

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SOĞUK ŞEKİLLENDİRMEYE UYGUN YÜKSEK MUKAVEMETLİ
ÇELİK MALZEME İLE LPG TÜPÜ İMALATINDA TOZALTI
KAYNAK PARAMETRELERİNİN DİKİŞ KALİTESİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Uğur NUHOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Tolga MERT

Eş Danışman

Doç. Dr. Mustafa TÜMER

Ağustos, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SOĞUK ŞEKİLLENDİRMEYE UYGUN YÜKSEK MUKAVEMETLİ
ÇELİK MALZEME İLE LPG TÜPÜ İMALATINDA TOZALTI
KAYNAK PARAMETRELERİNİN DİKİŞ KALİTESİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Uğur NUHOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 25.08.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Tolga MERT
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç. Dr. Mustafa TÜMER
Kocaeli Üniversitesi
Eş Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Tolga MERT, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ , Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Alptekin KISASÖZ , Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (YTÜ BAPK) Projesi (Proje Yürütücüsü: Doç. Dr. Tolga MERT, Proje No: FBA-2021-4500, Proje Adı: 26 Litrelik LPG Tüpünün Hafifletilmesi ve İmalat Hızının Arttırılması, Araştırmacılar: Doç. Dr. Mustafa TÜMER ve Öğr. Uğur NUHOĞLU, Başlangıç Tarihi: 25.10.2021) ve EVAS Ev Aletleri San. A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Soğuk şekillendirmeye uygun yüksek mukavemetli çelik malzeme ile LPG tüpü imalatında tozaltı kaynak parametrelerinin dikiş kalitesine etkilerinin incelenmesi başlıklı çalışmada, desteklerinden ötürü danışmanım Doç. Dr. Tolga MERT ve eş danışmanım Doç. Dr. Mustafa TÜMER başta olmak üzere; deney süreçlerinde yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Serkan Çelik ve Yalın Alakuş'a, son ana kadar destekçim olan anneme, babama ve eşime sonsuz teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Uğur NUHOĞLU

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
2 TEORİ	5
2.1 Tozaltı Ark Kaynağı.....	5
2.1.1 Tanım.....	5
2.1.2 Tozaltı Ark Kaynağının Özellikleri	7
2.1.3 Tozaltı Ark Kaynağının Dezavantajları.....	7
2.1.4 Tozaltı Ark Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri	8
2.1.5 Tozaltı Ark Kaynağında Kullanılan Kaynak Tozları	8
2.1.6 Uygulama Alanları.....	8
2.2 Çelik.....	9
2.2.1 Çeliklerin Sınıflandırılması.....	10
2.2.2 Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli (HSLA) Çelikler	10
2.3 LPG Tüpü	11
2.3.1 LPG Tüpü Tasarımı.....	12
3 UYGULAMA	16
3.1 Tasarım ve Malzeme Seçimi	16

3.2 Kaynak Uygulaması.....	19
3.2.1 Donanım.....	19
3.2.2 Kaynak Sarf Malzemeleri	22
3.2.3 Parametre Optimizasyonu	25
3.3 Deneysel Tasarım.....	34
3.4 K.K.N'lerin Hazırlanması ve Deneylerin Uygulanması	37
4 DENEY SONUÇLARI VE MALİYET ANALİZİ	51
4.1 Görsel Muayene	51
4.2 Radyografik Muayene	51
4.3 Makroskopik Muayene	52
4.4 Çekme Deneyi	53
4.5 Eğme Deneyi.....	55
4.6 Patlatma-Hacimsel Genleşme Deneyi	55
4.7 Basınçla Yorulma Deneyi.....	57
4.8 Mikro Sertlik Ölçme Deneyi	58
4.9 OM İle Mikro Görüntüleme	59
4.10Maliyet Analizi.....	63
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	66
KAYNAKÇA	68
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	73

SİMGE LİSTESİ

a	Silindirik gövde cidar kalınlığı
A	Amper
Al	Alüminyum
atü	Atmosfer teknik üst basınç
b	Bombe baş cidar kalınlığı
c	Bombe başların biçim faktörü
C	Karbon
cm	Santimetre
Cr	Krom
D	Tüpün dış çapı
dk	Dakika
Dp	Mandrel çapı
e	Numune kalınlığı
Fe	Demir
g	Gram
G	Gerilme düşürme faktörü
h	Bombe başın silindirik kısmının yüksekliği
H	Bombe başın bombeli kısmının yüksekliği
HV	Vickers sertliği
Hz	Hertz
J	Joule
kg	Kilogram
Lt	Litre
m	Metre
ml	Mililitre
mm	Milimetre
mm ²	Milimetre kare
Mn	Mangan
Mo	Molibden
MPa	Megapascal
n	Eğme mandreli çapının, deney numunesi kalınlığına oranı

N	Newton
Nb	Niyobyum
Ni	Nikel
O	Oksijen
Pa	Pascal
Pb	Patlatma deneyi sırasında erişilen azami basınç
Pc	Hesaplama basıncı
Ph	Deney basıncı
r	Bombe başın iç taraf boğum kısmının yarıçapı
R	Bombe başın iç taraf çanak kısmının yarıçapı
Re	Akma dayanımı
Rm	Çekme dayanımı
sa	Saat
Si	Silisyum
sn	Saniye
So	Kesit alanı
t	Kalınlık
Ti	Titanyum
TL	Türk Lirası
µm	Mikrometre
V	Vanadyum
V	Voltaj
w	Genişlik
W	Wolfram
Ø	Çap
°	Derece
°C	Celsius

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım
ADR	Tehlikeli malların karayoluyla uluslararası taşımacılığını bağlayan Avrupa anlaşması
DC	Doğru akım
EN	Avrupa standardı
HSLA	Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı
ISO	Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu
ITAB	Isı tesiri altındaki bölge
K.K.N	Kaynak kombinasyonu numunesi
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
max	Maksimum
min	Minimum
N.D.T	Tahribatsız muayene
OM	Optik mikroskop
PLC	Programlanabilir mantıksal kontrolcü
P.O.N	Parametre optimizasyonu numunesi
RID	Tehlikeli malların demiryoluyla uluslararası taşımacılığını bağlayan düzenleme
R.T	Radyografik muayene
SAW	Tozaltı kaynağı
TS	Teknik spesifikasyon
UN	Birleşmiş Milletler
V.T	Görsel muayene

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Tozaltı ark kaynağı: a) Genel süreç b) Kaynak bölgesi [13].	5
Şekil 2.2	LPG tüpü [9].	11
Şekil 2.3	(a)-Torisferik bombe baş, (b)-Yarı elipsoidal bombe baş [10].	13
Şekil 2.4	H/D oranı 0,2 ile 0,25 arasında iken “c” biçim faktörü [10].	14
Şekil 2.5	H/D oranı 0,25 ile 0,5 arasında iken “c” biçim faktörü [10].	15
Şekil 3.1	Lincoln Electric marka AC/DC 1000® SD kaynak makinesi [24].	19
Şekil 3.2	Lincoln Electric marka MAXsa 10 kontrol ünitesi [26].	20
Şekil 3.3	Otomatik tozaltı kaynak tezgahı ve LPG tüpü.	21
Şekil 3.4	Parametre optimizasyonu için hazırlanan kaynak numuneleri	26
Şekil 3.5	P.O.N’ye ait kaynak görüntüsü	26
Şekil 3.6	Farklı ilerleme hızlarında hazırlanan numuneler	27
Şekil 3.7	LPG tüpünün çevresel alın kaynağı [10].	28
Şekil 3.8	Kaynak dikişi genişliğinin ve yüksekliğinin ölçümü	28
Şekil 3.9	Kaynak dikişinde yetersiz dolgu ve dalgalı form	29
Şekil 3.10	X-ışını deney düzeneği	30
Şekil 3.11	P.O.N R.T görüntüleri	30
Şekil 3.12	Makro numunesi hazırlama ve görüntüleme süreci	31
Şekil 3.13	P.O.N makro görüntüleri	32
Şekil 3.14	P.O.N-5 nüfuziyet eksikliği	33
Şekil 3.15	K.K.N hazırlık süreci	37
Şekil 3.16	Kaynak tozunun kurutulması	38
Şekil 3.17	Tahribatlı muayene deney numunelerinin sınıflandırılması	39
Şekil 3.18	LPG tüpünün çevresel kaynağından alınan çekme numunesi [10]	40
Şekil 3.19	Çevresel kaynağa dik olarak alınan çekme deneyi numunesi [10]	40
Şekil 3.20	Çekme numunesi hazırlama süreci	41
Şekil 3.21	Deneye hazır çekme numuneleri	42
Şekil 3.22	Çekme deneyi test düzeneği	42
Şekil 3.23	Eğme deneyi [10].	43
Şekil 3.24	Eğme deneyi test düzeneği	44

Şekil 3.25 Patlatma-hacimsel genişme deney düzeneği.....	46
Şekil 3.26 Basınçla yorulma deneyi test düzeneği.....	47
Şekil 3.27 Tahribatlı deney numuneleri.....	48
Şekil 3.28 Bakalite alma ve zımparalama makineleri.....	48
Şekil 3.29 Bakalite alınmış deney numuneleri	49
Şekil 3.30 Sertlik ölçüm cihazı.....	49
Şekil 3.31 Sertlik ölçüm noktaları.....	50
Şekil 3.32 Optik mikroskop	50
Şekil 4.1 K.K.N 1-8 aralığının R.T görüntüleri.....	51
Şekil 4.2 K.K.N 9-16 aralığının R.T görüntüleri.....	52
Şekil 4.3 K.K.N 1-8 aralığının makro görüntüleri	52
Şekil 4.4 K.K.N 9-16 aralığının makro görüntüleri	53
Şekil 4.5 Çekme dayanımlarının (Rm) karşılaştırılması	53
Şekil 4.6 Eğme deneyi numunesi	55
Şekil 4.7 K.K.N 2-3 patlatma-hacimsel genişme deney raporu.....	55
Şekil 4.8 K.K.N 7-3 patlatma-hacimsel genişme deney raporu.....	56
Şekil 4.9 K.K.N 10-1 patlatma-hacimsel genişme deney raporu.....	56
Şekil 4.10 K.K.N 15-1 patlatma-hacimsel genişme deney raporu.....	56
Şekil 4.11 Vickers sertlik grafiği.....	59
Şekil 4.12 S460MC mikroyapısı	60
Şekil 4.13 ITAB 200x OM görüntüleri.....	61
Şekil 4.14 Kaynak metali 200x OM görüntüleri	62

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	LPG tüp gazlarının sınıflandırılması [21].	16
Tablo 3.2	LPG tüp gazlarının adlandırılması [21].	17
Tablo 3.3	Sıvılaştırılmış gazlar için test basıncı değeri [21].	17
Tablo 3.4	S460MC çeliğinin mekanik özellikleri [23].	18
Tablo 3.5	S460MC çeliğinin kimyasal bileşimi [23].	18
Tablo 3.6	Lincoln Electric AC/DC 1000® SD kaynak makinesi [25].	20
Tablo 3.7	SW 701 kaynak telinin kimyasal bileşimi [28].	22
Tablo 3.8	SF 212 - SW 701 kaynak metali kimyasal bileşimi [29].	23
Tablo 3.9	SF 212 - SW 701 kaynak sonrası mekanik değerler [29].	23
Tablo 3.10	SW 702Mo kaynak telinin kimyasal bileşimi [30].	23
Tablo 3.11	SF 304 - SW 702Mo kaynak metali kimyasal bileşimi [31].	24
Tablo 3.12	SF 304 - SW 702Mo kaynak sonrası mekanik değerler [31].	24
Tablo 3.13	Parametre optimizasyonu	25
Tablo 3.14	Parametre optimizasyonu deney sonuçları	33
Tablo 3.15	Kaynak tozu-teli ve parametrelerinin kombinasyonu	35
Tablo 3.16	K.K.N deney planı	36
Tablo 3.17	Mandrel çapı (Dp) ile deney parçası kalınlığının (n) oran değerleri.	44
Tablo 4.1	Çekme deneyi sonuçları	54
Tablo 4.2	Patlatma-hacimsel genişleme deney sonuçları.	57
Tablo 4.3	Basınçla yorulma deneyi sonuçları	57
Tablo 4.4	Vickers sertlik değerleri.	58
Tablo 4.5	LPG tüpü ve sac metallerin boyutsal değerleri	63
Tablo 4.6	Sac metal maliyeti analizi	64
Tablo 4.7	Sarf malzeme maliyeti analizi	64
Tablo 4.8	İşçilik maliyeti analizi	65
Tablo 4.9	Toplam maliyet analizi.	65

Soğuk Şekillendirmeye Uygun Yüksek Mukavemetli Çelik Malzeme İle LPG Tüpü İmalatında Tozaltı Kaynak Parametrelerinin Dikiş Kalitesine Etkilerinin İncelenmesi

Uğur NUHOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç Dr. Tolga MERT

Eş-Danışman: Doç. Dr. Mustafa TÜMER

S460MC, minimum akma dayanımı 460 MPa olan yüksek mukavemetli düşük alaşımlı bir yapı çeliğidir. Bu çalışmada, LPG tüpünün ağırlığını azaltmak amacıyla, geleneksel LPG tüp çelikleri yerine hammadde olarak S460MC çeliği kullanılmıştır. TS EN 14140'a göre tasarlanan ve imal edilen iki parçalı LPG tüpünün silindirik gövde cidar kalınlığı 1,50 mm olarak belirlenmiştir. Tüplerin çevresel kaynağında tozaltı ark kaynağı yöntemi kullanılmıştır. Kaynak yönteminin tozaltı ark kaynağı olarak belirlenmesinde yüksek verimlilik, derin nüfuziyet ve mükemmel yüzey kalitesi gibi birçok faktör etkindir. Kaynak sarf malzemelerinin (tel, toz) ve kaynak parametrelerinin (amper, voltaj, kaynak ilerleme hızı) seçimi ve optimizasyonu bu çalışmanın öncelikli odak noktalarıdır. Parametre optimizasyonu için klasik deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır ve bu doğrultuda deney planı oluşturulmuştur. İlk olarak, kaynak parametrelerini doğrulamak amacıyla ilgili standartlara uygun olarak kaynak dikişlerine görsel ve radyografik (X-ışını) muayeneler yapılmıştır. Sarf malzeme ve kaynak parametresi

seçimlerinin mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkilerini incelemek ve standartların gereksinimlerini sağlamak amacıyla deney numuneleri hazırlanarak; çekme deneyi, eğme deneyi, makro inceleme, mikro sertlik ölçme deneyi ve OM ile mikro görüntüleme deneyleri yapılmıştır. İmalatı tamamlanan numunelere ise patlatma-hacimsel genişleme ve basınçla yorulma deneyleri uygulanmıştır. Tahribatsız ve tahribatlı deneyler neticesinde doğrulanan kaynak parametreleri ile sarf malzeme seçimlerinin kaynak dikişi kalitesine olan etkileri ortaya konulmuştur. Kaynak teli içeriğindeki Molibden elementi, kaynak dikişinin çekme dayanımını arttırmış ve kaynak metalindeki sertlik değerlerini yükseltmiştir. Mekanik değerlerdeki iyileşmeler, Mo elementinin mikroyapıdaki tane inceltici etkisine dayandırılarak desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: LPG tüpü, tozaltı ark kaynağı, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik, tahribatsız muayene, tahribatlı muayene

Investigation of the Effects of Submerged Arc Welding Parameters on the Weld Bead Quality in Manufacturing of LPG Cylinder to be Manufactured from High Strength and Cold Formable Steel

Uğur NUHOĞLU

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Tolga MERT

Co-advisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa TÜMER

S460MC is a high strength low alloy structural steel which has minimum yield strength of 460 MPa. In this study, S460MC steel was used as a raw material instead of the conventional LPG cylinder steels in order to reduce the weight of the LPG cylinder. The cylindrical body wall thickness of the two-piece LPG cylinder, designed and manufactured in accordance with TS EN 14140, was determined as 1.50 mm. Submerged arc welding method was used for circumferential welding of the LPG cylinders. Many factors such as high efficiency, deep penetration and excellent surface quality are important in determining the welding method as submerged arc welding. Selection and optimization of welding consumables (wire, flux) and welding parameters (current, voltage, travel speed) are the primary focus of this study. The classical design of experiment method was used for parameter optimization and test plan was created accordingly. Initially,

visual and radiographic (X-ray) tests of the weld beads were performed in accordance with the relevant standards to verify the welding parameters. In order to analyze the effects of consumable and welding parameter selections on mechanical properties and microstructure and to fulfill the requirements of the standards, test specimens were prepared; tensile test, bend test, macroscopic examination, microhardness testing, microscopic examination in the OM were performed. Bursting-volumetric expansion and pressure fatigue tests were carried out the specimens whose production were completed. Welding parameters verified as a result of non-destructive and destructive tests and the effects of consumable selections on the quality of the weld bead were revealed. Molybdenum element in the welding wire increased the tensile strength and the hardness values in the weld metal. Improvements in mechanical values were supported based on the grain-refining effect of Mo element in microstructure.

Keywords: LPG cylinder, submerged arc welding, high strength low alloy steel, non-destructive test, destructive test

1.1 Literatür Özeti

S460MC, minimum akma mukavemeti 460 MPa olan yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) ferritik-perlitik bir yapı çeliğidir. İnce taneli yapının bir sonucu olan yüksek mukavemet özelliği, niyobyum, vanadyum ve titanyumun mikro alaşımlandırılması ve sıcak haddeme işlemiyle sağlanır [1]. S460MC ve diğer HSLA çelikleri, yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda, yaygın olarak kullanılan yapısal çeliklerin yerine tercih edilmeye başlanmıştır. Yüksek mekanik dayanımın yanında, soğuk şekillendirilebilir bir malzemedir [2]. Akma ve çekme dayanımlarında meydana gelen azalmalardan dolayı 580°C'nin üzerindeki uzun süreli normalizasyon ve gerilim giderme ısıl işlemleri S460MC çeliği için uygun değildir, bu durum S460MC'nin sıcak şekillendirilebilme kabiliyeti olmadığı anlamına da gelmektedir. S460MC, genel teknik kurallara uyulduğu takdirde tüm elektrik ark kaynak yöntemleriyle kaynak edilebilmektedir. Kaynak dolgu malzemesi olarak da mukavemet gereksinimlerini sağlayacak kaynak telleri ve elektrotlar kullanılmalıdır. Genel olarak, boylamasına kırıların, şasilerin, soğuk preslenmiş ve haddelenmiş parçaların ve yapısal boruların imalatında kullanılırlar [3]. Tozaltı ark kaynağı, kaynak için gerekli ısının, ergiyen elektrod ile iş parçası arasında oluşan ark sayesinde ortaya çıktığı bir ark kaynak yöntemidir. Kaynak banyosu, gazaltı kaynak yöntemlerinden farklı olarak tozaltı kaynak tozu tarafından, havanın zararlı etkilerine karşı korunur. Koruyucu görevi yapan kaynak tozu ayrıca kaynak banyosu ile reaksiyona girerek kaynak metalini deokside eder, yavaş soğumayı sağlar ve kaynak dikişine form verir. Ayrıca kullanılan malzemelere bağlı olarak, kaynak işleminde kullanılan kaynak tozları, kaynak metalinin kimyasal kompozisyonunu dengeleyen alaşım elementlerine sahip olabilir [4]. Yüksek dolgu verimliliğinden dolayı, tozaltı ark kaynağı (SAW), uygulanan konstrüksiyonun uygunluğuna bağlı olarak diğer pek çok kaynak

yöntemi yerine tercih edilmektedir. Tozaltı ark kaynağı, yüksek güvenilirlik, stabil ark, sıçrantısız, dumansız ve zararlı kaynak ışınları olmadan derin nüfuziyet ve mükemmel yüzey kalitesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır [5]. Tozaltı ark kaynağında kaynak metali, dolgu metali (ilave malzeme), ana malzeme ve kaynak tozunun kimyasal ve fiziksel reaksiyonları sonucu meydana gelir. Kaynak metali ile ana metalin uyumlu hale getirilebilmesi için kaynak tel ve tozunun uygun seçilmesi gerekir. Kaynak metalinin çatlama karşı direnci ve mekanik özellikleri, toza ilave edilen alaşım elementleri tarafından iyileştirilebilir. Kaynak dikişinin düzgün ve etkin bir biçimde curufla örtülmesi yavaş bir katılma sağladığından, kaynak banyosundan gaz çıkışı kolaylaşmakta ve birim dikişe uygulanan akım şiddetinin yüksekliği de soğuma hızını yavaşlattığından, geçiş bölgesinde sertleşme ihtimali de zayıflamaktadır [6]. Akım şiddeti, gerilim, tel besleme hızı, serbest tel mesafesi gibi kaynak parametreleri tozaltı ark kaynağının ana parametreleridir. Gerilim ve akım ark gücünü belirler. Kısa bir ark, mevcut gücü kaynak banyosunun küçük bir alanına odaklayarak daha derin bir penetrasyon ve daha dar kaynak dikişi sağlar. Tel besleme hızı da penetrasyon ve kaynak şeklinin belirlenmesine katkıda bulunan bir parametredir. Tel besleme hızı, iyi bir birleşme ve penetrasyon için istenen gerilimi (voltajı) elde edecek şekilde ayarlanır [7]. Basınçlı kaplar; 0,5 atü ve daha yüksek basınçtaki endüstriyel gazların (hava, oksijen, azot, argon, hidrojen), yakıt gazlarının (doğal gaz, asetilen gazı, desülfürize kok gazı) ve su buharının üretiminde, taşınmasında ya da depolanmasında kullanılan küre, silindir ya da koni biçimli hacimlerin birleştirilmesinden oluşan atmosfere kapalı kaplar olarak tanımlanmıştır [8]. LPG tüpü, sıkıştırılmış gazları depolamak için yüksek çekme ve basınç dayanımı gerektiren bir tür basınçlı kaptır. LPG, propan, propilen, bütan veya butilen hidrokarbonlarından oluşur. LPG, normal sıcaklıkta orta derecede sıkıştırıldığında, sıvı hale gelir. Gaz tahliye olduğunda basınç düşer ve sıvı gaza geri döner. Bu, sıvı olarak taşınabilir, depolanabilir ve gaz olarak yakılabilir anlamına gelir. Çelik tüpler, iki parçalı veya üç parçalı olarak imal edilmektedir. İki parçalı yapıdaki tüpler, iki bombenin doğrudan birbirine kaynak edilmesiyle imal edilir. Üç parçalı bir tüp, iki bombenin silindirik bir gövdeye birleştirilmesiyle

imal edilir [9]. Basınçlı kabın çeliği, içerikten (LPG) etkilenmemeli veya ondan dolayı zayıflamamalı ve tehlikeye yol açmamalıdır. Kullanılan çelik türü, gevrek kırılmaya ve gerilim korozyonu çatlamasına karşı dayanıklı olmalıdır. Gövdeler ve preslenmiş bombeli başlar için kullanılan malzemeler EN 10120'ye veya bu standartta açıklanan deney sonuçlarına uygunluğu sağlanan diğer standartlara göre karbon çeliği veya EN 10028-7'ye uygun paslanmaz çelik olmalıdır. Kaynak sarf malzemeleri, sürekli kaynak özelliğini gösterebilecek özellikte olmalıdır. İmal edilmiş tüpteki kaynakların dayanım karakteristikleri, tüpün tasarım ve hesaplanması için gerekli bütün gereksinimleri sağlamalıdır. Kaynak işlemi onay deneyleri, imalâtteki deneyleri temsil edecek niteliğe sahip kaynaklar üzerinde yapılmalıdır [10].

1.2 Tezin Amacı

LPG tüpü, malzeme sarfiyatı, lojistik maliyeti ve taşıma ergonomisi bakımından kazanımlara ve iyileştirmelere açık bir üründür. Bu iyileştirmeleri sağlayacak olan birincil adım ise LPG tüplerinin ağırlığını azaltmaktır. Bu doğrultuda, hammadde olarak kullanılan çelik sac metallerin kalınlığını düşürmek nihai sonuca ulaşmayı sağlamaktadır. Cidar kalınlığındaki incelme sonrası gerekli mekanik dayanımı sağlayabilmek adına da EN 10120 kapsamındaki LPG tüp çeliklerinden daha yüksek mekanik dayanım değerlerine sahip malzemeler gerekmektedir. Mn oranı %0,70'lerde olan çelik yassı ürünler yerine %1,60'lara kadar yükselen çelik yassı ürünler tercih edilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada, LPG tüpünün imalatında kullanılan EN 10149'a göre S460MC kalitedeki çelik malzemeye uygun kaynak sarf malzemelerinin (tel, toz) ve tozaltı kaynak parametrelerinin seçimi ve eniyilemesi (optimizasyonu) yapılmıştır. Sarf malzeme ve parametre seçimlerinin mekanik özelliklere ve mikroyapıya olan etkileri incelenmiştir. Yapılan kaynaklardan sonra standartlara uygun olarak görsel ve radyografik (X-ışını) muayeneler yapılmıştır. Daha sonra ise standartlara uygun olarak deney numuneleri işlenmiş; çekme deneyi, eğme deneyi, makro inceleme, mikro sertlik ölçme deneyi ve optik mikroskop ile mikro görüntüleme (OM) deneyleri

uygulanmıştır. İmal edilmiş tüplere ise patlatma-hacimsel genleşme ve basınçla yorulma deneyleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonrası elde edilen tüm veriler maliyet analizi çalışmasıyla desteklenmiştir.

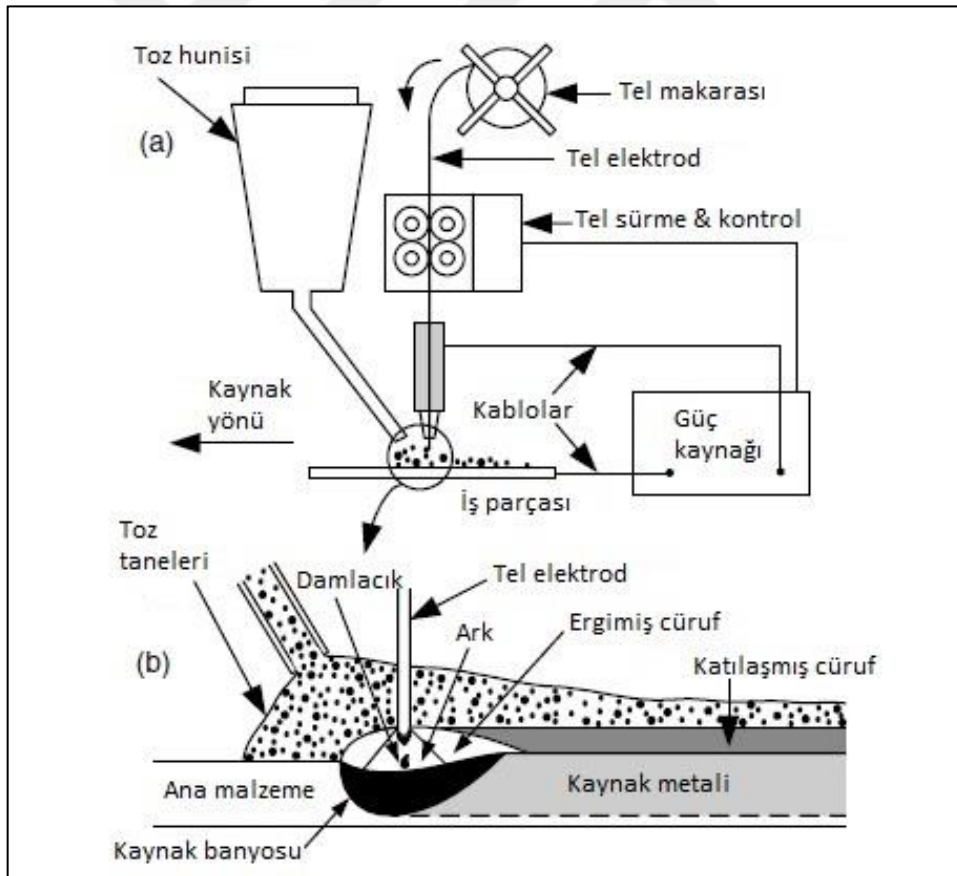
1.3 Hipotez

1,50 mm kalınlığındaki S460MC sac metal malzemesinden imal edilen LPG tüplerinin gövde kaynağında kullanılan kaynak parametrelerinin (akım, gerilim, ilerleme hızı) ve seçilen kaynak teli ile kaynak tozu sarf malzemelerinin kaynak dikiş kalitesine, mekanik değerlere ve mikroyapıya olan etkileri açıklanmaya çalışılmıştır. Numune kaynak dikişlerine uygulanan tahribatlı ve tahribatsız deneyler ve numune LPG tüplerine uygulanan patlatma-hacimsel genleşme ve basınçla yorulma deneyleri bu amaç doğrultusunda yöntem olarak kullanılmıştır.

2.1 Tozaltı Ark Kaynağı

2.1.1 Tanım

Tozaltı ark kaynağı, arkin ergimiş bir cüruf tarafından korunduğu ve ark atmosferinin belirli cüruf bileşenlerinin ayrışmasıyla oluşturulduğu, tüketilebilir bir elektrot ark kaynağı işlemidir. Dolgu malzemesi sürekli beslenen bir teldir ve nispeten küçük çaplı teller ile yüksek akımlar kullanılarak çok yüksek ergime ve yığılma miktarları elde edilir [11]. Arkin devamlı olarak toz yığını altında oluşması bu yönetime tozaltı ark kaynağı isminin verilmesine sebep olmuştur [12].



Şekil 2.1 Tozaltı ark kaynağı: a) Genel süreç b) Kaynak bölgesi [13].

Tozaltı ark kaynağını uygulayabilmek adına üç genel yöntem vardır:

- Yarı otomatik kaynak,
- Otomatik kaynak ve
- Makine ile kaynak.

Bu yöntemlerin her biri, kaynak tozu ve ergiyik kaynak banyosu katılaşana kadar iş parçasının sabit kalacak şekilde konumlandırılmasını gerektirir. İş parçalarının konumlandırılması için arabalar, döner merdaneler, pozisyoner tablalar ve manipülatörler gibi birçok farklı tipte fikstür kullanılmaktadır.

Yarı otomatik kaynak, hem kaynak tozunun hem de elektrodun nozuldan iletildiği elle tutulan bir kaynak torcu ile yapılır. Elektrot, bir tel besleyici tarafından tahrik edilir. Kaynak tozu, torç üzerine monte edilmiş küçük bir haznedeki yerçekimi kuvveti ile veya bir hortum vasıtasıyla aktarılabilir.

Otomatik kaynak, bir kaynak operatörünün sürekli olarak kaynağı izlemesine ve müdahale etmesine gerek kalmadan kaynak işlemini gerçekleştiren ekipmanlarla yapılır. Otomotiv endüstrisinde veya boru parçası gibi yarı mamul çelik ürünlerin imalatında uygulama örnekleri mevcuttur.

Makine kaynağı, tüm kaynak işlemini gerçekleştiren ancak bir kaynak operatörü tarafından kaynağın başlatılması ve durdurulması ve gerektiğinde kontrollerin ayarlanması için sürekli izleme gerektiren ekipmanları kullanır. Üç yöntemden en yaygın kullanılanı makine kaynağıdır.

Makine ile kaynak ve otomatik kaynağın ana ekipman parçaları aşağıdaki gibidir:

- Elektrodu kaynak torcunun kontak memesinden iş parçasına doğru sürmek için bir tel besleyici,
- Kontak memeden elektroda enerji vermek için bir güç kaynağı,
- Kaynak tozunu gerektiği gibi depolamak ve dağıtmak için gerekli ekipman,
- Kaynak tozunun tahliyesi ve yeniden kullanımı için gerekli teçhizat.

Tozaltı kaynak yöntemi, 1,5 mm ve daha fazla et kalınlıklarına sahip birçok farklı malzemenin kaynak edilmesi için kullanılabilir. Tozaltı ark kaynağı, tüm metaller ve alaşımlar için uygun değildir [14].

2.1.2 Tozaltı Ark Kaynağının Özellikleri

- a) **Kaynak hızı ve kaynak gücü:** Tozaltı kaynağında 200 - 5000 arası akım şiddeti (amper) ve 6 - 300 m/saat arası kaynak ilerleme hızları kullanılır.
- b) **Kaynak teli sarfiyatı:** Tozaltı kaynağında, yaklaşık olarak, ergiyen metalin 2/3'ünü ana metal ve 1/3'ünü ilave metal oluşturur. Bu sebepten ötürü ilave metal sarfiyatı oldukça azdır.
- c) **Nüfuziyet:** Kaynak ağzı açılmadan, iki paso ile 18 mm'ye kadar ve kaynak ağzı açarak iki paso ile 140 mm'ye kadar kalınlıktaki parçalar tozaltı kaynak yöntemi ile kaynak edilebilir.
- d) **Sürekli kaynak yapabilme imkanı:** Tozaltı ark kaynağında toz hunisi, tel ilerletme mekanizması, ayar ve kumanda tertibatı, hızı ayarlanabilen ve sabit tutulabilen bir arabaya monte edildiğinden, devamlı kaynak yapma imkanı vardır. Böylece, kalifiye kaynakçı kullanma gereksinimi ortadan kalkmaktadır.
- e) **Yüksek kaliteli kaynak dikişinin sağlanması:** Kaynak banyosunun iyi bir şekilde cürufle örtülmesi, yavaş soğumayı sağlar. Bu ise kaynak hatalarının meydana gelme olasılığını azaltır.
- f) **Elektrik enerjisi sarfiyatının minimum olması:** Kaynak banyosunun kaynak tozu tarafından gayet iyi bir şekilde örtülmesi, elektrik enerjisi kaybını azaltır.
- g) **Özel koruyucu emniyet tedbirlerine ihtiyaç olmaması:** Kaynak tozunun kaynak banyosunu gayet iyi bir şekilde koruması sebebiyle; ultraviyole ışınlar, gaz ve tozdan korunmak için özel tedbirlere ihtiyaç yoktur [15].

2.1.3 Tozaltı Ark Kaynağının Dezavantajları

Tozaltı ark kaynağı, yüksek yığılma miktarı nedeniyle, kaynak işlemi için diğer ark kaynak yöntemlerine göre daha kalın iş parçaları gerektirir. Hacimce büyük ergimiş cürufa ve kaynak banyosuna sahip bu yöntem, kaynak pozisyonunu düz ve çevresel kaynakla sınırlamaktadır. Yüksek ısı girdisine sahip olması nedeniyle de kaynak dikiş kalitesine olumsuz etki edebilir ve iş parçasının çarpılmasına sebep olabilir.

2.1.4 Tozaltı Ark Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri

Tozaltı ark kaynağında yüksek kaliteye sahip çelik teller kullanılır. Bu teller genellikle elektrik ark ocaklarında üretilir. Kaynak dikişinin emniyeti açısından, mangan miktarları yüksektir. Çapları 1,2 - 12 mm arasında değişir. Tozaltı kaynak tellerinin dış yüzeyleri tamamen düz ve pürüzsüz, yağ, pas ve pislikten arınmış olmalıdır. Tellerin paslanmasını önlemek ve kaynak esnasında kontak memeden tele akım geçişini kolaylaştırmak amacıyla, tozaltı kaynak tellerinin dış yüzeyleri bakır ile kaplanır [15].

2.1.5 Tozaltı Ark Kaynağında Kullanılan Kaynak Tozları

Toz, kaynak banyosunu havaya karşı korur, kaynak dikişine form verir ve hızlı soğumaya engel olur. Ana metal, kaynak teli ve tozun bileşimi, dikişin kimyasal bileşimine etki eden üç önemli faktördür.

Kaynak tozları imal usullerine;

- a) Ergimiş tozlar
- b) Sinterlenmiş tozlar
- c) Aglomere tozlar,

Kimyasal karakteristiklerine göre ise;

- a) Asit karakterli tozlar
- b) Nötr karakterli tozlar
- c) Bazik karakterli tozlar olmak üzere üçe ayrılır.

Kaynak tozu bileşeninin büyük kısmını SiO_2 , sonrasında da MnO oluşturur. Kaynak tozunun fiziksel tesirlerini etkileyen faktörlerin başlıcaları ise tozun tane büyüklüğü ve kaynak esnasındaki yığılma yüksekliğidir [12].

2.1.6 Uygulama Alanları

Tozaltı kaynak yöntemi birleştirme kaynaklarında olduğu kadar dolgu ve kaplama kaynak işlemlerinde de başarıyla kullanılan bir yöntemdir.

Birleştirme yöntemi olarak kullanıldığı alanlar:

- Basınçlı kap, kazan ve tank imalatında
- LPG tüpleri imalatında
- Spiral kaynaklı boru imalatında
- Çelik konstrüksiyon imalatında
- Profil (I, H, T) yapımında
- Otomotiv ve lokomotif sanayisinde
- Gemi inşa sanayisinde

Dolgu işlemlerine örnek olarak:

- Aşınan mil ve makine parçalarının dolgusunda
- Darbe ve aşınmaya dayanıklı sert dolgu işlemlerinde

Kaplama yöntemi olarak:

- Korozyona ve oksidasyona dayanıklı kaplama işlemlerinde kullanılır [16].

2.2 Çelik

Çelik, bir demir(Fe)-karbon(C) alaşımıdır. C haricinde, farklı oranlarda alaşım elementleri ve empürite (saf olmayan, kirlilik yaratan) elementler de içerir. Çeliğe farklı özellikler kazandıran içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi ve çeliğin iç yapısıdır [17]. Demir-karbon alaşımları, mühendislikte yaygın olarak kullanılan çelikler ve dökme demir malzemelerin temelini oluşturur. %2'nin altında karbon içeren alaşımlar çelik, %2'nin üstünde karbon içeren malzemeler ise dökme demir olarak adlandırılır [18]. Çeliklerde karbon dışında Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, W, Al gibi değişik elementlerle alaşımlama yapılır. Alaşımlama ile çeliklerin dayanım, süneklik, tokluk, aşınma dayanımı, sertleşebilme kabiliyeti, tane küçültme etkisi, korozyon dayanımı, yüksek sıcaklık dayanımı, elektriksel ve manyetik özellikleri gibi kullanım özellikleri ve soğuk şekillendirilebilirlik, sıcak şekillendirilebilirlik, talaşlı imalata elverişlilik, dökülebilirlik, kaynak kabiliyeti, nitrürlenebilirlik gibi imalat özelliklerinin geliştirilmesi mümkündür.

Çelikler genel olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır:

- Karbon ve alaşımlı çelik olarak bileşimlerine göre,
- Üretim yöntemlerine göre,
- Son üretim yöntemine göre,
- Ürün şekline göre,
- Kullanım yeri, üretim programları ve deoksidasyon durumlarına göre [18].

2.2.1 Çeliklerin Sınıflandırılması

Her bir çelik için, tek bir adlandırma olmaktadır [19]. Her çelik tipi bir çelik numarasına karşılık gelmelidir. Bir çeliğe tahsis edilmiş numara, prensipte bir başka çelik tipi için kullanılmamalıdır [20]. Kısa gösteriliş amaçları için, çelik adları iki ana (esas) grupta sınıflandırılır:

- Grup 1: Uygulama yerlerine, mekanik veya fiziksel özelliklerine göre kısa gösterilen çelikler,
- Grup 2: Kimyasal bileşimlerine göre kısa gösterilen çelikler.

S460MC çeliği için, başlıca sembollerden “S”, “yapı çeliği”ni temsil etmektedir. İlave sembollerden “M”, “termomekanik haddelenmiş” ve “C” ise “özel soğuk şekillendirme” anlamına gelmektedir [19]. Bu doğrultuda “S460MC” çeliği, termomekanik haddelenmiş ve özel soğuk şekillendirilebilir bir yapı çeliğidir. 460 değeri ise min. akma dayanımı değerini N/mm^2 (MPa) cinsinden temsil etmektedir.

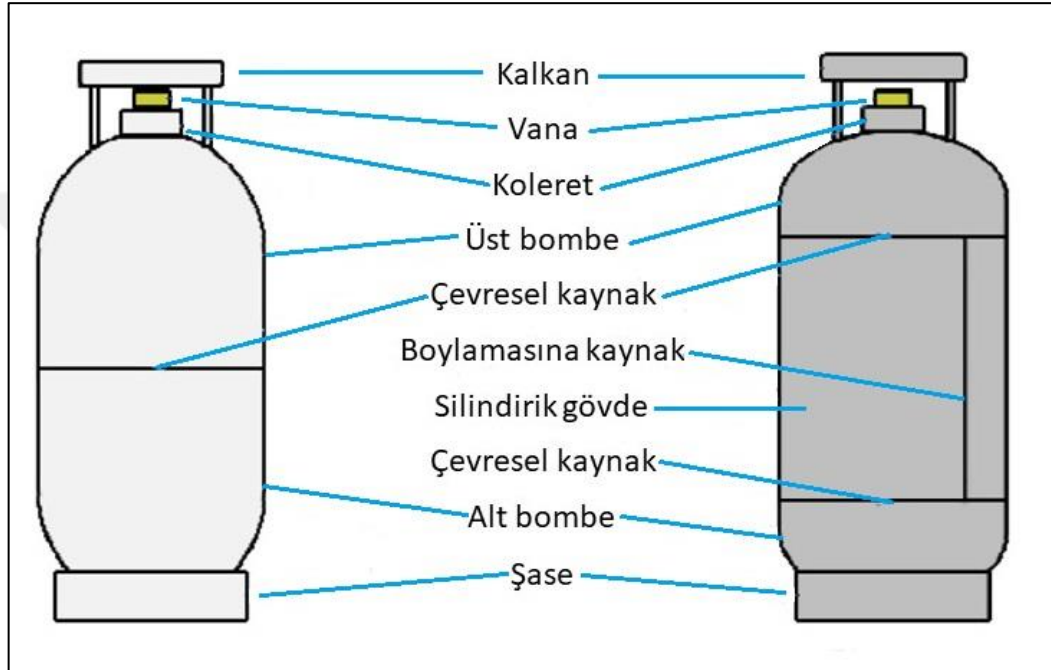
2.2.2 Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı (HSLA) Çelikler

HSLA çeliklerinde, yüksek dayanım ve şekillendirilebilme kabiliyeti mikro alaşımlama ile sağlanır (Ti, Nb, V gibi). Malzemeye ait özellikler, etkili bir alaşımlama ve kontrollü ısıl/mechanik işlemlerle geliştirilir.

Yüksek dayanımlar hafif tasarımlara imkan sağlar, ayrıca imalat kolaylığından dolayı da tercih edilirler [18]. Düşük karbon içeriği sayesinde, bu çeliklerin soğuk çatlak eğilimi düşüktür ancak mikro yapıları ve dolayısıyla mekanik özellikleri kaynak işleminden oldukça etkilenir. Yüksek mukavemet özelliği sağlayan ince mikroyapıyı korumak ve ısı kaynaklı mikro yapı bozulmalarını azaltmak için minimum ısı girdisi ile kaynak teknikleri önerilir.

2.3 LPG Tüpü

LPG, Sadece UN 1011, UN 1075, UN 1965, UN 1969 veya UN 1978 sınıfına atanmış bir veya daha fazla hafif hidrokarbonun oluşturduğu ve ağırlıklı olarak propan, propen, bütan, bütan izomerleri ve eser halde diğer hidrokarbon gazları içeren bütenden oluşan düşük basınçlı sıvılaştırılmış gazdır. Tüp ise 150 L'yi geçmeyen su kapasitesine sahip taşınabilir basınçlı kaptır [10]. LPG tüpünün şematize edilmiş hali Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 LPG tüpü [9].

LPG;

- Kolayca buharlaşarak gaza dönüşebilen renksiz bir sıvıdır. Isıtma uygulamalarında ve taşıtlarda yakıt olarak kullanılır,
- Basınçlı bir kap içerisinde basınç altında sıvı halde saklanır ve taşınır, Normal sıcaklıkta orta derecede sıkıştırıldığında, sıvı hale gelir. Gaz tahliye olduğunda basınç düşer ve mevcut sıvı tekrar gaza döner. Bu, sıvı olarak taşınabilir ve depolanabilir ve gaz olarak yakılabilir anlamına gelir,
- Kokusuzdur, ancak sızıntı durumunda tespit amaçlı bir koku maddesi içerir. Kullanılan koku maddesi, belirgin ve hoş olmayan bir kokuya sahip olan etil merkaptandır. Etil merkaptan, korozif olmadığı ve LPG'ye çok yakın kaynama noktasına sahip olduğu için tercih edilir [9].

2.3.1 LPG Tüpü Tasarımı

Basınca maruz kalan parçaların cidar kalınlığı, malzemenin akma dayanımı dikkate alınarak hesaplanmalıdır.

Hesaplama amaçları bakımından, akma dayanımı değeri (Re), azami çekme dayanımı 0,85 Rm değeri ile sınırlandırılmıştır.

Basınç hesaplaması (Pc), aşağıda belirtildiği gibi yapılmalıdır;

- Deney basıncı 16 bar'ı aşmayan mutlak basınçtaki (UN1011, UN 1965 A, A01, A02 ve A0 karışımları ve UN1969) LPG ile sınırlandırılan tüplerde;
Pc = Phmin = 15 bar,
- Diğer bütün LPG tüpleri için;
Pc = Phmin = 30 bar.

Deney basınçları için ADR [21]/RID [22] Madde 4.1.4.1 P200 Çizelge 2'ye bakılır.

LPG tüpünün tasarımında aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır:

- El ile taşıma kolaylığı,
- Kullanım ve dolum için bağlantı kolaylığı,
- Güvenli istifleme,
- Malzeme kullanımını en aza indirme,
- Servisteyken, bakımda ve ömür sonu imhasındaki çevresel etkilerini en aza indirme [10].

Silindirik gövdenin cidar kalınlığı (a), aşağıdaki denklemlerle hesaplanan değerden az olmamalıdır [10]:

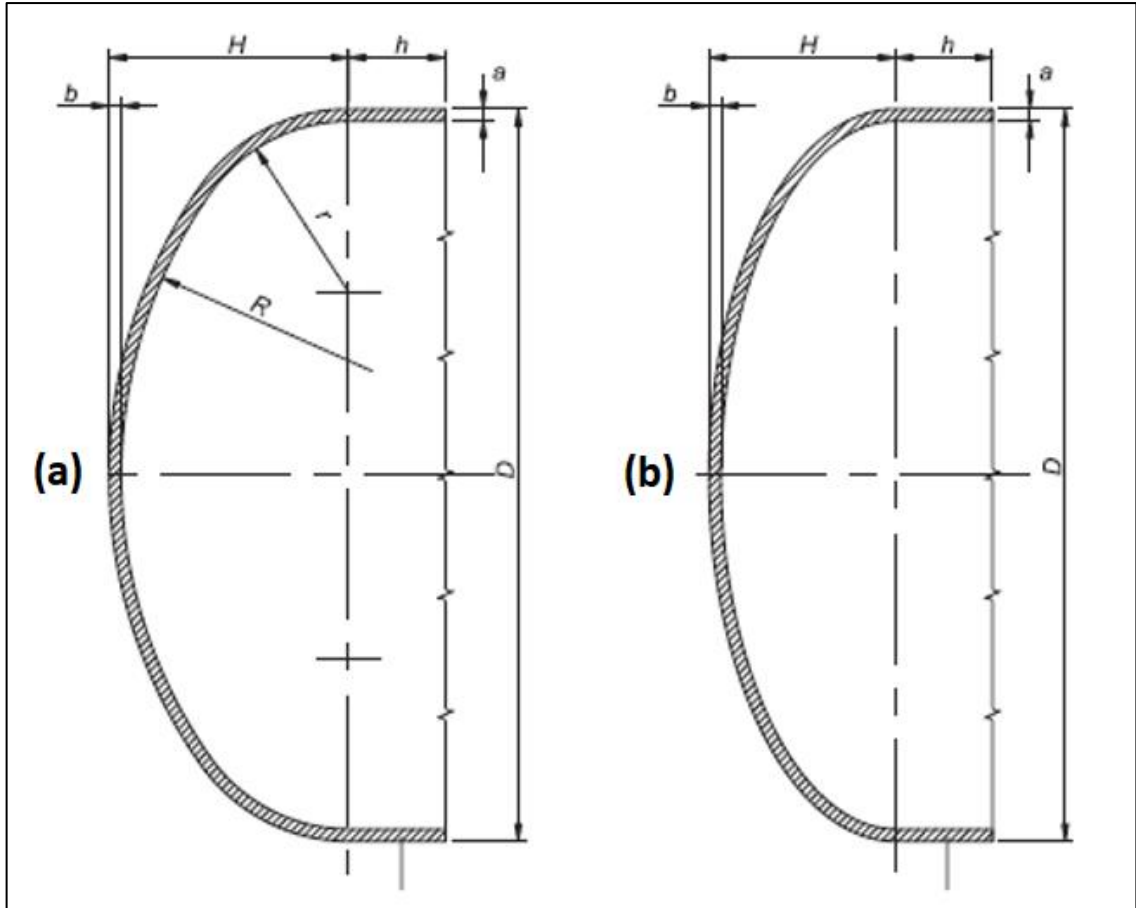
$$a = \frac{Pc \times D}{(15 \times Re \times G) + Pc} \quad (2.1)$$

Boylamasına kaynaklı tüpler için: G = 0,9

Boylamasına kaynaklı olmayan tüpler için: G = 1,0

Bombe başların biçimi, aşağıda belirtilen şartlar karşılanacak şekilde olmalıdır [10]:

- Torisferik bombe başlarda; $R < D$; $r > 0,1 \times D$; $h > 4b$ (bk. Şekil 2.3),
- Yarı elipsoidal bombe başlarda; $H > 0,192 \times D$; $h > 4b$ (bk. Şekil 2.3).



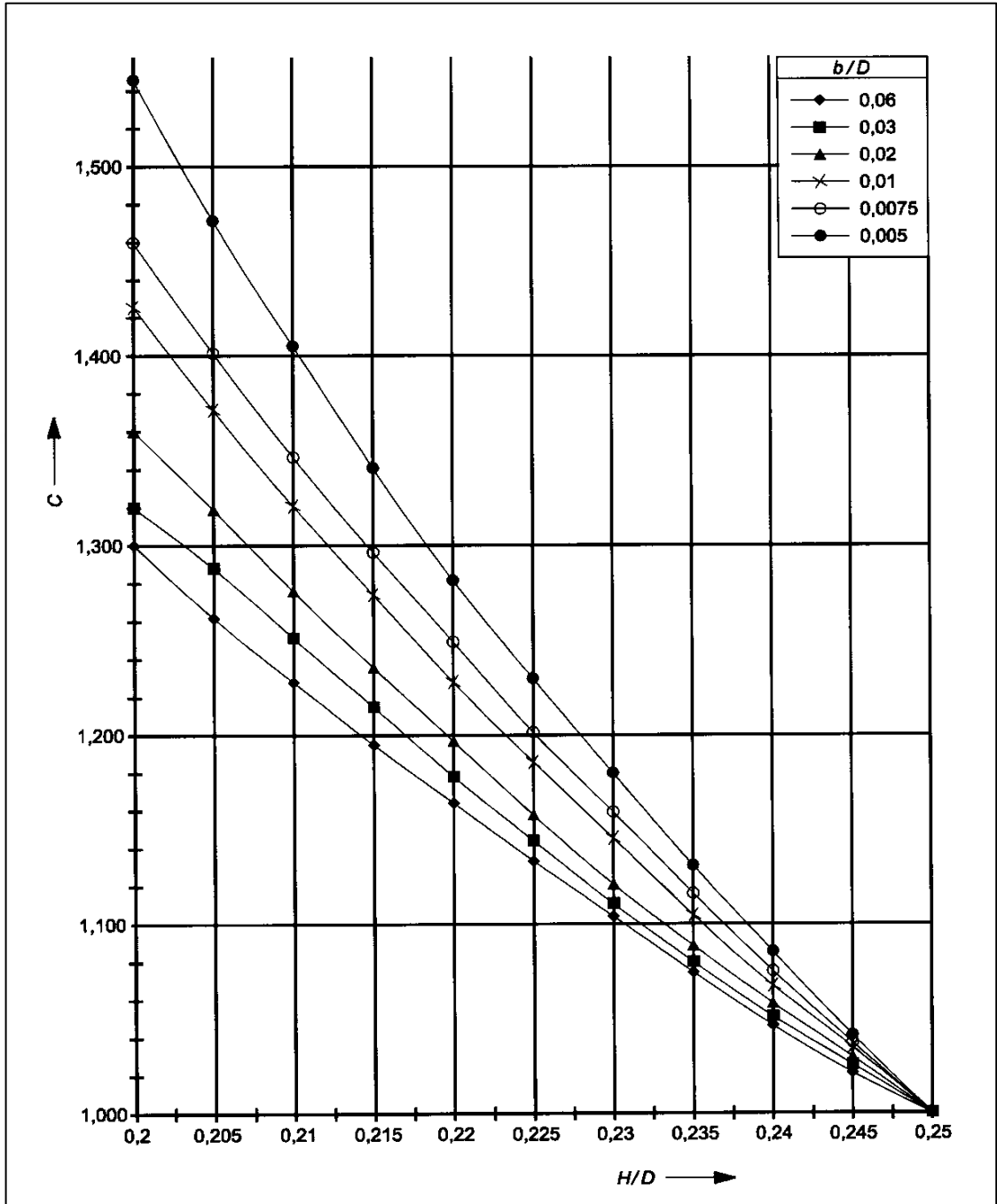
Şekil 2.3 (a)-Torisferik bombe baş, (b)-Yarı elipsoidal bombe baş [10].

Cidar kalınlığı (b), aşağıdaki denklemle hesaplanan değerden az olmamalıdır:

$$b = \frac{Pc \times D \times c}{(15 \times Re) + Pc} \quad (2.2)$$

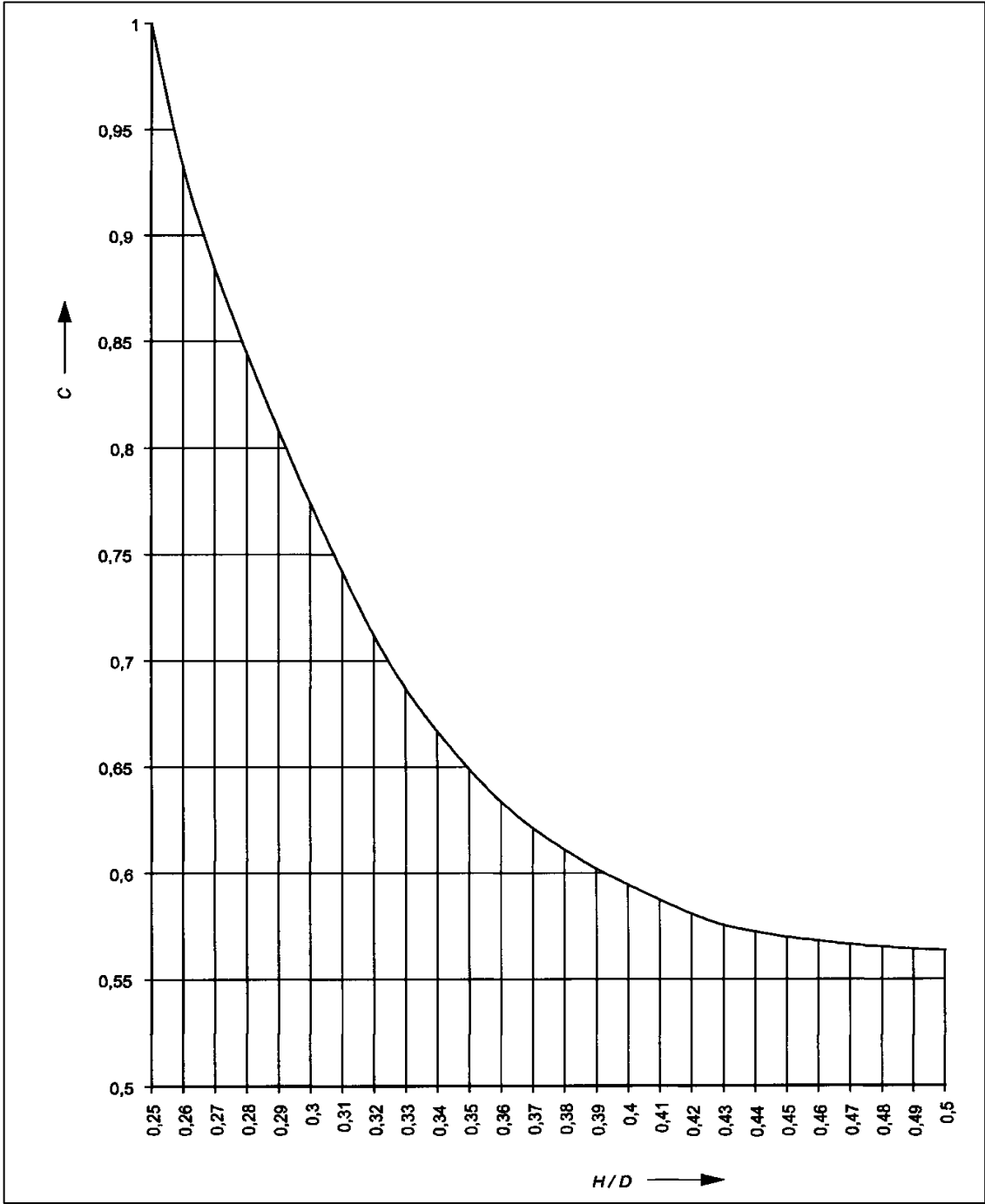
Bu eşitlikte "c", H/D oranına bağlı biçim faktörü değeridir.

H/D oranı 0,2 ve 0,25 arasında iken "c" değeri; Şekil 2.4'teki grafikten elde edilmelidir.



Şekil 2.4 H/D oranı 0,2 ile 0,25 arasında iken "c" biçim faktörü [10].

H/D oranı 0,25 ve 0,5 arasında iken "c" değeri; Şekil 2.5'teki grafikten elde edilmelidir.



Şekil 2.5 H/D oranı 0,25 ile 0,5 arasında iken "c" biçim faktörü [10].

Her bir basınca maruz kalan parçanın asgari cidar kalınlığı ise, aşağıda gerekli görünen değerlerden en büyüğü olmalıdır [10]:

- Silindirik gövdelerde, 2.3.1.1' için gerekli olan cidar kalınlığı,
- Bombe başlarda, 2.3.1.2 için gerekli olan cidar kalınlığı.

3.1 Tasarım ve Malzeme Seçimi

LPG tüpü tasarımı TS EN 14140'a göre yapılmıştır. Tasarımın ilk aşamasında LPG tüpünün dış çapı (D) 300 mm olarak belirlenmiştir. Ø300 mm dış çapa sahip LPG tüplerinin dünya üzerinde yaygın şekilde kullanılıyor olması, bu seçimde belirleyici faktör olmuştur.

LPG tüpünün tipi ev tipi olarak belirlenmiştir. Bu tipteki LPG tüplerinden en yaygın kullanılanları min. 26 L su hacmine sahiptir ve kaynak öncesi iki parçalı yapıdadır. İki parçalı yapıdaki tüpler, iki bombenin doğrudan birbirine kaynak edilmesiyle imal edilir. Dolayısıyla boylamasına kaynakları yoktur. Boylamasına kaynak edilmeyen tüpler için, $G = 1,0$ 'dır.

LPG, propan, propilen, bütan veya butilen hidrokarbonlarından oluşur. Tasarım ise bu gazlardan en çok kullanılan propan gazına göre yapılmıştır. ADR/RID'ye göre sınıflandırılmış gaz karışımlarının sınıflandırılması Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1 LPG tüp gazlarının sınıflandırılması [21].

Karışım	70°C'de azami buhar basıncı (MPa)	50°C'de asgari yoğunluk (kg/l)	Teknik ad
A	1,1	0,525	"Karışım A" ya da "Bütan"
A01	1,6	0,516	"Karışım A01" ya da "Bütan"
A02	1,6	0,505	"Karışım A" ya da "Bütan"
A0	1,6	0,495	"Karışım A02" ya da "Bütan"
A1	2,1	0,485	"Karışım A0" ya da "Bütan"
B1	2,6	0,474	"Karışım A1"
B2	2,6	0,463	"Karışım B1"
B	2,6	0,450	"Karışım B2"
C	3,1	0,440	"Karışım C" ya da "Propan"

ADR/RID'ye göre gaz karışımlarının adlandırılması Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2 LPG tüp gazlarının adlandırılması [21].

Maddenin veya nesnenin adı: HİDROKARBON GAZ KARIŞIMI, SIVILAŞTIRILMIŞ	Karışım A, 70°C'de buhar basıncı 1,1 Mpa'ı (11 bar) geçmeyen ve 50°C'deki yoğunluğu 0,525 kg/l'den düşük olmayan
	Karışım A01, 70°C'de buhar basıncı 1,6 Mpa'ı (16 bar) geçmeyen ve 50°C'deki bağıl yoğunluğu 0,516 kg/l'den düşük olmayan
	Karışım A02, 70°C'de buhar basıncı 1,6 Mpa'ı (16 bar) geçmeyen ve 50°C'deki bağıl yoğunluğu 0,505 kg/l'den düşük olmayan
	Karışım A0, 70°C'de buhar basıncı 1,6 Mpa'ı (16 bar) geçmeyen ve 50°C'deki yoğunluğu 0,495 kg/l'den düşük olmayan
	Karışım A1, 70°C'de buhar basıncı 2,1 Mpa'ı (21 bar) geçmeyen ve 50°C'deki yoğunluğu 0,485 kg/l'den düşük olmayan
	Karışım B1, 70°C'de buhar basıncı 2,6 Mpa'ı (26 bar) geçmeyen ve 50°C'deki bağıl yoğunluğu 0,474 kg/l'den düşük olmayan
	Karışım B2, 70°C'de buhar basıncı 2,6 Mpa'ı (26 bar) geçmeyen ve 50°C'deki bağıl yoğunluğu 0,463 kg/l'den düşük olmayan
	Karışım B, 70°C'de buhar basıncı 2,6 Mpa'ı (26 bar) geçmeyen ve 50°C'deki yoğunluğu 0,450 kg/l'den düşük olmayan
	Karışım C, 70°C'de buhar basıncı 3,1 Mpa'ı (31 bar) geçmeyen ve 50°C'deki bağıl yoğunluğu 0,440 kg/l'den düşük olmayan
	Not: Yukarıdaki bahsedilen karışımlar için, maddeleri tanımlamada piyasada alışılmış olan aşağıda belirtilen isimlerin kullanılmasına izin verilmiştir. A, A01, A02 ve A0 karışımları için: BÜTAN; C karışımları için: PROPAN

Propan gazı "C" sınıfı karışım olarak adlandırılmaktadır. ADR/RID'ye göre propan gazının Pc (Phmin, test basıncı) değeri Tablo 3.3'te görüldüğü üzere 30 bar'dır.

Tablo 3.3 Sıvılaştırılmış gazlar için test basıncı değeri [21].

HİDROKARBON GAZ KARIŞIMI, SIVILAŞTIRILMIŞ	İsim ve açıklama	Test basıncı (bar)
	Karışım A	10
	Karışım A01	15
	Karışım A02	15
	Karışım A0	15
	Karışım A1	20
	Karışım B1	25
	Karışım B2	25
	Karışım B	25
	Karışım C	30

LPG tüpünü hafifletme ve ısı girdisi yüksek bir kaynak yöntemi olan tozaltı kaynağını ince cidar kalınlığına sahip LPG tüpüne uygulayabilme hedeflerinden dolayı, LPG tüpünün cidar kalınlığı çalışmanın başında 1,5 mm olarak belirlenmiştir. Denklem (2.1)'e göre silindirik gövdenin min. cidar kalınlığı (a) ve denklem (2.2)'ye göre de bombe başın min. cidar kalınlığı (b) hesaplanmaktadır. S460MC, min. akma dayanımı 460 N/mm² olan yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) ferritik-perlitik bir yapı çeliğidir. Yüksek mekanik dayanıma ve kaynağa elverişli bir kimyasal bileşime sahip olması sayesinde, hedeflenen cidar kalınlığındaki LPG tüpünün tozaltı kaynak yöntemiyle kaynak edilmesine imkan vermektedir. S460MC çeliğinin mekanik özellikleri Tablo 3.4'te ve kimyasal bileşimi de Tablo 3.5'te gösterilmektedir.

Tablo 3.4 S460MC çeliğinin mekanik özellikleri [23].

Standart karşılığı		Re, (N/mm ²) min.	Rm, (N/mm ²)
Standart	Kalite		
EN 10149-2	S460MC	460	520-720

Tablo 3.5 S460MC çeliğinin kimyasal bileşimi [23].

Standart	Kalite	% C max	% Mn	% P max	% S max	% Si max	% Al	% Nb max	% Ti max	% V max
EN 10149-2	S460MC	0,12	1,00 – 1,60	0,025	0,015	0,30	0,015 – 0,060	0,09	0,03	0,03

LPG tüpünün bombe baş geometrisi yarı ellipsoidal olarak belirlenmiştir. D= 300 mm çap değeri için H= 75mm'dir. Böylece H/D oranı 0,25'tir. H/D= 0,25 için Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'e bakıldığında H/D oranına bağlı "C" biçim faktörü 1,0 olarak bulunmaktadır. Silindirik gövdenin min. olması gereken cidar kalınlığını veren Denklem (2.1) ve bombe başın min. olması gereken cidar kalınlığını veren Denklem (2.2)'ye elde edilen değerler yerleştirildiğinde; Pc= 30 bar, D= 300 mm,

$c= 1,0$ (sbt), $G= 1,0$ (sbt), $Re = 460 \text{ N/mm}^2$, $a= 1,50 \text{ mm}$ değerinin silindirik gövde cidar kalınlığı için ve $b=1,50 \text{ mm}$ değerinin bombe baş cidar kalınlığı için yeterli olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, $\text{Ø}300 \text{ mm}$ dış çapında, min. 26L su hacmine sahip, iki parçalı yapıda ve yarı elipsoidal bombe baş geometrisinde bir LPG tüpü tasarımı ortaya çıkmıştır.

TS EN 14140'a ve tasarlanan geometriye göre de 1,50 mm S460MC eliği, LPG tüpünün imalatında kullanılacak sac metal malzeme olarak belirlenmiştir.

3.2 Kaynak Uygulaması

3.2.1 Donanım

LPG tüpü gövdesinin çevresel kaynağında Lincoln Electric marka AC/DC 1000® SD kaynak makinesi kullanılmıştır. Kaynak makinesi şekil 3.1'de, makineye ait teknik özellikler ise Tablo 3.6'da gösterilmektedir.



şekil 3.1 Lincoln Electric marka AC/DC 1000® SD kaynak makinesi [24].

Tablo 3.6 Lincoln Electric AC/DC 1000® SD kaynak makinesi [25].

Ürün Adı	Powerwave AD/DC 1000® SD
Besleme Gerilimi	400 V 3 Faz 50/60 Hz
Kaynak Akımı Kaynak Gerilimi	1000 A / 44 V / %100
Sigorta Değeri	80 A
Akım Aralığı	100-1000 A
Boyutlar (Yükseklik x Genişlik x Derinlik) [mm]	1250 x 448 x 1174 [mm]
Ağırlık (kg)	363

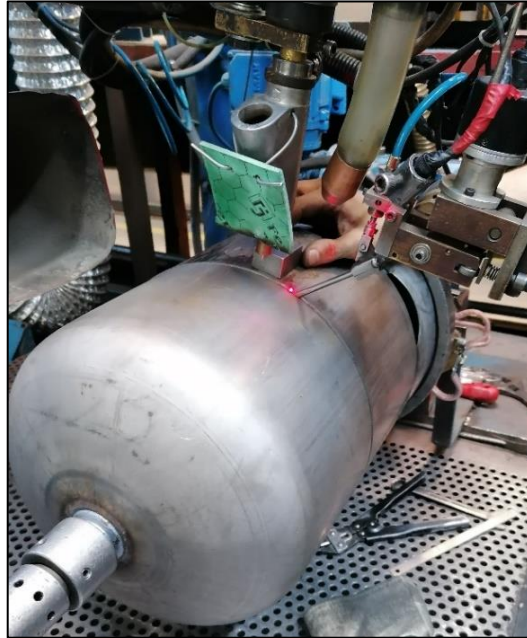
Power Wave AC/DC 1000® SD ile hem DC tozaltı kaynağının sağladığı yüksek penetrasyon, kaynak hızı ve metal yığıma hızından; hem de AC tozaltı kaynağında ark üflemesine karşı oluşan dirençten faydalanmak mümkündür. Tek arklı proseslerde dalga formu kontrol teknolojisi sayesinde oldukça esnek bir kullanım olanağı elde edilebilmektedir. Çok arklı proseslerde ise arklar arasındaki fazların kontrol edilmesiyle aynı esnekliği sağlamak mümkündür.

LPG tüpü gövdesinin çevresel kaynağında Lincoln Electric marka AC/DC 1000® SD kaynak makinesinin yanında, MAXsa 10 kontrol ünitesi de kullanılmıştır. Kontrol ünitesinin görseli Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Lincoln Electric marka MAXsa 10 kontrol ünitesi [26].

Kaynak makinesi ve kontrol ünitesinin yanısıra, LPG tüpü gövdesinin çevresel tozaltı kaynağına özel tasarlanıp imal edilmiş kaynak tezgahı da donanımın bir diğer parçasıdır. Tezgah, kaynak torcunun istenen pozisyona ayarlanması sonrası LPG tüpünün yatay pozisyonda döndürülerek kaynak edilmesi prensibiyle çalışmaktadır. Servo motorlar sayesinde kaynak torcu kartezyen eksenlerde pozisyonlandırılmaktadır. Torcun kaynak ağzına göre açısal pozisyonu ve serbest tel mesafesinin mastar ile ayarlanması ise manuel olarak yapılmaktadır. Tezgah, sahip olduğu PLC donanımı sayesinde, kaynak kontrol ünitesi ve kaynak makinesiyle haberleşmektedir. Kaynağın ilerleme hızı, inverter motor sayesinde istenen hıza ayarlanmakta ve PLC ile kontrol edilmektedir. Ayrıca PLC sayesinde kaynağın süresi ve uzunluğu da ayarlanabilmektedir. Kaynak takip sistemine sahip olan tezgah, bu sayede odaklanılan kaynak ağzından sapmadan kaynak süresince istenen formda kaynak yapabilmektedir. Tezgaha entegre edilmiş olan kaynak tozu emiş sistemi sayesinde, hem kaynak tozu tüketiminden tasarruf edilmekte hem de emiş sonrası uygulanan mekanik filtrasyon sayesinde devir daim olan kaynak tozunun istenen temizlikte ve tane boyutunda olması sağlanmaktadır. Kaynak öncesi torç pozisyon ayarı yapılan tezgah ve LPG tüpü Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Otomatik tozaltı kaynak tezgahı ve LPG tüpü

3.2.2 Kaynak Sarf Malzemeleri

S460MC çeliğinden imal edilmiş LPG tüplerinin tozaltı kaynağı uygulaması sonrası tüplerin kaynak dikiş kalitelerini gözlemleyebilmek ve sonrasında tahribatlı-tahribatsız deneylerle mekanik ve kimyasal sonuçları değerlendirebilmek adına iki farklı tel-toz kombinasyonu kullanılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerde iyi sonuçlar elde etmek için, kaynak metalinin kimyasal bileşimi ana metale genellikle benzerlik göstermektedir. Temel yaklaşım, ilave metalle ana metalin aynı bileşimde olmasından ziyade, kimyasal açıdan uyumlu olmalarıdır [27]. Kaynak sarf malzemesi kombinasyonlarından ilki SW 701 - SF 212 kombinasyonudur. SW 701, EN ISO 14171-A'a göre S 42 A AR S1, basınçlı kap, boru, gemi, çelik konstrüksiyon imalatında 510 N/mm² çekme dayanımına sahip genel yapı çeliklerinin kaynağında kullanılan masif tozaltı kaynak telidir. Bakır kaplı olması, elektrik iletkenliğini ve paslanmaya karşı direncini arttırmaktadır [28]. İlgili üretici kataloğunda SW 701 olarak adlandırılan kaynak teli, TS EN ISO 14171-A'ya göre S1 kalite tozaltı kaynak teline tekabül etmektedir. Kaynak edilecek ana malzemenin kalınlığı (1,50 mm) göz önünde bulundurularak, uygulamalar için 1,60 mm çaplı SW 701 kaynak teli seçilmiştir. SW 701 için sarf malzeme üreticisi tarafından verilen kimyasal bileşim Tablo 3.7'de gösterilmektedir.

Tablo 3.7 SW 701 kaynak telinin kimyasal bileşimi [28].

Analiz Tipi	%C	%Si	%Mn
Kaynak Teli	0,07	0,03	0,55

SF 212, EN ISO 14171-A'a göre S A AR 1, çok düzgün ve parlak kaynak dikişlerinin yüksek kaynak hızlarında yapılabilmesi için geliştirilmiş rutil tip, aglomere kaynak tozudur. Genellikle gemi inşa, basınçlı kap, LPG tüpleri, küçük tank, kazan, kolon, ince et kalınlıklı boru, tüp ve lamba direklerinde kullanılan ince malzemelerin kaynağında kullanılır. Mn ve Si alaşımı sayesinde karbonlu çeliklerde tek ve çok tel ile tek ve çok pasolu kaynaklarda kullanıma uygundur. Alternatif ve doğru akımda kullanılabilir. Cürufu genellikle kendiliğinden kalkar, köşe, aln ve kök paso kaynaklarında cüruf kalkışı çok kolaydır [29].

SF 212 - SW 701 kombinasyonu için sarf malzeme üreticisi tarafından verilen kaynak metaline ait kimyasal değerler Tablo 3.8’de gösterilmektedir.

Tablo 3.8 SF 212 - SW 701 kaynak metal kimyasal bileşimi [29].

Analiz Tipi	%C	%Si	%Mn
Kaynak Metal	0,07	0,03	0,55

SW 701 ve SF 212’nin kombinasyonuna ait sarf malzeme üreticisi tarafından verilen mekanik özellikler de Tablo 3.9’da gösterilmektedir.

Tablo 3.9 SF 212 - SW 701 kaynak sonrası mekanik değerler [29].

Test Şekli	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)	Çentik Darbe Dayanımı (J)	
Kaynak Sonrası	460	530	28	20°C → 60	0°C → 30

Kaynak sarf malzemesi kombinasyonlarından ikincisi SW 702Mo - SF 304 kombinasyonudur. SW 702Mo, EN ISO 14171-A’ya göre S 46 3 AB S2Mo, orta ve yüksek mukavemete sahip alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerin kaynağında kullanılan Mo alaşımlı masif tozaltı kaynak telidir. Basınçlı kap, kazan, tank, boru, gemi ve ağır çelik konstrüksiyon imalatında kullanılır. Bakır kaplı olması elektrik iletkenliğini ve paslanmaya karşı direncini artırır [30]. İlgili üretici kataloğunda SW 702Mo olarak geçen kaynak teli, TS EN ISO 14171-A’ya göre S2Mo kalite tozaltı kaynak teline tekabül etmektedir. Kaynak edilecek ana malzemenin kalınlığı (1,50 mm) göz önünde bulundurularak, uygulamalar için 1,60 mm çaplı SW 702Mo kaynak teli seçilmiştir. SW 702Mo için sarf malzeme üreticisi tarafından verilen kimyasal bileşim Tablo 3.10’da gösterilmektedir.

Tablo 3.10 SW 702Mo kaynak telinin kimyasal bileşimi [30].

Analiz Tipi	%C	%Si	%Mn	%Mo
Kaynak Teli	0,10	0,15	1,10	0,50

SF 304, EN ISO 14171-A'a göre S A AB 1, özellikle spiral ve boyuna kaynaklı boru imalatı için geliştirilen alüminabazik tip aglomere kaynak tozudur. İnce ve orta kalınlıktaki boruların tek veya çok telle (tandem / twin) kaynağında yüksek kaynak hızlarıyla kaynak yapma imkanı verir. Yüksek akım taşıma kabiliyeti vardır, alternatif ve doğru akımda kullanılabilir. Kaynak dikiş görüntüsü güzeldir ve özellikle boru kaynaklarından beklenen düzgün ve yüksek nüfuziyetli kaynak dikişlerini verir. Cüruf kalkışı çok kolaydır [31].

SF 304 - SW 702Mo kombinasyonu için sarf malzeme üreticisi tarafından verilen kaynak metaline ait kimyasal değerler Tablo 3.11'de gösterilmektedir.

Tablo 3.11 SF 304 - SW 702Mo kaynak metal kimyasal bileşimi [31].

Analiz Tipi	%C	%Si	%Mn	%Mo
Kaynak Metali	0,05	0,30	1,35	0,35

SW 702Mo ve SF 304'ün kombinasyonuna ait sarf malzeme üreticisi tarafından verilen mekanik özellikler de Tablo 3.12'de gösterilmektedir.

Tablo 3.12 SF 304 - SW 702Mo kaynak sonrası mekanik değerler [31].

Test Şekli	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)	Çentik Darbe Dayanımı (J)	
Kaynak Sonrası	510	570	26	-20°C → 100	-40°C → 50

Çevresel kaynak metalini üzerinden alınan numuneye uygulanan çekme deneyi sırasında elde edilen çekme dayanımı değeri (Rm), imal edilmiş tüplerde tüp imalatçısı tarafından garanti edilenden az olmamalıdır [10].

Tablo 3.4'te görüldüğü üzere, S460MC çeliği için Rm değeri, 520-670 N/mm² aralığındadır. Tablo 3.9'da SF 212 - SW 701 kombinasyonu için Rm değeri 530 N/mm² ve Tablo 3.12'de ise SF 304 - SW 702Mo kombinasyonu için Rm değeri 570 N/mm² olarak verilmiştir.

Bu doğrultuda, sarf malzeme üreticisi tarafından her iki tel – toz kombinasyonu için verilen Rm değerlerine göre, SF 304 - SW 702Mo kombinasyonu, SF 212 - SW 701 kombinasyonuna göre kaynak sonrası için daha iyi mekanik değerler vadetmektedir ve S460MC çeliğinin tozaltı kaynağı için daha uygun bir kombinasyon olduğu öngörülmektedir.

3.2.3 Parametre Optimizasyonu

LPG tüplerinin çevresel tozaltı kaynağında kullanılacak SF 212 - SW 701 ve SF 304 - SW 702Mo sarf malzeme kombinasyonlarının, hangi kaynak parametrelerinde kaynak edileceğinin belirlenmesi adına parametre optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın başlangıcında dokuz farklı akım şiddeti, gerilim ve ilerleme hızı kombinasyonu denenmiştir ve numunelerin her biri P.O.N (parametre optimizasyonu numunesi) olarak adlandırılmıştır.

Tablo 3.13 Parametre optimizasyonu

Numune No	Amper (A)	Voltaj (V)	İlerleme Hızı (cm/dk)	Kaynak Boyu (mm)
P.O.N-1	240	26	90	200
P.O.N-2	245	26,5	100	200
P.O.N-3	250	27	110	200
P.O.N-4	255	27,5	90	200
P.O.N-5	260	28	100	200
P.O.N-6	265	28,5	110	200
P.O.N-7	270	29	90	200
P.O.N-8	275	29,5	100	200
P.O.N-9	280	30	110	200

Her bir parametre kombinasyonu için 200 mm boyunda kaynak dikişleri hazırlanmıştır. Her LPG tüpüne üç farklı kombinasyonda kaynak edilecek şekilde, üç tüpten toplamda dokuz kaynak numunesi elde edilmiştir. Kaynak dikişlerinin birbirlerine binmemesi adına aralarına 50 mm'lik boşluklar bırakılmıştır. Bu aşamada sarf malzeme olarak SF 212 ve SW 701 kombinasyonu kullanılmıştır. Numunelerin görseli Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Örnek bir numuneye ait kaynak dikişi ise Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Parametre optimizasyonu için hazırlanan kaynak numuneleri



Şekil 3.5 P.O.N'ye ait kaynak görüntüsü

90, 100 ve 110 cm/dk olmak üzere, farklı ilerleme hızlarında kaynak edilen numune tüpler Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Farklı ilerleme hızlarında hazırlanan numuneler

İlk olarak doğru kaynak parametresi kombinasyonlarının belirlenebilmesi adına her kaynak numunesine TS EN ISO 17637'ye [32] göre görsel muayene ve TS EN ISO 17636-1 [33] sınıf-B'ye göre radyografik muayene (X-ışını) uygulanmıştır. Sonrasında ise TS EN ISO 17639 [34]'a göre hazırlanmış her bir kaynak makrosu TS EN ISO 5817 [35]'ye göre değerlendirilmiştir. Tüm kaynak muayene standartlarının yanısıra, TS EN 14140 standardının ek isterlerinin de sağlanması amaçlanmıştır.

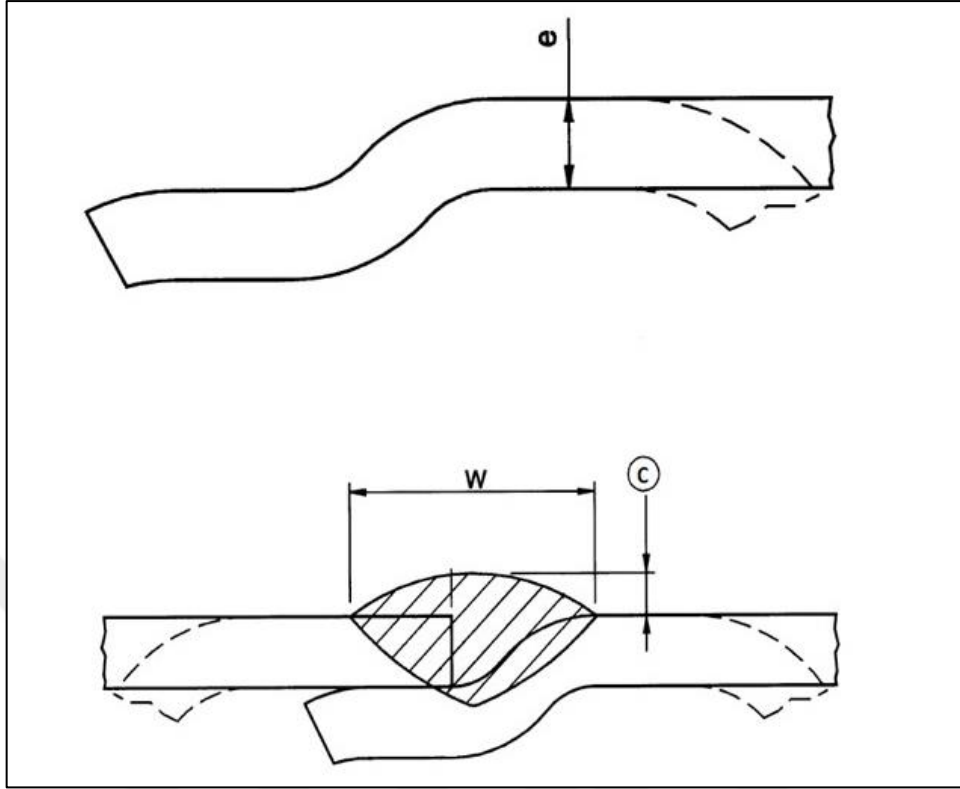
Çekme deneyi, eğme deneyi, mikro sertlik ölçme deneyi, OM ile mikro görüntüleme, patlatma- hacimsel genişleme ve basınçla yorulma deneyleri ise ilk kez, optimize edilmiş kaynak parametreleriyle kaynak edilmiş numunelere uygulanacaktır.

TS EN 14140'a göre, kaynak yapılan metal ile ana metal birleştirmesi pürüzsüz olmalı ve üst üste binme, boşluklar veya keskin düzensizlikler olmamalıdır. Kaynaklı ve kaynağa yakın yüzeylerde çatlaklar, çentikler veya gözenekli kısımlar olmamalıdır. Kaynaklı yüzey düzgün olmalı ve çukurluklar bulunmamalıdır.

Kaynak dikiş yüksekliği, genişliğinin % 25'ini geçmemelidir ($C \leq W/4$).

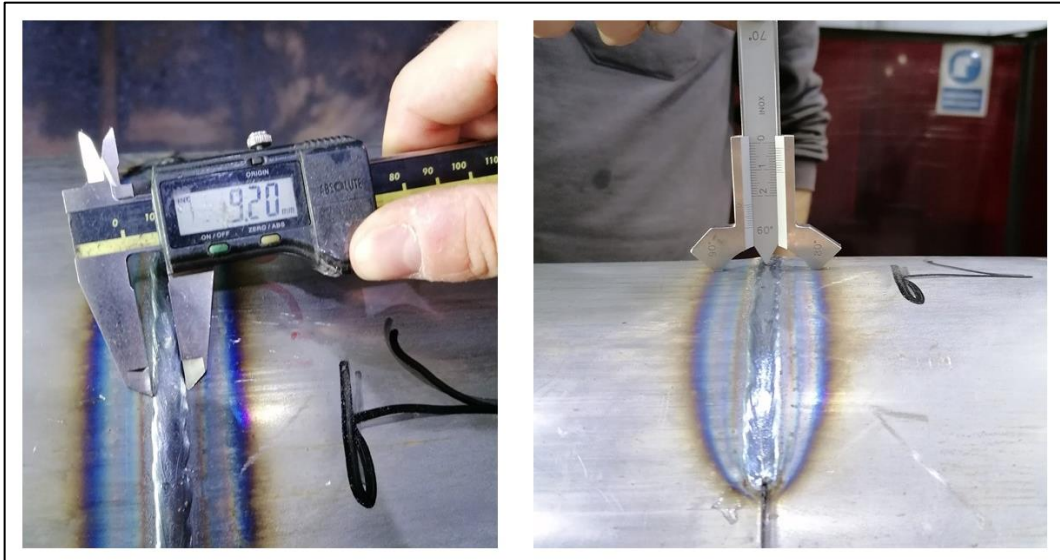
Kaynak dikiş genişliği cidar kalınlığının 3 - 8 katı arasında olmalıdır ($8e \geq W \geq 3e$).

LPG tüpüne ait çevresel alın kaynağı Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 LPG tüpünün çevresel alın kaynağı [10].

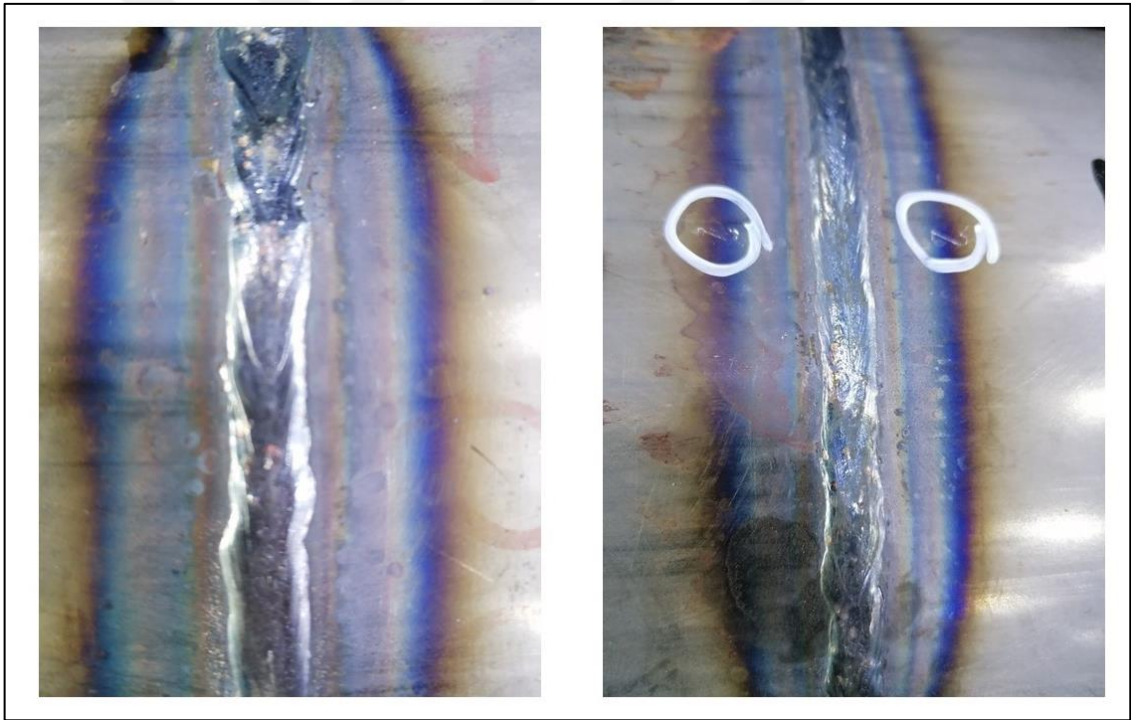
Dijital kumpas ile kaynak dikiş genişliği (W), sürgülü kaynak kumpası ile de kaynak dikiş yüksekliği (C) ölçülmüştür. Kaynak dikişlerine ait genişlik ve yükseklik değerlerinin ölçümü ise Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Kaynak dikişi genişliğinin ve yüksekliğinin ölçümü

Dikiş genişliği ve yüksekliği ölçümleri sonrasında dokuz kaynak numunesinin de uygun olduğu görülmüştür. Fakat, görsel muayene esnasında P.O.N-1 ve P.O.N-2 kaynak dikişlerinde yetersiz dolgu ve dalgalı form görülmüştür. Bu iki numunede istenen kalite görsel olarak yakalanamamıştır. Artan akım, penetrasyon ve ergime hızını artırır. Akım çok düşükse yetersiz nüfuziyet meydana gelebilir. Ark gerilimi esas olarak kaynak dikişi kesitinin şeklini ve dış görünümünü belirler. Akım şiddeti ve ilerleme hızı sabitken gerilimi artırmak, daha düz ve daha geniş bir kaynak dikişi elde edilmesini sağlamaktadır [14].

Numuneler arasında karışıklık olmaması adına, kaynak dikişlerinin hemen üstüne ve altına kalıcı markalama yapılmıştır. Görsel muayene TS EN ISO 17637'ye uygun şekilde hazırlanıp uygulanmıştır. Kaynak dikişlerine ait hatalar Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



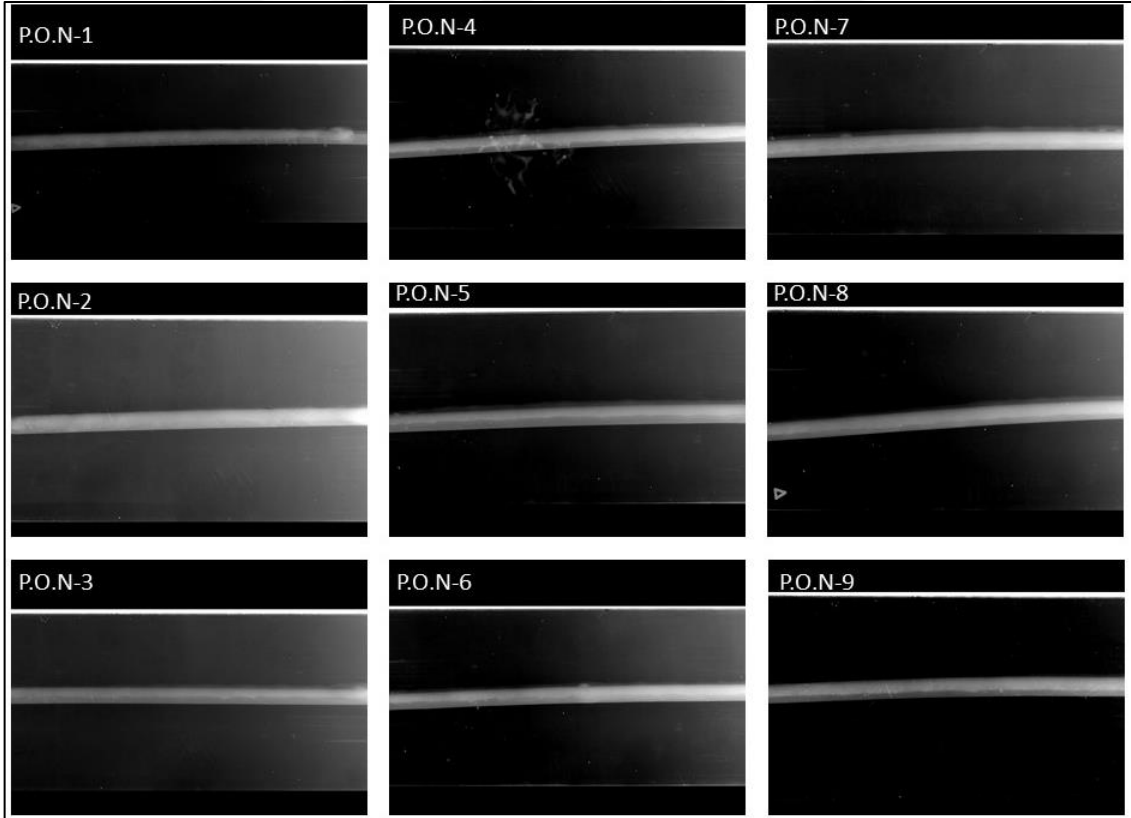
Şekil 3.9 Kaynak dikişinde yetersiz dolgu ve dalgalı form

Görsel muayenenin akabinde her bir numuneye radyografik muayene (X-ışını) uygulanmıştır. X-ışını deney düzeneği Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Filmlerle X-ışını radyografik muayene kontrolü tüm numunelere TS EN ISO 17636-1, TS EN ISO 19232-1 [36] ve TS EN ISO 19232-3 [37]'e uygun şekilde uygulanmıştır ve kaynak dikiş kaliteleri sertifikalı R.T-II personeli tarafından değerlendirilmiştir.



Şekil 3.10 X-ışını deney düzeneği

150 mm'lik film ile her bir numuneden alınan R.T görüntüleri Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Değerlendirme sonucunda bütün kaynak dikişleri uygun görülmüştür.

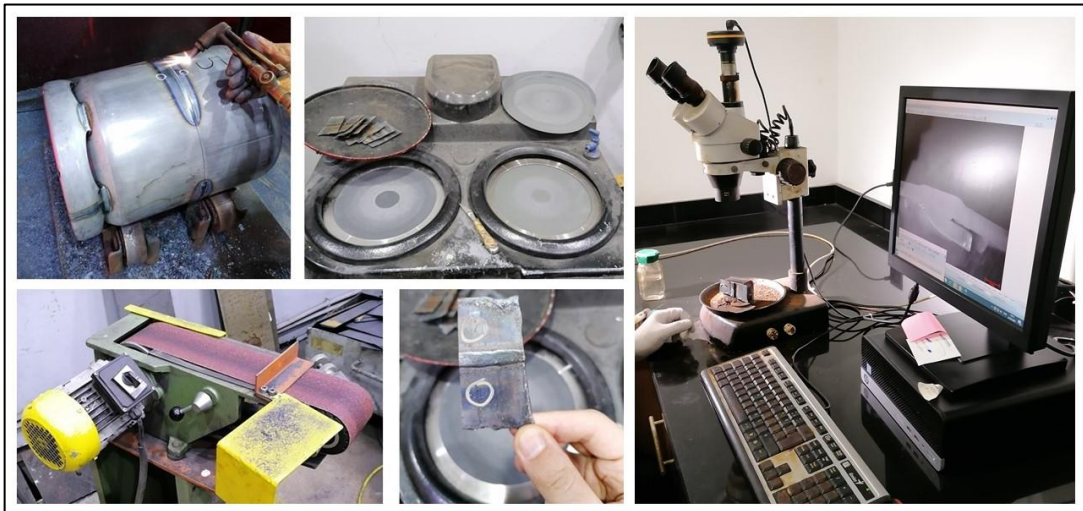


Şekil 3.11 P.O.N R.T görüntüleri

LPG tüpü kaynak dikişinde TS EN ISO 6520-1 [38]'de tanımlanan aşağıdaki kusurlara müsaade edilmez:

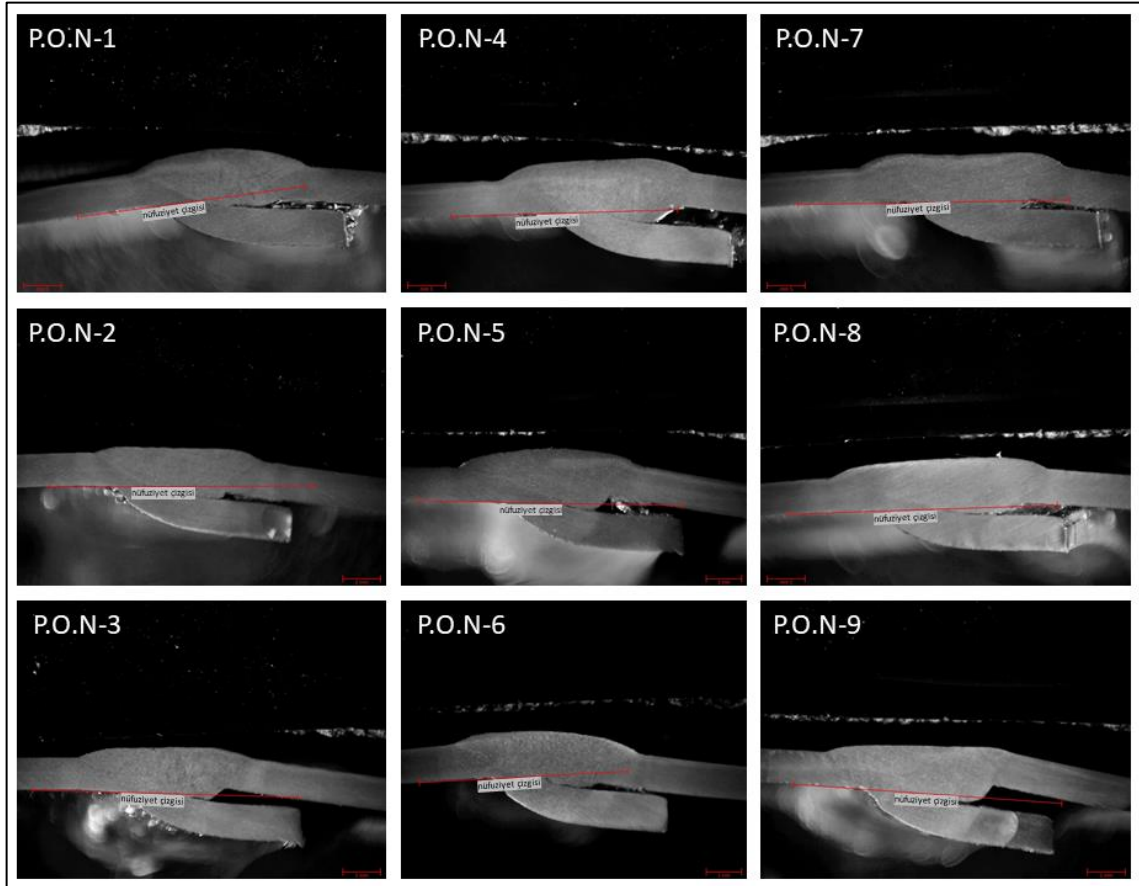
- Çatlaklar,
- Yetersiz nüfuziyet,
- Kaynağın yetersiz ergimesi,
- Tam doldurulmamış kaynak ağzı,
- Kaynak kökü iç bükeyliği,
- Üst üste binme,
- 12 x e'lik kaynak uzunluğunun 6 mm'den büyük olması ile temsil edilen uzunluktan daha uzun kalıntı veya sıra halindeki yuvarlak kalıntı grubu,
- Boyutu $e/3$ mm'den büyük olan gaz gözeneği,
- Herhangi bir gaz gözeneğine 25 mm veya daha az uzaklıkta, $e/4$ 'ten büyük olan herhangi bir gaz gözeneği,
- Bütün gözeneklerin toplam alanı (mm^2) $2e$ 'den büyük olan herhangi bir 100 mm uzunluk içindeki gaz gözenekleri.

Tüm bu kalitesel gereksinimleri sadece görsel muayene ve radyografik muayene ile doğrulamak mümkün değildir. Bu doğrultuda, parametre optimizasyonu numunelerinin kaynak dikişlerine, TS EN ISO 17639'a göre makroskopik muayene de uygulanmıştır. Makroskopik muayene numunelerinin hazırlığı ve incelenmesi süreci Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



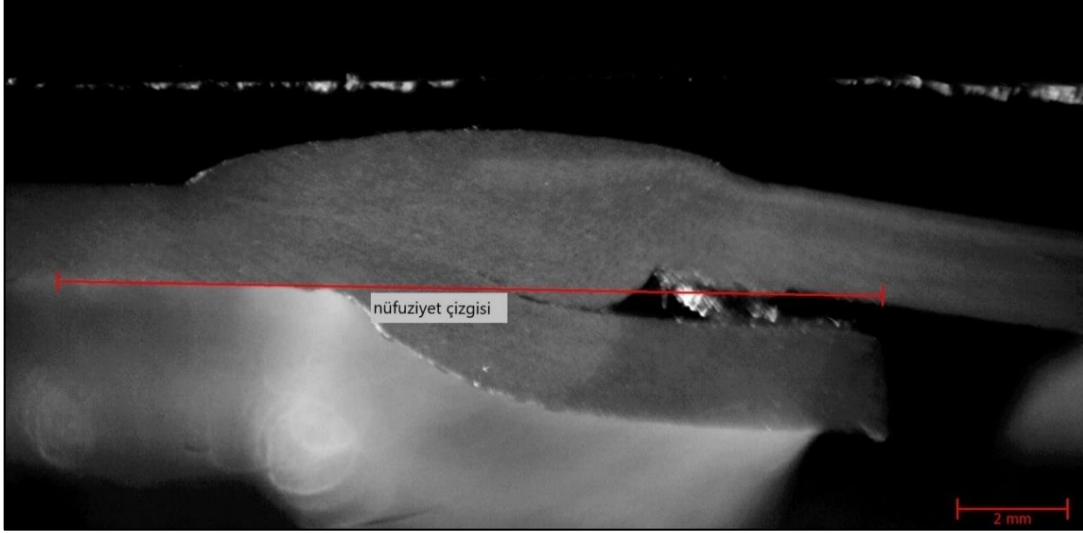
Şekil 3.12 Makro numunesi hazırlama ve görüntüleme süreci

Numune hazırlama sürecinde ilk olarak oksii-asetilen yardımıyla makro numuneler kesilmiştir. Kesilen numunelere sırasıyla 30, 180 ve 600 gritlik zımparalarla yüzey hazırlığı yapılmıştır. Sonrasında numunelere TSE CEN ISO/TR 16060 [39]'a uygun şekilde dağlama yapılmıştır. 5 ml nitrik asit (HNO_3) ve 95 ml etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) karışımı, yani nital5, dağlayıcı çözelti olarak kullanılmıştır. Son olarak 50x mikroskopta incelenen makro numunelere ait görüntüler Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13 P.O.N makro görüntüleri

Parametre optimizasyonu çalışması doğrultusunda, LPG tüpü çevresel kaynak dikişlerinin görsel, radyografik ve makroskopik muayeneleri tamamlanmıştır. P.O.N-1 ve P.O.N-2 görsel muayeneden geçememiştir, diğer numuneler geçmiştir. Tüm numuneler radyografik muayeneden geçmiştir. P.O.N-5 numunesinin makro görüntüsünde nüfuziyet eksikliği görülmüştür. Diğer tüm numuneler makroskopik muayeneden geçmiştir. P.O.N-5 numunesine ait makro görüntü detayı Şekil 3.14'te gösterilmektedir.



Şekil 3.14 P.O.N-5 nüfuziyet eksikliği

Nüfuziyet çizgisi, mevcut kaynak ağzındaki nüfuziyet sınırını göstermektedir. Bu sınır, tüp cidarının iç yüzeyinden hiza alır. Çizginin üstünde kalan kaynaklı birleşme bölgesinde tam nüfuziyet olmalıdır. P.O.N-5'te çizginin üstünde kalan alanda nüfuziyet eksikliği görülmektedir. Bu hatanın kaynak parametresi seçiminden kaynaklı olmadığı, alt ve üst bombenin kaynak ağzındaki aksenal kaçıklıklarından dolayı olduğu düşünülmüştür. P.O.N-5'e sayısal olarak yakın kaynak parametrelerinde kaynak edilen diğer numunelerin makro görüntülerinde tam nüfuziyet olması da bu öngörüğü desteklemektedir. Çalışmanın devamında tekrar deneyleri yapılarak P.O.N-5'e ait kaynak parametreleri bölüm 4.3'te gösterildiği üzere doğrulanmıştır. Deney sonuçlarına ait özet çizelge Tablo 3.14'te gösterilmektedir.

Tablo 3.14 Parametre optimizasyonu deney sonuçları

Numune No	Görsel Muayene	Radyografik Muayene	Makro İnceleme
P.O.N-1	X	✓	✓
P.O.N-2	X	✓	✓
P.O.N-3	✓	✓	✓
P.O.N-4	✓	✓	✓
P.O.N-5	✓	✓	X
P.O.N-6	✓	✓	✓
P.O.N-7	✓	✓	✓
P.O.N-8	✓	✓	✓
P.O.N-9	✓	✓	✓

3.3 Deneysel Tasarım

Çalışmanın devamında, SF 212 - SW 701 ve SF 304 - SW 702Mo sarf malzeme kombinasyonlarıyla beraber uygulanacak kaynak parametreleri olarak P.O.N-5 ve P.O.N-9'a ait parametreler seçilmiştir.

P.O.N-5: 260A, 28V, 100 cm/dk ile SF 212 - SW 701 ve SF 304 - SW 702Mo

P.O.N-9: 280A, 30V, 110 cm/dk ile SF 212 - SW 701 ve SF 304 - SW 702Mo

Deney planı oluşturulurken klasik deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bu metot her bir parametre için bir başlangıç noktası ya da temel seviye seçmekle başlar. Seçilen parametre dışındaki diğer parametreler kendi temel seviyesinde sabit tutulur. Seçilen parametreler kendi aralığı içerisinde değiştirilerek deneye etkisi araştırılmaktadır [40].

Bu doğrultuda her bir toz-tel kombinasyonu için gerekli deney numunesi sayısı $2^3=8$, toplamda ise 16'dır.

Yüksek mukavemet özelliklerini sağlayan ince yapıyı korumak ve ısı kaynaklı bozulmaları azaltmak için minimum ısı girdisi ile kaynak teknikleri önerilmektedir [1]. Kaynak akımındaki artış,yüksek ısı girdisine sebep olmaktadır . Bu da kaynaktaki yığılma miktarını artırmaktadır [41]. Yüksek ısı girdisi, kaynak ve ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) iri taneli mikroyapıya sebebiyet vermektedir. İlerleme hızındaki artış ısı girdisinin düşüşüyle sonuçlanmaktadır [42]. P.O.N-5 ve P.O.N-9 kaynak parametrelerinin SF 212 - SW 701 ve SF 304 - SW 702Mo sarf malzemeleri ile kombinasyonu Tablo 3.15'te gösterilmektedir. 2, 7, 10 ve 15 numaralı deneyler, en yüksek ve en düşük ısı girdisine neden olacak kaynak parametresi kombinasyonlarını içermektedir. Bu doğrultuda, patlatma-hacimsel genişleme ve basınçla yorulma deneyleri, en yüksek ve en düşük ısı girdisindeki kaynak dikişlerine sahip LPG tüplerine uygulanacaktır. Patlatma-hacimsel genişleme ve basınçla yorulma deneyleri, LPG tüpü gövdesinin bütününe uygulanması gereken deneyler olduğundan 2, 7, 10 ve 15 numaralı numunelerden üçer adet hazırlanmıştır. Böylece 16 adet olan numune sayısı 24'e yükselmiştir.

Tablo 3.15 Kaynak tozu-teli ve parametrelerinin kombinasyonu

Numune No	Numune Adedi	Amper (A)	Voltaj (V)	İlerleme Hızı (cm/dk)	Toz (EN ISO 14171-A) Tel (EN ISO 14171-A)	Isı Girdisi (kJ/cm)
K.K.N-1	1	260	28	100	SF 212 - SW 701	4,37
K.K.N-2-1	1	260	28	110	SF 212 - SW 701	3,97
K.K.N-2-2	1	260	28	110	SF 212 - SW 701	3,97
K.K.N-2-3	1	260	28	110	SF 212 - SW 701	3,97
K.K.N-3	1	260	30	100	SF 212 - SW 701	4,68
K.K.N-4	1	260	30	110	SF 212 - SW 701	4,25
K.K.N-5	1	280	28	100	SF 212 - SW 701	4,70
K.K.N-6	1	280	28	110	SF 212 - SW 701	4,28
K.K.N-7-1	1	280	30	100	SF 212 - SW 701	5,04
K.K.N-7-2	1	280	30	100	SF 212 - SW 701	5,04
K.K.N-7-3	1	280	30	100	SF 212 - SW 701	5,04
K.K.N-8	1	280	30	110	SF 212 - SW 701	4,58
K.K.N-9	1	260	28	100	SF 304 - SW 702Mo	4,37
K.K.N-10-1	1	260	28	110	SF 304 - SW 702Mo	3,97
K.K.N-10-2	1	260	28	110	SF 304 - SW 702Mo	3,97
K.K.N-10-3	1	260	28	110	SF 304 - SW 702Mo	3,97
K.K.N-11	1	260	30	100	SF 304 - SW 702Mo	4,68
K.K.N-12	1	260	30	110	SF 304 - SW 702Mo	4,25
K.K.N-13	1	280	28	100	SF 304 - SW 702Mo	4,70
K.K.N-14	1	280	28	110	SF 304 - SW 702Mo	4,28
K.K.N-15-1	1	280	30	100	SF 304 - SW 702Mo	5,04
K.K.N-15-2	1	280	30	100	SF 304 - SW 702Mo	5,04
K.K.N-15-3	1	280	30	100	SF 304 - SW 702Mo	5,04
K.K.N-16	1	280	30	110	SF 304 - SW 702Mo	4,58

Parametre optimizasyonu çalışmasında olduğu gibi bu kısımda da her LPG tüpü numunesine TS EN ISO 17637'ye göre görsel muayene, TS EN ISO 17636-1 sınıf-B'ye göre radyografik muayene (X-ışını) ve TS EN ISO 17639'a göre makroskopik muayene uygulanmıştır. TS EN ISO 14140'a göre uygulanması zorunlu olan TS ISO 4136'ya [43] göre çekme deneyleri ve TS EN ISO 5173'e [44] göre eğme deneyleri de bu bölümde yapılmıştır.

TS EN ISO 9015-2'e [45] göre mikro sertlik ölçme deneyi ve TS EN ISO 17639'a göre OM ile mikro görüntüleme deneyinin TS EN ISO 14140'a göre yapılması zorunlu değildir, fakat, ITAB ve kaynaklı bölgelere ait mikroyapılardaki fiziksel

değişimleri gözlemlemek de amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, ısı girdisinin en az ve en çok olduğu 2, 7, 10 ve 15 numaralı LPG tüplerinin kaynak dikişlerine bu deneyler de uygulanmıştır. Deney planı Tablo 3.16’da gösterilmektedir.

Tablo 3.16 K.K.N deney planı

Numune No	1- Görsel muayene (TS EN ISO 17637)	2- Radyografik muayene (TS EN ISO 17636-1)	3- Patlatma – hacimsel genleşme (TS EN 14140)	4- Basınçla yorulma deneyi (TS EN 14140)	5- Çekme deneyi (TS ISO 4136)	6- Eğme deneyi (TS EN ISO 5173)	7- Makro inceleme (TS EN ISO 17639)	8- Mikro sertlik ölçme deneyi (TS EN ISO 9015-2)	9- OM ile mikro görüntüleme (TS EN ISO 17639)
K.K.N-1	•	•			•	•	•		
K.K.N-2-1	•	•			•	•	•	•	•
K.K.N-2-2	•	•		•					
K.K.N-2-3	•	•	•						
K.K.N-3	•	•			•	•	•		
K.K.N-4	•	•			•	•	•		
K.K.N-5	•	•			•	•	•		
K.K.N-6	•	•			•	•	•		
K.K.N-7-1	•	•			•	•	•	•	•
K.K.N-7-2	•	•		•					
K.K.N-7-3	•	•	•						
K.K.N-8	•	•			•	•	•		
K.K.N-9	•	•			•	•	•		
K.K.N-10-1	•	•	•						
K.K.N-10-2	•	•		•					
K.K.N-10-3	•	•			•	•	•	•	•
K.K.N-11	•	•			•	•	•		
K.K.N-12	•	•			•	•	•		
K.K.N-13	•	•			•	•	•		
K.K.N-14	•	•			•	•	•		
K.K.N-15-1	•	•	•						
K.K.N-15-2	•	•		•					
K.K.N-15-3	•	•			•	•	•	•	•
K.K.N-16	•	•			•	•	•		

TS EN ISO 148-1'e [46] göre 2,50 mm'nin altında kalınlığa sahip metalik numune parçalara Charpy çentik darbe deneyi uygulanamamaktadır. Bu doğrultuda, Charpy çentik darbe deneyi çalışma kapsamına alınamamıştır.

3.4 K.K.N'lerin Hazırlanması ve Deneylerin Uygulanması

Tablo 3.16'da yer almakta olan deney numunelerinin hazırlanması ve ilgili deneylerin uygulanması sürecinin detayları bu bölümün içeriğini oluşturmaktadır. İlk olarak, 24 adet LPG tüpüne, Tablo 3.15'teki kaynak parametresi ve sarf malzeme kombinasyonları doğrultusunda çevresel tozaltı kaynağı yapılmıştır. Uygulama süreci Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15 K.K.N hazırlık süreci

SF 212 ve SF 304 kaynak tozlarının fırında kurutulması süreci ayrı zaman dilimlerinde yapılarak, tozların birbirlerine karışmamasına dikkat edilmiştir.

Kaynak tozu kurutma fırını Şekil 3.16'da gösterilmektedir.



Şekil 3.16 Kaynak tozunun kurutulması

Tahribatsız muayeneler;

- Yüzeysel muayene metotları,
- Hacimsel muayene metotları,
- Diğer metotlar olmak üzere temelde üçe ayrılır [47].

Bu çalışmada, yüzeysel N.D.T yöntemlerinden V.T ve hacimsel N.D.T yöntemlerinden R.T uygulanmıştır. Tahribatsız muayenelerin tamamlanması sonrası, numunelere tahribatlı muayeneler uygulanmıştır.

Tahribatlı deney numunelerinin hazırlanış sürecinin başlangıcı Şekil 3.17’de gösterilmektedir. Her bir numuneye ait etikete, numunenin ismi ve uygulanacak deneyler yazılmıştır. Deney sürecindeki izlenebilirlik bu şekilde sağlanmıştır.



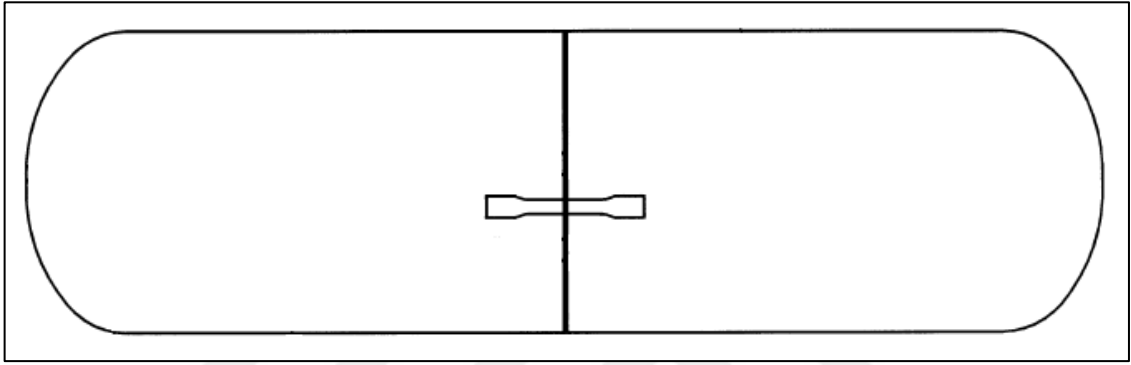
Şekil 3.17 Tahribatlı muayene deney numunelerinin sınıflandırılması

Tahribatlı muayenelerden ilk olarak makroskopik muayene yapılmıştır. Bölüm 3.2.3’te detayları anlatılmış olan numunelerin kesilmesi, zımparalanması, dağlanması ve sonrasında incelenmesi süreçlerinin hepsi sırasıyla bu aşamada da uygulanmıştır.

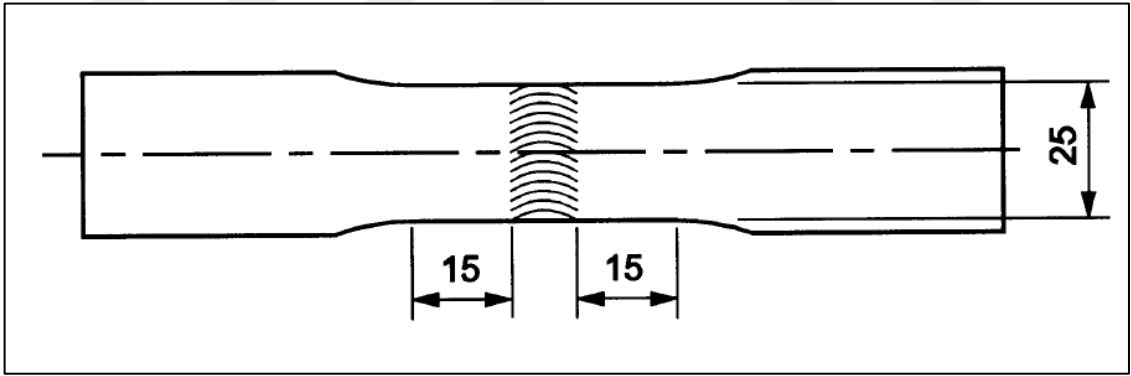
Makroskopik muayenelerin tamamlanması sonrası, Tablo 3.16’da gösterilmekte olan numunelere enine çekme deneyleri yapılmıştır.

Kaynağa dik olarak yapılan çekme deneyi, kaynak kenarlarından 15 mm ileriye kadar uzanan, genişliği 25 mm'ye indirilmiş enine kesite sahip deney numunesi ile TS EN ISO 4136'ya uygun olarak yapılmalıdır. Bu merkezi bölgenin ötesinde deney numunesinin genişliği, devamlı olacak şekilde artmalıdır. Deney sırasında elde edilen çekme dayanımı değeri, R_m , imal edilmiş tüplerde tüp imalatçısı tarafından garanti edilenden az olmamalıdır [10].

Çekme numunesinin LPG tüpü üzerinden alındığı bölgeye ait görsel Şekil 3.18'de ve çekme numunesine ait boyutsal kriterler Şekil 3.19'da gösterilmektedir.



Şekil 3.18 LPG tüpünün çevresel kaynağından alınan çekme numunesi [10]



Şekil 3.19 Çevresel kaynağa dik olarak alınan çekme deneyi numunesi [10].

Kaynaklı bir bağlantıdan alınan bir deney numunesine, numunede kopma meydana gelene kadar sürekli olarak artan bir çekme yükü uygulanır. Kopmanın gerçekleştiği yer not edilir; kırılma yüzeyleri incelenir ve deneyi olumsuz etkilemiş olabilecek herhangi bir kusurun varlığı, tipi, boyutu da dahil olmak üzere kaydedilir [43].

Çekme numuneleri, istenilen tam ölçüye hidrolik preste kesme kalıbıyla kesilerek getirilmiştir. Çekme numunelerinin hazırlanış süreci Şekil 3.20’de gösterilmektedir.



Şekil 3.20 Çekme numunesi hazırlama süreci

Kaba kesimi giyotin tezgahında, tam ölçüye kesimi ise kesme kalıbıyla yapılan çekme numuneleri, yüzeylerinin düzleştirilmesi amacıyla son olarak frezede işlenmiştir. Hazırlık süreci tamamlanmış her bir çekme numunesi tekrardan markalanarak deneylere alınmıştır. Deneye hazır numuneler Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Çekme deneyine ait test düzeneği ise Şekil 3.22’de gösterilmiştir.

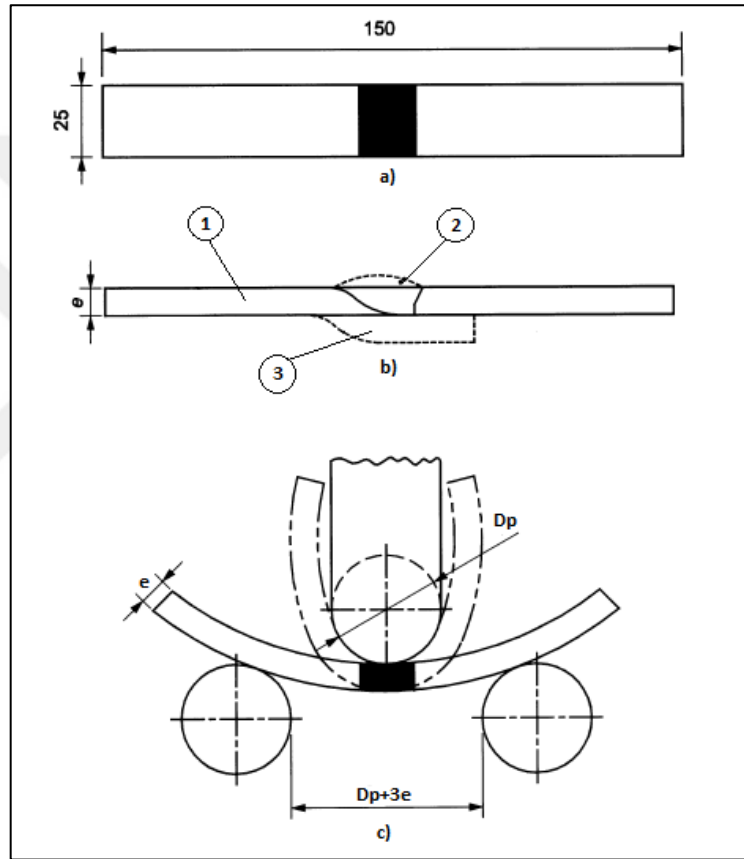


Şekil 3.21 Deneye hazır çekme numuneleri



Şekil 3.22 Çekme deneyi test düzeneği

Çekme deneylerinin tamamlanması sonrası, Tablo 3.16’da gösterilmekte olan numunelere eğme deneyleri yapılmıştır. Deney numunelerinin hazırlığı ve deneyleri gerçekleştirmek için gerekli işlemler, TS EN ISO 5173’e uygun olarak yapılmıştır. Eğme deney numuneleri, 25 mm genişliğindedir. Deney yapılırken, Şekil 3.23’de gösterildiği gibi, mandrel kaynağın merkezine yerleştirilmiştir. Deney numunesi, mandrelin etrafında 180° eğilmiştir. Mandrelin çapı (D_p) ile deney numunesinin kalınlığı (e) arasındaki oran (n), Tablo 3.17’de verilen değerlere uygundur.



Şekil 3.23 Eğme deneyi [10].

- a) Deney numunesinin boyutları
- b) Deney numunesinin hazırlanması
 - 1) Kaynak numunesi
 - 2) Kaynak taşmasının düzeltilmesi (kep tarafı)
 - 3) Çıkartılan bindirmeli kısım (kök tarafı)

Tablo 3.17 Mandrel çapı (Dp) ile deney parçası kalınlığının (n) oran değerleri

Rm (N/mm ²)	n değeri
440'a kadar (dahil)	2
440 ila 520 (dahil)	3
520 ila 600 (dahil)	4
600 ila 700 (dahil)	5
700 ila 800 (dahil)	6
800 ila 900 (dahil)	7
900 üzeri	8

Mandrel çapı (Dp): 9,00 mm

Deney numunesinin kalınlığı (e): 1,50 mm

Alt mandreller arası mesafe (Dp+3e): 13,50 mm

Eğme deneylerine ait test düzeneği Şekil 3.24'te gösterilmektedir.



Şekil 3.24 Eğme deneyi test düzeneği

Eğme deneylerinin tamamlanması sonrası, Tablo 3.16'da gösterilmekte olan ilgili numunelere patlatma-hacimsel genişleme deneyleri yapılmıştır.

Patlatma-hacimsel genişleme deneyleri TS EN 14140'a uygun şekilde yapılmıştır.

Bu doğrultuda, tüp, patlayıncaya kadar basınçlandırılmıştır ve tüpün hacimsel genişleme oranı, tüpün deney başlangıcındaki ve deney sonundaki hacmi arasındaki farkın ilk hacmine oranlanmasıyla hesaplanmıştır.

Deneye alınan tüp patladıktan sonra yırtılma yüzeyi, yırtılma ve yırtılma kenarlarının görsel olarak incelenmesi amacıyla muayeneye tabi tutulmuştur.

TS EN 14140'a göre;

Ölçülen patlama basıncı (P_b), hesaplama basıncının (P_c) 2,25 katından az olmamalı ve en az 50 bar olmalıdır,

Tüpün hacimsel genişmesinin başlangıç hacmine oranı, aşağıdaki değerlere eşit veya aşağıdaki değerlerden daha büyük olmalıdır:

- Tüpün uzunluğu (muf dahil basınca maruz kalan gövdenin uzunluğu), çapından (D) büyük ise, % 20 veya
- Tüpün uzunluğu (muf dahil, basınca maruz kalan gövdenin uzunluğu), çapına (D) eşit veya çapından küçük ise, % 17.
- Bu iki gereksinimi karşılamayan tüplerde, tüplerin basınç tahliye tertibatı ile donatılması gerekmektedir.
- Patlatma deneyi, tüpte herhangi bir parçalanmaya sebep olmamalıdır,
- Ana yırtık, herhangi bir gevrek görünüm göstermemelidir (örneğin; yırtılmanın kenarları radyal olmamalı ancak tüp çapının oluşturduğu düzlemlerle açı oluşturmalı ve kalınlığı boyunca bir kesit daralması göstermemelidir),
- Yırtılma, metalin yapısında gözle görülür bir kusur meydana getirmemelidir [10].

En yüksek ve en düşük ısı girdisiyle çevresel kaynakları yapılan numune tüplere ait patlatma-hacimsel genişleme deney düzeneği Şekil 3.25'te gösterilmektedir.



Şekil 3.25 Patlatma-hacimsel genişleme deney düzeneği

Patlatma-hacimsel genişleme deneylerinin tamamlanması sonrası, Tablo 3.16'da gösterilmekte olan numunelere basınçla yorulma deneyi yapılmıştır. Tüpler, su ile doldurulup sonrasında boşaltılarak ardışık hidrolik basınç uygulamalarına tabi tutulmuştur. TS EN 14140'a göre;

- Deney basıncının 2/3'üne eşit olan üst çevrim basıncında, tüp 80000 çevrime tabi tutulmalı veya
- Deney basıncına eşit olan üst çevrim basıncında, tüp 12000 çevrime tabi tutulmalıdır,
- Alt çevrim basınç değeri, üst çevrim basıncının % 10'undan fazla olmamalı,
- Basınç çevrim sıklığı, 0,25 Hz (15 çevrim/dk)'i geçmemelidir.
- Tüpün dış yüzeyinde ölçülen sıcaklık, deney sırasında 50 °C'yi geçmemelidir,
- Tüpte hiçbir şekilde sızıntı olmamalıdır [10].

Basınçla yorulma deneyi parametreleri ise aşağıdaki gibidir;

- Üst çevrim basıncı: 30 bar (hesaplama basıncına (Pc) eşit),
- Alt çevrim basıncı: 3 bar,
- Çevrim sayısı: min. 12000,
- Çevrim sıklığı: 9 çevrim/dk,



Şekil 3.26 Basınçla yorulma deneyi test düzeneği

Basınçla yorulma deneyine ait düzenek Şekil 3.26'daki gibidir. Tahribatlı deneylere ait numuneler Şekil 3.27'de gösterilmektedir.

Tamamlanmış olan tahribatlı deneyler sonrası, Tablo 3-16'da gösterilmekte olan K.K.N-2-1, K.K.N-7-1, K.K.N-10-3 ve K.K.N-15-3 numunelerine sıradaki deneyler yapılmıştır. Bunlar, mikro sertlik ölçme deneyi ve OM ile mikro görüntülemedir.

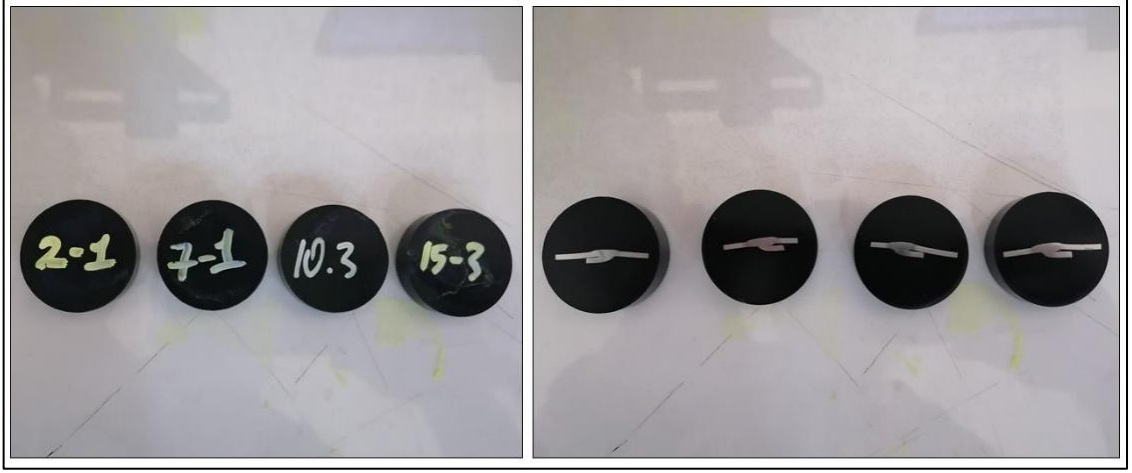


Şekil 3.27 Tahribatlı deney numuneleri

İlk olarak numunelerin bakalite alınabilmesi amacıyla kaba kesim yapılmıştır. Sonrasında kabaca kesilen numunelere sırasıyla 240-320-500-600-1000-1200 gritlik zımparalarla zımparalama yapılmıştır. Zımparalama işlemleri sonrasında parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işleminde 3 µm elmas pasta süspansiyonu kullanılmıştır. Parlatma işlemi sonrasında dağlama çözeltisi olarak %5'lik pikral çözeltisi (5 g pikrik asit ($C_6H_2OH(NO_2)_3$) ve 100 ml etanol (C_2H_5OH) karışımı) kullanılmıştır. Dağlama sonrası tüm numuneler saf su ve alkol ile temizlenmiştir ve kurutma makinesi ile kurutulmuştur. Bakalite alma ve zımparalama işlemlerinin yapıldığı tezgahlar Şekil 3.28'de gösterilmektedir. Sırasıyla kaba kesim, zımparalama, parlatma, dağlama, temizleme ve kurutma işlemleri tamamlanan numunelerin bakalite alınmış halleri Şekil 3.29'da gösterilmektedir.



Şekil 3.28 Bakalite alma ve zımparalama makineleri

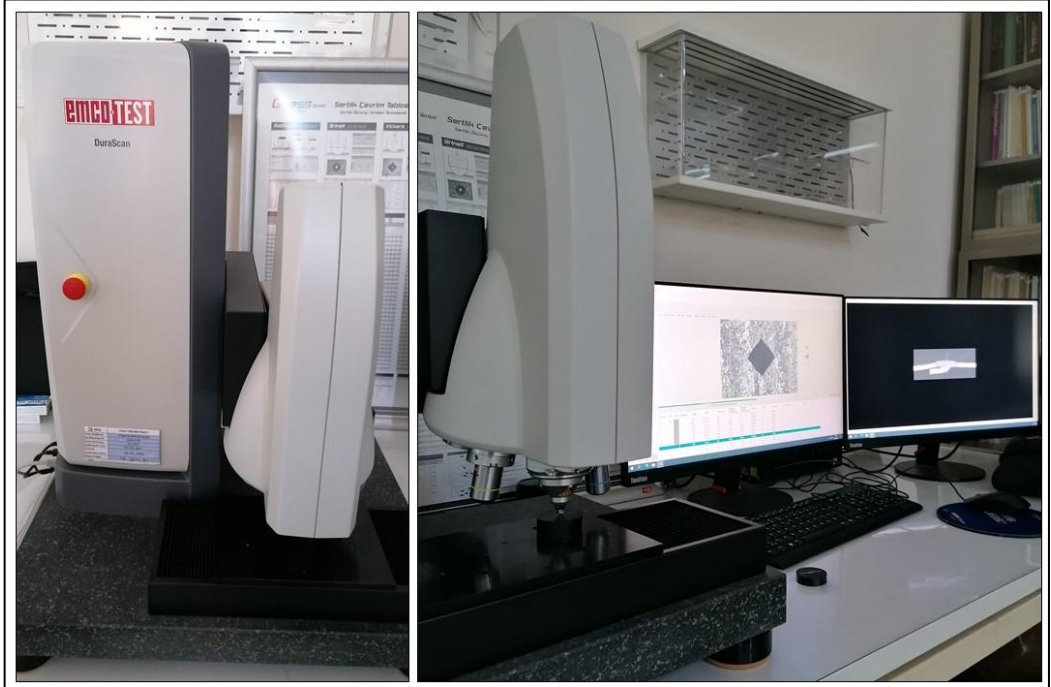


Şekil 3.29 Bakalite alınmış deney numuneleri

Bakalite alma işlemleri tamamlandıktan sonra, ilk olarak TS EN ISO 9015-2'ye göre mikro sertlik deneyleri yapılmıştır. Deney numuneleri Şekil 3.30'da gösterilmekte olan EMCOTEST DuroScan sertlik ölçme cihazında, HV 0,2 yöntemiyle test edilmiştir.

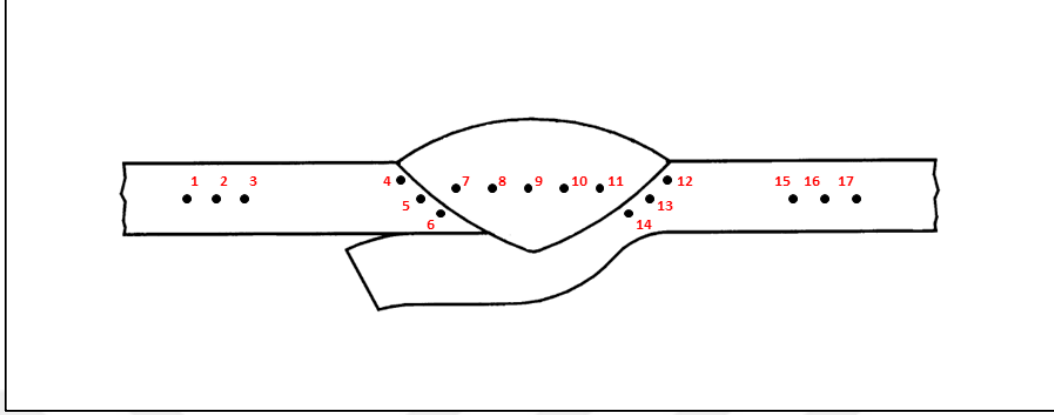
HV, Vickers sertliği anlamına gelmektedir. HV 0,2 ise, test esnasında uygulanan nominal kuvvetin 1,961 N olduğu Vickers mikro sertlik test yöntemidir [48].

Sertlik ölçüm cihazı EMCOTEST DuroScan Şekil 3.30'da gösterilmektedir.



Şekil 3.30 Sertlik ölçüm cihazı

6'sı malzeme, 6'sı ITAB ve 5'i kaynak metali olmak üzere her mikro sertlik deneyi numunesinden toplamda 17 ölçüm alınmıştır. K.K.N-2-1, K.K.N-7-1, K.K.N-10-3 ve K.K.N-15-3 numunelerine ait sertlik ölçüm noktaları Şekil 3.31'de gösterilmektedir.



Şekil 3.31 Sertlik ölçüm noktaları

Mikro sertlik ölçüm deneylerinin ardından bakalite alınmış numuneler, OM ile mikro incelemeye tabi tutulmuştur. OM ile incelemeler 200x büyütülerek gerçekleştirilmiştir ve sırasıyla malzeme, ITAB ve kaynak metaline ait bölgelerden görüntüler alınmıştır. LEICA DMI8 marka optik mikroskop Şekil 3.32'de gösterilmektedir.



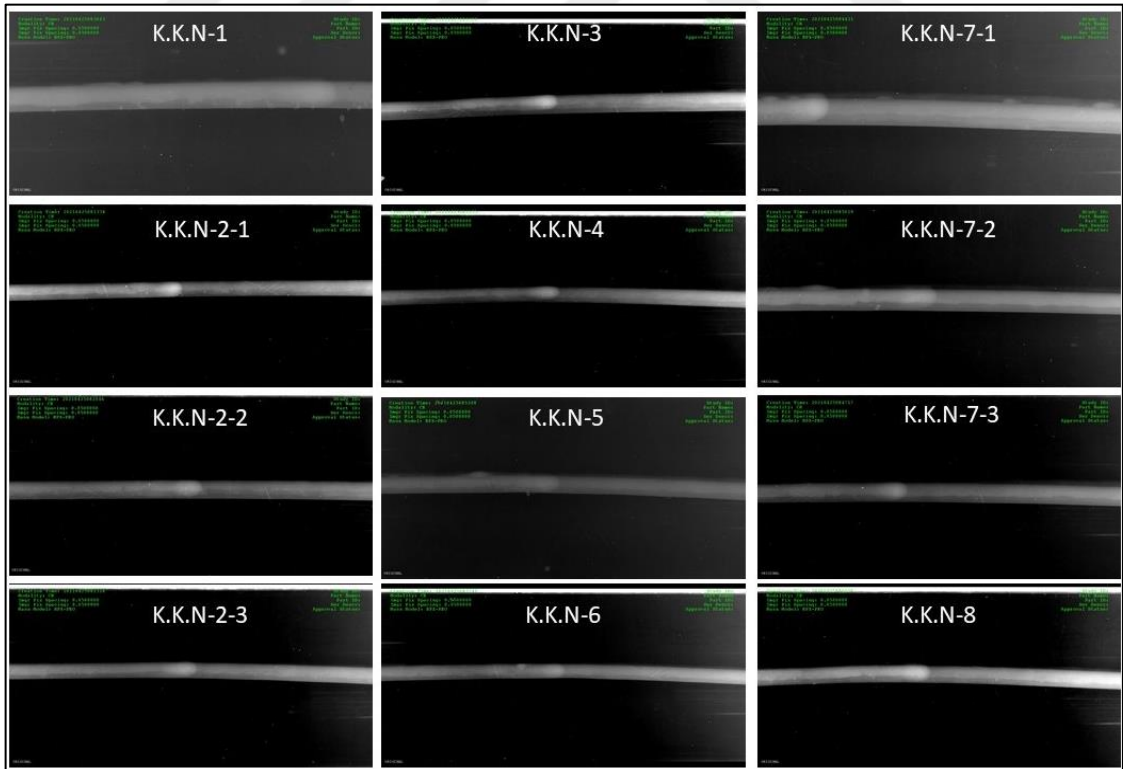
Şekil 3.32 Optik mikroskop

4.1 Görsel Muayene

Tablo 3.16’da gösterilmekte olan ilgili her bir kaynak dikişi numunesine TS EN ISO 17637’ye göre görsel muayene yapılmıştır ve incelemeler neticesinde tüm numuneler görsel muayeneden geçmiştir.

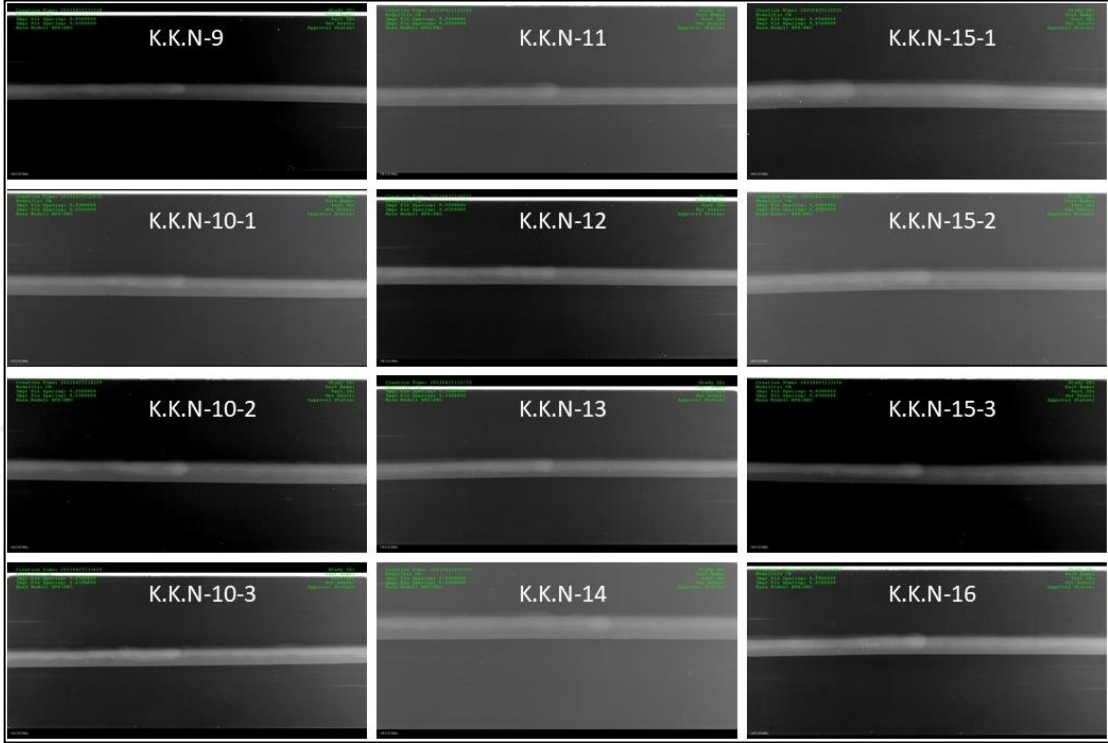
4.2 Radyografik Muayene

Görsel muayenelerin başarıyla sonuçlanması sonrası ilgili her bir kaynak numunesine X-ışını ile R.T uygulanmıştır. K.K.N 1-8 aralığındaki numunelere ait R.T görüntüleri Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 K.K.N 1-8 aralığının R.T görüntüleri

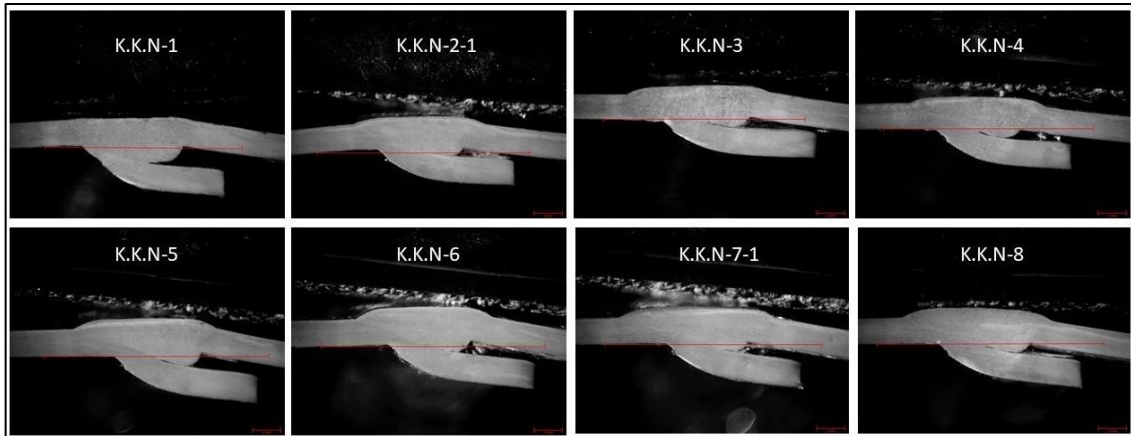
K.K.N 9-16 aralığındaki numunelere ait R.T görüntüleri Şekil 4.2’de gösterilmektedir. TS EN ISO 17636-1 sınıf-B isterine tabi LPG tüpüne ait çevresel kaynak dikişleri, uygulanan X-ışını ile R.T kontrollerinden başarıyla geçmiştir.



Şekil 4.2 K.K.N 9-16 aralığının R.T görüntüleri

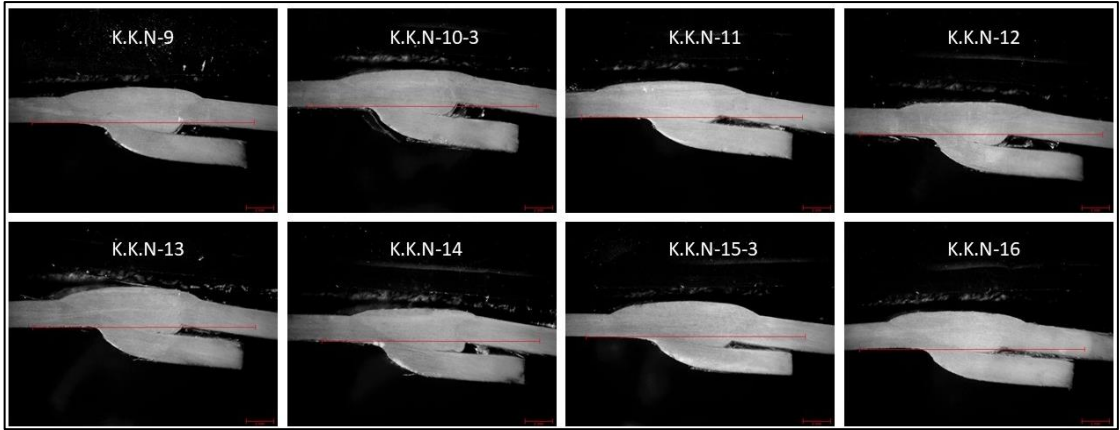
4.3 Makroskopik Muayene

K.K.N 1-8 aralığındaki numunelere ait makro görüntüler Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 K.K.N 1-8 aralığının makro görüntüleri

K.K.N 9-16 aralığına ait makro görüntüler Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

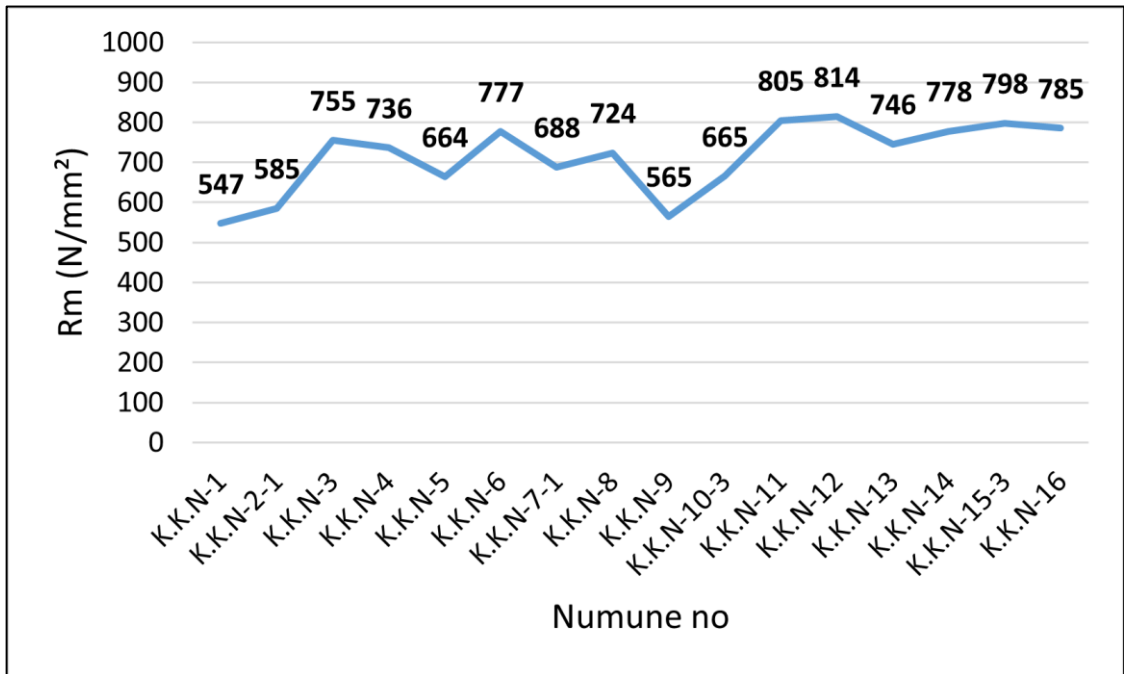


Şekil 4.4 K.K.N 9-16 aralığının makro görüntüleri

İncelemeler neticesinde, tüm makro numuneler makroskopik muayeneden başarıyla geçmiştir. Bölüm 3.2.3'te nüfuziyet eksikliğinin görüldüğü ve sonrasında doğrulanacak olan P.O.N-5 numunesine ait kaynak parametreleri bu aşamada doğrulanmıştır.

4.4 Çekme Deneyi

Tablo 3.16'da gösterilmekte olan numunelere uygulanan çekme deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.5 ve Tablo 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Çekme dayanımlarının (Rm) karşılaştırılması

Tablo 4.1 Çekme deneyi sonuçları

Numune No	w (mm)	h (mm)	So (mm ²)	Rm (N/mm ²)	Kopma Noktası	Deney Sonucu
K.K.N-1	24,72	1,55	38,32	547	Malzeme	✓
K.K.N-2-1	24,71	1,58	39,04	585	Malzeme	✓
K.K.N-3	24,74	1,53	37,85	755	Malzeme	✓
K.K.N-4	24,77	1,58	39,14	736	Malzeme	✓
K.K.N-5	24,81	1,51	37,46	664	Malzeme	✓
K.K.N-6	24,78	1,5	37,17	777	Malzeme	✓
K.K.N-7-1	24,69	1,54	38,02	688	Malzeme	✓
K.K.N-8	24,74	1,57	38,84	724	Malzeme	✓
K.K.N-9	24,75	1,53	37,87	565	Malzeme	✓
K.K.N-10-3	24,74	1,52	37,60	665	Malzeme	✓
K.K.N-11	24,74	1,64	40,57	805	Malzeme	✓
K.K.N-12	24,72	1,61	39,80	814	Malzeme	✓
K.K.N-13	24,74	1,54	38,10	746	Malzeme	✓
K.K.N-14	24,76	1,6	39,62	778	Malzeme	✓
K.K.N-15-3	24,69	1,51	37,28	798	Malzeme	✓
K.K.N-16	24,73	1,52	37,59	785	Malzeme	✓

Çekme deneyleri neticesinde;

- Kaynak bölgesinden kopan numune olmamıştır,
- Elde edilen çekme dayanımı (Rm) değerlerinin hepsi, S460MC çeliğine ait minimum çekme dayanımı değeri olan 520 N/mm²'nin üstünde elde edilmiştir.
- SF 304 - SW 702Mo kombinasyonu numunelerine ait ortalama çekme dayanımı değeri 744,5 N/mm² iken, SF 212 - SW 701 kombinasyonlarına ait ortalama çekme dayanımı değeri 684,5 N/mm²'dir,
- SW 702Mo kaynak telinin %0,50'sini Mo oluşturmaktadır. Molibdenin kaynak metaline ilave edilmesinin ana amacı, kaynak mukavemetini arttırmaktır [4]. Düşük karbonlu çeliklerde uygun kaynak elektrodunun kullanılması, kaynak dikişlerinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde ve uygun bir mikroyapının elde edilmesinde büyük önem arz etmektedir. [49]. Bu doğrultuda, molibdenin mukavemete olan olumlu etkisi numunelere uygulanan çekme deneyleriyle doğrulanmıştır.

4.5 Eğme Deneyi

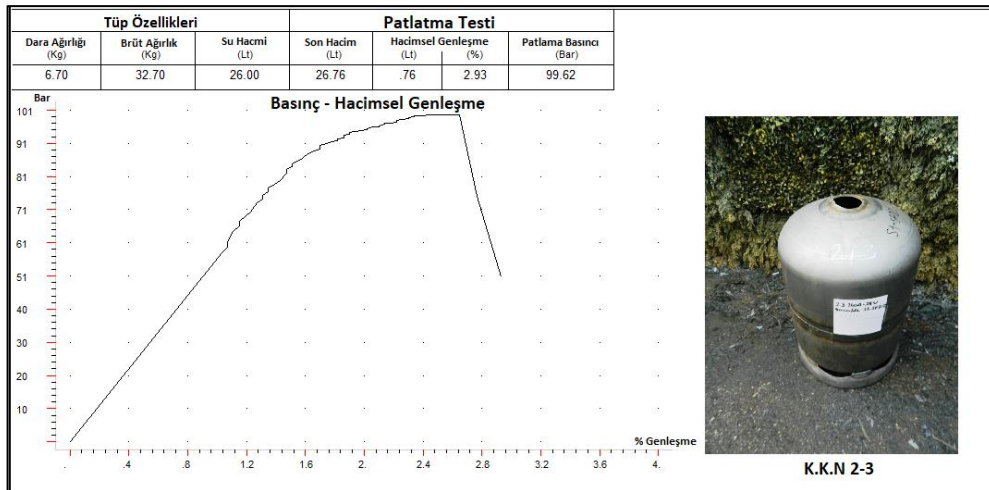
Tablo 3.16’da gösterilmekte olan her bir eğme deneyi numunesine bir enine kök eğme ve bir enine kep eğme deneyi yapılmıştır. Eğme deneyi numunesi Şekil 4.6’da gösterilmektedir. Deney numunelerinin hiçbirinde eğilmeden sonra çatlak görülmemiştir.



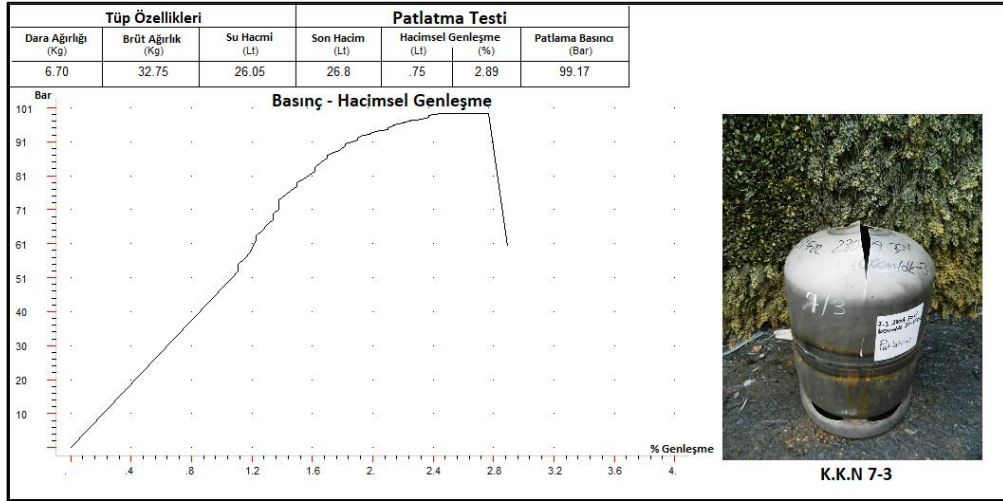
Şekil 4.6 Eğme deneyi numunesi

4.6 Patlatma-Hacimsel Genleşme Deneyi

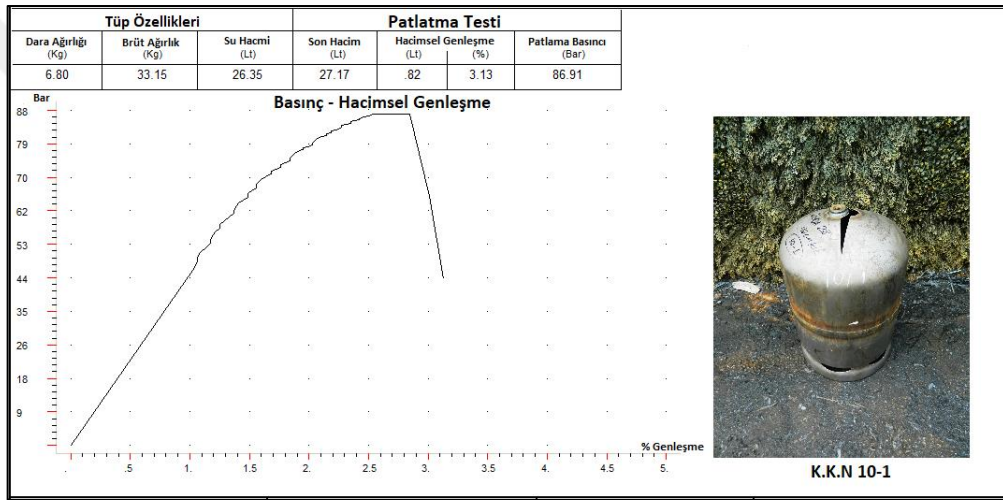
Patlatma-hacimsel genişleme deneyleri neticesinde numune bazlı basınç (bar) – hacimsel genişleme (% genişleme) grafikleri elde edilmiştir. Grafiklerdeki sonuçlar doğrultusunda patlatma%hacimsel genişleme deneylerine ait veriler Tablo 4.2’de özetlenmiştir.



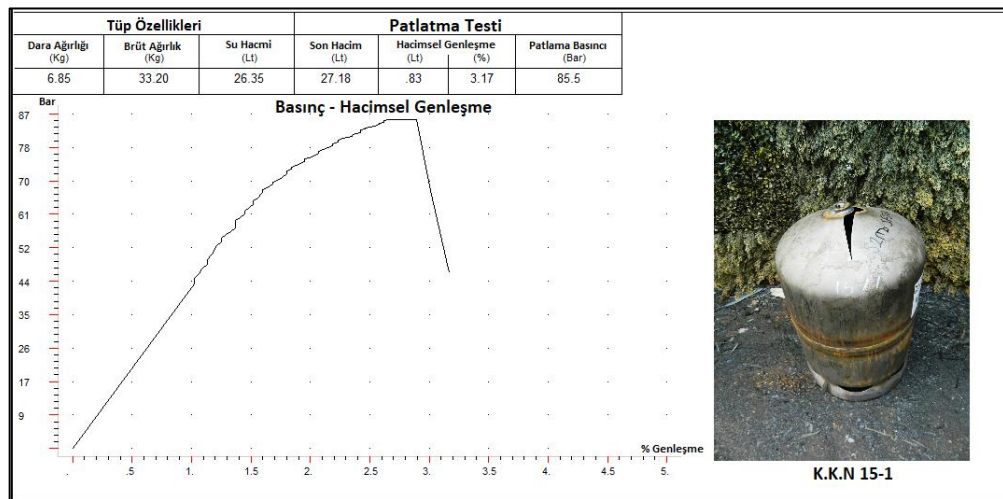
Şekil 4.7 K.K.N 2-3 patlatma-hacimsel genişleme deney raporu



Şekil 4.8 K.K.N 7-3 patlatma-hacimsel genleşme deney raporu



Şekil 4.9 K.K.N 10-1 patlatma-hacimsel genleşme deney raporu



Şekil 4.10 K.K.N 15-1 patlatma-hacimsel genleşme deney raporu

Tablo 4.2 Patlatma-hacimsel genleşme deney sonuçları

Numune No	Dara (kg)	Su dolu ağırlık (kg)	İlk hacim (Lt)	Son hacim (Lt)	Hacim artışı (Lt)	Hacimsel genleşme miktarı (%)	Patlama basıncı (bar)
K.K.N 2-3	6,7	32,7	26	26,76	0,76	2,9	99,62
K.K.N 7-3	6,7	32,75	26,05	26,8	0,75	2,9	99,17
K.K.N 10-1	6,8	33,15	26,35	27,17	0,82	3,1	86,91
K.K.N 15-1	6,85	33,2	26,35	27,18	0,83	3,1	85,5

Patlatma-hacimsel genleşme deneyleri neticesinde;

- Her bir numune için ölçülen patlama basıncı (Pb), 67,5 bar değerinin üstünde gelmiştir. Böylece patlama basıncı gereksinimi tüm numuneler için sağlanmıştır.
- Patlama sonucunda meydana gelen yarıлма, çevresel kaynak bölgesinden olmamıştır ve diğer muayene gereksinimlerini karşılamıştır.
- Hacimsel genleşme değerleri %17'nin altında kalmıştır. Bunun sebebi ise çevresel kaynağı tamamlanmış tüplere herhangi bir ısıl işlem (gerilim giderme vb.) uygulanmamış olmasıdır. Fakat TS EN 14140'a göre, tüplerin basınç tahliye tertibatı (emniyet ventilli vana vb.) ile donatılarak hacimsel genleşme kriterinden muaf bir şekilde üretilmesi mümkündür.

4.7 Basınçla Yorulma Deneyi

Basınçla yorulma deneyleri sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3 Basınçla yorulma deneyi sonuçları

Numune No	Çevrim		Basınç (bar)		Deney Sonucu
	Sayısı (adet)	Sıklığı (çevrim/dk)	Alt	Üst	
K.K.N 2-2	16620	9	3	30	✓
K.K.N 7-2	14320	9	3	30	✓
K.K.N 10-2	12200	9	3	30	✓
K.K.N 15-2	12380	9	3	30	✓

Deneyler neticesinde tüm numune tüpler, deney basıncına eşit olan üst çevrim basıncında min. 12000 çevrime dayanım göstermiştir ve deneylerden başarıyla

geçmiştir. K.K.N 2-2 ve K.K.N 7-2'nin çevrim sayılarının K.K.N 10-2 ve K.K.N 15-2'ye göre yüksek olmasının sebebi, K.K.N 2-2 ve K.K.N 7-2'ye ait yorulma deneylerinin gece yarısı yapılmış olması ve bu numunelerin test durdurulmadan önce 12000 çevrim değerini çoktan aşmış bulunmalarıdır.

4.8 Mikro Sertlik Ölçme Deneyi

Vickers mikro sertlik (HV 0,2) deneylerine ait ölçüm sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 4.4 ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Vickers sertlik değerleri

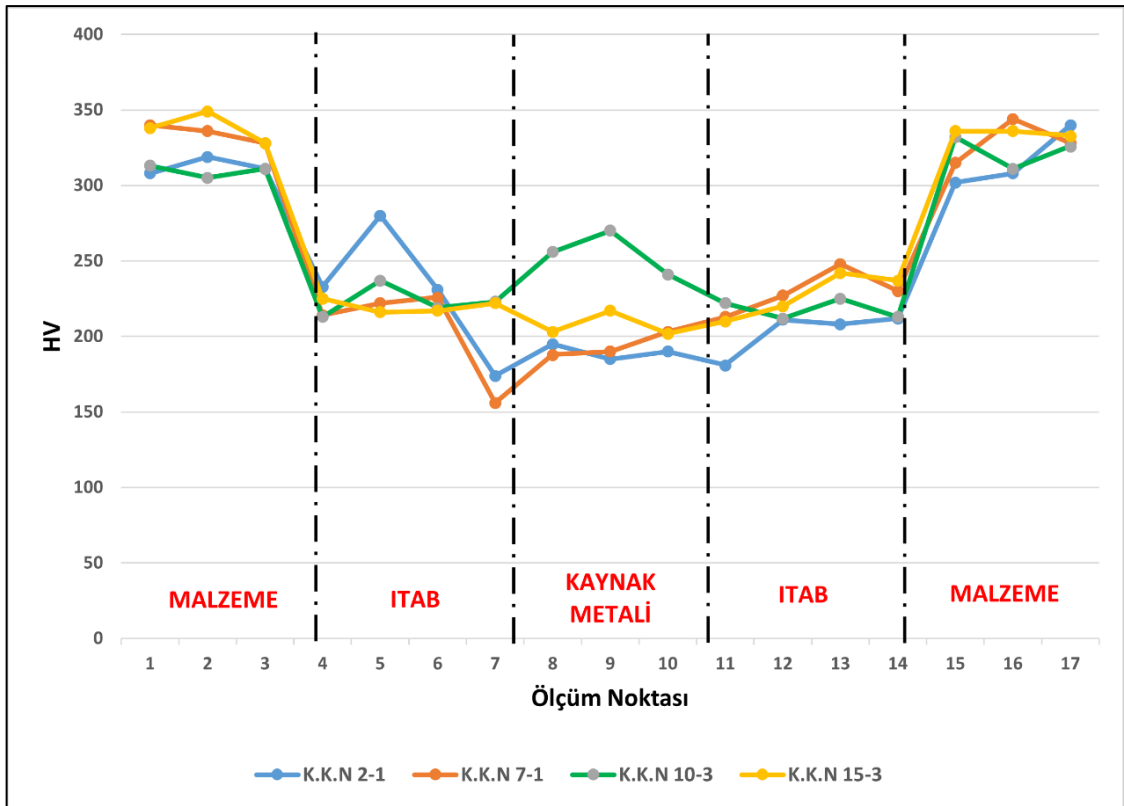
Nokta	Ölçüm Yapılan Alan	Sertlik Değeri (HV)			
		K.K.N 2-1	K.K.N 7-1	K.K.N 10-3	K.K.N 15-3
1	Malzeme	308	340	313	338
2	Malzeme	319	336	305	349
3	Malzeme	311	328	311	328
4	ITAB	233	214	213	225
5	ITAB	280	222	237	216
6	ITAB	231	226	219	217
7	Kaynak metali	174	156	223	222
8	Kaynak metali	195	188	256	203
9	Kaynak metali	185	190	270	217
10	Kaynak metali	190	203	241	202
11	Kaynak metali	181	213	222	210
12	ITAB	211	227	212	220
13	ITAB	208	248	225	242
14	ITAB	212	230	213	237
15	Malzeme	302	315	332	336
16	Malzeme	308	344	311	336
17	Malzeme	340	328	326	333

Uygulanan mikro sertlik ölçme deneyleri neticesinde;

- Sertlik değerlerinin hepsi 350 HV'nin altındadır. Düşük karbonlu, az alaşımlı çeliklerin kaynağında ITAB'da çatlamaya karşı emniyet için sertliğin 350 HV sertlik değerini geçmemesi tavsiye edilmektedir [50].
- Tüm numunelerin ITAB ve kaynak metali sertlik değerlerinde azalma göze çarpmaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada Mo etkisi yanında artan ısı girdisi ile sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür [51]. Isı girdisindeki artışla beraber soğuma hızı azalır, bu da ITAB ve kaynak metalinde tane

büyümesiyle sonuçlanır. Böylece sertlikte azalma meydana gelir [42]. Yüksek ısı girdisini sağlayan etken tozaltı ark kaynağı yöntemidir. Fakat kaynak metali ve ITAB'daki sertlik düşüşüne rağmen, tüm numuneler patlatma ve basınçla yorulma deneylerinin gereksinimlerini karşılamıştır.

- İçeriğinde %0,50 oranında Mo bulunan SW 702Mo kaynak telinin kullanıldığı numunelerde kaynak metalleriindeki sertlik değerlerinin S1 kaynak teli kullanılan numunelerinkine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Mo miktarı arttıkça, sertlik değerleri de çekme testi sonuçlarıyla uyumlu olarak artmıştır [52].



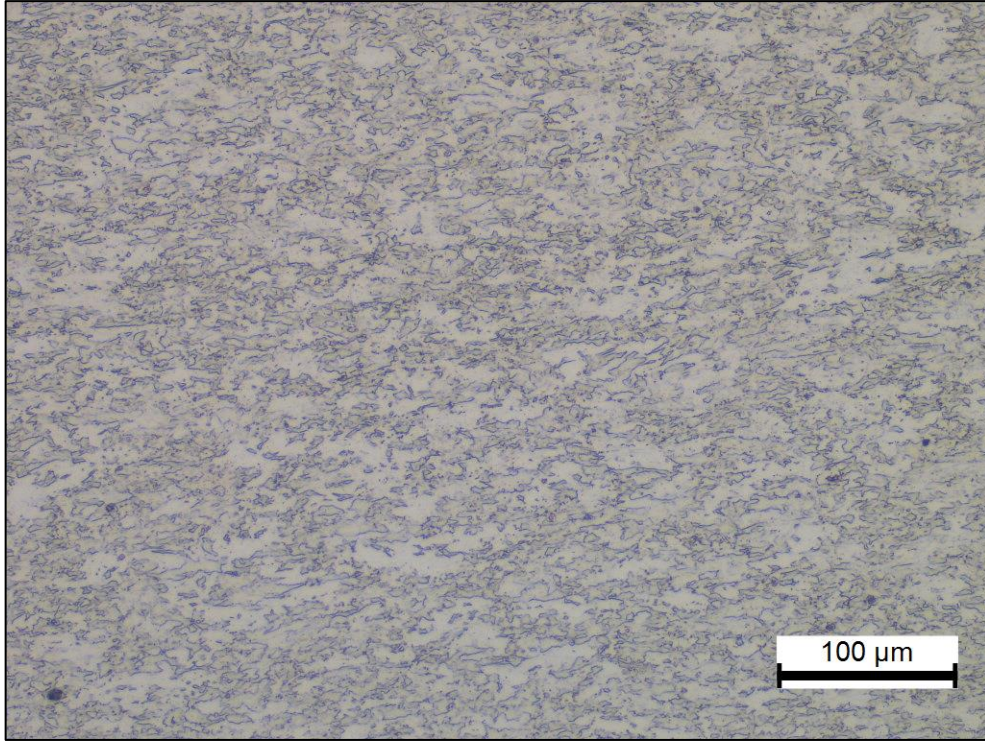
Şekil 4.11 Vickers sertlik grafiği

4.9 OM İle Mikro Görüntüleme

Modern ince taneli yüksek mukavemetli düşük alaşımli çelikler (HSLA), doğru şekilde kontrol altına alınmış termomekanik proses ve mikro alaşımlandırma sayesinde mukavemet özelliklerini kazanırlar [1]. Alaşım elementleri genellikle V,

Ti ve Nb'dir. Bu elementler ince karbürler, nitrürler veya karbonitrürler oluşturur ve matrisin tane incelmeye ve güçlenmesine katkıda bulunurlar. Düşük miktardaki karbon oranı sayesinde bu çeliklerin soğuk çatlak eğilimi çok azdır fakat mikroyapıları ve dolayısıyla mekanik özellikleri kaynak işleminden etkilenmeye oldukça müsaittir. Tane sınırlarını ve yapısını stabilize eden ince çökeltilerin çözülmesinin meydana geldiği 1100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, ITAB'da yoğun tane irileşmesi vardır. Bu sebepten ötürü kaynaktaki ısı girdisinin azaltılması tavsiye edilir [2].

S460MC çeliğinin mikroyapısı ince ferrit taneciklerinden (OM görüntülerinde açık renkte görünen) ve sınırlı hacimdeki perlit adalarından (OM görüntülerinde koyu renkte görünen) oluşmaktadır [53]. S460MC'ye ait mikroyapı Şekil 4.12'de gösterilmektedir.

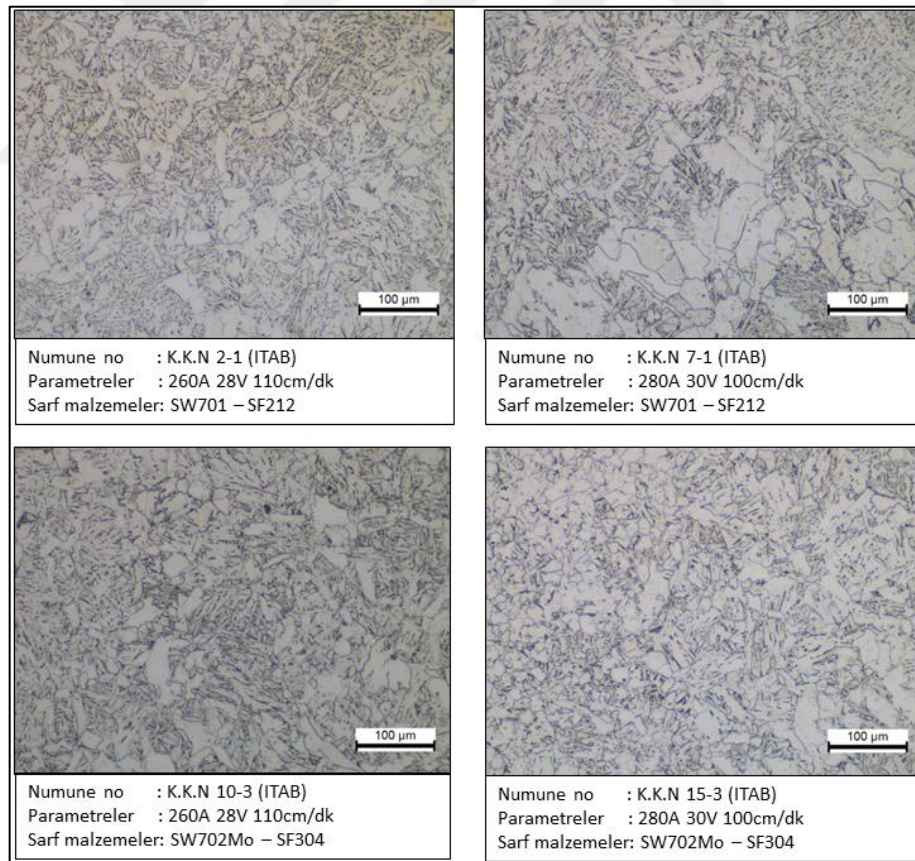


Şekil 4.12 S460MC mikroyapısı

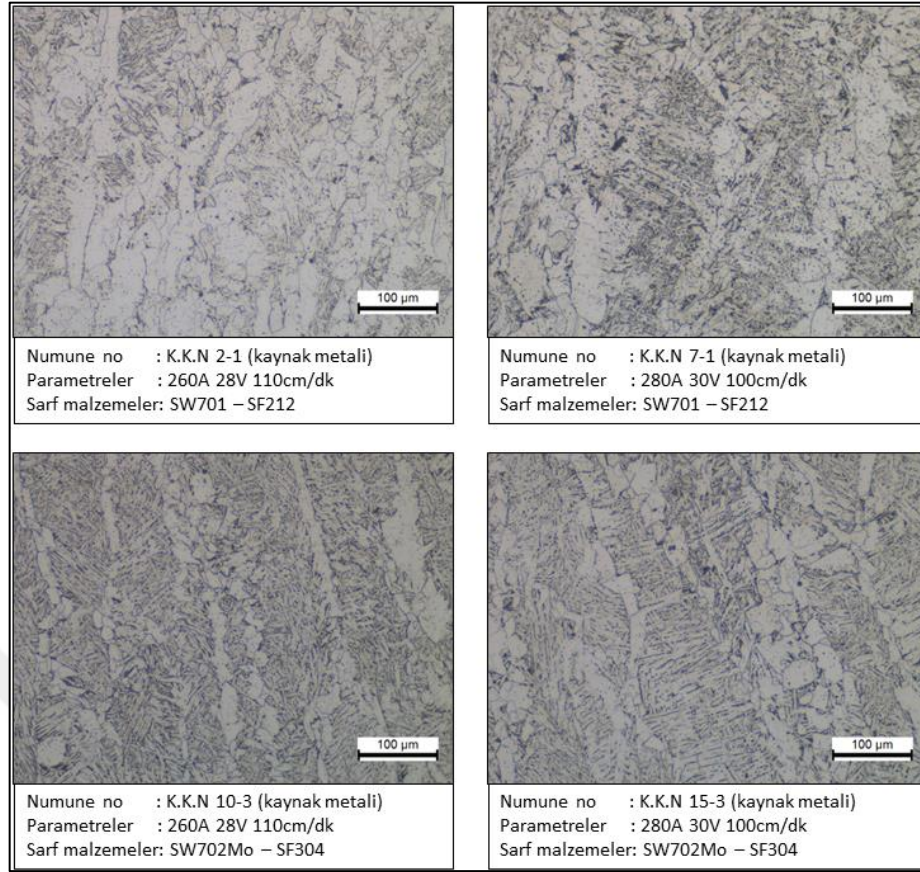
Mikro görüntüleme deneyleri neticesinde K.K.N 2-1, K.K.N 7-1, K.K.N 10-3 ve K.K.N 15-3 numunelerinin ana malzeme, ITAB ve kaynak bölgelerine ait 200x OM görüntüleri elde edilmiştir. İçeriğindeki kaynak sarf malzemeleri ve uygulanan kaynak parametreleri dikkate alınarak, numunelere ait 200x ITAB ve kaynak metali OM görüntüleri Şekil 4-13 ve Şekil 4-14'te gösterilmektedir.

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gösterilen mikroyapılar Şekil 4.12'deki ana malzeme mikroyapısı ile karşılaştırıldığında, her bir numunenin ana malzeme bölgesinde ITAB ve kaynak metali bölgesine göre daha ince tane yapısı gözlemlenmiştir. Mikroyapı, ana metalden ITAB'a ve kaynak metaline doğru gidildikçe ince taneli ferritten iğnemi ferrite dönüşmüştür ve böylece ana malzemeye göre daha iri bir tane yapısı karakteristiği gözlemlenmiştir [5].

Kaynak metali tane yapısı, mekanik özellikleri önemli ölçüde etkileyebilir. Bu yüzden mekanik deney sonuçlarını, mikroyapı deney sonuçlarıyla desteklemek son derece önemlidir. Bu doğrultuda kaynak metali bölgesinin tane yapısının inceltmesi mekanik özellikleri iyileştirme adına da son derece önemlidir. Kaynak metali bölgesinde ince tanelerin oluşumunun iki önemli avantajı vardır. Birincisi, ince taneler, kaynak sırasında kaynak metalinin katılabilirken çatlama eğilimi göstermesini azaltır. İkincisi ise kaynak dikişinin süneklik ve kırılma tokluğu gibi mekanik özelliklerini iyileştirebilir [54].



Şekil 4.13 ITAB 200x OM görüntüleri



Şekil 4.14 Kaynak metali 200x OM görüntüleri

Daha önce yapılan bir çalışmada kaynak elektrodunun Mo miktarı artırılarak, Mo elementinin ferritik yüksek mukavemetli çelik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mo miktarı arttıkça, ITAB-kaynak metali katılma yönündeki mikroyapıda tane inceliği gözlemlenmiştir [52]. Mo elementinin tane inceltici etkisi Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'teki mikro görüntülere bakıldığında belirgin bir şekilde görülmektedir. Aynı kaynak parametrelerinde kaynak edilmiş K.K.N 2-1 ve K.K.N 10-3 numunelerinin ITAB ve kaynak metali mikroyapıları karşılaştırıldığında, ergiyen elektrodunda Mo elementi bulunan K.K.N 10-3 numunesinin daha ince tane yapısına sahip olduğu, benzer şekilde, aynı kaynak parametrelerinde kaynak edilmiş K.K.N 7-1 ve K.K.N 15-3 karşılaştırıldığında, ergiyen elektrodunda Mo elementi bulunan K.K.N 15-3 numunesinin daha ince tane yapısına sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar uygulanan çekme ve mikro sertlik ölçme deneylerini de destekler niteliktedir. Aynı sarf malzemeler kullanılarak farklı parametrelerde kaynak edilmiş numunelere ait mikroyapılar karşılaştırıldığında ise belirgin tane yapısı farklılıkları gözükmemektedir.

4.10 Maliyet Analizi

Tahribatlı ve tahribatsız deneylerin tamamlanması sonrası maliyet analizi çalışması gerçekleştirilmiştir. Deney verilerine ek olarak, çalışma, maliyet yönüyle de ele alınmıştır. Maliyet analizinde Ağustos 2022 kuru (18,20 USD/TRY) baz alınmıştır ve hesaplamalar Türk Lirası cinsinden yapılmıştır.

Maliyet analizi çalışması kapsamında;

- S1 - S A AR 1 sarf malzemeleriyle kaynak edilen 1,50 mm S460MC çeliği ile standart LPG tüp çeliklerinden olan P310NB çeliği ile imal edilen LPG tüplerinin basınca maruz kalan kısımları maliyet yönünden karşılaştırılmıştır.
- 1,50 mm S460MC çeliğinden imal edilen LPG tüpünün basınca maruz kalan kısmının çevresel tozaltı kaynağında kullanılan S1 - S A AR 1 ve S2Mo - S A AB 1 sarf malzemelerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Dünya genelinde P310NB çeliğinden imal edilen LPG tüpleri dikkate alınarak, maliyet analizinde P310NB çeliğinin kalınlığı 2,20 mm olarak alınmıştır.

LPG tüpü imalinde kullanılan sac metal malzemelerin boyutsal değerleri Tablo 4.5'te verilmektedir. Sac metal malzeme maliyetlerinin karşılaştırılması Tablo 4.6'da, sarf malzeme maliyetlerinin karşılaştırılması ise Tablo 4.7'de gösterilmektedir.

Tablolarda yer alan ağırlık değerleri tüplerin basınca maruz kalan kısımlarının ağırlığıdır. LPG tüpü başına tel ve toz sarfiyatı 100'er gramdır.

Tablo 4.5 LPG tüpü ve sac metallerin boyutsal değerleri

Malzeme	LPG Tüpü Dış Çapı (mm)	LPG Tüpü Hacmi (L)	Sac Metal Kalınlığı (mm)
P310NB	300	26	2,20 mm
S460MC	300	26	1,50 mm

Tablo 4.6 Sac metal maliyeti analizi

Sac Metal Maliyeti		Ağırlık (kg)	Sac Metal Maliyeti (TL/tüp)
Ürün	Fiyat (TL/kg)		
P310NB	16,38		
S460MC	18,2		
P310NB LPG tüpü		6,89	112,92
S460MC LPG tüpü		4,88	88,89

Tablo 4.7 Sarf malzeme maliyeti analizi

Sarf Malzeme Maliyeti				
Ürün	Fiyat (TL/kg)	Tüketim (g/tüp)	Sarf Malzeme Maliyetleri (TL/tüp)	Tel-Toz Toplam Maliyetler (TL/tüp)
S1	28,30	100	2,83	5,78
S A AR 1	29,46	100	2,95	
S2Mo	32,18	100	3,22	5,67
S A AB 1	24,55	100	2,46	

Sac metal ve sarf malzeme maliyeti hesaplamaları sonucu, S460MC çeliğine ait maliyet 88,89 TL/tüp ve S2Mo - S A AB 1 sarf malzemelerine ait toplam maliyet ise 5,67 TL/tüp olarak hesaplanmıştır. S460MC sac metali ve S2Mo - S A AB 1 sarf malzemelerinden imal edilen LPG tüpünün malzeme maliyetleri yönünden en düşük maliyetli tüp olduğu hesaplanmıştır.

Malzeme maliyetlerinin karşılaştırılmasına ek olarak, P310NB ve S460MC çeliğinden imal edilen LPG tüplerinin tozaltı ark kaynağı prosesine ait işçilik maliyetleri de karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, S460MC çeliğinden imal edilen LPG tüpünün basınca maruz kalan kısmının çevresel tozaltı kaynağı 110 cm/dk ilerleme hızında başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. P310NB çeliğinden imal edilen LPG tüpünün basınca maruz kalan kısmının çevresel tozaltı kaynağına ait ilerleme hızının 85 cm/dk olduğu ise çalışma öncesinde bilinmektedir. İşçilik maliyetlerinin karşılaştırılması Tablo 4.8'de gösterilmektedir.

Tablo 4.8 İşçilik maliyeti analizi

İşçilik Maliyeti					
Ürün	Kaynak uzunluğu (mm)	Hız (cm/dk)	Kaynak Süresi (sn/tüp)	İşçilik (TL/sa)	İşçilik maliyeti (TL/tüp)
P310NB LPG tüpü	1000	85	70,6	45,0	0,88
S460MC LPG tüpü	1000	110	54,5	45,0	0,68

İşçilik maliyeti hesaplamaları sonucu S460MC LPG tüpünün basınca maruz kalan kısmının tozaltı ark kaynağında 25 cm/dk'lık hızlanma (yaklaşık %29) ve ürün başına 0,20 TL (yaklaşık %23) işçilikten olmak üzere kazanç elde edilmiştir. Sac metal malzeme, sarf malzeme ve işçilik maliyetlerinin hesaplanması sonrası her bir LPG tüpü için tüm maliyetler toplanmıştır. Toplam maliyet analizi Tablo 4.9'da gösterilmektedir.

Tablo 4.9 Toplam maliyet analizi

Ürün	Toplam Maliyet (TL/tüp)
P310NB LPG tüpü + S1 + S A AR 1	119,58
S460MC LPG tüpü + S1 + S A AR 1	95,35
S460MC LPG tüpü + S2Mo + S A AB 1	95,24

İşçilik dahil tüm maliyetlerin toplanması neticesinde, S460MC çeliğinden ve S2Mo - S A AB 1 sarf malzemelerinden imal edilen LPG tüpünün maliyeti 95,24 TL/tüp olarak hesaplanmıştır ve en düşük maliyetli tüp olarak bulunmuştur.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, LPG tüpü hammadde olarak geleneksel LPG tüp çeliklerinden daha yüksek mukavemetteki 1,50 mm et kalınlığında S460MC çeliği kullanılmıştır. Tozaltı ark kaynağı ile kaynak edilen numuneler imal edilmiş ve tahribatlı-tahribatsız deneyler yapılmıştır. İlk aşamada gerçekleştirilen parametre optimizasyonu çalışması neticesinde, 250-280 A akım şiddeti, 27-30 V gerilim, 90-110 cm/dk ilerleme hızı aralığındaki parametrelerle ve S1 - S A AR 1 sarf malzemeleriyle kaynak edilen numunelerin görsel, radyografik (X-ışını) ve makroskopik muayene deneyleri başarıyla sonuçlanmıştır. Çalışmanın devamında, S1 - S A AR 1 ve S2Mo - S A AB 1 sarf malzeme kombinasyonlarıyla beraber uygulanacak kaynak parametreleri olarak P.O.N-5 (260A, 28V, 100 cm/dk) ve P.O.N-9 (280A, 30V, 110 cm/dk)'a ait parametreler seçilmiştir ve bu parametre-sarf malzeme kombinasyonlarına deney planı oluşturulmuştur. Deney planı oluşturulurken klasik deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır ve planın içeriğini görsel muayene, radyografik (X-ışını) muayene, çekme, eğme, makro inceleme, mikro sertlik ölçme, OM ile mikro görüntüleme, patlatma-hacimsel genişleme ve basınçla yorulma deneyleri oluşturmuştur.

Deney planı kapsamındaki kaynak kombinasyon numuneleri ilgili standartların isterlerine göre görsel, radyografik (X-ışını) ve makroskopik muayenelerden başarıyla geçmiştir.

Çekme deneyleri neticesinde, kaynak bölgesinden kopan numune olmamıştır. Molibden elementinin mekanik dayanımı arttırdığı gözlemlenmiştir.

Patlatma-hacimsel genişleme deneyleri neticesinde, her bir numune için ölçülen patlama basıncı (Pb), 67,5 bar değerinin üstünde gelmiştir ve patlama basıncı gereksinimi tüm numuneler için sağlanmıştır. Patlama sonucunda meydana gelen yarılma, çevresel kaynak bölgesinden olmamıştır ve diğer muayene gereksinimleri de karşılanmıştır.

Basınçla yorulma deneyleri neticesinde, tüm numuneler min. 12000 çevrime dayanım gereksinimini sağlamıştır.

Mikro sertlik ölçme deneyleri neticesinde, sertlik değerlerinin hepsi 350 HV'nin altında gelmiştir. Tüm numunelerin ITAB ve kaynak metali sertlik değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu durum tozaltı kaynak yönteminin sağladığı yüksek ısı girdisine dayandırılmıştır. Tüm numunelerin patlatma ve basınçla yorulma deneylerinin gereksinimlerini karşılamış olması kaynak metali ve ITAB'daki sertlik düşüşünü tolere edilebilir kılmıştır. İçeriğinde Mo bulunan kaynak telinin kullanıldığı numunelerde kaynak metalleriindeki sertlik değerlerinin diğer numunelerden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Mo miktarı arttıkça, sertlik değerleri de çekme testi sonuçlarıyla uyumlu olarak artmıştır.

OM ile mikro görüntüleme deneyleri neticesinde, her bir numunenin ana malzeme bölgesinde, ITAB ve kaynak metali bölgesine göre daha ince tane yapısı gözlemlenmiştir. Mo elementinin tane inceltici etkisi ITAB ve kaynak metali mikro görüntülerine bakıldığında belirgin bir şekilde görülmüştür. Bu sonuçlar uygulanan çekme ve mikro sertlik ölçme deneylerini de destekler niteliktedir.

LPG tüpünü hafifletme amacıyla kullanılan 1,50 mm S460MC HSLA çeliği ve S2Mo - S A AB 1 sarf malzeme kombinasyonu malzeme ve işçilik maliyetleri açısından pozitif neticeler vermiştir. Elde edilen teknik iyileştirmeler maliyet analizi sonuçlarıyla da desteklenmiştir.

S460MC'den daha yüksek mukavemete sahip HSLA çelikleri ya da alüminyum gibi özgül ağırlığı daha düşük metaller kullanılarak, LPG tüplerini hafifletme çalışmaları gelecekte devam ettirilebilir. Tozaltı ark kaynağı yöntemi yerine ısı girdisi daha düşük diğer ark kaynak yöntemleri (örn. gazaltı ark kaynağı) alternatif olarak denenebilir. Bu sayede ITAB ve kaynak metali bölgelerinde meydana gelen sertlik değerlerindeki düşüşler önlenir. Bu çalışmada numunelere kaynak öncesi ve sonrası ısıl işlem uygulanmamıştır. Kaynak sonrası uygun sıcaklıkta ve sürede uygulanacak olan normalizasyon tavlamaının kaynak dikişinin mekanik dayanım ve sertlik değerleri ile mikroyapı karakteristiğine olan etkisi ısıl işlemsiz numunelerle karşılaştırılarak gösterilebilir.

- [1] H. Sebestova, P. Hornik, L. Mrna and P. Dolezal, "Microstructure and mechanical properties of hybrid LasTIG welds of HSLA steel," in 10th CIRP Conference on Photonic Technologies, Brno, 2018.
- [2] J. Moravec, J. Sobotka, P. Solfronk and R. Thakral, "Heat Input Influence on the Fatigue Life of Welds," *Metals*, vol. 10, no. 10, p. 1288, 2020.
- [3] Flachstahl Salzgitter GmbH, "S460MC," Salzgitter.
- [4] A. A. Akay, Y. Kaya and N. Kahraman, "Farklı Özellikteki Malzemelerin Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Birleştirmelerin Tahribatlı ve Tahribatsız Muayenesi," *SAÜ. Fen Bil. Der.*, vol. 17, no. 1, pp. 85-96, 2013.
- [5] A. Saoudi, M. Fellah, A. Sedik, D. Lerari, F. Khamouli, L. Atoui and K. Bachari, "Assessment and statistical correlation of mechanical properties of double sided single pass submerged arc welded line pipe steel," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 23, no. 2, pp. 452-461, 2020.
- [6] N. Kahraman, B. Gülenç and A. Durgutlu, "Investigation of the Effect of Electrode Extension Distance on Microstructural and Mechanical Properties of Low Carbon Steel Welded with Submerged Arc Welding," *G.U. Journal of Science*, vol. 18, no. 3, pp. 473-480, 2005.
- [7] P. Peasura, "Investigation of the Effects of Submerged Arc Welding Process Parameters on the Mechanical Properties of Pressure Vessel Steel ASTM A283 Grade A," *Hindawi Journal of Engineering*, 2017.
- [8] U. Caligulu and H. Kejanli, "P460-St52 Malzemelerin Tozaltı Kaynağında Amper Değerinin Etkisi," in 2. Savunma Sanayi Sempozyumu, Kırıkkale, 2017.
- [9] A. Tom, G. M. Pius, G. Joseph, J. Jose and M. J. Joseph, "Design and Analysis of LPG Cylinder," *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)*, vol. 6, no. 2, pp. 17-31, 2014.
- [10] "TS EN 14140: LPG donanım ve aksesuarları - Taşınabilir, tekrar doldurulabilir, kaynaklı çelik tüpler - Alternatif tasarım ve imalat," *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2015.

- [11] J. Norrish, Advanced Welding Processes: Technologies and Process Control, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [12] S. Anık and K. Tülbentçi, "Tozaltı Kaynak Tekniği," GEDİK KAYNAK SAN. TİC. A.Ş, İstanbul, 2007.
- [13] S. Kou, Welding Metallurgy, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [14] American Welding Society, Welding Handbook: Welding Processes, Arc and Gas Welding and Cutting, Brazing and Soldering, 7 ed., vol. 2, Miami, 1976.
- [15] S. Anık, "Kaynak Tekniği El Kitabı," Gedik Eğitim Vakfı, İstanbul, 1991.
- [16] E. Klahlı, "Tozaltı Kaynak Yöntemi," Oerlikon Yayını, 1988.
- [17] Hasçelik, "Teknik Katalog," Kocaeli, 2014.
- [18] A. Aran, "Malzeme Bilgisi," İT Makine Fakültesi, İstanbul, 2008.
- [19] "TS EN 10027-1: Çeliklerin Kısa Gösteriliş Sistemleri - Bölüm 1: elik Adları," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2017.
- [20] "TS EN 10027-2: Çeliklerin Kısa Gösteriliş Sistemleri - Bölüm 2: elik," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [21] Avrupa Ekonomik Komisyonu İ Ulaştırma Komitesi, "ADR: Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Anlaşma," New York, 2021.
- [22] OTIF, "RID: Uluslararası Demiryolu Taşımalarına ilişkin Sözleşme (COTIF) Ek C – Tehlikeli Malların Demiryolu ile Uluslararası Taşımacılığına ilişkin Düzenlemeler (RID)," 2021.
- [23] Oyak Maden Metalurji Grubu, "Yassı rn Kataloğu," 2020.
- [24] The Lincoln Electric Company, "Power Wave® AC/DC 1000 SD CE Kullanıcı El Kitabı," Cleveland, 2017.
- [25] Askaynak, "Power Wave AC/DC 1000 SD CE, rn Broşürü," 2015.
- [26] Askaynak, "MAXsa 10 Controller & 22 Feed Head, rn Broşürü," 2018.

- [27] American Welding Society, Welding Handbook: Fundamentals of Welding, 7 ed., vol. 1, Miami, 1981.
- [28] Magmaweld, "SW 701 Datasheet," 2021.
- [29] Magmaweld, "SF 212 Datasheet," 2021.
- [30] Magmaweld, "SW 702Mo Datasheet," 2021.
- [31] Magmaweld, "SW 304 Datasheet," 2021.
- [32] "TS EN ISO 17637: Ergitme kaynaklarının tahribatsız muayenesi-Ergitme kaynaklı birleştirmeleri gözle muayene," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2017.
- [33] "TS EN ISO 17636-1: Kaynak dikişlerinin tahribatsız muayenesi - Radyografik muayene - Bölüm 1: Filmler ve gama ışını teknikleri," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [34] "TS EN ISO 17639: Metalik malzemelerdeki kaynaklarda tahribatlı muayene- Kaynakların makroskopik ve mikroskopik muayenesi," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [35] "TS EN ISO 5817: Kaynak – Çelik, nikel, titanyum ve bunların alaşımlarında ergitme kaynaklı (demet kaynağı hariç) birleştirmeler – Kusurlar için kalite seviyeleri," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [36] "TS EN ISO 19232-1: Tahribatsız muayene-Radyografların görüntü kalitesi-Kısım 1: Görüntü kalite göstergeleri (tel tipi) – Görüntü kalite değerinin tespiti," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [37] "TS EN ISO 19232-3: Tahribatsız muayene – Radyografların görüntü kalitesi – Bölüm 3: Görüntü kalite sınıfları," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [38] "TS EN ISO 6520-1: Kaynak ve ilgili işlemler – Metalik malzemelerde geometrik kusurların sınıflandırılması – Bölüm 1: Ergitme kaynağı," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [39] "TSE CEN ISO/TR 16060: Metalik malzemelerde kaynaklar üzerinde tahribatlı muayene- Makroskopik ve mikroskopik inceleme için dağlayıcılar.," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2014.

- [40] B. Gökçe and S. Taşgetiren, "Kalite İçin Deney Tasarımı," Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, vol. 6, no. 1, pp. 71-83, 2009.
- [41] Z. Ma, M. Zhuang and M. Li, "Effect of main arc voltage on arc behavior and droplet transfer in tri-arc twin wire welding," Journal of Materials Research and Technology, vol. 9, no. 3, pp. 4876-4883, 2020.
- [42] E. K. Hamd, A. S. Alwan and I. K. Irthia, "Study the Effect of Welding Heat Input on the Microstructure, Hardness, and Impact Toughness of AISI 1015 Steel," Al-Khwarizmi Engineering Journal, vol. 14, no. 1, pp. 118-127, 2018.
- [43] "TS EN ISO 4136: Metalik malzemelerin kaynakları üzerinde tahribatlı deneyler-Enine çekme deneyi," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [44] "TS EN ISO 5173: Metalik malzemelerde kaynak dikişleri üzerinde tahribatlı muayeneler-Eğme deneyleri," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [45] "TS EN ISO 9015-2: Metalik malzeme kaynaklarında tahribatlı deneyler-Sertlik deneyi-Kısım 2: Kaynaklı birleştirmelerde mikro sertlik deneyi," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2016.
- [46] "TS EN ISO 148-1: Metalik malzemeler-Charpy vurma deneyi- Bölüm 1: Deney metodu," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2017.
- [47] C. Mohammed, "Innovative Techniques in Non-Destructive Testing and Industrial Applications on Pressure Equipment," Procedia Engineering, vol. 46, pp. 266-278, 2012.
- [48] "TS EN ISO 6507-1: Metalik malzemeler - Vickers sertlik deneyi - Bölüm 1: Deney metodu," Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2018.
- [49] K. Sirin, S. Y. Sirin and E. Kaluc, "Influence of the Chemical Composition of Weld Electrode on the Mechanical Properties of Submerged Arc Welded Pipe," Journal of Materials Processing Technology, 2016.
- [50] A. A. Akay, Y. Kaya and N. Kahraman, "Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen X60, X65 ve X70 Çeliklerin Kaynak Bölgesinin Etüdü," Karaelmas Science and Engineering Journal, vol. 3, no. 2, pp. 34-42, 2013.
- [51] D. Viano, N. Ahmed and G. Schumann, "Influence of heat input and travel speed on microstructure and mechanical properties of double tandem submerged arc high strength low alloy steel weldments," Science and Technology of Welding and Joining, vol. 5, no. 1, pp. 26-34, 2000.

- [52] E. Surian, L. De Vedia and M. De Rissone, "Influence of Molybdenum on Ferritic High-Strength SMAW All-Weld-Metal Properties," *Welding Journal*, vol. 84, no. 4, pp. 53-62, 2005.
- [53] K. Zgutova and M. Pitonak, "Attenuation of Barkhausen Noise Emission due to Variable Coating Thickness," *MDPI*, vol. 11, p. 263., 2021.
- [54] J. Roy and R. N. Rai, "Effect of TiO₂ enriched fluxes on the bead geometry, grain size and hardness in submerged arc welds," *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 56, no. 4, p. 313, 2018.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. U. Nuhoğlu, T.Mert and M. Tümer, “Investigation of the Effect of Solid Wire and Flux Combinations Used in Submerged Arc Welding of the LPG Cylinders on Mechanical Properties”, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, vol. 37, no. 2, pp. 509-517, 2022.

