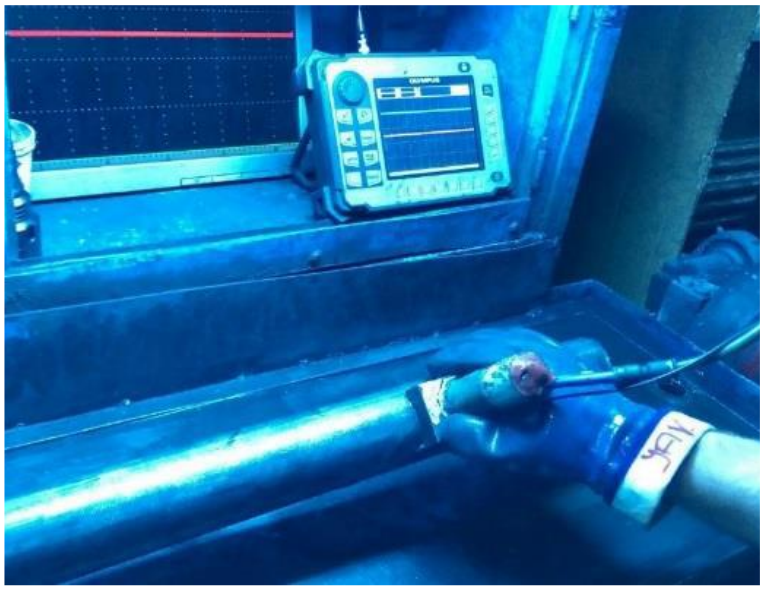


Şekil 2.23 : Görsel kontrol[17].



Şekil 2.24 : Otomatik ultrasonik test işlemi[26].

Boru tekrar manuel ultrasonik teste alınır. Sinyal tekrarı durumunda borular değerlendirilme sehpasına alınır. İşaretli yer incelenir. Göz kontrol operatörleri hata hakkında genel bir sebep (kaynak/malzeme) söyleyerek numuneyi mikro ve makro analize yollamak üzere keser. Ayrıca üretim süresince ultrasonik test sonrası kaynak dikişini kontrol etmek için her 5 boruda 1 mikro numunesi alınır [26].



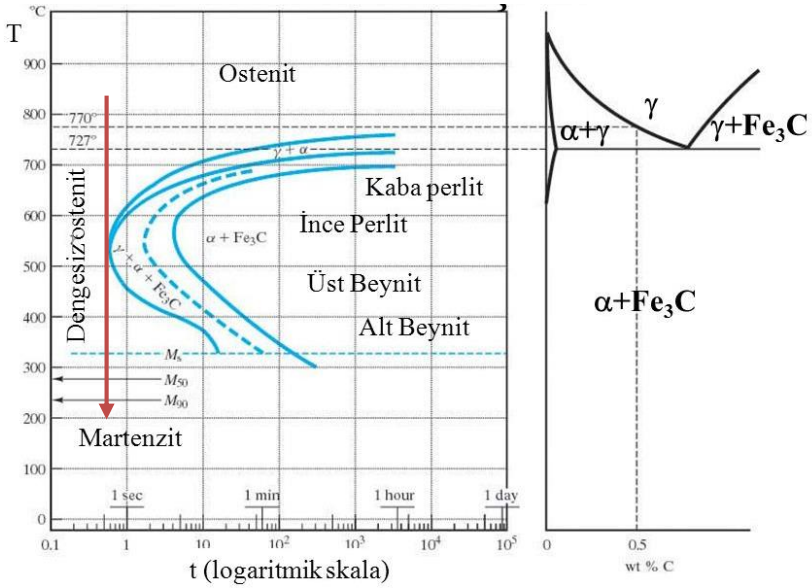
Şekil 2.25 : Ultrasonik test ekranı[26].

2.2.12 Sertleştime Isıl İşlemi

Sertleştirme ısıl işlemi su verme ve temperlemeden oluşmaktadır.

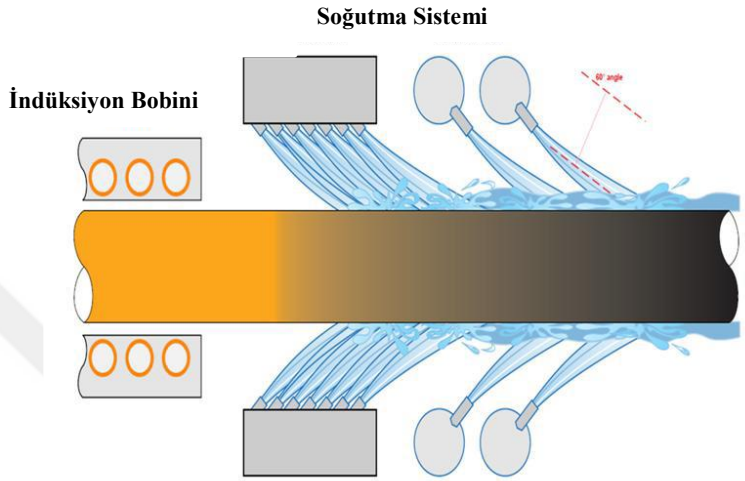
2.2.12.1 Su Verme

Katı çelik çözeltisinin yüksek sıcaklıktaki kararlı östenit fazından aniden soğutulmasıyla oluşan yapı martenzit olarak adlandırılır ve bu işleme su verme işlemi denir. Şekil 2.26'da verilen TTT diyagramında da görüldüğü gibi, çelik bu işlem ile beynit yapısına dönüşmeden martenzit yapısına geçer. Su verme olarak bilinmesine rağmen soğutma aracı olarak yağ ve hava da kullanılabilmektedir [27].



Şekil 2.26 : Sıcaklık-Zaman-Dönüşüm Diyagramı[28].

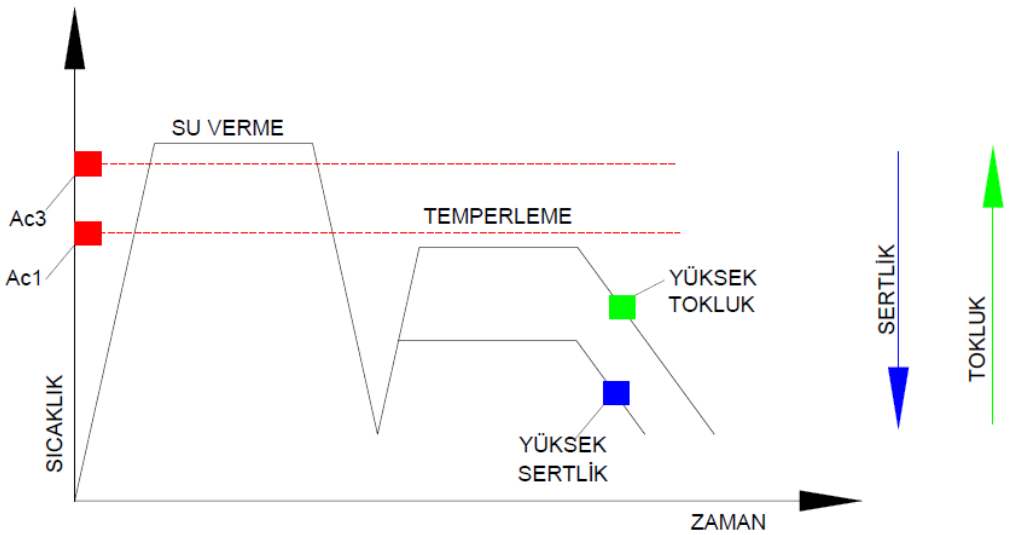
Çelik en yüksek sertlik değerine martenzit yapısındayken sahiptir. Bu yüzden sertlik değerinin önemli olduğu basınç altında çalışacak olan petrol sondaj ve iletim borularında su verme işlemi uygulanmaktadır. İndüksiyon bobinleri ile 800-900 ˚C sıcaklık aralığına kadar ısıtılan boru, homojen olarak Şekil 2.27'de de görüldüğü gibi su ile soğutulmaktadır. Bu soğutulmayla borunun dış kısmı basma, iç kısmı çekme gerilimine maruz kalmaktadır [26].



Şekil 2.27 : Boruya su verme işlemi [29].

2.2.12.2 Temperleme

Su verilmiş çeliklerin gevrekliğinin azaltılması ve/veya sünekliliğinin artırılması için Ac1 sıcaklığı altında yeniden ısıtılması işlemine temperleme adı verilmektedir. Bu işlem ile su verme işleminden dolayı malzeme içerisinde biriken kalıntı gerilimler giderilmektedir [27].



Şekil 2.28 : Isıl işlem grafiği.

OCTG borularının yüksek sertlik ve tokluk gereksiniminden dolayı, bu borular özelinde temperleme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.28'de belirtilen ısıl işlem grafiğinde de görüldüğü gibi su verme işlemine maruz kalan boru Ac1 faz dönüşüm sıcaklığı altında kontrollü olarak ısıtılmalıdır. Isıtma işlemi Şekil 29'da görüldüğü gibi indüksiyon tipi fırınlarda boru boyunca 480-500 ˚C arası sıcaklığa kadar yapılır [26].



Şekil 2.29 : Temperleme[29].

2.3 Kaynak Kalitesine Etki Eden Parametreler

Yüksek frekans kaynağında kaynak kalitesine etki eden ana değişkenler;

I. Ana malzeme özellikleri
   - Kimyasal Kompozisyon
   - Mikroyapı
   - Kaynaklanabilirlik

II. Mekanik faktörler
   - 'V' açıklığı oranı
   - 'V' açıklığı doğrultusunda bant paralelliği

III. Elektriksel faktörler
   - Frekans
   - Kaynak Gücü
   - Akım

- Voltaj
- Kaynak Hızı

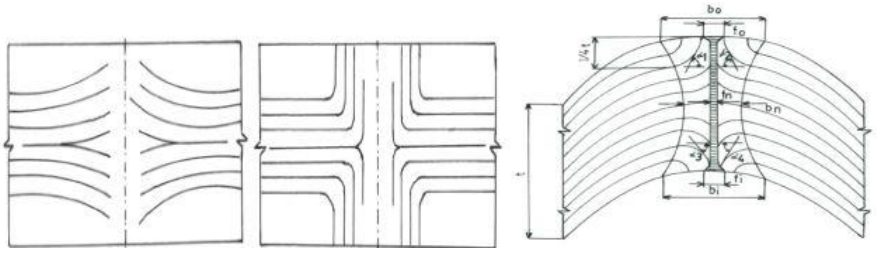
IV. Kaynak sıcaklığı

V. Kaynak baskısı ve kaynak öncesi-sonrası boru çevre farkı miktarıdır [30].

Petrol sondaj işlemlerinde operasyon sürelerinin azaltılması ve kullanılan boruların fiziksel dayanımı düşünüldüğünde, boru üretiminde kullanılan malzemenin kimyasal yapısı önem arz etmektedir. Et kalınlığını arttırmadan sadece termomekanik olarak Ti, V, Nb, Mo, Cr gibi elementlerle mikro alaşımlandırılmış çeliklerden üretilen borular daha mukavemetli olup, proje maliyetlerinin azaltılmasına da katkıda bulunmaktadırlar [30,31].

Yüksek frekans kaynağında Mn/Si oranına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu oranın 8:1 oranı altında olması çeşitli kaynak hatalarına sebebiyet vermektedir [32].

Yüksek frekans kaynaklı boru üretiminde kullanılan sıcak haddelenmiş çelik haddelenmeden kaynaklı bantlı ve ince taneli yapıya sahiptir. Bu bantlaşma ferrit ve perlitden oluşmakta ve hadde yönünde uzamaktadır. Form verme prosesinde plastik deformasyon altında bu bantlaşma Şekil 2.30'da görüldüğü gibi yönlenmektedir. Çelik alaşımlandırılma esnasında metal oksit kalıntılarının kalması (segregasyon) bu yönlenmenin yapılamamasına dolayısıyla kaynak kalitesinin azalmasına sebebiyet verecektir [33].



Şekil 2.30 : Plastik deformasyon sırasında birleşme (kaynak) çizgisi etrafındaki akış çizgileri ve akma açıları[33].

Karbon eşdeğeri, kaynağın soğuma anında martensit oluşturma ve soğuk çatlamaya (cold cracking) maruz kalma eğiliminin bir ölçüsüdür. Karbon eşdeğeri 0,40 ile 0,60 arasında olduğunda, kaynak ön ısıtması gerekli olabilir. Karbon eşdeğeri düşükse kaynaklanabilirlik kötüdür [17].

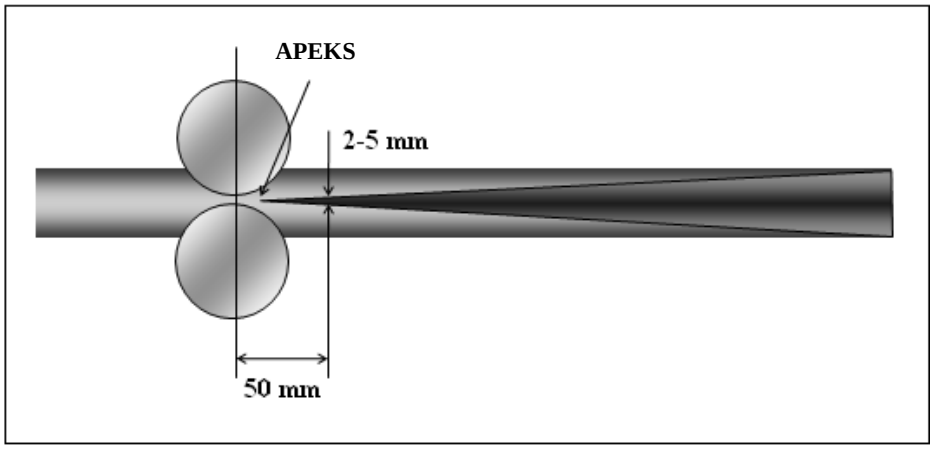
Çeliklerin farklı dönüşüm fazları (martenzit ve beynit) çeliklerin sertliğini ve kırılganlığını etkiler. Bu fazların dönüşümü kimyasal kompozisyonla ilişkilidir. Çelikler eklenen alaşım elementlerinin çeliği sertleştirebilme kabiliyetlerine göre sınıflandırılırlar [34].

En basit karbon eşleniği hesaplama formülü aşağıdaki gibidir;

$$CE_t = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (2.4)$$

Yüksek frekans kaynağında verilen ısı girdisi ile birlikte ferritik yapıda olan çeliğin sıcaklığı 705°C ulaştığında östenik yapıya dönüşmeye başlar. Karbon östenitte daha iyi çözünür. Ferrit içerisindeki karbonlar östenite difüze olur. Sıcaklık yaklaşık olarak metalin sıvı hale geçtiği 1480°C ulaştığında demir oksijen ile reaksiyona girerek demir oksit oluşturur. Yapıdaki karbon ise oksijenle birleşik yaparak, karbonmonooksit ve karbondioksiti meydana getirir. Ayrıca karbon sıvı metalin dışına difüze olarak ve oksijenle birleşerek CO_2 meydana getirir. Bu durum kaynak dikişinin karbonca fakir olmasına sebebiyet verir. Bu bölge soğuduğunda HMK ferritik yapıya sahip olur. İyi bir kaynak dikişi için bu hattın düzgün ve kalınlığının olabildiğince az olması gereklidir [15].

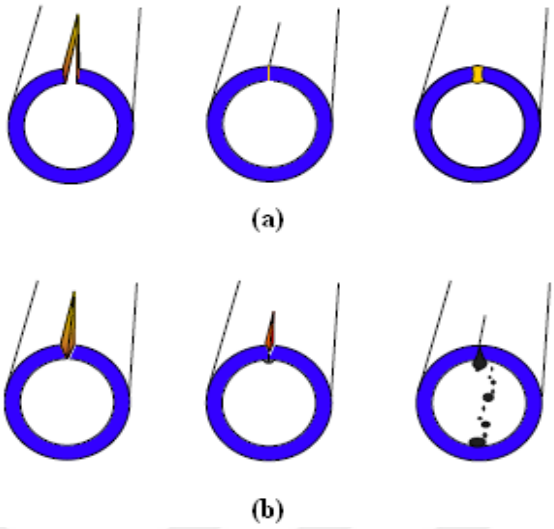
VEE açıklık boyu kaynak makara çapı ile ilişkilidir. Açıklık boyu kısalırsa akıma karşı olan direnç azalacağından verim artar. Şekil 2.31'de gösterildiği gibi ideal "VEE" açısı 2- 4 derece ya da 50 mm de 2-5 mm'dir [9].



Şekil 2.31 : V-açıklığını gösteren illüstrasyon[9].

Isınmanın homojen dağılması için bant uçları birbirine paralel olmalıdır. Şekil 2.28'de birbirine paralel olan ve olmayan boru uçları gösterilmiştir. Paralel olan bant ucunda

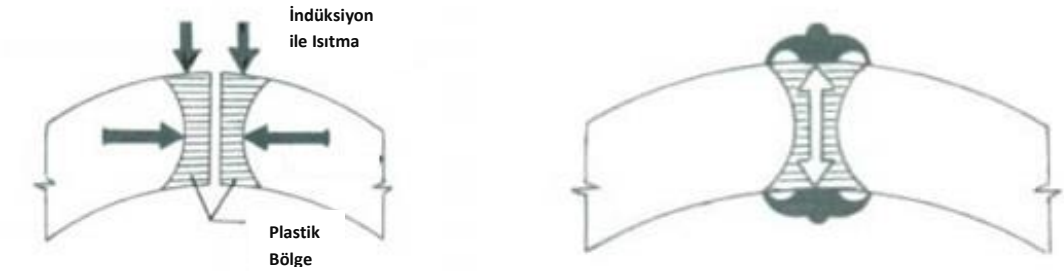
ısının homojen dağılımı gözlenirken, Şekil 2.32b'de diğer uç fazla ısınmış ve boru içine ergimiş metal damlama problemi gözlenmiştir [35].



Şekil 2.32 : Bant kenarı paralelliğini gösteren illüstrasyon[35].

Kaynak kalitesine etki eden parametrelerden bir diğeri ise elektriksel faktörlerdir. Yüksek frekans kaynağı akım, voltaj ve kaynak hızına bağlı olarak farklı kaynak kaliteleri ortaya çıkarabilir. Verilen akım ve voltaj yüksek ısı oluşturduğunda çoğunlukla delinme hatası görülebilir [9].

Verilen sıcaklıkla ısınan bant kenarları birbirlerine kaynak baskı makaralarıyla kaynaklanır. Yeterli miktarda uygulanan baskı ısınan metalin kenarlarındaki oksitlenen metal cürufunun dışarıya çıkmasını sağlar. Cürufun kaynak banyosu içerisinde kalmaması iyi bir kaynak kalitesi (mukavemetli ve tok) ve hatasız bir kaynak dikişi sağlar. Şekil 2.33'de görüldüğü gibi baskı makaraları ITAB'a ısırılmış elma şeklini verir [33].



Şekil 2.33 : Kaynak baskısı sonrası ITAB[33].

Bir diğer parametre ise upsettir. Upsetin tanımı borunun kaynaklanmadan önceki çapı ile kaynaklandıktan sonra ki çapının farkıdır, genellikle 1-5 mm arasındadır. Bu çap

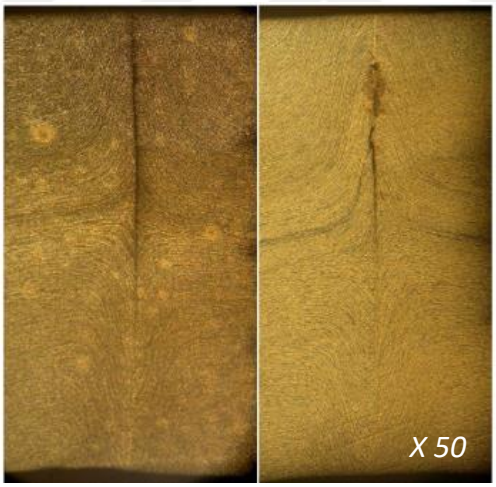
farkına kaynak baskı makaraları sebep olur. Bir diğer deyişle kaynak baskı makaralarını etkileyen her parametre boru çevre farkını(upset) etkiler [17].

2.4 Kaynak Hataları

Kaynağı etkileyen değişkenler optimize edilmez ise çeşitli kaynak hatalarına sebebiyet verilmiş olur [17]. Yüksek frekans kaynağında yaygın olarak görülen kaynak hataları aşağıda sıralanmıştır.

2.4.1 Soğuk kaynak

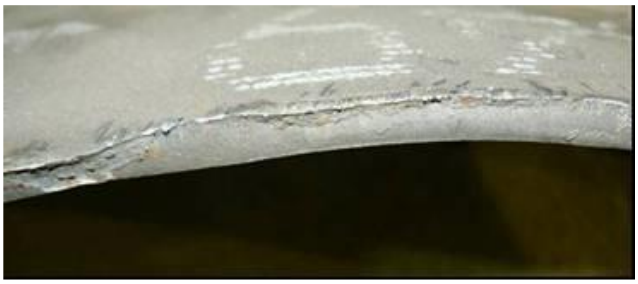
Kaynak yapılan bölgenin ince olup, herhangi bir hasara uğradığında açılabilme tehlikesinin olması durumudur. Soğuk kaynak süreç anında fark edilmez, ITAB bölgesine uygulanan ezme testleri sonrasında Şekil 2.34'de görülen çatlak ile tespit edilir. Yetersiz ısı girdisi ve baskı bu hatanın başlıca sebeplerindendir. Önlem olarak makara bakımları düzenli olarak yapılmalı, kaynak baskısı ve ısı girdisi kontrolü için kaynak esnasında metalografi numunesi alınmalıdır [36].



Şekil 2.34 : Soğuk kaynak makro görüntüsü[37].

2.4.2 Yetersiz nüfuziyet

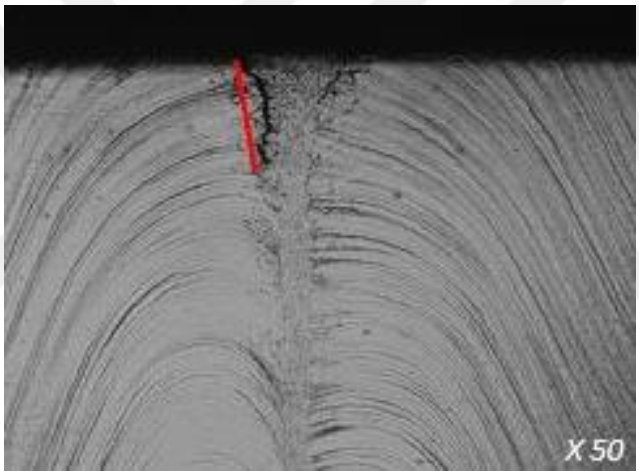
Adından da anlaşılacağı gibi bu hata iki bant kenarının birbirine kusursuz kaynaklanamaması anlamına gelmektedir. Bu hatanın oluşma sebebleri arasında ısı girdisinin yanında diğer faktörler de etkilidir. Kaynak güç parametreleri, VEE açısı ve uzunluğu, empeder konumu ve indüktör çapı birbiri ile bağımlı ya da bağımsız olarak Şekil 2.35'de kaynak dikişi görüntüsü verilen bu problemin oluşmasına sebebiyet verir [32].



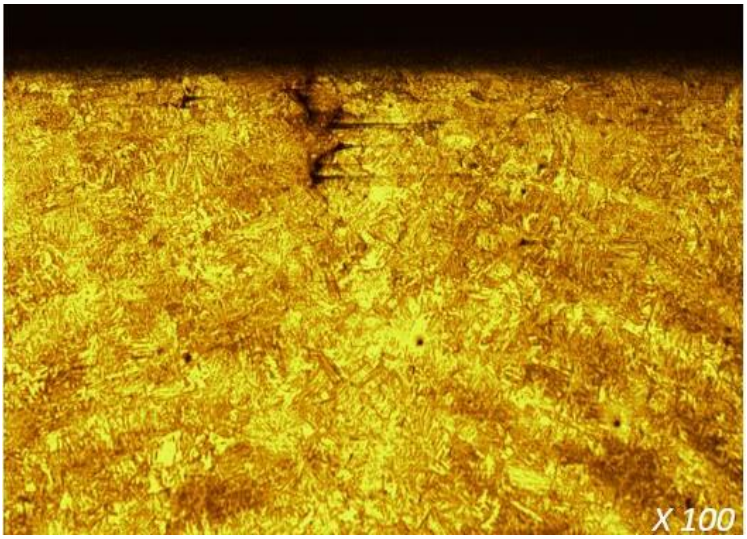
Şekil 2.35 : Yetersiz nüfuziyet sonrası ikiye ayrılan kaynak dikişi[37].

2.4.3 Cüruf çatlağı

Kaynak sırasında dışarı çıkması gereken kaynak atıklarının (özellikle metal oksitlerin) yeterli miktarda dışarı çıkamaması ve kaynak banyosuna nüfuz etmesinden kaynaklı meydana gelen hata türüdür. Bu çatlağı önlemek için yapılması gerekenler baskı miktarının arttırılarak oksit bileşiklerinin dışarı çıkarılmasını sağlamaktır [32].



Şekil 2.36 : Cüruf çatlağı 50X mikro görüntüsü[37].

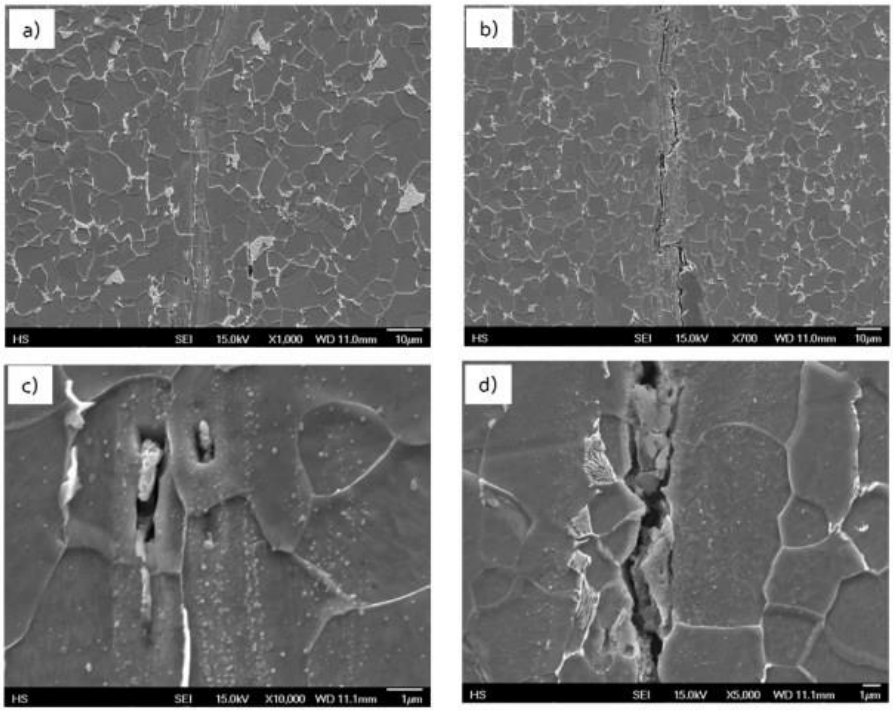


Şekil 2.37 : Cüruf çatlağı 100X mikro görüntüsü[37].

Şekil 2.36 ve Şekil 2.37'de cüruf çatlağının 50X ve 100X büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Çatlak ITAB içerisinde kaynak dikişinin kenarında dağılımlı olarak gözlenmektedir [37].

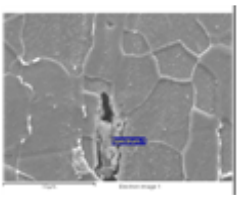
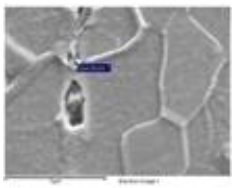
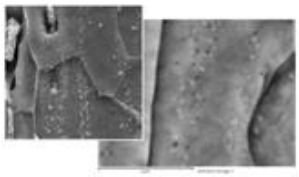
2.4.4 Boşluklar ve kalıntılar

Birleşme yüzeyinde ortaya çıkan boşlukların oluşma nedeni yüksek kaynak sıcaklığı ve yetersiz baskı kuvvetidir. Boşluk oluşumundan kaçınmanın yolu kaynak sıcaklığını azaltmaktan ve baskı kuvvetini arttırmaktan geçmektedir [32].



Şekil 2.38 : Yüksek frekans kaynağında görülen tipik kalıntı örnekleri[38].

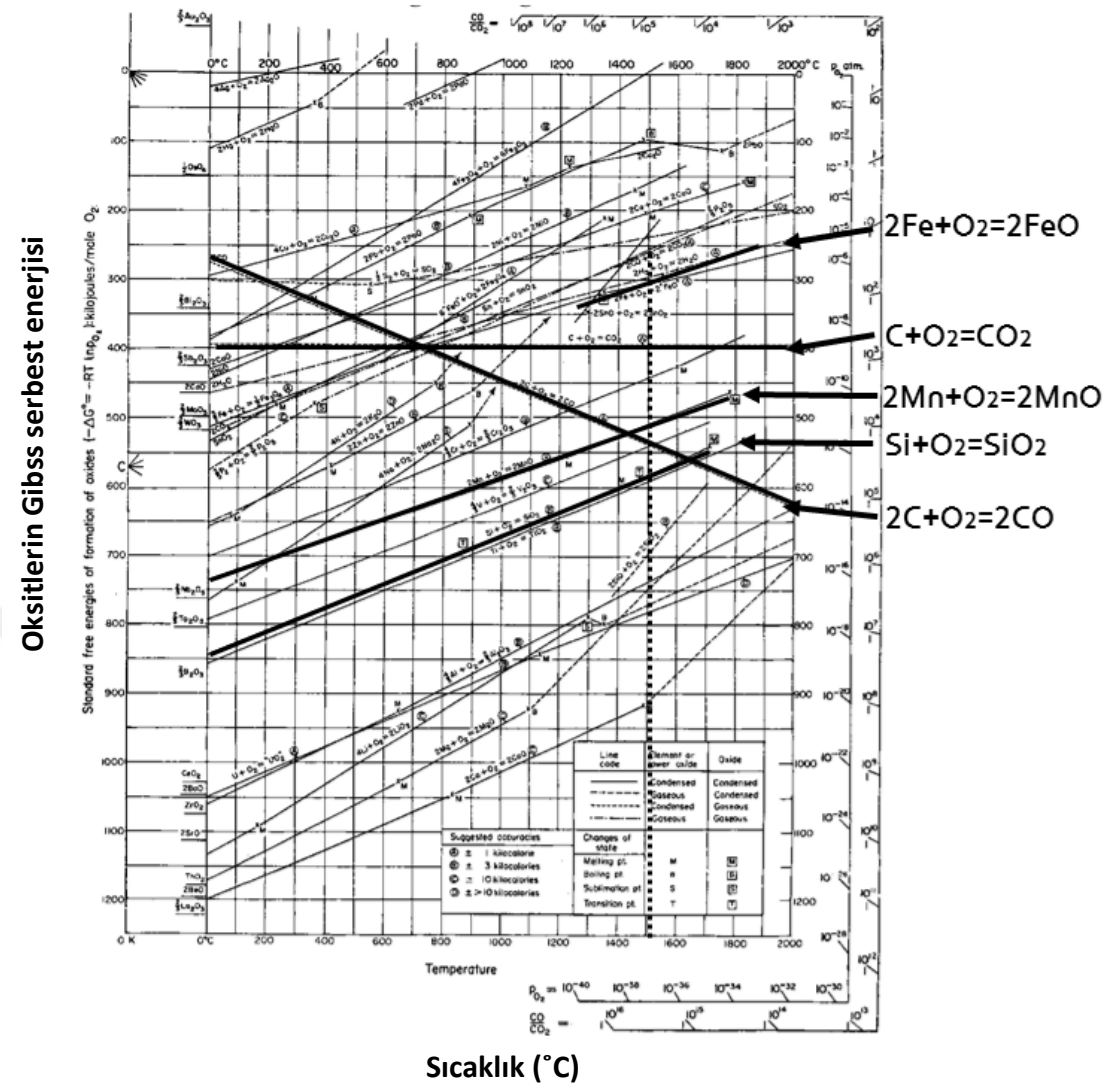
Kalıntılar da boşluk hataları gibi birleşme yüzeyinde meydana gelir. Kaynak dikişi merkezinde birçok oksit parçacığı bulunur. Şekil 2.38c ve 2.38d'de mikroskop altında gözlenebilen mikron altı parçacıklar gösterilmiştir. Şekil 2.39'da yüksek frekans kaynağında gözlenen kalıntı örneklerinin boyutlarına göre SEM-EDS analizleri verilmiştir. Yapılan çalışmaya göre büyük parçacıklar genelde Fe ve O elementlerinden oluşan FeO kalıntısını oluşturmakta ve buna ek olarak eser miktarda Mn ve Si miktarı gözlenmektedir. Orta boy ve küçük partiküllerde ise daha az O gözlenirken daha fazla Mn ve Si gözlenmektedir [38].

Tip	Büyük	Orta	Küçük (BSEGörüntüsü)	
SEM Görüntüsü				
Boyut	5µm~	1-6µm	~0,3µm	
Kompozisyon aralığı (ağırlık%)	**O:** 21-30% **Fe:** 63-79% **Mn:** 0-7% **Si:** 0-3% **O/Fe (%):** 1,35%	**O:** 7-20% **Fe:** 68-87% **Mn:** 3-12 % **Si:** 0-2 %	Beyaz **O:** 2-2,4% **Fe:** 93-96% **Mn:** 2-4% **Si:** 0-1%	Siyah **O:** 7-10% **Fe:**77-88% **Mn:** 3-9% **Si:** 3-4%

Şekil 2.39 : Kalıntı örneklerinin kimyasal kompozisyonları[38].

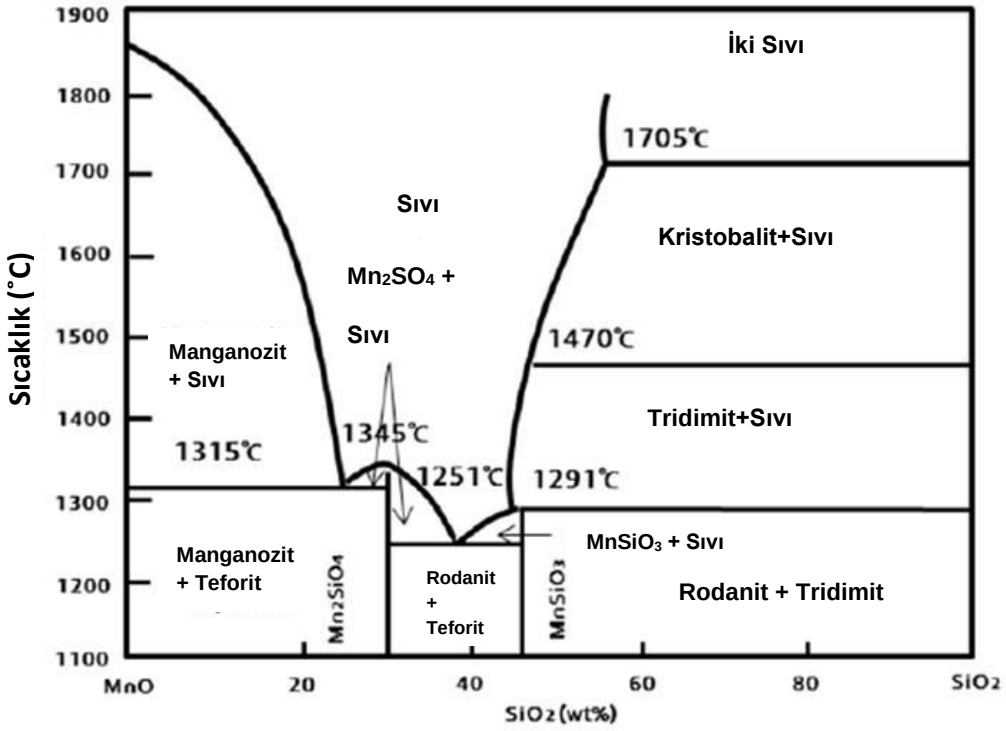
Büyük partiküller genellikle kaynak prosesinin başlangıç evrelerinde ergimiş metal ve atmosferin ilk etkileşiminden kaynaklı olarak oluşmaktayken, küçük partiküller kaynak prosesinin ilerleyen aşamalarında gözlemlenir. Şekil 2.40'da verilen Ellingham Diyagramı'na bakıldığında CO ve CO_2 gazı oluşum reaksiyonunun Gibbs serbest enerjisinin FeO oluşum reaksiyonuna göre daha az olduğu görülmektedir. Bu da kaynak başlangıcında karbonun oksitlenmeye ve demirin ise redüklenmeye meyilli olduğu anlamına gelmektedir. Kaynağın ilerleyen aşamalarında kaynak bölgesinin soğumaya başlamasıyla Gibss serbest enerjisi Fe'den düşük olan Mn ve Si gibi partiküller oksitlenmeye başlayacaktır [38].

Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi yüksek frekans kaynağı metalin iki ucunun birbirine yapıştırılmasıyla kaynak yapma işlemidir. Bu işlem esnasında düşük ısı girdisi, soğuk kaynak ve yetersiz nüfuziyet hatasına sebep olacağı için yüksek ısı girdisi ile çalışılır. Yüksek ısı girdisi ise kaynağın birleşme noktası olan apeks ile kaynak noktası arasında oluşan mesafeyi arttırır ve oksit parçacıklarını kaynak bölgesinden uzaklaştıran manyetik gücü azaltır. Bu yüzden yüksek ısı girdisi ERW-HFI kaynak dikişinde oksitlerin yeterince uzaklaştırılamamasına ve kaynak dikişi içerisinde birçok oksitli partikülün kalıntı olarak bırakılmasına sebebiyet verir [39].



Şekil 2.40 : Oksit inklüzyonlarının oluşumunu gösteren Ellingham diyagramı[38].

Kaynak kalitesine etki eden parametreler bölümünde bahsedildiği gibi (Bölüm 2.3), alaşımlı çeliğin kompozisyonu da kaynak dikişi içerisinde kalıntı partiküller oluşmasında önemli bir etkendir. Şekil 2.41'de görüldüğü gibi, mangan ve silisin kompleks oksitlerinin ergime sıcaklıkları Mn/Si oranı ile değişkenlik göstermektedir. Düşük ergime sıcaklığına sahip oksitlerin kompozisyonları genellikle küçük boyutlu kalmaya ve kaynak esnasında kaynak dikişinden uzaklaşmaya meyillidir. Faz diyagramına göre Mn/Si oranının 8 olduğu oksitler en düşük ergime sıcaklığına sahip olduğundan, minimum oksit kalıntısı oluşması için Mn/Si oranı 8 olan çelik kompozisyonu tercih edilmelidir [38].



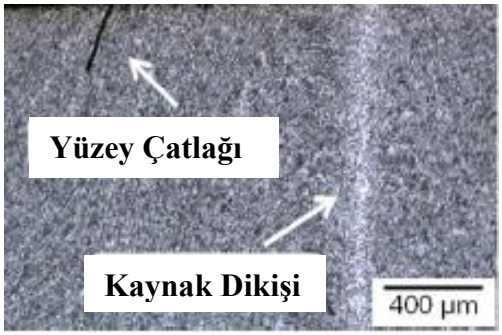
Şekil 2.41 : MnO-SiO_2 ikili faz diyagramı[38].

2.4.5 Çatlaklar

Kalıntı ve boşluk gibi kaynak hatalarının gerilim altında meydana getirdiği problemler karşımıza çatlak olarak çıkmaktadır. Çatlaklar aşağıda belirtildiği gibi gruplandırılabilirler;

2.4.5.1 Yüzey çatlakları

Yüzey çatlakları ITAB bölgesinin kenarında görülmektedir. Ana malzeme ve ITAB bölgesindeki homojen olmayan dağılım bu çatlak oluşumunun gizli sebebidir. Şekil 2.42'de gösterilen bu çatlak türü, genellikle oksitli fazlardan başlayarak ana malzeme tarafında ilerler [40].

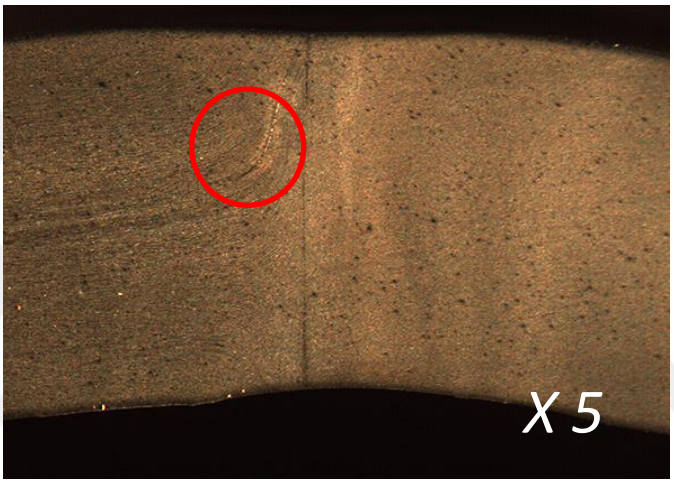


Şekil 2.42 : Yüzey çatlağı mikro görüntüsü[40].

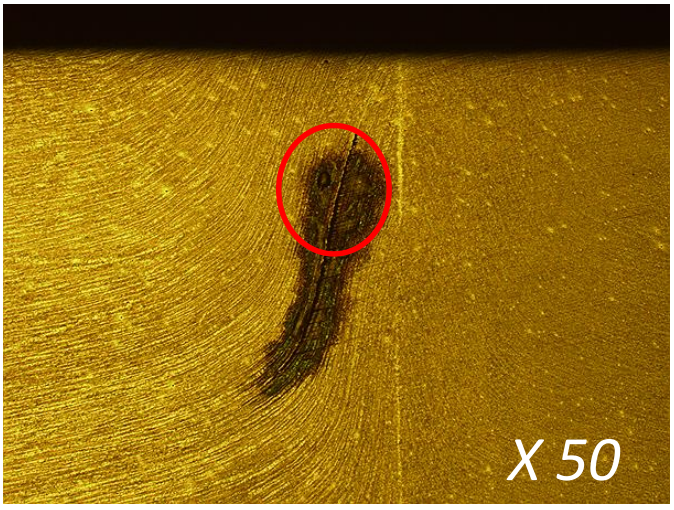
Malzeme içerisinde kalıntı gerilimlerin varlığı da oksit kalıntıları ile birlikte yüzey çatlaklarına sebep olur. Oksit inklüzyonlarının başlattığı bir mikroçatlak, kalıntı gerilimler altında kaynak bölgesinde östenit tane sınırlarından başlayarak çatlak ilerlemesine yatkın sertleşmiş bölge boyunca ilerler. Bu da çatlağın büyümesine sebep olur [40].

2.4.5.2 Segregasyon çatlağı

Kaynaklanan metalin dökümü sürecinde oluşan segregasyon üzerinde çatlak meydana gelme durumudur. Şekil 2.43 ve Şekil 2.44'de de görüldüğü gibi genellikle segregasyon çizgisi boyunca ITAB içinde gözlemlenir [37].



Şekil 2.43 : Segregasyon çizgisi üzerinde meydana gelen çatlak[37].



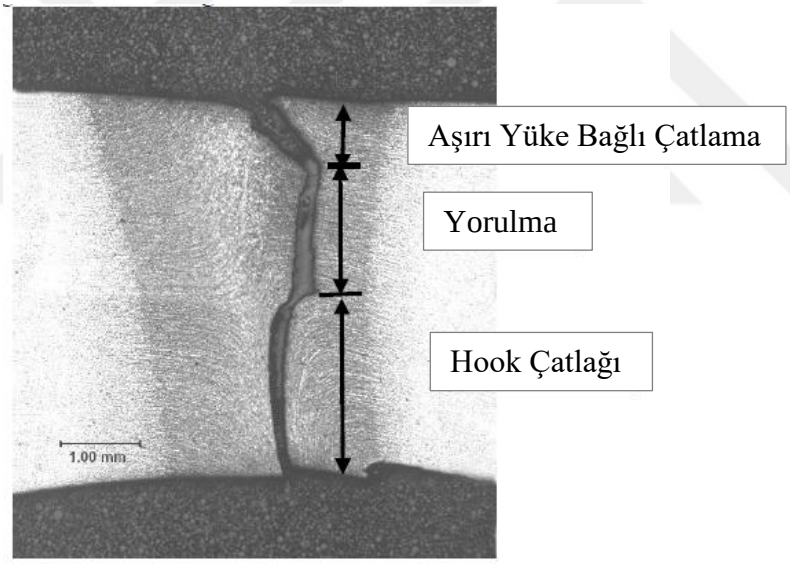
Şekil 2.44 : Segregasyon çatlağının 50X büyütmedeki görüntüsü[37].

Yüksek frekans kaynağında kullanılan banttan dolayı oluşan bir hatadır. Bu durumdan kaçınmak için bant kabul adımında, banda kirlilik analizi yapılır. Ayrıca tedarikçi

durum hakkında bilgilendirilip segregasyona sebep olacak durumların araştırılması sağlanır [37].

2.4.5.3 Hook çatlağı

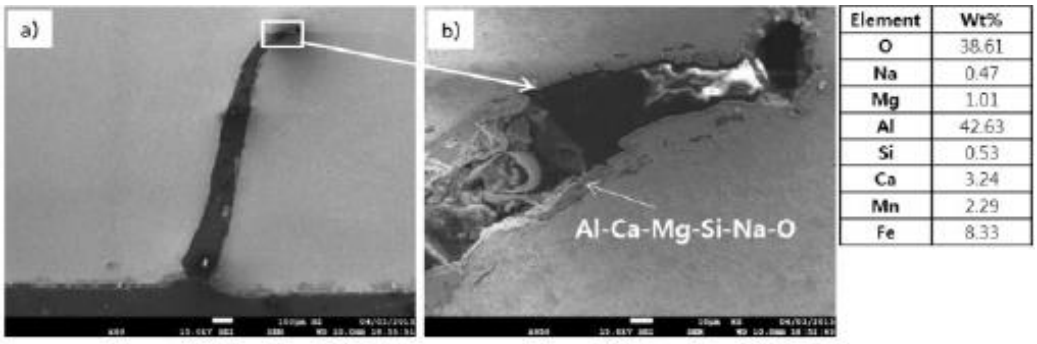
Hook çatlağı genellikle ITAB'ın üst ve alt bölgelerinde borunun 'upset bölgesi' olarak adlandırılan kısmında karşılaşılan bir hata türüdür. Bu çatlaklar, küçük kılcal çatlaklar olarak kaynak dikişi boyunca kaynak akma çizgileri üzerinde gözlenirler. Kaynak adımı sonrası kaynak baskısı yeteri kadar uygulanmaz ve çelik banyosu içerisindeki oksit ve sülfür inklüzyonları kaynak cürufu olarak dışarı atılmaz ise bu çatlak oluşumu gözlenir [41]. Şekil 2.45'de verilen tipik Hook çatlağına bu kalıntıların sebep olduğu fakat çatlağın hidrostatik test ve yüksek gerilime bağlı yorulmayla artarak büyüdüğü literatürde sıklıkla bahsedilen durumlar arasındadır. SMYS verilerine göre meydana gelen Hook çatlaklarının %56.6'sı gerilime bağlı oluşrken, %43.4'ü ise hidrostatik test sonrası ultrasonik test sonucunda fark edilmekte ve tespit edilmektedir [36].



Şekil 2.45 : Yorulma ve yüksek gerilime uğrayarak ilerleyen Hook çatalğı[36].

Yapılan birçok araştırma ITAB kenarında görülen Hoock çatlağınına CaO, Al_2O_3, CaS alaşımlarının ve merkezde gözlenen Hook çatlağının %76'sına ise MnS ve Al_2O_3'ün sebebiyet verdiğini göstermiştir [42].

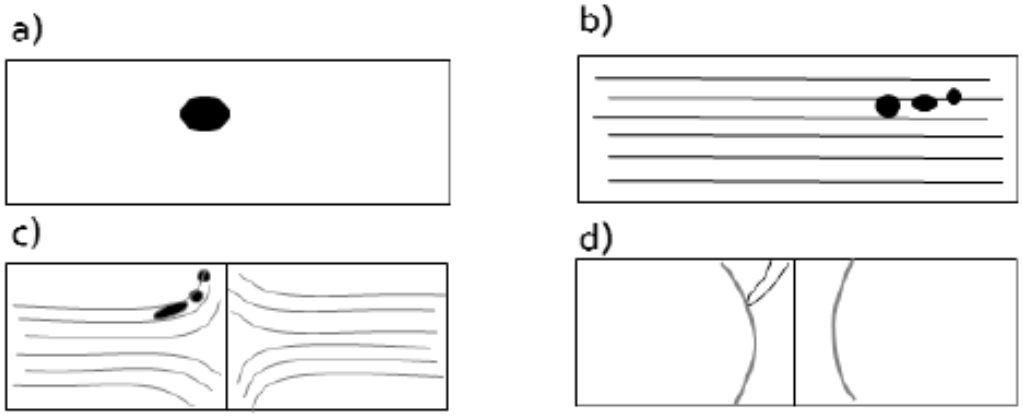
Şekil 2.46'da verilen çatlak etrafında görülen metal olmayan oksit inklüzyonlarının SEM ve EDS sonuçlarına göre çatlak oluşumuna Al, Ca ve Mg bileşikleri sebep olmuştur. Kütlece %42 Al ve %32 oksijen gözlenirken az miktarda Ca'da gözlenmiştir [38].



Element	Wt%
O	38.61
Na	0.47
Mg	1.01
Al	42.63
Si	0.53
Ca	3.24
Mn	2.29
Fe	8.33

Şekil 2.46 : Hook çatlağının SEM-EDS görüntüsü[38].

Bu inklüzyonlara kaynak esnasında sebebiyet verecek bir durum olmadığı için problem çelik üretimi ve sürekli döküm prosesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.47'de slab içerisinde bulunan küresel oksit ve sülfür kalıntılarının haddeleme sırasında daha küçük parçacıklara bölündüğü, kaynak sırasında metal akma çizgileri üzerinde sıralanıp çatlağa sebebiyet verdiği şematik olarak gösterilmiştir. Bu EAF prosesi ile gelen metalik olmayan partiküllerin kaynak işleminin sonuna kadar geldiğinin göstergesidir. Bu yüzden oksit ve sülfür eliminasyonu döküm prosesi öncesinde pota metalujisi kısmında başlamalı ve kalıp içerisinde katılaşmaya kadar sürdürülmelidir [38,41].



Şekil 2.47 : Hook çatlağı oluşumunun şematik gösterimi[38].

2.4.5.4 Gerilimli korozyon çatlaması (SSC)

H_2S içeren asitli ortamlarda çalışan hat borularında sıklıkla rastlanan çatlak türüdür. İçeriden ya da dışarıdan uygulanan gerilim sonucu oluşan çatlak çekme yönünde görülür. Asidik ortamda çalışan çelik boru yüzeyinde aşağıda sıralanmış korozyon reaksiyonları oluşmaya başlar:

Anodik reaksiyon:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \quad (2.5)$$

Ayrışma reaksiyonu:

$$H_2S \rightarrow H^{+} + HS^{-} \quad (2.6)$$

$$HS^{-} \rightarrow H^{+} + S^{2-} \quad (2.7)$$

Katodik reaksiyon:

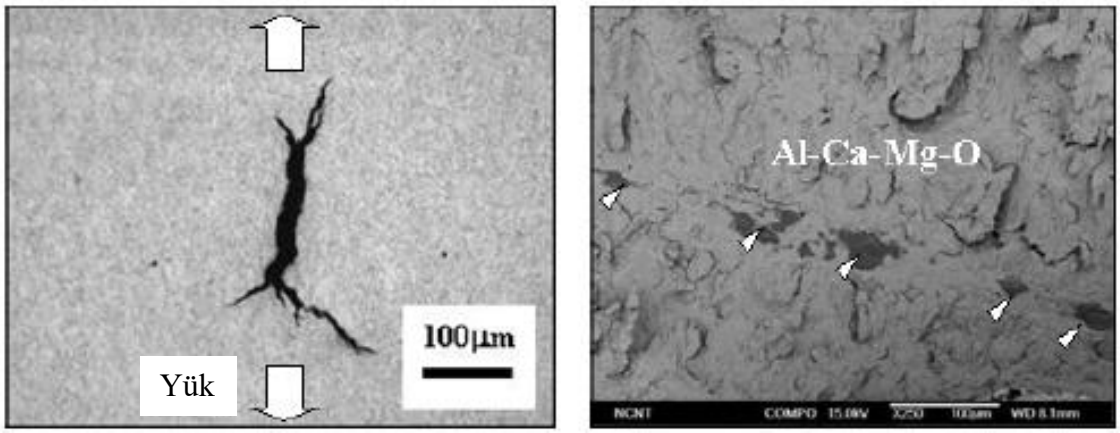
$$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow 2H \text{ (atomik hidrojen)} \rightarrow H_2 \uparrow_{(gaz)} \quad (2.8)$$

Anodik reaksiyon (2.5) ve ayrışma reaksiyonları (2.6, 2.7) sonucu oluşan H^{+} atomların bir araya gelerek atomik hidrojen oluşturması beklenirken, açığa çıkan HS^{-} hidrojen gazı oluşumunu sınırlandırır ve oluşan atomik hidrojenlerin çelik içine nüfuz etmesine sebep olur [43].

Mikroyapı içerisinde hidrojen tuzak bölgeleri olarak adlandırılan metalürjik açıdan hasarlı yapılar bulunmaktadır. Bunlar; metalik olmayan inklüzyonlar, büyük çökeltiler ve sert mikroyapı içerisindeki bantlaşmalardır. Çelik içerisine nüfuz eden hidrojen atomları birleşerek H_2 gazı meydana getirmekte, H_2 gazı bu tuzak bölgelere geldiğinde uygulayacağı yüksek basınç sonucu bu noktalarda stres konsanstrasyonunu artırmakta ve çatlak oluşumuna sebebiyet vermektedir [43].

Az korozif ortamlarda ve yüksek mekanik gerilmelerin olmadığı durumlarda da gerilimli korozyon çatlamalarına rastlanabilir. Bu çatlak türü büyük çatlaklar oluşmadan tespit edilemediği için çok tehlikelidir. Endüstride SSC çatlaklarının 1/3'ü korozyon sebepli olup, geri kalanı ise çoğunlukla plastik deformasyonlar şekil verme veya kaynak sırasında oluşan kalıntı gerilimlerden kaynaklı oluşmaktadır. Ayrıca heterojen yapıdaki mikroyapı özellikleri (yani içerisinde inklüzyon bulunduran yapılar) SSC için mükemmel bir adaydır [44].

Şekil 2.48'de içerisinde oksit kalıntıları bulunduran gerilim kuvvetine maruz bırakılmış çelik mikroyapısı verilmiştir. Örneğin alıntılandığı çalışmada çatlağın gerilim yönünde ilerlediği gözlemlenmiştir [43].



Şekil 2.48 : Oksit kalıntılarının nükleasyonu ve stress altında sebep oldukları çatlak[43].

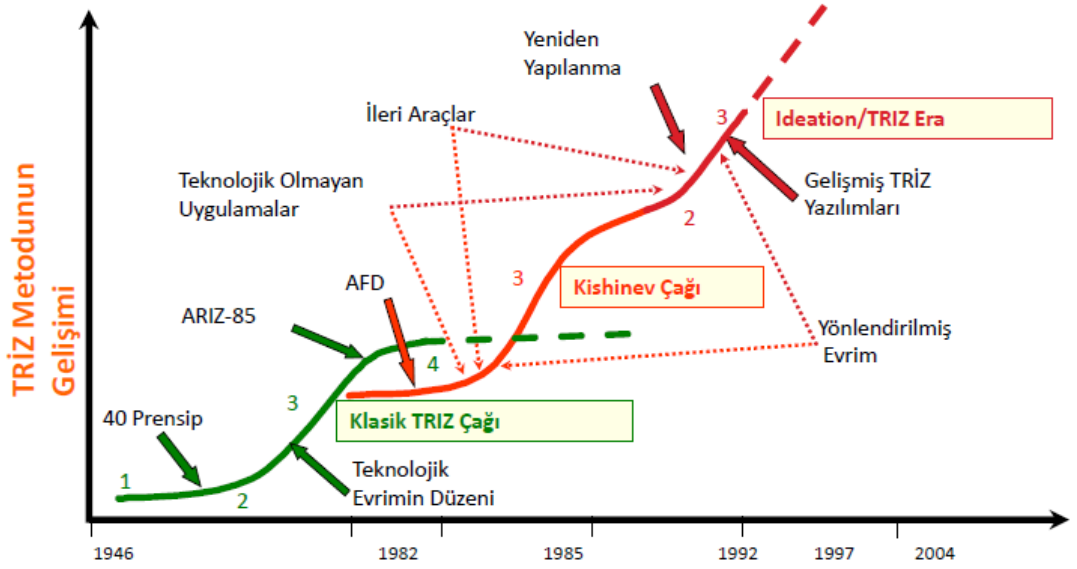
Kaynak sırasında parametrelerin değiştirilerek ısı girdisinin arttırılması kalıntı gerilimleri azaltan bir etki yaparak gerilimli korozyon çatlaması riskini azaltacaktır. Ayrıca kaynak sonrası kaynak dikişine yapılan ısıl işlem kalıntı gerilimi dağıtıp, kalıntı gerilim miktarını azaltan bir başka önlemdir [44].

2.5 TRIZ

2.5.1 Tanımı ve Tarihçesi

Rusça'da "Yaratıcı Problem Çözme Teorisi" anlamına gelen TRIZ, *"Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch''* kelimelerinin baş harflerinden oluşmaktadır. Ayrıca literatürde *"Theory of Inventive Problems Solving"* kelimelerinin baş harflerinden oluşan TIPS kısaltması ile de anılmaktadır [45]. TRIZ karar verici ya da probleme kesin bir çözüm üretici bir yöntem olmamakla birlikte, yalnızca var olan durumu geçmiş deneyimlerin bir birleşimi olarak ele alarak, karar vericiye bir düşünce sistematiği sunmaktadır [46].

Bu yöntem, 1940 yılında Moldovyalı bir patent uzmanı olan Genrikh Saulovich Altshuller tarafından keşfedilmiş ve geliştirilmiştir. Bakü'de bir patent ofisinde görevli olan Altshuller'in görevi patentleri düzenlemek ve evraklara geçirmektir. Altshuller yaptığı patent incelemeleri ve düzenlemeler sonucunda, yenilik olarak öne sürülen fikirlerin aslında 39 mühendislik parametresinin arasındaki çelişkiler olduğunu ve bunların çözümünün aslında 40 ana prensibin uygulanmasından meydana geldiğini keşfetti. Bu araştırmaları esnasında ilk etapta 200.000 patent inceledi ve bunları 40.000 patente sadeleştirdi [48].



Şekil 2.49 : TRIZ'in kronolojik süreci[47].

Yaptığı çalışmanın ülkesi için yararlı olabileceğini düşünen Altshuller dönemin devlet adamı Stallin'e bir mektup yazdı ve bu yöntemi araştırıp uygulayabilmesi için maddi yardım talep etti. Politik nedenlerden dolayı bu mektup sonrasında Sibirya'ya sürülen Altschuller orada birçok bilim adamı ile temasa geçti ve bu yöntemi geliştirdi. 1954 yılında Stallin'in ölmesi ile Bakü'ye döndü ve çalışmalarına kaldığı yerden devam etti. İlk makalesini 1956 yılında yayınladı ve dünyada TRIZ hakkındaki ilk semineri vermiş oldu. TRIZ hakkında 14 kitap ve çok sayıda makale yazdı. 1970'li yıllarda başlayan TIZ Hareketi'nin liderliğini yaptı. 1980'lere gelindiğinde bu metodoloji gelişmiş, patent arştırmalar devam etmiş ve 2,000,000 üzerinde patent incelenmiş oldu [49]. 1980'lerde TRIZ uzmanlarının Sovyet Sosyalist Cumhuriyet Birliği'nden (SSCB) batı ülkelerine göç etmeleri TRIZ'in geniş bir alana yayılmasına sebep olmuş, Altshuller'in kitap ve makalelerinin çevirileri önce Almanya ve Polonya'ya daha sonra Japonya, ABD ve diğer batı ülkelerine yayılmıştır. Kronolojik olarak TRIZ 3 aşamada gelişmiştir. Şekil 2.49'da görüldüğü gibi TRIZ'in Altshuller tarafından keşfi ile başlayan çağ Klasik TRIZ Dönemi, 1986 ve sonrasında Kishinev'de açılan TRIZ okulunda yapılan çalışmaların kapsadığı Kishinev Dönemi ve son olarak Altshuller'in öğrencileri olan Zlotin ve Zusman'ın kurduğu Ideation şirketinin yaptığı çalışmaları kapsayan Ideation Dönemi'dir [50].

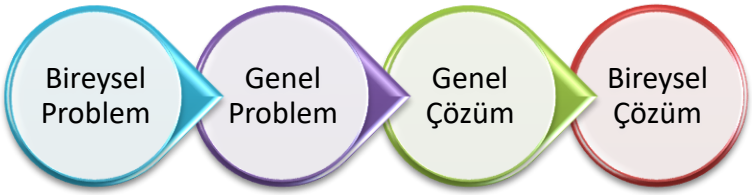
2.5.2 Metodolojisi

Altshuller problemleri Çizelge 2.1'de görüldüğü 5 kategoriye ayırmıştır. Sorunu çözmek için ortaya konan çözüm yolu ya da fikirlerin yalnızca %4'ü yeni bir konsept niteliği taşımakta ve ancak %1'i yaratıcılık seviyesinde bir buluş kategorisinde değerlendirilmektedir [51].

Çizelge 2.1 : Problem kategorileri[51].

Seviye	Yaratıcılık Seviyesi	Çözümlerin Yüzdesi	Bilgi Kaynağı	İncelenmesi Gereken Yaklaşık Çözüm Sayısı
1	Bilinen çözüm	%32	Kişisel bilgi birikimi	10
2	Küçük iyileştirmeler	%45	Şirketin bilgi birikimi	100
3	Büyük iyileştirmeler	%18	Sektör içerisindeki bilgi birikimi	1000
4	Yeni bir konsept	%4	Sektör dışındaki bilgi birikimi	100,000
5	Buluş(İcat)	%1	Bilinen her şey	1,000,000

Şekil 2.50'de TRIZ'in problem çözme metodolojisi verilmiştir. Bilinen tüm bilgilerden faydalanılarak yaklaşık 1 milyon çözümün incelenmesini gerektiren bireysel problem ilk olarak genel bir problem tanımı haline dönüştürülür. Daha sonra genel probleme bulunan çözümler incelenir ya da çözüm araçları kullanılarak yeni çözümler geliştirilir. Genel çözüm sorunu çözmekle yükümlü ekip/kişinin mühendislik bilgileri ışığında yorumlanır, uyarlanır ve bireysel çözüme ulaşılır [47].



Şekil 2.50 : TRIZ'in problem çözme metodolojisi[47].

TRIZ yönteminde problemlerin yaklaşık %90'ı belirlidir, tanımlıdır ve tekrarlıdır. Sorunlar kendi içerisinde yeni bir sorun yaratır ve bu da çelişkileri oluşturur. Örneğin; bir kalemin ucu daha iyi yazabilmek için keskin olmalıdır ama bu durum kâğıda zarar vermesine neden olabilir. Bu bir çelişkidir. Çelişkiler aynı zamanda yaratıcılığın da temelini oluştururlar [49].

Çizelge 2.2 : TRIZ tekniğinin kullanıldığı örnek çalışmalar[46].

Uygulama Konusu	Yazar
Kimyasal sürecin emniyet açısından değerlendirilmesi için TRIZ tekniğinin modifiye edilmesi	Kim ve diğ, (2009)
Banka hizmetlerinin iyileştirilmesinde TRIZ tekniğinin kullanılması	Wang ve Chen, (2010)
LPG depolama tankı kurulum teknolojisinin iyileştirilmesinde TRIZ tekniğinin kullanılması	Leem ve Huh, (2010)
Otobüslerin gövde yapısında meydana gelen termal deformasyon probleminin incelenmesinde TRIZ tekniğinin kullanılması	Butdee ve Vignat, (2008)
TRIZ yardımı ile yazılım kalite problemlerinin çözüm yollarının incelenmesi	Wang ve diğ, (2011)
Elektrik ark ocağının toz toplama işlemi ile ilgili problemlerin giderilmesi ve uygun tasarım şeklinin bulunması çalışmalarında TRIZ kullanılması	Jiang ve diğ, (2010)

TRIZ yönteminin amacı ideal çözüme ulaşmaktır. İdeallik çözümün yararlı etkilerinin zararlı etkilerine olan oranı olarak tanımlanmaktadır. İdeal çözüm tüm çelişkilerden arındırılmış, fonksiyonel ve etkin kaynak kullanımı ile ortaya konmuş olmalıdır [49].

Altshuller'in TRIZ metodu, sistematik ve adım adım ilerleyen bir yöntemdir. Kişiye geniş çözüm önerileri içerisinde rehberlik ederek ideal çözüme ulaştırır ve psikolojik etmenlere dayanmadığı için tekrarlanabilir ve güvenilirdir. Bu sebeple son yıllarda literatüre birçok çalışma kazandırılmıştır. Çizelge 2.2'de TRIZ yönteminin kullanıldığı örnek çalışmalar verilmiştir [46].

2.5.3 TRIZ Araçları

Yukarıda verilen bilgiler ışığında, neredeyse bütün büyük buluşlar bir veya birkaç çelişkinin çözümüdür denilebilir. Altshuller tasarım problemlerinin çözümünde çelişkiye neden olan 39 farklı parametre belirlemiş ve bu parametrelerin tüm ikili birleşimlerine göre, çözüm için kullanılabilecek 39x39 çelişki matrisi oluşturmuştur.

1.Hareket halindeki nesnenin ağırlığı	**14.** Mukavemet	**27.** Güvenilirlik
2. Durağan haldeki nesnenin ağırlığı	**15.** Hareket halindeki nesnenin dayanıklılığı	**28.** Ölçümün doğruluğu
3. Hareket halindeki nesnenin uzunluğu	**16.** Durağan haldeki nesnenin dayanıklılığı	**29.** Üretimin doğruluğu
4. Durağan haldeki nesnenin uzunluğu	**17.** Sıcaklık	**30.** Nesneye etki eden zararlı unsurlar
5. Hareket halindeki nesnenin alanı	**18.** Parlaklık	**31.** Zararlı yan etkiler
6. Durağan haldeki nesnenin alanı	**19.** Hareket halindeki nesnenin harcadığı enerji	**32.** Üretilebilirlik
7. Hareket halindeki nesnenin hacmi	**20.** Durağan haldeki nesnenin harcadığı enerji	**33.** Kullanım kolaylığı
8. Durağan haldeki nesnenin hacmi	**21.** Güç	**34.** Tamir edilebilirlik
9. Hız	**22.** Enerji israfı	**35.** Uyumluluk
10. Kuvvet	**23.** Madde israfı	**36.** Cihazın karmaşıklığı
11. Gerilme, basınç	**24.** Bilgi israfı	**37.** Kontrolün karmaşıklığı
12. Şekil	**25.** Zaman israfı	**38.** Otomasyon seviyesi
13. Nesnenin istikrarlılığı	**26.** Malzeme miktarı	**39.** Verimlilik

Şekil 2.51 : Mühendislik parametreleri[47].

Genel çelişki parametreleri Şekil 2.51'de gösterilmiştir. Çelişkiler matrisi kullanılırken, iyileştirilmek istenen özellik ile bu durum karşısında kötüleşmesi ön görülen özellik tespit edilir. Çelişkiler matrisinde iki özelliğin kesişmesi sağlanır ve uygun olan yaratıcı prensipler tespit edilir. Şekil 2.52'de verilen yaratıcı prensipler

kendi içinde değerlendirildikten sonra, çözüme en uygun olan prensip seçilir ve problem çözümüne gidilir [47].

1	Bölünme	**21**	Acele etme
2	Çıkarma	**22**	Zararın yarara dönüştürülmesi
3	Kısmi kalite	**23**	Geri besleme
4	Asimetri	**24**	Arabulucu
5	Kombinasyon	**25**	Self-servis
6	Evrensellik	**26**	Kopyalama
7	Yuvalama	**27**	Ucuz kısa ömürlü nesneler
8	Karşı ağırlık	**28**	Mekanik sistemin değiştirilmesi
9	Önceden karşıt hareket	**29**	Pnömatik veya hidrolik yapılar
10	Önceki hareket	**30**	Esnek kabuklar veya ince filmler
11	Önceden yastıklama	**31**	Gözenekli malzemeler, membranlar
12	Eşit potansiyel enerji	**32**	Rengin değiştirilmesi
13	Tersine çevirme / tersyüz etme	**33**	Homojenlik
14	Yuvarlama	**34**	Parçaların atılması veya yenilenmesi
15	Dinamiklik	**35**	Fiziksel ve/veya kimyasal özellikler
16	Kısmi veya fazladan yapılmış işlem	**36**	Faz dönüşümleri
17	Başka bir boyuta geçiş	**37**	Termal genleşme
18	Mekanik titreşim	**38**	Güçlü oksitleyicilerin kullanılması
19	Periyodik hareket	**39**	İnert atmosfer
20	Faydalı hareketin devamlılığı	**40**	Kompozit malzemeler

Şekil 2.52 : 40 buluşçu prensip[47].

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan malzemenin hazırlanışı ve özellikleri ile uygulanan yöntemler hakkında detaylı bilgi verilmektedir.

3.1 Malzeme

Deneysel çalışmalarda, birkaç farklı tedarikçiden temin edilmiş, kaynaklanmış ve kaynak dikişi normalize edildikten sonra ultrasonik testlerden geçmiş ancak maruz kaldığı su verme ve temperleme işlemleri sonrasında yapılan kalite kontrol testlerinde kaynak dikiş içerisinde çatlak ile karşılaşılan malzemeler ile çalışılmıştır.

3.1.1 Numunenin hazırlanması

Numuneler görsel olarak incelenmiş, çap ve et kalınlığı kumpas ve mikrometre ile ölçülmüştür.

Numuneler metalografik muayene işlemi için 10x15 cm boyutunda işlenmiştir. İşlenen numuneler ilk olarak 240'lık zımpara ile kaba zımparlanmış ve daha sonra zımparalama işlemine 1200'lük zımpara ile devam edilmiştir. Zımparalanan numuneler 3µm'lik parlatma çözeltisi kullanılarak parlatılmış ve ardından dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi için kullanılan dağlama çözeltisi %6'lık nital (%2 nitrik asit, %6 alkol) çözeltisidir. Dağlama işlemini kurutma ve analiz izlemektedir.

SEM ve EDS yöntemlerinde kullanılan numune bakalite alınmış, daha sonra numune hazırlama işlemlerinden geçmiştir.

3.1.1 Numunenin fiziksel ve mekanik özellikleri

Çatlak meydana gelen boru çap ve et kalınlığı 114,3x6,35 mm'dir. Kaynak bölgesinde çatlak meydana gelen borulardan biri Şekil 3.1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.1 : Kaynak bölgesinde çatlak tespit edilen borulardan bir tanesi.

Ayrıca bu çap ve et kalınlığı üretiminde kullanılan API J55 kalite çeliğin akma ve çekme değerleri Çizelge 3.1'de gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.1 : Numunelerin mekanik özellikleri.

Numune No	Akma Dayanımı Rp 0,2 N/mm^2	Çekme Dayanımı Rm N/mm^2	Uzama (%)
M211	515,3	649,6	27
M213	507,6	657,8	33,2
M214	494,6	683	31,1
M215	498,5	642,1	28

3.1.2 Numunenin kimyasal özellikleri

Numuneler OES cihazı ile kimyasal analize tabi tutulmuştur. Numunelerin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : Malzemelerin kimyasal kompozisyonu (%ağ.).

Numune No	C	Mn	Si	Ti	B	Mn/Si
M211	0,25	1,34	0,27	0,03	0,002	4,96
M213	0,25	1,34	0,27	0,03	0,002	4,96
M214	0,25	1,34	0,27	0,03	0,002	4,96
M215	0,27	1,38	0,26	0,03	0,002	5,30

Numunelerin API 5L J55 kalite, Ti ve B ile alaşımlandırılmış C-Mn çeliği olduğu gözlenmiştir. Tüm numunelerin Mn/Si oranları 8'den küçüktür.

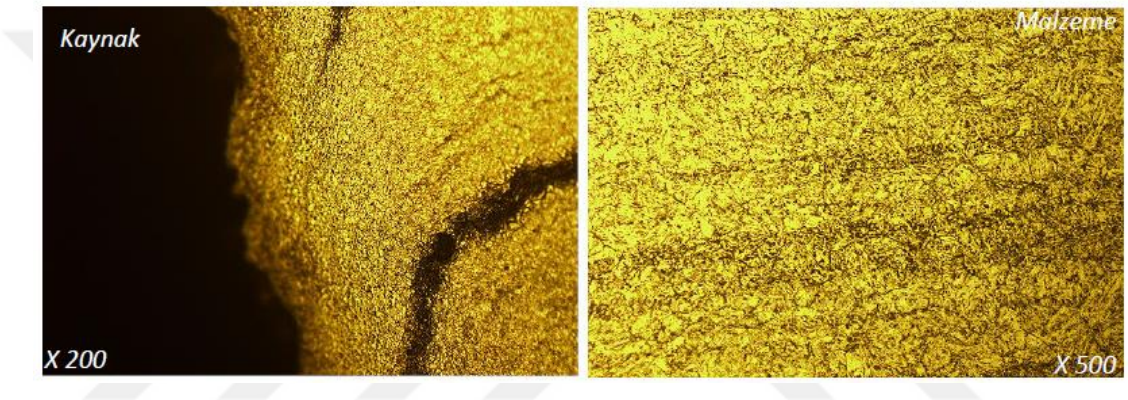
3.2 Yöntem

Numunelerin mikro ve makro incelenmesinde Optik Mikroskop kullanılmıştır. Numunelerin kimyasal kompoziyon analizi Optik Emisyon Spektroskopisi kullanılarak yapılmıştır. Çatlağın yüksek büyütmelerde analizi ve çatlak kenarında elementel analiz için SEM-EDS cihazından yararlanılmıştır.

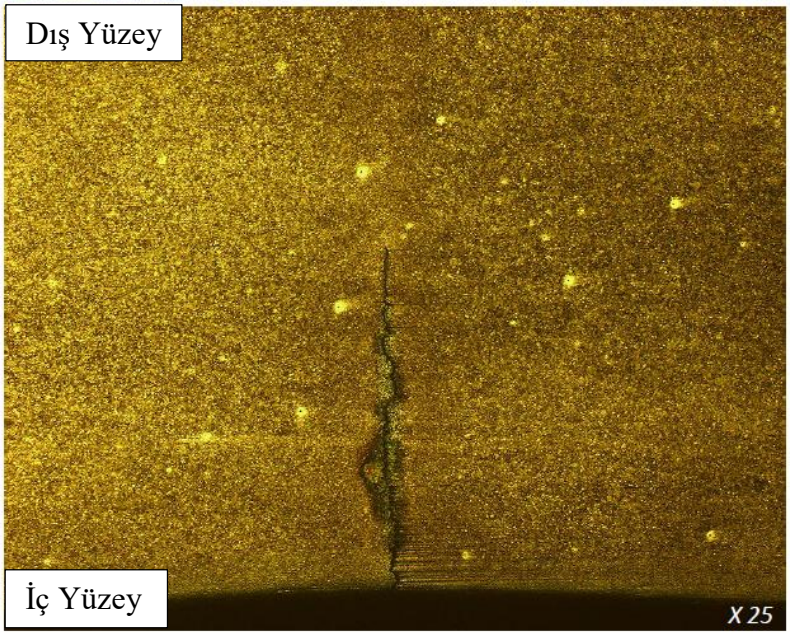
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEMELER

4.1 Yapısal İncelemeler

Bu bölümde çatlak tespit edilen 4 numune kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Numunelerin kimyasal kompozisyonları ve çatlak karakteristikleri aynı olduğu için sadece belirli numuneler testlere tabi tutulmuştur.



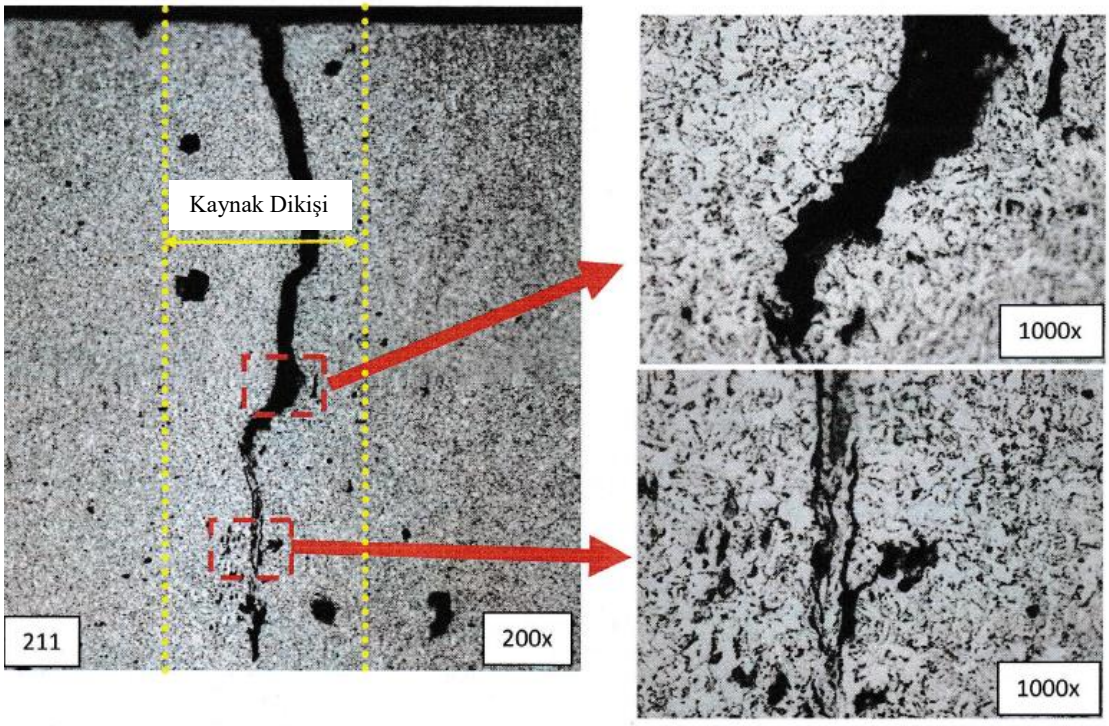
Şekil 4.1 : M215 nolu numunenin farklı büyütmelerde mikro ve makro görüntüsü.



Şekil 4.2 : M213 nolu numunenin makro görüntüsü.

Numune hazırlama yöntemlerinden geçen numuneler optik mikroskop altında incelenmiştir. Şekil 4.1 M215 nolu numunenin 200 ve 500X büyütmedeki analiz görselidir. Şekil 4.2'de ise M213 nolu numunenin 25X büyütmedeki makro görseli verilmiştir. Çatlağın borunun iç yüzeyden başlayıp dış yüzeye doğru ilerlediği gözlenmiştir.

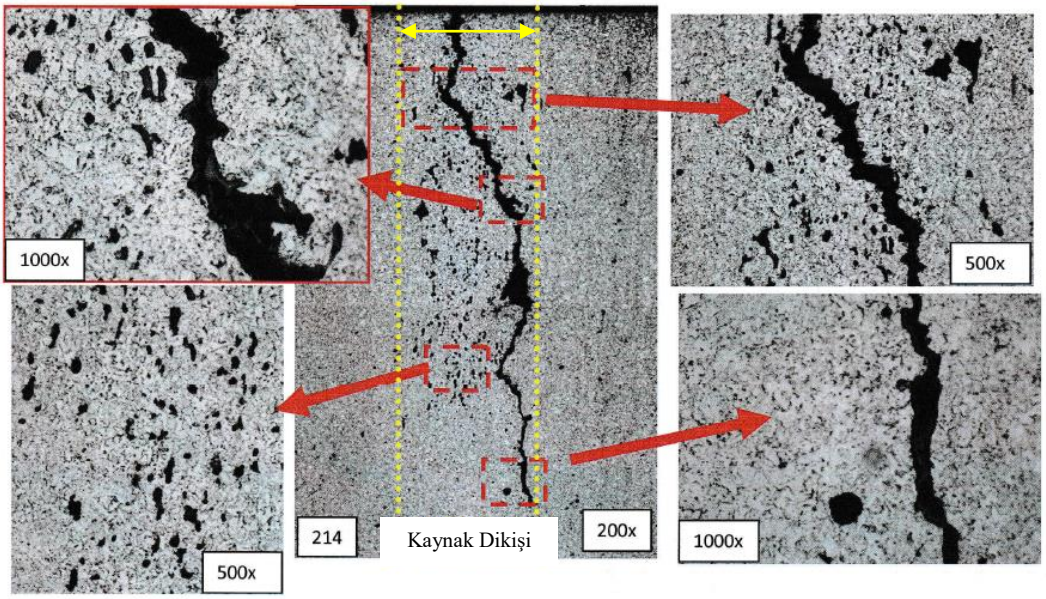
M211 numunesinde gözlenen çatlak 200X ve 1000X büyütmelerde detaylı olarak optik mikrokopta incelenmiş ve görüntüler Şekil 4.3'de verilmiştir.



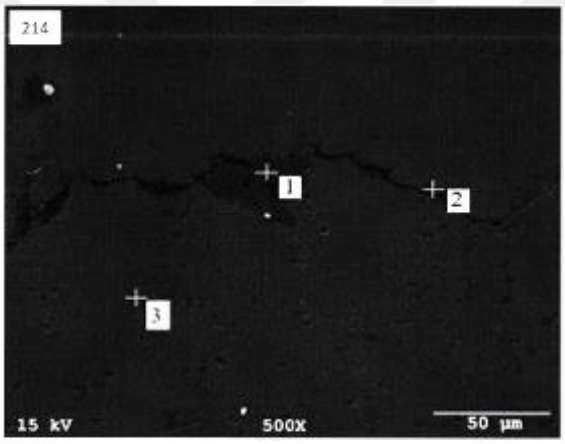
Şekil 4.3 : M211 nolu numunenin optik mikroskop analiz sonucu.

Aynı şekilde M214 nolu numunenin de yüksek büyütmelerdeki analizi Şekil 4.4'de verilmiştir. Her iki görüntüde de çatlağın ilerlediği bölgenin temperlenmiş martenzit yapısında olduğu ve bu bölgede birçok kalıntı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çatlağın içerisinde de kalıntıların varlığı dikkat çekmektedir.

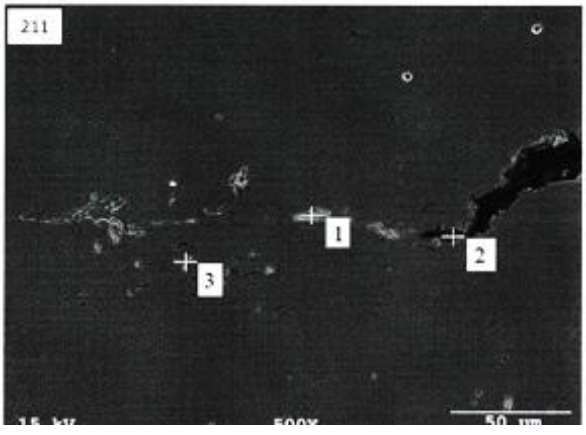
Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, M211 ve M214 numunesi üzerinde tespit edilen inklüzyonlara ait elementel analiz SEM-EDS yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak dikişi ve çatlak içerisindeki bu inklüzyonların ağırlıklı olarak Mn, Si ve O elementleri içerdiği görülmektedir. Bu sonuç kaynak dikişi içerisinde Mn ve silisyumca zengin kompleks oksitlerin varlığını doğrulamaktadır.



Şekil 4.4 : M214 nolu numunenin optik mikroskop analiz sonucu.



At. %	1	2	3
O	36.810	35.892	33.998
Al	3.438	2.360	0.695
Si	28.231	27.500	25.044
S	0.110	0.300	0.000
Ti	2.368	2.525	1.207
Mn	26.885	29.483	34.587
Fe	2.158	1.940	4.469



At. %	1	2	3
O	9.045	31.178	16.931
Al	0.859	1.060	6.355
Si	7.300	1.083	12.369
S	0.277	0.623	0.605
Ca	0.197	1.738	0.244
Ti	0.096	0.610	0.682
Mn	1.265	0.434	8.552
Fe	80.962	63.274	54.263

Şekil 4.5 : M211 ve M214 nolu numunelerde tespit edilen inklüzyonlara uygulanan elementel analiz sonuçları.

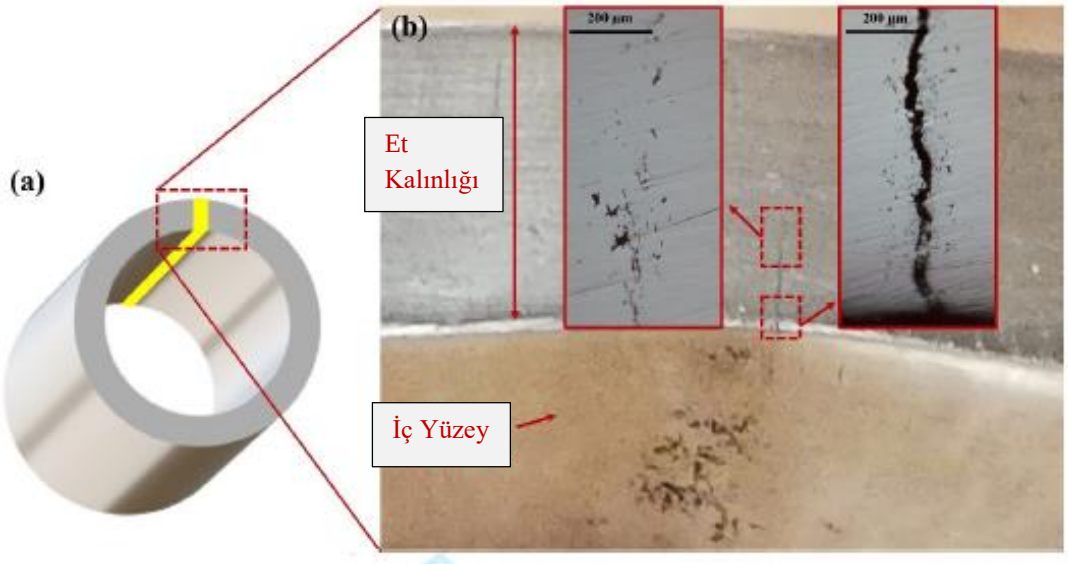
Numunelerin kimyasal analiz sonuçlarına göre Mn/Si oranı 8:1 oranından düşük olduğu görülmektedir (Çizelge 3.2). Bu oranın düşük olması literatürde de belirtildiği

gibi [38] yapı içerisinde karşılaşılan Mn ve silisyumca zengin kompleks oksitlerin oluşumuna sebep olmaktadır.

Bu gözlemlerin yanı sıra, çatlağın sadece su verme ve temperleme işlemi sonrası fark edilmesi çatlağın bu ısıl işlem ile alakalı olabileceğini göstermektedir. Bölüm 2.3'de de belirtildiği gibi malzemeler 800-900˚C derecede östenit yapısına getirildikten sonra, dış yüzeylerine püskürtme yöntemiyle su verilerek hızlı soğuma gerçekleştirilmiştir. Su verme işleminin sadece dış yüzeyden uygulanması, borunun dış yüzeyinin basma kuvvetlerine iç yüzeyinin ise çekme kuvvetlerine maruz kalmasına sebebiyet vermiştir. Çatlağın borunun iç yüzeyinden başlamasına (Şekil 4.2) iç yüzeyde ısıl işlem sonrası çekme yönünde oluşan termal iç gerilimlerin neden olduğu düşünülmektedir.

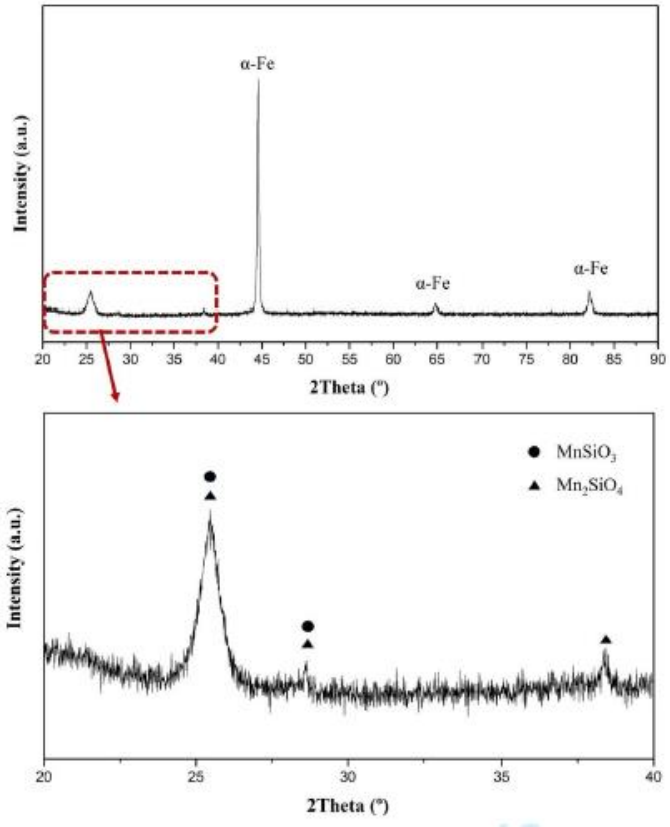
Bu bilgiler ışığında çatlağın kaynak dikişinden başlamasına Mn ve silisyumca zengin kompleks oksit kalıntılarının varlığı neden olmuştur. Ayrıca borunun iç yüzeyinde oluşan ısıl işlemden kaynaklanan termal gerilmeler de kompleks oksit/matris ara yüzeyinden çatlağın başlayıp ilerlemesine sebebiyet vermiştir denilebilir.

Ek olarak, son zamanlarda literatüre kazandırılan, benzer numuneler ile gerçekleştirilen bir hasar analizi çalışmasında da kaynak dikişinde oksit inklüzyonlarının varlığı tespit edilmiştir. Şekil 4.6'da numunelerin iyice parlatıldıktan sonra makroskopik ve optik mikroskop altındaki görüntüsü verilmiştir [52].

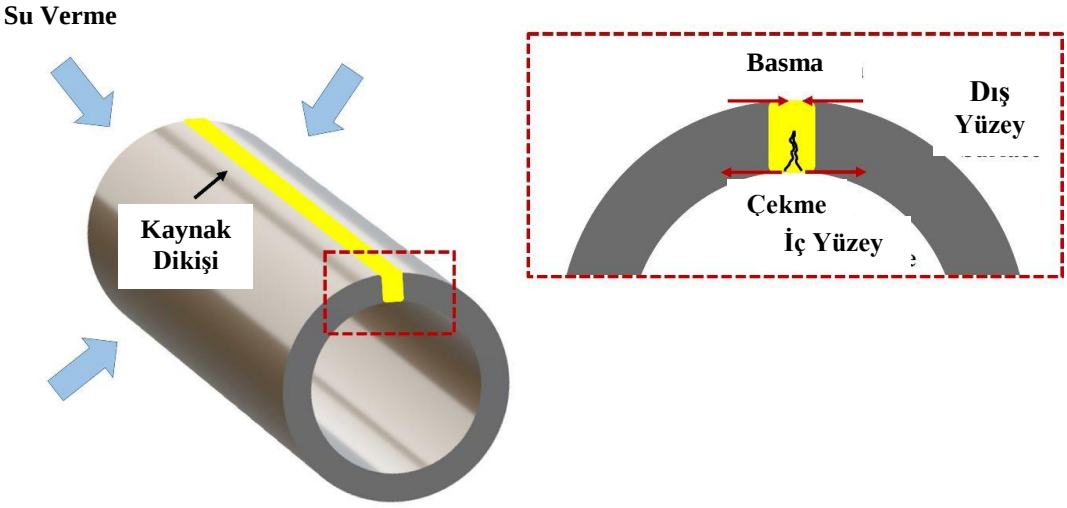


Şekil 4.6 : a) Borunun şematik görünümü, b) çatlak bölgesinin makroskopik ve optik mikroskop görüntüleri[52].

Kaynak dikişine yapılan XRD analizinde bu kompleks oksitlerin mangan ve silikat esaslı olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi bu kompleks oksitler, Mn/Si oranı 8 olan oksitler ile kıyaslandığında ergime noktası daha yüksek olan $MnSiO_3$ ve Mn_2SiO_4'tür. Yine aynı çalışmada, Şekil 4.8'de belirtildiği gibi çatlağın kaynak dikişinde borunun iç yüzeyinden başlaması görsellenmiş ve çatlak sebebinin borunun ısıl işlem sırasında maruz kaldığı termal gerilimler olduğu rapor edilmiştir.



Şekil 4.7 : Çatlağın ilerlediği bölgeden alınan XRD paterni[52].



Şekil 4.8 : Su verme ısıl işlemi sırasında çatlak oluşumunun şematik gösterimi[52].

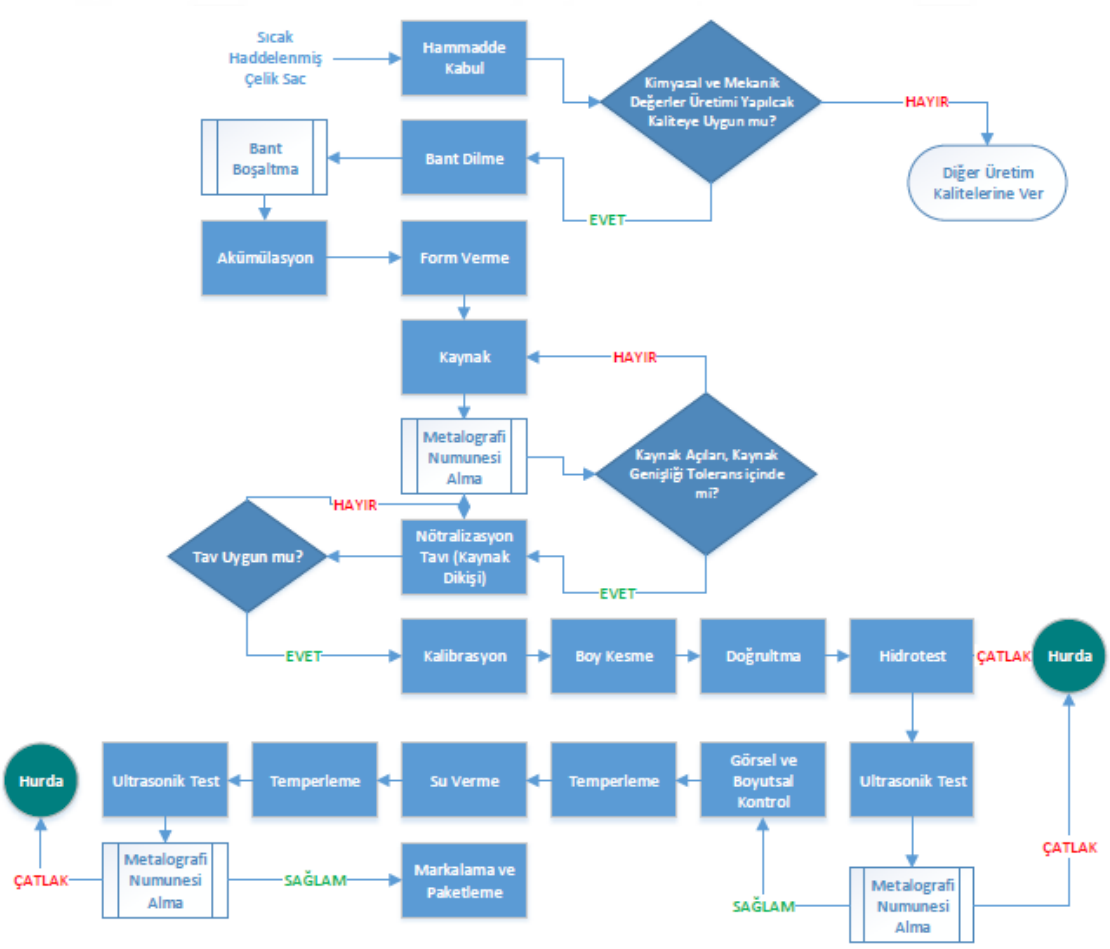
4.2 Problem Çözme Yöntemi: TRIZ

4.2.1 Problemin tanımlanması

Kaynak ve kaynak dikiş normalizasyonu sonrası hasarlı ve tahribatsız muayene yöntemlerinden sağlam olarak geçen 114,3 mm çapında 6,35 mm et kalınlıklı yüksek frekans kaynaklı çelik borularda, su verme ve temperleme işlemleri sonrası kaynak dikişi ve çevresinde çatlaklara rastlanılmıştır.

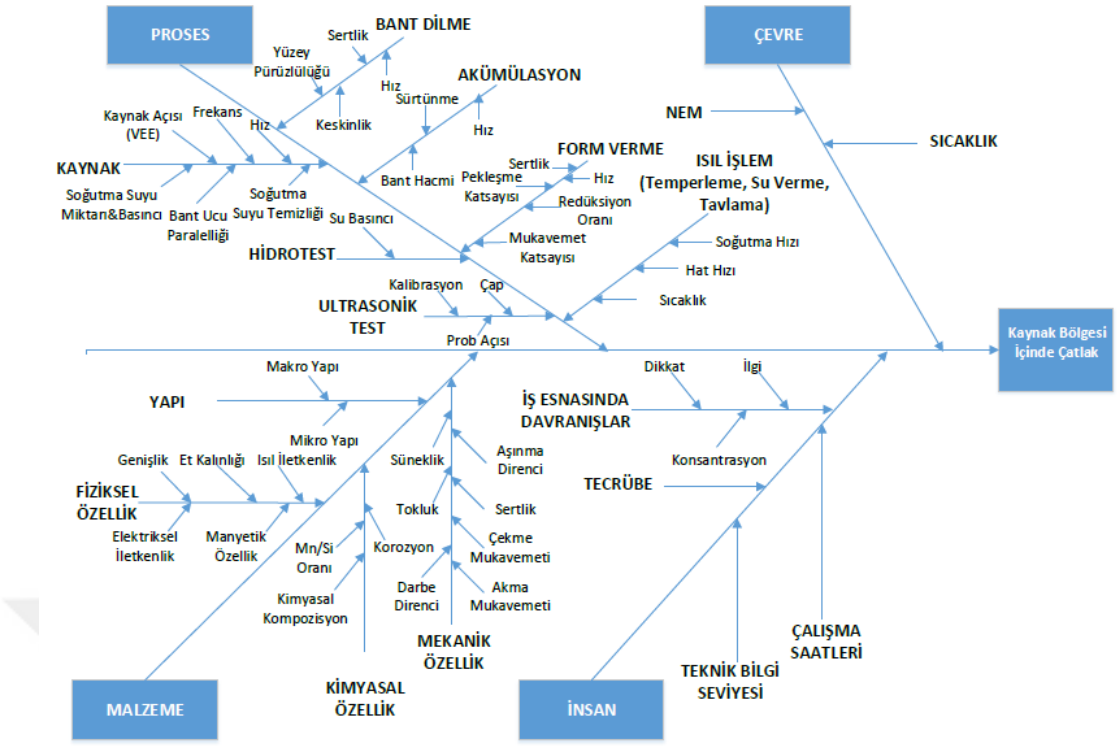
4.2.2 Çözümün geliştirilmesi

Problem çözme sürecinde ilk olarak boru üretim sürecine odaklanılmış ve Şekil 4.9'da belirtilen üretim akış şeması çizilmiştir.



Şekil 4.9 : Üretim akış şeması.

Üretim sürecinin her adımında, numunelerde görülen çatlak tipine benzer çatlaklar oluşmasına sebep olabilecek parametreler belirlenmiş ve bu parametreleri içeren balık kılçığı (sebep-sonuç diyagramı) tasarlanmıştır. Şekil 4.10'da verilen bu balık kılçığına göre çatlak oluşumuna sebep olabilecek birçok parametre vardır.



Şekil 4.10 : Balık kılçığı diyagramı.

Parametrelerin sadeleştirilmesi, problemin çözümüne ulaşmada zaman kayıplarını önleyeceğinden, çatlak oluşumuna en çok etkisi olan parametreler için etkinlik analizi yapılmıştır. Şekil 4.11'de verilen etkinlik analizinde 4 etken dikkate alınmakta ve her biri 0, 1, 2 rakamları ile değerlendirilmektedir.

Beklenen etki 5 veya daha üstü ise problemin çözümüne ilişkin uygulamalar gerçekleştirilir. Uygulama önceliği beklenen etkinin büyüklüğü dikkate alınarak belirlenir.

Aşağıda verilen nedenlerin önceliklendirilmesi matrisinde, incelenen numunelerde gözlenen çatlak tipinin oluşumunda etkili olabilecek parametreler incelendiğinde birinci önceliğin uygulama kolaylığından ve problem üzerindeki etkisinden kaynaklı yüksek ısı girdisine verilmesi gerekliliği gözlenmiştir. Yüksek ısı girdisi, daha önce de bahsedildiği gibi (Bölüm 2.4.4) oksit partiküllerinin kaynak dikişine girişinde, Mn ve silisyumca zengin kompleks oksitlerinin oluşumunda önemli rol oynamaktadır. Soğutma hızı, mikroyapının bir anda martenzite dönüşmesinde etkili olduğu ve çatlak oluşumuna doğrudan sebep olabileceği için bir sonraki odaklanılacak parametredir. Su verme prosesi üretim sürecinde sadece borunun dış yüzeyine uygulandığı ve yapısal incelemelerde de çatlak oluşumunun iç yüzeyden dışa doğru olduğu gözlendiği için

üçüncü önemli ekten olarak değerlendirilmiştir. Kaynak prosesi ve/veya kaynak dikişi normalizasyon tavı sonrasında herhangi bir tahribatsız muayene yöntemi olmadığından, çatlak mikro çatlak halinde tespit edilememiş ve daha sonraki sertleştirme prosesleriyle büyümüş ve ilerlemiş olabilir. Bu sebep, tahribatsız muayene tekniğinin dördüncü öncelik olarak belirlenmesinde önemli rol oynamıştır.

NEDENLER	Uygulama Kolaylığı	Uygulama Süresi	Maliyet	Problem Üzerinde Etkisi	Toplam Etki	Öncelik
Yüksek Isı Girdisi	2	2	1	2	**7**	**1**
Mn/Si Oranı	1	1	1	2	**5**	**3**
Yetersiz Hasarsız Muayene Teknikleri	2	1	0	1	**4**	**4**
Su Verme Yöntemi	2	1	0	2	**5**	**3**
Soğutma Hızı	1	1	2	2	**6**	**2**
Yüksek Homojenizasyon Tav Hızı	0	0	0	1	**1**	**5**
Düşük Homojenizasyon Tav Sıcaklığı	1	1	1	1	**4**	**4**
Düşük Frekansta Kaynak İşlemi	1	1	1	1	**4**	**4**
ETKEN	**0**		**1**		**2**	
Uygulama Kolaylığı	Zor		Normal		Kolay	
Uygulama Süresi	Uzun		Normal		Kısa	
Maliyet	Fazla		Normal		Az	
Problem Üzerinde Etkisi	Etkisi Yok		Etkili		Çok Etkili	

Şekil 4.11 : Nedenlerin önceliklendirilmesi.

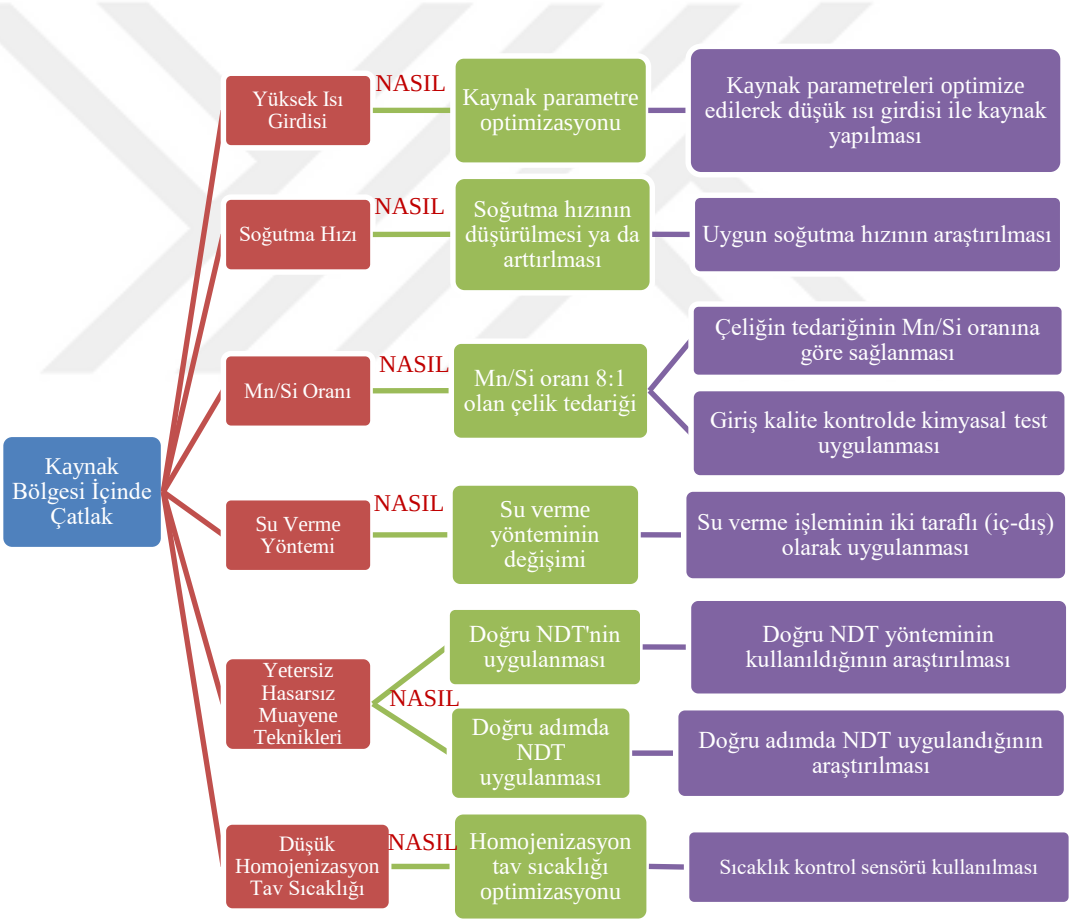
Kaynak sonrası malzeme içerisindenki kalıntı gerilimleri gidermek için yapılan homojen tavı sıcaklığının düşük olması da çatlak oluşmasında etkili olacağı için dördüncü öncelikli olarak incelenen sebeptir. Düşük frekansla kaynak işlemi problem üzerinde nispeten etkili olan parametrelerdendir. Düşük frekanslı kaynağın çatlağa sebep olduğu çok fazla araştırma bulunmadığı ve kaynak nüfuziyetinin yapılan testlerde yüksek olduğu gözlendiği için bu sebep ileride değerlendirilmeyecektir. Problem üzerindeki etkisi düşük olan yüksek homojenizasyon tav hızını yüksek frekans kaynağı prosesi sürekli bir hat olduğundan çözmek mümkün değildir.

Uygulama kolaylığı en düşük olan bu parametre de ileride değerlendirilmeye alınmayacaktır.

Sonuç olarak yapılan irdeleme sonunda yüksek ısı girdisi, soğutma hızı, Mn/Si oranı, su verme yöntemi, yetersiz hasarsız muayene teknikleri ve düşük homojenizasyon tav sıcaklığı ile ilerlenmiştir.

4.2.1 Çözüm alternatifleri ve seçimi

Önceliklendirilen nedenler, neden-nasıl ağaç diyagramına yerleştirilerek çözüm yolları belirlenmiştir. Şekil 4.12'de gösterildiği gibi öncelik sırası 1,2 ve 3 olan nedenlere Nasıl sorusu sorulup, çözüm getirilmesi konusunda çeşitli fikirler üretilmiştir.



Şekil 4.12 : Neden-Nasıl ağaç diyagramı.

Yüksek ısı girdisinin azaltılması için akım, voltaj ve hız gibi kaynak parametrelerinin kullanılan çeliğe göre optimize edilmesi gereklidir. Yapılan çalışmalarda ısı girdisi kaynak parametreleri değiştirilerek azaltılmalıdır. Fakat düşük ısı girdisi ile kalıntı partiküller elimine edilirken kaynak nüfuziyeti azalmış ve bir çelişki durumu ortaya

çıkmıştır. TRIZ yöntemi içerisinde bulunan 39x39 çelişki matrisine (Şekil 2.51) başvurulmuş ve probleme dair çözümler araştırılmıştır. TRIZ yöntemine göre iyileştirilmek istenen ve iyileştirilmeye karşı kötüleşen özellik belirlenmiş ve bunlar Şekil 4.13'de görüldüğü gibi matrise yerleştirilmiştir. Kötüleşen kaynak nüfuziyeti çelişki matrisinde belirtilen zararlı yan etkidir.

İyileştirilmek istenen özellik: Zararlı Yan Etkiler

İyileştirilmeye karşı kötüleşen özellik: Sıcaklık

Geliştirilen Özellik / Kötüleşen Özellik		Hareketli nesnenin ağırlığı	Sabit nesnenin ağırlığı	Hareketli nesnenin uzunluğu	Kuvvet	Şekil	Sıcaklık
		1	**2**	**3**	**10**	**12**	**17**
1	Hareketli nesnenin ağırlığı	+		15,8, 29,34	8,10, 18,37	10,14, 35,40	4,6, 29,38
2	Sabit nesnenin ağırlığı		+		8,10, 19,35	13,10 29,14	19,22, 28,32
3	Hareketli nesnenin uzunluğu	8,15, 29,34		+	17, 10,4	1,8, 10,29	10,15, 19
5	Hareketli nesnenin alanı	2,17, 29,4		14,15, 18,4	19,30, 35,2	5,34, 29,4	2,15, 16
31	Zararlı yan etkiler	15,19 , 22,39	1,22, 35,39	15,16, 17,22	1,28 35,40	1,35	2,22, 24,35
32	Verimlilik	27,28 29,15 16	1,13, 27,36	1,13, 17,29	12,35	1,13, 27,28	18,26, 27

Şekil 4.13 : Zararlı yan etki ve sıcaklığa yönelik çelişkiler matrisinden problemin çözümüne dair alınan kesit.

Çözümler: 2, 22, 24, 35

- **02:** Çıkarma
- **22:** Zararın Yarara Dönüşmesi
- **24:** Arabulucu
- **35:** Fiziksel ve/veya Kimyasal Özellikler

Şekil 4.13'de verilen zararlı yan etki-sıcaklık çelişki matrisinden elde edilen çözümler yukarıda da belirtildiği gibi çıkarma, zararın yarara dönüşmesi, arabulucu ve fiziksel ve/veya kimyasal özelliklerdir. Boru tek bir parça olduğu için sorun çıkaran parçayı ayırmak anlamına gelen çıkarma parametresi burada dikkate alınmamıştır. Ayrıca zararın yarara dönüştürülmesi ve bir cismi bir başkasyla birleştirmek anlamına gelen arabulucu uygulanabilir çözümler değildir. Sonuç olarak, sıcaklık düşüşü ve buna bağlı olarak kaynaktaki nüfuziyetsizlik, fiziksel ve kimyasal parametrelerin değişimi çözümünde belirtildiği gibi sadece optimum parametrenin bulunmasıyla ve bu konuda yeni araştırmaların yapılmasıyla mümkündür.

Soğutma hızının arttırılarak malzemenin bir anda sıcaklık düşüşüne maruz kalması, iç yapının değişerek malzemenin gevrekleşmesine yani mukavemet düşüşüne sebebiyet verecektir. Soğutma hızının azaltılması da mikroyapı içerisindeki martenzitik dönüşümün sağlanamamasına ve doğal olarak mukavemetin düşmesine sebebiyet verecektir. Yani soğutma hızı arttırılsa da azaltılsa da mukavemet etkilenecektir. Mukavemetin arttırılması için soğutma hızının optimize edilmesi gereklidir. İyileştirilmek istenen soğutma hızı ve iyileştirilmeye karşı kötüleşen özellik mukavemettir.

İyileştirilmek istenen özellik: Hız

İyileştirilmeye karşı kötüleşen özellik: MUKAVEMET

Çözümler: 3, 8, 14, 26

- **03:** Kısmi Kalite
- **08:** Karşı Ağırlık
- **14:** Yuvarlama
- **26:** Kopyalama

Geliştirilen Özellik / Kötüleşen Özellik		Hareketli nesnenin ağırlığı	Sabit nesnenin ağırlığı	Hareketli nesnenin uzunluğu	Kuvvet	Şekil	Mukavemet
		1	**2**	**3**	**10**	**12**	**14**
1	Hareketli nesnenin ağırlığı	+		15,8, 29,34	8,10, 18,37	10,14, 35,40	18,27 28,40
2	Sabit nesnenin ağırlığı		+		8,10, 19,35	13,10 29,14	2,10, 27,28
3	Hareketli nesnenin uzunluğu	8,15, 29,34		+	17, 10,4	1,8, 10,29	8,29, 34,35
5	Hareketli nesnenin alanı	2,17, 29,4		14,15, 18,4	19,30, 35,2	5,34, 29,4	3,14, 15,40
9	Hız	2,13, 28,38		8,13 14	13,15, 19,28	15,18, 34,35	3,8, 14,26
12	Şekil	+	3,10, 15,26	4,5, 29,34	10,35, 37,40		10,14, 30,40

Şekil 4.14 : Hız ve mukavemete yönelik çelişkiler matrisinden problemin çözümüne dair alınan kesit.

Şekil 4.14'de verilen hız-mukavemet çelişki matrisinden elde edilen çözümler yukarıda da belirtildiği gibi kısmi kalite, karşı ağırlık, yuvarlama ve kopyalamadır. Kaynak kalitesinin boru boyunca değişmesi söz konusu değildir. Daha önce de bahsedildiği gibi petrol boruları hayati önem taşıyan iletim elemanlarıdır, bu yüzden kısmi kalite çözümü göz ardı edilmiştir. Malzemenin ağırlığının azaltılmasını belirten karşı ağırlık maddesi prosesi hızlandırmak için etkili bir maddedir. Fakat boruların ağırlığı standarttır. Yuvarlama prensibine göre malzemeyi yuvarlayarak soğutmak hem hızlı soğumaya hem de homojen soğumaya sebep olacağı için etkili bir çözümdür. Son olarak kopyalama işlemi, üretimin başında bir simülasyon borusu kullanılmasını önermekte ve süreci görsel örneği ile tasarlayıp üretime geçmeyi gerektirmektedir. Su verme işlemi için uygun simülasyon tasarlanıp soğuma grafikleri oluşturulması yine etkili bir çözümdür.

Mn/Si oranının iyileştirilmesi sadece petrol borularının üretiminde kullanılan çelik bantların tedarikçilerinin Mn/Si oranının 8:1 olacak şekilde çelik üretmesiyle mümkündür. Tedarikçilerin kimyasal değişime gitmeleri mali açıdan pek istenen bir opsiyon değildir. Ayrıca Mn/Si oranının artması, mangan miktarının artmasına ve dolayısıyla çeliğin kalitesinin değişmesine, C-Mn oranlarına bağlı olarak düzenlenen tüm sistemin bir anda değişmesine sebebiyet verecektir. Yani boru üreticisinden J55 kalite çelik istendiğinde boru üreticisi J55'in gerektirdiği kimyasal dışına çıkmış olduğundan API 5L J55 kalite boru imalatı yapamamış olacaktır. Yani aslında kimyasal yapının düzenlenmesiyle elimine edilen çatlak oluşumu imalatın verimliliğinin artmasına fakat üretilebilirliğin azalmasına neden olacaktır.

İyileştirilmek istenen özellik: Verimlilik

İyileştirilmeye karşı kötüleşen özellik: Üretilebilirlik

Geliştirilen Özellik / Kötüleşen Özellik		Hareketli nesnenin ağırlığı	Sabit nesnenin ağırlığı	Hareketli nesnenin uzunluğu	Kuvvet	Şekil	Üretilebilirlik
		1	**2**	**3**	**10**	**12**	**32**
1	Hareketli nesnenin ağırlığı	+		15,8, 29,34	8,10, 18,37	10,14, 35,40	1,27, 28,36
2	Sabit nesnenin ağırlığı		+		8,10, 19,35	13,10 29,14	1,9, 28
3	Hareketli nesnenin uzunluğu	8,15, 29,34		+	17, 10,4	1,8, 10,29	1,17, 29
5	Hareketli nesnenin alanı	2,17, 29,4		14,15, 18,4	19,30, 35,2	5,34, 29,4	1,13, 24,26
31	Zararlı yan etkiler	15,19, 22,39	1,22, 35,39	15,16, 17,22	1,28 35,40	1,35	
39	Verimlilik	24,26, 35,37	3,15, 27,28	4,18, 28,38	10,15, 28,36	10,14, 34,40	2,24, 28,35

Şekil 4.15 : Verimlilik ve üretilebilirliğe yönelik çelişkiler matrisinden problemin çözümüne dair alınan kesit.

Çözümler: 2, 24, 28, 35

- **02:** Çıkarma
- **24:** Arabulucu
- **28:** Mekanik Sistemin Değiştirilmesi
- **35:** Fiziksel ve/veya Kimyasal Özellikler

Şekil 4.15'de verilen verimlilik-üretilebilirlik çelişki matrisinden elde edilen çözümler yukarıda da belirtildiği gibi çıkarma, arabulucu, mekanik sistemin değiştirilmesi ve fiziksel ve/veya kimyasal özelliklerdir. Çıkarma, arabulucu gibi çözümler daha önce bahsedildiği gibi uygun değildir. Malzeme kimyasal yapısıyla ilişkili olan bu parametrenin mekanik sistemin değiştirilmesiyle çözülmesi olası değildir. Burada uygulanacak tek çözüm fiziksel ve/veya kimyasal özelliklerin değişimidir. Mn/Si oranının optimumda tutulması sağlanmalı sadece petrol boruları üretiminde kullanılacak bu boru üretiminde gelen hammaddeye ön kontrol esnasında OES ile kimyasal analiz yapılmalıdır.

Çatlak su verme ve temperleme işlemleri sonunda yapılan ultrasonik testlerde ortaya çıkmıştır. Bu da çatlağın su verme sürecinde oluşabileceğini düşündürmektedir. Su verme işlemi sadece borunun dış yüzeyinden uygulanmaktadır. Bu da dış kısmın bir anda soğumasıyla dış yüzeyde basma kuvvetlerinin iç yüzeyde çekme kuvvetlerinin oluşmasına sebebiyet vermiştir. Isıl işlem sonrası iç yüzeyde oluşan termal gerilimlerin çatlağa sebebiyet verdiği göz önünde bulundurularak, bu termal gerilimlerin önüne geçmek adına borunun iki yüzeyden de soğutulması gereklidir. Su verme yönteminin değişmesinde maliyet dışında kısıtlayıcı bir engel yoktur. Bu yüzden yöntemin değiştirilmesi için TRIZ yöntemine başvurulmamıştır.

Yüksek frekans kaynağı ile boru üretiminde hasarsız muayene tekniği olarak akış şemasında (Şekil 4.9) gösterildiği gibi ultrasonik test kullanılmaktadır. Ultrasonik test hidrostatik test sonrası çatlakların tespit edilmesi için uygun bir yöntemdir. Fakat mikro çatlakların tespiti bu test ile mümkün değildir. Ayrıca kaynak ve onu izleyen kaynak dikiş normalizasyonu sonrası herhangi bir hasarsız muayene yönteminin kullanılmaması boruların seri olarak üretilmesini ve belki de baştan tespit edilecek bu çatlakların bir çok işlemden sonra proses bitiminde tespit edilmesine sebep olmuştur. Kaynak dikiş normalizasyonu sonrasına yeni bir hasarsız muayene yöntemi yerleştirmek ya da yöntemi çatlak analizini daha hassas yapabilecek başka bir yöntem

ile değiştirmek gereklidir. Bu durumun üreticiye mali olarak bir yük getirmesinin yanı sıra, seri üretimde zaman israfına sebep olacağı öngörülmüştür. Hasarsız muayene yönteminin değiştirilmesiyle iyileştirilen güvenilirlik ve doğruluk getirdiği zaman israfıyla üreticiyi çelişkide bırakmaktadır. Bu çelişkiye çözüm bulabilmek için TRIZ yöntemine başvurulmuştur.

İyileştirilmek istenen özellik: Üretimin Doğruluğu

İyileştirilmeye karşı kötüleşen özellik: Zaman İsrafı

Geliştirilen Özellik / Kötüleşen Özellik		Hareketli nesnenin ağırlığı	Sabit nesnenin ağırlığı	Hareketli nesnenin uzunluğu	Kuvvet	Şekil	Zaman İsrafı
		1	**2**	**3**	**10**	**12**	**25**
1	Hareketli nesnenin ağırlığı	+		15,8, 29,34	8,10, 18,37	10,14, 35,40	10,20, 28,35
2	Sabit nesnenin ağırlığı		+		8,10, 19,35	13,10 29,14	10,20, 26,35
3	Hareketli nesnenin uzunluğu	8,15, 29,34		+	17, 10,4	1,8, 10,29	2,15, 29
5	Hareketli nesnenin alanı	2,17, 29,4		14,15, 18,4	19,30, 35,2	5,34, 29,4	4,26
29	Üretimin Doğruluğu	13,18, 28,32	9,27, 28,35	10,28, 29,37	19,28, 34,36	30,32, 40	18,26, 28,32
31	Zararlı yan etkiler	15,19, 22,39	1,22, 35,39	15,16, 17,22	1,28 35,40	1,35	1,22

Şekil 4.16 : Üretimin doğruluğu ve zaman israfı yönelik çelişkiler matrisinden problemin çözümüne dair alınan kesit.

Çözümler: 18, 26, 28, 32

- **18:** Mekanik Titreşim
- **26:** Kopyalama
- **28:** Mekanik Sistemin Değiştirilmesi
- **32:** Rengin Değiştirilmesi

Şekil 4.16'da verilen üretimin doğruluğu-zaman israfı çelişki matrisinden elde edilen çözümler yukarıda da belirtildiği gibi mekanik titreşim, kopyalama, mekanik sistemin değiştirilmesi ve rengin değiştirilmesidir. TRIZ tarafından sağlanan bu çözümler zaman israfının önüne geçmek için uygun değildir. Bu yüzden NDT yönteminin doğruluğu ve güvenilirliği üzerine araştırma yapılmamıştır.

Yüksek frekans kaynağı sonrası kaynak kalıntı gerilimlerini gidermek ve mikroyapıyı homojen hale getirmek için yapılan normalizasyon tavının çatlağa sebebiyet vermesi düşük bir ihtimal olsa da değerlendirilmeye alınmıştır. İndüksiyon yöntemiyle çalışan bölgesel tav fırınlarının sıcaklık kontrol ve uyarı sensörlerinin olmayışı sıcaklıkların proses esnasında, herhangi bir arıza durumunda, sıcaklık değiştiğinde sesli ya da görsel uyarı vermemesi ileride oluşabilecek başka kaynak hatalarına seebiyet verebilir. Bu yüzden üreticinin tav sıcaklığını kontrol eden sıcaklık sensörü taktırması zorunludur. Bu çözüm için TRIZ yöntemine başvurulmamıştır.

5. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu tez kapsamında, yüksek frekans kaynağı ile boru üretimi ile ilgili geniş bir literatür bilgisine ve saha gözlemlerine yer verilmiştir. Ayrıca kaynak kalitesini etkileyen parametreler incelenmiş ve bunların kaynak hataları üzerindeki etkileri bu kaynak yönteminde yaygın olarak görünen hatalar ele alınarak irdelenmiştir.

Petrol sondaj ve iletim hatlarında kullanılan yüksek frekans kaynaklı çelik boruların sertleştirme ısıl işlemleri sonrası kaynak bölgesinde çatlak meydana gelen numuneleri ile çalışılmıştır. Çatlak içeren numuneler optik ve elektron mikroskopisi gibi analiz süreçlerine tabi tutulmuş ve çatlak yönü incelenmiştir. Çatlağın yüksek büyütmelerdeki görüntüleri incelendiğinde kaynak dikişi mikroyapısının temperlenmiş martenzit olduğu fark edilmiştir. Ayrıca kaynak dikişi çevresindeki kalıntıların varlığı da dikkat çekmektedir. Kaynak dikişi içerisine ve çatlak çevresine SEM-EDS analizi gerçekleştirilip bu kalıntıların Mn, Si ve O içerdiği tespit edilmiştir. Yani kaynak dikişinde Mn ve silisyumca zengin kompleks oksitler bulunmaktadır.

Literatür araştırmalarının Mn/Si oranı 8:1 oranından düşük çelikler için belirttiği kompleks oksit oluşturma mekanizması, Mn/Si oranı 8'den küçük bu 4 çatlaklı numune için doğrulanmıştır.

Ayrıca çeşitli büyütmelerde çatlak incelenmiş ve çatlak karakteristiğinin boru iç yüzeyinden dışa doğru olduğu gözlenmiştir. 800-900 ˚C'lere ısıtılan borunun dışarıdan su verilerek sertleştirilmesi söz konusudur. Bu durum literatür araştırmalarında da belirtildiği gibi boru dış yüzeyinde basma ve boru iç yüzeyinde çekme gerilimlerinin oluşmasına sebebiyet vermektedir. Çatlağın dıştan içe doğru oluşmasına bu termal gerilmelerin neden olduğu düşünülmektedir.

Literatürden elde edilen bilgiler ve yapılan metalürjik incelemeler sonunda çatlağın başlayıp ilerlemesine kaynak dikişi içerisinde bulunan mangan ve silisyumca zengin kompleks oksitlerin ve borunun iç yüzeyinde oluşan termal gerilmelerin sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

Analitik süreçlerin yanı sıra yüksek frekans kaynaklı çelik borularda meydana gelen bu çatlaklara problem çözme tekniklerinden biri olan TRIZ ile çeşitli çözümler üretilmesi hedeflenmiştir. Üretim ve kalite kontrol süreci içerisinde çatlağa sebebiyet verebilecek her parametre incelenmiş ve bunların problem üzerindeki etkileri etkinlik matrisi ile irdelenmiştir. Çözümlerin geliştirilmesi için ağaç diyagramından faydalanılmış ve uygulanabilir çözümler üretilmeye çalışılmıştır. Elde edilen çözümlerdeki çelişki durumuna bağlı olarak TRIZ 39x39 çelişki matrisine başvurulmuş ve 40 buluşçu prensipten ilgili olanları elde edilmiştir.

TRIZ metodunun sağladığı her çözüm yüksek frekans kaynağı ve çatlak oluşum süreci göz önünde bulundurularak irdelenmiş ve elde edilen olası çözümler öneriler kısmında belirtilmiştir.

6. ÖNERİLER

TRIZ yönteminden elde edilen sonuçlara göre kompleks oksit bileşiklerinin oluşmasına sebep olan yüksek ısı girdisinin azaltılması yönünde çalışmalar yapılmalıdır. Akım, voltaj ve hat hızı gibi kaynak parametreleri göz önünde bulundurularak optimum ısı girdisi belirlenmelidir. Belirlenen ısı girdisi ile kaynak yapılmadan önce mutlaka ham madde kimyasal analize tabi tutulmalı ve Mn/Si oranı kontrol edilmelidir. Çatlak oluşumuna elverişli sertleştirme ısıl işlemine maruz kalacak yüksek frekans kaynaklı borular için Mn/Si oranı 8:1'den büyük olan çelik malzeme tedarik edilmelidir.

Çatlağın oluşum karakteristiği dikkate alındığında soğuma sonrası meydana geldiği varsayılmaktadır. Bu da soğutma hızı ve su verme yöntemi üzerine yoğunlaşılmasını sağlamıştır. TRIZ metoduna başvurulduğunda borunun homojen soğuması için yuvarlanarak soğutulması ve soğumanın bir simülasyonla desteklenmesi sonuçları elde edilmiştir. Bir diğer neden olan su verme yönteminde ise değişikliğe gidilmeli, sadece borunun dış yüzeyinden sağlanan su verme işlemi boru iç yüzeyinden de verilerek termal gerilmenin önüne geçilmelidir.

TRIZ yönteminden elde edilen bir başka çözüm ise kalite kontrol sürecinde kullanılan hasarsız muayene tekniklerinin doğruluğunun ve güvenilirliğinin araştırılması gerekliliğidir. Kaynak sonrasında oluşabilecek kaynak hasarlarını gözlemleyebilmek ve zamanında müdahale edebilmek için kaynak prosesi ardına bir hasarsız muayene yöntemi eklenmesi önerilmektedir. Böylece sürekli bir hat olan yüksek frekans kaynağı birden çok hasarsız muayene yöntemi ile desteklenecek ve sadece hat sonunda yapılan ultrasonik test ile tespit edilen hataların önüne daha önce geçilecektir.

Ayrıca petrol sondaj ve iletim boruları gibi hayati öneme sahip üretimler için tüm süreç otomatize edilmeli ve izlenebilir olmalıdır. Özellikle kaynak dikişi normalizasyonu ve temperleme gibi malzeme mikroyapısını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini etkileyecek tüm ısıl işlem fırınlarının sıcaklık değerleri kontrol edilebilir ve herhangi bir arıza durumunda görsel ya da işitsel uyarı verebilir durumda olmalıdır.

Son olarak, endüstride sıklıkla rastlanan kaynak çatlağı problemine TRIZ yöntemi ile yaklaşılmış olması ileriki süreçte birçok çatlak probleminin sadece analitik süreçlerle değil problem çözme teknikleri kullanılarak da ilerleyeceğinin zeminini oluşturmaktadır. TRIZ, problem çözme teknikleri arasında en yeni ve gelişmeye en açık olanıdır. Gün geçtikçe yapılan çalışmalarla zenginleşen bir literatüre sahiptir ve endüstride karşılaşılan problemlerde kullanılması her geçen gün bu metodu daha güçlü hale getirecektir.

KAYNAKLAR

[1] **Uysal, A. K. & CANSEVER, N.** (2008). Doğalgaz ve Petrol Boru Hatlarında Hidrojenin Neden Olduğu Çatlamalar. *3. Enternasyonel Hasarsız Muayene Testleri Sempozyumu ve Fuarı.*

[2] **Yan, P.** (2011). *High frequency induction welding & post-welding heat treatment of steel pipes* (Doctoral dissertation, University of Cambridge).

[3] **Fanchi, J. R. & Fanchi, C. J.** (2005). Energy in the 21st century. Hackensack, NJ: World scientific.

[4] **British Petroleum.** (2014). BP energy outlook 2035. *BP stats, Jan*.

[5] **Türkiye Petrolleri**. (2016). *Ham petrol ve doğalgaz sektör raporu*

[6] **Dudley, B.** (2017). BP statistical review of world energy. In World Petroleum Congress: London. Retrieved from: https://www.bp.com/content/dam/bp/business sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf

[7] **Url-7** <*http://www.oilscams.org/offshore-vs-onshore-oil-drilling*>, erişim tarihi 28.09.2019

[8] **Tenaris.** (2010). Offshore and onshore pipeline solutions. Retrieved from: https://docplayer.net/20942997-Offshore-and-onshore-pipeline-solutions.html

[9] **Göçmen B.,** (t.y.). Kaynak Teknik Eğitim Notu. Borusan Mannesmann Boru.

[10] **Url-10 <***https://www.worldironsteel.com/news/what-s-octg-pipe-and-what-s -used-for-9512089.html*> erişim tarihi 28.09.2019

[11] **Url-11** <*https://www.theprocesspiping.com/introduction-to-seamless-pipe -manufacturing*> erişim tarihi 28.09.2019

[12] **Url-12** <*https://hardhatengineer.com/pipe-class-piping-specifications-pipeend /pipe-manufacturing-process*>, erişim tarihi 28.09.2019

[13] **Url-13 <***http://www.sunnysteel.com/high-frequency-welded-pipe.php*>, erişim tarihi 28.09.2019

[14] **Url-14** <*http://weldedsteelpipe.over-blog.com/process-5.html*>, erişim tarihi 28.09.2019

[15] **Avcı, İ. A.** (2010). Yüksek frekans indüksiyon kaynaklı borularda kaynak parametrelerindeki değişimin mekanik özelliklere ve kaynak dikişi geometrisine etkisinin incelenmesi (Doctoral dissertation).

[16] **Orhan, S.** (2008). Yüksek freekans kaynağı ile birleştirilen çelik profillerin mekanik özelliklerinin incelenmesi (Master thesis)

[17] **Borusan Mannesman Boru.** (2018). Borusan Mannesmann Boru ERW Üretim Sistemi.

[18] **Url-18** < *https://thermatool.com/what-is-induction-2*>, erişim tarihi 28.09.2019

[19] **Robert, K., & Nichols, R. K.** (1999). High Frequency Welding-the Process and Applications. Thermatool Corp, 5.

[20] **B.B.B.F. AR&GE.,** (1998). Editorial: "Yüksek frekans boru kaynağı". Yüksek Frekans Boru Kaynağı El Kitabı, 1-2,11.

[21 **Hannachi, Mohamed Tahar., & Djebail, Hamid.** Optimization of Parametres of Welding Steel Tubes by Induction at High Frequency.

[22] **Wright, J.** (1999). Optimizing Efficiency in HF Tube Welding Processes. In Tube & Pipe Technology, November/December.

[23] **Hasegawa, N., Hamatani, H., Nakaji, T. F. T., Takeda, Y., Motoyoshi, T., & Ohsawa, M. T. T.** (2015). Development of a new optical monitoring system for HF-ERW welding processes. In Nippon Steel & Sumitomo Metal technical report.

[24] **Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. L.** (2017). Handbook of induction heating. CRC press.

[25] **Warren, L.** (2019). Examining electric resistance weld nuggets in tube and pipe. Retrieved from https://www.thefabricator.com/thewelder/article/ shopmanagement/examining-electric-resistance-weld-nuggets-in-tube-and-pipe

[26] **Borusan Mannesmann Boru.** NDT Yöntemleri Teknik Bilgileri El Kitabı.

[27] **Totten, G. E. (Ed.).** (2006). *Steel heat treatment: metallurgy and technologies*. CRC press.

[28] **Url-28** < *https://slideplayer.biz.tr/slide/2689992/*>, erişim tarihi 15.10.2019

[29] **Ajax TACCO Magnethermic.** (2015). *Induction heat treating complexities for the tube and pipe industry.* [PowerPoint slides] Retrieved from https://www.slideshare.net/GeorgOhm/ajaxtocco-magnethermic-presentation-for-aam-2015-conference-in-houston-texas

[30] **Simion, P., Dia, V., Istrate, B., & Munteanu, C.** (2014). Controlling and monitoring of welding parameters for micro-alloyed steel pipes produced by high frequency electric welding. In Advanced Materials Research (Vol. 1036, pp. 464-469). Trans Tech Publications.

[31] **Chen, Z., Chen, X., & Zhou, T.** (2017). Microstructure and mechanical properties of J55 ERW steel pipe processed by on-line spray water cooling. Metals, 7(4), 150.

[32] **Robert, K., & Nichols, P. E.** (1999). Common HF Welding Defects. *Thermatool Corp. East haven CT*.

[33] **Maksuti, R., Mehmeti, H., & Oettel, H.** (2007, September). The influence of the plastic deformation on the metal flow during high frequency electric resistance welding of longitudinally welded pipes. In 3rd International Conference, Deformation Processing and Structure of Materials, Belgrade, Serbia (pp. 20-22).

[34] **ArcelorMittal Europe – Flat Products**. (2016). *Definitions of welding and weldability*. Published by ArcelorMittal Europe Communications.

[35] **Wright, J.** (1997). Principles of high frequency induction tube welding. *Washington Electronic Heating Equipment Inc*.

[36] **Kiefner, J. F., Nestleroth, J. B., Quickel, G. T., Beavers, J. A., & Leis, B. N.** (2014, December). Types of Defects That Affect ERW Seam Integrity in Response to NTSB Recommendation P-09-1, Arising From the Carmichael, MS Rupture. In *2014 10th International Pipeline Conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.

[37] **Borusan Mannesmann Boru**, (2018), *Kaynak Hata Kataloğu*

[38] **Shin, M. H., Han, J. M., Lee, Y. S., & Kang, H. W.** (2014, December). Study on defect formation mechanisms in ERW for API steel. In *2014 10th International Pipeline Conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.

[39] **Kim, C. M., & Kim, J. K.** (2009). The effect of electromagnetic forces on the penetrator formation during high-frequency electric resistance welding. *journal of materials processing technology*, *209*(2), 838-846.

[40] **Joo, M. S., Noh, K. M., Kim, W. K., Bae, J. H., & Lee, C. S.** (2015). A study of metallurgical factors for defect formation in electric resistance welded API steel pipes. *Metallurgical and Materials Transactions E*, *2*(2), 119-130.

[41] **Aminorroaya-Yamini, S., Edris, H., & Fatahi, M.** (2003). Hook crack in electric resistance welding line pipe steel.

[42] **Eaves, G. N., Cameron, S. R., Casey, V. J., Nestico, P., & Bernert, W.** (1992, April). Hook Crack reduction in ERW line pipe steel. In *Steelmaking Conference Proceedings.* (Vol. 75, pp. 521-528).

[43] **Kim, W. K., Koh, S. U., Yang, B. Y., & Kim, K. Y.** (2007). Study on EEC and SSC of the Electric Resistance Welded Linepipe Steel. Corrosion Science and Technology, 6(3), 96-102.

[44] **Lee, J., Han, S., Kim, K., Kim, H., & Lee, U.** (2013). Failure analysis of carbon steel pipes used for underground condensate pipeline in the power station. Engineering Failure Analysis, 34, 300-307.

[45**] Duran, H. C.** (2011). Yaratıcı Problem Çözme Tekniği Yardımıyla Konstrüktif Bir Problemin Ele Alınması (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

[46] **Keçeci, T.** (2015). Gemi kazası probleminin incelenmesi için kök sebeb analizi yaklaşımı önerisi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

[47] **Kaykayoğlu, C.R.** (2018). *Temel TRIZ Eğitimi*. [PowerPoint Slayt]

[48] **Eryurt, E.** (2005). *Metalurjik Ürün Geliştirmede Kfg Ve Trız Metodolojilerinin Uygulanması* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

[49] **Beklen, Z. P.** (2013). TRİZ Metodolojisi Kullanarak Yenilikçi Ürün Geliştirme (Doctoral dissertation)

[50] **Şener, S.D.** (2006). TRIZ: Yaratıcı Problem Çözme Teorisi ve Diğer Problem Çözme Yöntemleriyle Karşılaştırma. Yüksek Lisans Tezi. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[51] **Yaralıoğlu, K.** (2002). İşletme Sorunlarının Çözümünde Yaratıcı Sorun Çözme Teorisi. *1. Ulusal Kalite Fonksiyon Göçerimi Sempozyumu.* Erişim adresi http://www.deu.edu.tr/userweb/k.yaralioglu/dosyalar/TRIZ.doc

[52] **Cimenoglu, H., Kaba, M., Altay, M**. (2020). An Investigation on the Longitudinal Cracking of Electric Resistance Welded Steel Pipes. *Journal of Failure Analysis and Prevention,* 1-19



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Merve Seyyitoğlu

Doğum Tarihi ve Yeri : 29.05.1993 - İskenderun/HATAY

E-posta : seyitoglum@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İTÜ, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2020, İTÜ, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017 yılında İtü Arı Teknokent Bünyesi'nde düzenlenen Girişimci ve Yenilikçi Bitirme Tasarım Projesi (BTP) Yarışması'nda En İyi Bitirme Tasarım Projesi birincilik ödülünü kazandı.
- 2017-2019 yılları arasında Borusan Mannesmann Boru Fabrikası'nda Uzun Dönem Kalite Stajyeri olarak çalıştı.
- 2019'dan bu yana Kaynak Mühendisi olarak Çimtaş Boru Sanayi A.Ş'de görev yapmaktadır.