İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FREKANS KAYNAK METODU İLE KAYNAK YAPILAN BORULARIN FARKLI STANDARTLARDA ÇELİKLER KULLANILARAK KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sarp KILIÇ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FREKANS KAYNAK METODU İLE KAYNAK YAPILAN BORULARIN FARKLI STANDARTLARDA ÇELİKLER KULLANILARAK KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sarp KILIÇ
(506141442)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Proğramı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mahmut Ercan AÇMA

HAZİRAN 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

CHARACTERIZATION OF PIPES WELDED BY HIGH-FREQUENCY WELDING METHOD USING DIFFERENT STEEL GRADES ACCORDING TO VARIOUS STANDARDS

M.Sc. THESIS

Sarp KILIÇ
(506141442)

Department of Metallurgical and Material Engineering

Material Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Mahmut Ercan AÇMA

JUNE 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 506141442 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Sarp KILIÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "YÜKSEK FREKANS KAYNAK METODU İLE KAYNAK YAPILAN BORULARIN FARKLI STANDARTLARDA ÇELİKLER KULLANILARAK KARAKTERİZASYONU" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Mahmut Ercan AÇMA** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Mehmet Şeref SÖNMEZ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 21 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 11 Haziran 2024

Anneme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca sonsuz sabırla desteklerini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Mahmut Ercan AÇMA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımda her türlü destekte bulunan tüm teknisyen arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan desteklerini hep hissettiğim eşim Tuğba KILIÇ'a teşekkür ederim.

Haziran 2024

Sarp KILIÇ
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Literatür Araştırması 2
2. ÇELİK BORU ÜRETİMİ **9**
2.1 Dikişsiz Boru Üretimi 9
2.2 Dikişli Boru Üretimi 11
2.2.1 Toz Altı Kaynak Metodu (SAW) 14
2.2.2 Fretz-Moon Prosesi 15
2.2.3 Elektrik Direnç Kaynağı 17
2.2.3.1 DC Prosesi 17
2.2.3.2 Düşük Frekans Kaynak Prosesi 17
2.2.3.3 Yüksek Frekans Kaynak Prosesi 18
3. ÜRETİM STANDARTLARI **31**
3.1 EN ISO 10255 31
3.2 EN ISO 10217-1 32
3.3 EN ISO 10217-2 32
3.4 EN ISO 10217-3 32
3.5 EN ISO 10219-1 32
3.6 EN ISO 10219-2 33
3.7 API 5L-Line Pipe 33
3.8 API 5CT-Casing and Tubing 33
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **35**
4.1 Metalografik Numune Hazırlama 36
4.2 Sertlik Testleri 37
4.3 Çekme Testleri 38
4.4 Kimyasal Analiz Testleri 39
5. DENEYSEL SONUÇLAR **41**
5.1 25m/dak Hızındaki Deneysel Sonuçlar 41
5.1.1 Çekme Testi Sonuçları 41
5.1.2 Sertlik Testi Sonuçları 42
5.1.3 Kimyasal Analiz Sonuçları 43
5.1.4 Mikroyapı İncelemesi ve Karakterizasyonu 44

5.2 35m/dak Hızındaki Deneysel Sonuçlar 48
5.2.1 Çekme Testi Sonuçları 48
5.2.2 Sertlik Testi Sonuçları 48
5.2.3 Kimyasal Analiz Sonuçları 50
5.2.4 Mikroyapı İncelemesi ve Karakterizasyonu 51
5.3 45m/dak Hızındaki Deneysel Sonuçlar 55
5.3.1 Çekme Testi Sonuçları 55
5.3.2 Sertlik Testi Sonuçları 55
5.3.3 Kimyasal Analiz Sonuçları 57
5.3.4 Mikroyapı İncelemesi ve Karakterizasyonu 58
5.4 55m/dak Hızındaki Deneysel Sonuçlar 62
5.4.1 Çekme Testi Sonuçları 62
5.4.2 Sertlik Testi Sonuçları 62
5.4.3 Kimyasal Analiz Sonuçları 64
5.4.4 Mikroyapı İncelemesi ve Karakterizasyonu 65
5.5 Sonuçların Karşılaştırılması 69
6. GENEL SONUÇLAR 71
6.1 Öneriler 75
KAYNAKLAR 77
ÖZGEÇMİŞ 79

KISALTMALAR

ERW **:** Electric Resistance Welding
HFIW **:** Yüksek frekans indüksiyon kaynağı
SAW **:** Tozaltı kaynağı
CTA **:** Merkezi Ayarlama Mekanizması
ISO **:** Uluslararsı standart organizasyonu
ITAB **:** Isı tesiri altındaki bölge
HFI **:** Yüksek frekans indüksiyon
HF **:** Yüksek frekans
OD **:** Dış çap

SEMBOLLER

δ	**:** Nüfuziyet derinliği
ρ	**:** Elektrik direnci
μ	**:** Manyetik geçrigenlik
f	**:** Frekans
q	**:** Faz yükü
t	**:** Zaman

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Dikişli boru üretim prosesleri **13**
Çizelge 4.1 : Kullanılan Malzemeler **35**
Çizelge 5.1 : Kimyasal Analiz Sonuçları **43**
Çizelge 5.2 : Kimyasal Analiz Sonuçları **50**
Çizelge 5.3 : Kimyasal Analiz Sonuçları **57**
Çizelge 5.4 : Kimyasal Analiz Sonuçları **64**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Dikişsiz boru üretimi için süreç aralıkları **10**
Şekil 2.2 : Dikişsiz boru üretim akışı[15]. **11**
Şekil 2.3 : Toz altı kaynak metodu ile boru üretim prosesi **15**
Şekil 2.4 : Toz altı kaynak metodu ile kaynak kesitinin makro görüntüsü **15**
Şekil 2.5 : Fretz-Moon Prosesi-Alttan görünüş **16**
Şekil 2.6 : Düşük frekans Kaynak Prosesi **18**
Şekil 2.7 : Yüksek Frekans Etkisi[16]. **20**
Şekil 2.8 : Yüksek Frekans Etkisi **20**
Şekil 2.9 : Roll form Prosesinin adımları. **21**
Şekil 2.10 : Roll form Prosesinin adımları **22**
Şekil 2.11 : CTA form verme Prosesi görünümü. **23**
Şekil 2.12 : Kontak Metodu **23**
Şekil 2.13 : İndüksiyon Metodu **24**
Şekil 2.14 : Kaynağın oluşumu **25**
Şekil 2.15 : Kaynağın gerçek zamanlı oluşumu[19]. **25**
Şekil 2.16 : Paralel konumlanmış bant kenarlarındaki ısı dağılımları **26**
Şekil 2.17 : Paralel konumlanmamış bant kenarlarındaki ısı dağılımları **26**
Şekil 2.18 : Empeder kesit görünümü **27**
Şekil 2.19 : Empederin boru içine konumlandırılması **27**
Şekil 2.20 : Akıma Empederin Etkisi **28**
Şekil 2.21 : Thermatool tavsiye edilen değerler **28**
Şekil 2.22 : Büyük çap baskı röleleri ve küçük çap baskı röleleri Vee uzunluğuna etkisi **29**
Şekil 2.23 : Yüksek Frekans Kaynak Prosesi **30**
Şekil 2.24 : Tipik Makro görüntüsü **30**
Şekil 2.25 : HFIW Kaynak Prosesi **31**
Şekil 4.1 : Metalografik numune örnekleri **36**
Şekil 4.2 : Metal Mikroskopları **37**
Şekil 4.3 : Sertlik Cihazı **37**
Şekil 4.4 : Çekme numunesi örnekleri **38**
Şekil 4.5 : Çekme Makinesi **39**
Şekil 4.6 : Kimyasal Analiz Cihazı **40**
Şekil 5.1 : 25m/dak hızındaki Çekme testi sonuçları **41**
Şekil 5.2 : Sertlik bölgeleri **42**
Şekil 5.3 : 25m/dak hızındaki Sertlik testi sonuçları **42**
Şekil 5.4 : Mikroyapı görünümleri (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO **44**
Şekil 5.5 : Mikroyapı görünümleri (e) 6-S355J2H, (f) 7-P235TR1, (g) 8-P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH **45**
Şekil 5.6 : Mikroyapı görünümleri (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245N **46**
Şekil 5.7 : Mikroyapı görünümleri (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55 ..... **47**
Şekil 5.8 : 35m/dak hızındaki Çekme testi sonuçları **48**
Şekil 5.9 : Sertlik bölgeleri **49**
Şekil 5.10 : 35m/dak hızındaki Sertlik testi sonuçları **49**

Şekil 5.11 : Mikroyapı görünümleri (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO **51**
Şekil 5.12 : Mikroyapı görünümleri (e) 6-S355J2H, (f) 7-P235TR1, (g) 8-P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH **52**
Şekil 5.13 : Mikroyapı görünümleri (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245N **53**
Şekil 5.14 : Mikroyapı görünümleri (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55 ..... **54**
Şekil 5.15 : 45m/dak hızındaki Çekme testi sonuçları **55**
Şekil 5.16 : Sertlik bölgeleri **56**
Şekil 5.17 : 45m/dak hızındaki Sertlik testi sonuçları **56**
Şekil 5.18 : Mikroyapı görünümleri (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO **58**
Şekil 5.19 : Mikroyapı görünümleri (e) 6-S355J2H, (f) 7-P235TR1, (g) 8-P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH **59**
Şekil 5.20 : Mikroyapı görünümleri (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245N **60**
Şekil 5.21 : Mikroyapı görünümleri (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55 ..... **61**
Şekil 5.22 : 55m/dak hızındaki Çekme testi sonuçları **62**
Şekil 5.23 : Sertlik bölgeleri **63**
Şekil 5.24 : 55m/dak hızındaki Sertlik testi sonuçları **63**
Şekil 5.25 : Mikroyapı görünümleri (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO **65**
Şekil 5.26 : Mikroyapı görünümleri (e) 6-S355J2H, (f) 7-P235TR1, (g) 8-P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH **66**
Şekil 5.27 : Mikroyapı görünümleri (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245N **67**
Şekil 5.28 : Mikroyapı görünümleri (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55 ..... **68**
Şekil 6.1 : Hız-Standart tercih matrisi **75**

YÜKSEK FREKANS KAYNAK METODU İLE KAYNAK YAPILAN BORULARIN FARKLI STANDARTLARDA ÇELİKLER KULLANILARAK KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Günümüz demir çelik sektöründe önemli yer tutan çelik boru üretimi, yıllar geçmesine rağmen sektör içindeki payı artmaktadır. Çelik malzemenin gerek mekanik özellikleri gerek fiyat/performans oranının yüksek olmasından ötürü müşterilerin tercihi olmaktadır. Demir çelik sektörü dışında büyük bir kullanıma sahip sektör ise Otomotiv sektörüdür. Çelik borular araçların birçok kısmında gerek konstrüksiyon gerekse sıvı/gaz taşınmasında kullanılmaktadır.

Çelik borular, sanayide geniş bir kullanım alanına sahip olan önemli bir malzemedir. İnşaat, petrol ve doğalgaz endüstrilerinde sıkça kullanılan borular, sıvıların ve gazların taşınmasında hayati bir rol oynar. Özellikle petrol ve doğalgaz boru hatları, enerji nakliyesi için vazgeçilmezdir.

Bunun yanı sıra, kimya endüstrisinde de kimyasal maddelerin taşınması ve işlenmesinde kullanılırlar. Boruların esnek ve dayanıklı yapısı, çeşitli sıcaklık ve basınç koşullarına uyum sağlayabilme özellikleri, onları endüstriyel süreçlerde güvenilir bir seçenek haline getirir. Ayrıca, boruların kolaylıkla montajı ve bakımı yapılabilmesi, endüstriyel tesislerde iş verimliliğini arttırır. Dolayısıyla, borular sanayide hem malzeme taşıma hem de işleme süreçlerinde kritik bir rol oynarlar ve modern endüstrinin temel yapı taşlarından birini oluştururlar.

1960'lı yıllarda "Electric Resistance Welding (ERW)" yöntemi, yüksek frekanslı alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Kullanılmaya başlanmasıyla birlikte, özellikle boru ve profil üretiminde yaygın olarak tercih edilen bir üretim metoduna dönüşmüştür.

Yüksek frekans kaynak prosesi, alternatif akımın 200 kHz ile 500 kHz aralığında uygulanması ve bu sayede kaynak bölgesine ısı enerjisi aktarılması prensibine göre çalışmaktadır. Bu kaynak metodunda basınç ve ısı aynı anda uygulanır. Borunun ek yerlerinde oluşturulan ısı ile borunun birleşme yüzeyi ergitilerek kaynak yapılması sağlanır. Bu kaynak işleminde önemli kazanımlardan biri de, kaynak sırasında ayrıca ek dolgu teli ya da kaynak elektrotu kullanılmamasıdır.

Diğer kaynak teknolojilerinden en önemli farklılık ise şekil veren sistem ile kaynak işlemi için gerekli ısıyı boruya aktaran sistemlerin farklı bağımsız sistemlerdir. Ve kaynak hızı diğer metodlara göre nispeten daha yüksektir. Bu nedenle çok daha önemli yanı ise uygulama ve üretim maliyetleri kapsamında sağladığı avantajlardır.

Deneysel çalışmalar kapsamında ulusalararası standartlara göre üretilen farklı çeliklerden üretilmiş boruların 4 farklı hızda yapılmış kaynaklarının kaynak bölgelerinin mekanik, kimyasal, metalografik incelemeleri yapılmıştır.

Yapılan çalışmada hız-standart tercih matrisi çizilmiştir. Standartlarda üretim için hangi hızın daha optimum olduğu belirlenmiştir.

CHARACTERIZATION OF PIPES WELDED BY HIGH-FREQUENCY WELDING METHOD USING DIFFERENT STEEL GRADES ACCORDING TO VARIOUS STANDARDS

SUMMARY

Steel pipe production, which holds a significant place in today's iron and steel industry, continues to increase its share in the industry despite the passing years. Steel material is preferred by customers due to its high mechanical properties and price/performance ratio. Another sector with significant usage outside the iron and steel industry is the automotive sector. Steel pipes are used in many parts of vehicles for both construction and fluid/gas transportation purposes.

Steel pipes are an important material with a wide range of applications in industry. Pipes, commonly used in the construction, oil, and natural gas industries, play a vital role in transporting liquids and gases. Especially, pipelines for oil and natural gas are indispensable for energy transportation.

In addition, they are also used in the chemical industry for the transportation and processing of chemical substances. The flexible and durable structure of pipes, along with their ability to adapt to various temperature and pressure conditions, makes them a reliable choice in industrial processes. Moreover, the ease of assembly and maintenance of pipes enhances operational efficiency in industrial facilities. Therefore, pipes play a critical role in both material transportation and processing processes in industry and constitute one of the fundamental building blocks of modern industry.

In the 1960s, the "Electric Resistance Welding (ERW)" method emerged as a high-frequency alternative. With its introduction, it has evolved into a widely preferred production method, especially in the production of pipes and profiles.

The high-frequency welding process operates on the principle of applying alternating current in the range of 200 kHz to 500 kHz to transfer heat energy to the welding area. In this welding method, pressure and heat are applied simultaneously. The joining surface of the pipe is melted by the heat generated at the seams of the pipe, allowing for welding. One of the significant advantages of this welding process is that no additional filler wire or welding electrode is used during welding.

The most significant difference from other welding technologies is that the systems shaping the shape and transferring the heat required for the welding process to the pipe are independent systems. Additionally, the welding speed is relatively higher compared to other methods. Therefore, its most important aspect lies in the advantages it offers in terms of application and production costs.

Experimental studies have been conducted to examine the mechanical, chemical, and metallographic characteristics of welded joints made at four different speeds using pipes made of different steels produced according to international standards.

In this experimental study, a speed-standard preference matrix was drawn. The optimal speed for production according to the standards was determined.

1. GİRİŞ

Global Demir-Çelik sektörü**,** Otomotiv sektörü tercihleri, yasal düzenlemeler ve rekabetçi baskılar tarafından yönlendirilmektedir. Çevresel düzenlemeler, mevzuat gereklilikleri ve müşteri talepleri doğrultusunda üreticiler ve malzeme tedarikçileri çok çeşitli çözümler geliştirmek zorunda kalmıştır. Yeni çözümler geliştirilirken yakıt tüketimini azaltmak, güvenliği arttırmak, ürün güvenilirliğini sağlamak ve satın alınabilirliğini arttırmak amaçları gözetilmiştir. Çözümler genellikle maliyet azaltmaya, kaliteyi ise uluslararası düzeyde belirli bir standartta tutmaya yönelik olmuştur.

Çelik borular satın alınabilirliği, performansı, üretilebilirliği, geri dönüştürülebilirliği ve geniş uygulama alanları nedeniyle otomobil ve yapı sektöründe tercih edilen mühendislik ürünü olma özelliğine sahiptir.

Üstün niteliklere sahip çelik borular özellikle doğalgaz taşıma hatlarında katodik korumaya da uygun olduklarından ve bu nedenle servis ömürleri yüksek olduklarından tercih sebebi olmaya devam etmektedir. Doğalgaz ve Petrol iletiminde kullanılan boru hatları dünyada stratejik öneme sahiptir.

Günümüzde, 650 mm çap ve 25 mm et kalınlığına kadar boru üretimine olanak sağlayan yüksek frekans indüksiyon boru kaynak yönteminde, indüktör vasıtası ile açık boruya indüklenen 400 kHz civarındaki yüksek frekans alternatif akımı, band kenarlarında ve birleşme noktasında yoğunlaşarak bu bölgelerin kaynak için gerekli olan ergime sıcaklığına kadar ısınmasını sağlar. Daha sonra kaynak baskı ruloları ile ısıtılmış olan bu band kenarları basınç yolu ile birleştirilerek kaynak işlemi tamamlanır[1].

Bu çalışmada farklı üretim standartlarındaki çelikler kullanılarak farklı kaynak hızlarındaki davranışları incelenecektir.

Yüksek frekans induksiyon kaynağı (HFIW/ERW) olarak bilinen metod 605mm çaplı borulara kadar uygulanabilmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada farklı üretim standartlarındaki çelikler kullanılarak farklı kaynak hızlarındaki davranışları incelenip hız faktörünün üretim standartlarına göre etkisini tayin etme amaçlanmıştır. Bu çalışmayla farklı üretim hızlarının hangi standarttaki çeliklere daha uygun olduğu tayin edilebilecek ve üretim sırasında bu aralıklarda performans ihtiyacına göre üreticiler güvenli aralıklarda kaynak işlemlerini daha güvenilir yapabilir hale geleceklerdir.

1.2 Literatür Araştırması

Jiaojiao Cheng, Jianguo Cao, 2020 yılında yayınlanan "The flower pattern and rolls design for ERW pipes with the different specification in the flexible roll forming process" makalesinde farklı özelliklere sahip elektrik direnç kaynak (ERW) borularının etkin ve ekonomik bir şekilde üretilebilmesi için esnek rulo şekillendirme teknolojisine acil bir ihtiyaç olduğunu belirtmiş ve bunun için Elastik plastik deformasyon teorisine dayanarak, tipik rulo şekillendirme ünitelerinin temel parametrelerle birleştirilerek, yedi farklı boyutta ERW borularının 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi (FEA) modelleri oluşturulmuş ve sayısal simülasyonlar, profesyonel rulo şekillendirme yazılımı COPRA ile gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel rulo şekillendirme sürecinde şerit ve rulolar arasındaki mekanik ilişki açığa çıkarılmış ve sonuçlar, ruloların kenar yay segmentinin önemli bir rol oynadığını ve düz segmentin W şeklindeki şekillendirme sürecinde şeridin deformasyonunu kısıtladığını göstermiştir. Mekanik kanunlar ve şekillendirme mekanizması göz önüne alındığında, birinci ila beşinci ayaklarda çiçek deseni ve ruloların modüler ve kompakt tasarımı yapılmış; birinci ila beşinci ayaklarda yedi farklı boyutta ERW borularının esnek rulo şekillendirme için bir dizi involüt-tangent-yay profili önerilmiş ve sayısal simülasyonlarla doğrulanmıştır. Sonuçlar, çiçek deseni ve ruloların esnek tasarımı ile elde edilen son ürünün doğruluk gereksinimlerini karşıladığını ve rulo şekillendirme sürecinde enine gerilme dağılımının optimize edildiğini göstermiştir. Esnek rulo şekillendirme teknolojisi, farklı özelliklere sahip ERW boruları üretildiğinde birinci ila beşinci ayaklarda rulo hazırlama ve değiştirme sürelerini ve maliyetlerini azaltırken, toplam rulo ağırlığını yaklaşık %35 azaltarak hafif üretimi gerçekleştirir. Bu, ERW borularının esnek rulo şekillendirme için yeni bir yöntem sağlar[2].

Min Chul Joa, Seok Gyu Leea, 2017 yılında yaınlanan “Effects of coiling temperature and pipe-forming strain on yield strength variation after ERW pipe forming of API X70 and X80 linepipe steels” makalesinde borular, boru şekillendirme ve düzleştirme sırasında tekrarlayan gerilme ve sıkışma deformasyonlarına maruz kaldığından, düzleştirilmiş levhalar genellikle sıcak haddelenmiş bobinlere göre çok daha yüksek veya düşük akma mukavemeti gösterirler, bu da akma mukavemeti standartlarını karşılamada zorluklar doğurduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, Mo içeriğinin kontrol edilmesi ve sargı sıcaklığı ile X70 (483 MPa) ve X80 (552 MPa) boru çeliklerinde mikroyapı ve boru şekillendirme gerilmesinin (kalınlık/çap (t/D)) akma mukavemeti varyasyonuna etkileri araştırılmış, ve bunların akma mukavemeti, sertleşme katsayısı ve Bauschinger gerilme parametresi, değişen çekme öncesi gerilme ile çekme-basma testleri yapılarak ölçülmüştür. Mo içeriği X70 çeliklerin Mo içeriğinden daha yüksek olan X80 çeliklerinde, daha yüksek Mo içeriği acicullar ferrit (AF), granüler beynit (GB), beynitik ferrit (BF) ve martenzit-östenit (MA) bileşeni gibi düşük sıcaklıkta dönüşen mikroyapıların oluşumunu teşvik ettiği görülmüş ve Bauschinger etkisini azaltan bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Akma mukavemetindeki azalma, X80 çelikte X70 çeliğe göre daha küçükt olduğu görülmüştür. Sarma sıcaklığı azaldıkça, AF, BF ve perlit hacim fraksiyonları artarken, QPF, GB ve MA'nın fraksiyonları azalmış ve akma mukavemetini yaklaşık olarak 30 MPa artırdı. Boru şekillendirme sonrası akma mukavemeti, daha yüksek sarılma sıcaklığında hafifçe artarken, daha düşük sarılma sıcaklığında büyük ölçüde azaldığı sonucuna ulaşmışlardır[3].

Joonmin Lee, Dongwook Kim, 2017 yılında yayımlanan “Change of the yield stress in roll formed ERW pipes considering the Bauschinger effect” makalesinde numerik simülasyon modelleme yaparak ERW ön form bölümündeki akma dayanımı değişimini tayin etmeye çalışmışlar ve ön şekillendirme oranı ile Baushinger etkisi ile bir korelasyon olup olmadığını araştırmışlar. Simülasyondaki seçtikleri modelleme metodu ile tahmin edilen ve deneysel olarak ölçülen kalınlık dağılımı ile bölgesel olarak ölçülen akma gerilmesi değerleri arasındaki karşılaştırmalar, benimsenen süreç zinciri analizinin hem güvenilirliğini hem de doğruluğunun sonucuna varmışlardır[4].

M. Zeki MAHMUTOĞLU ve Hüseyin ÇİMENOĞLU’nun, 2003 yılında yayımlanan “% 0.03 Nb ve % 0.05 V’lu Bir Boru Hattı Çeliğinde Mikroyapı-Mekanik Özellik İlişkisi” konulu makalesinde; Ar-Ge faaliyetleri kapsamında Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş.’de (ERDEMİR) üretilen API X60 kalite boru hattı çeliğinin,

mikroyapı-mekanik özellik ilişkisi konularında çalışılmıştır. Bu çalışmada Ferrit tane boyutu küçüldükçe; akma ve çekme mukavemeti ile sertliğin arttığı uzamanın ise değişmediği görülmüştür[5].

Hüseyin UZUN'un 2002 yılında yayımlanan "Kaynaklı API 5L X65 Boru Hattı Çeliklerinin Kırılma Tokluğu" konulu makalesinde; Petrol ve doğalgaz boru hatlarında yaygın olarak kullanılan ve tandem tozaltı kaynak metodu ile birleştirilen API 5L X65 dual fazlı çeliğin kırılma tokluğu tespit edilmiştir. Kırılma tokluğu, çentikli üç nokta kırılma tokluğu deneyi kullanılarak belirlenmiştir. Çentik, hem kaynak dikişinin ortasına hem de ısının tesiri altındaki bölgesi (ITAB) içerisinin içine gelecek şekilde açılarak deney uygulanmıştır. Her bir numuneye gerilim giderme tavlaması uygulanarak, kırılma tokluğu değerlerinin nasıl etkilendiği değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, gerilim giderme tavı uygulanmamış ve uygulanmış numunelerde, kaynak dikişinin kırılma tokluğu, ITAB bölgesinin kırılma tokluğundan daha yüksek çıkmıştır[6].

Doktora tezinde, Kahraman Şirin (2004), "Tozaltı Kaynak Yöntemi İle Spiral Boru Üretiminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Dikiş Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi" başlıklı çalışmasında tozaltı kaynak yöntemi ile üretilen spiral dikişli çelik boruların, doğal gaz ve petrol iletim hatlarında yaygın bir şekilde kullanıldığını belirtmektedir. Ancak, özellikle yüksek işletme basınçları altında, doğal gaz hat borularının performansına ilişkin kalite sistemlerinin giderek arttığını vurgulamaktadır. Şirin, çelik malzemenin türü, kalınlığı, kaynak metalinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri, kaynak telinin ve tozunun türü, ek kaynak metal miktarı, kaynak geometrisi, kaynak hızı gibi faktörlerin yüksek kaynak güvenilirliği için önemli olduğunu ifade etmektedir. Bu nedenle, kaynak işlemi öncesi kaynak tasarım çalışmasının önemini vurgulamaktadır. Tezde, tozaltı kaynağında kullanılan parametrelerin, kaynak dikiş geometrisi üzerindeki etkilerinin incelendiği deneysel çalışmaların ilk aşamasının yanı sıra, ikinci aşamada kaynak metalinin tokluk özelliklerini etkileyen faktörlerin ele alındığı belirtilmektedir. Ayrıca, üretim öncesi kaynak tasarımına yönelik yeni bir yaklaşım geliştirilerek, kaynak parametrelerinin seçimine yönelik bir bilgisayar programı da geliştirilmiştir[7].

Hakan Ada'nın 2006 yılında sunulan yüksek lisans tezinde, "Petrol ve Doğalgaz Boru Hatları İçin Üretilen Boruların Tozaltı ve Spiral Kaynak Yöntemiyle Kaynaklanabilirliği ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı kapsamlı bir

çalışma yer almaktadır. Bu çalışmada, tozaltı kaynak yöntemiyle spiral dikişli boru üretimi için detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Deneysel aşamada ise, petrol ve doğalgaz boru hatları için farklı malzemelerden üretilen boruların mekanik performansı incelenerek kaynaklı birleştirmenin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. API 5L standardına uygun X65, X52, X70, X60 doğalgaz boruları ve çeşitli ebatlarda X65 petrol boruları üzerinde kaynaklı birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiş ve bu birleştirmelere çeşitli mekanik testler uygulanmıştır, bunlar arasında kimyasal analiz, sertlik, çekme, çentik - darbe ve eğme testleri bulunmaktadır. Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerin makro ve mikro fotoğrafları çekilerek incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, en verimli mekanik test sonuçlarının X70 malzemeden imal edilen doğalgaz borularında elde edildiği belirlenmiştir[8].

Emel Taban ve Erdinç Kaluç'un 2004 yılında yayımlanan makalesi, "Petrol ve Doğalgaz Boru Hatlarının Yapımında Kullanılan Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler ve Kaynak Edilebilirliği" başlığını taşımaktadır. Makalede, uluslararası ve ulusal petrol ve doğalgaz boru hatlarının yapımında kullanılan geleneksel az alaşımlı çelik boruların zamanla korozyona uğrayarak hasar oluşturması ve onarımının maliyetinin yüksek olması sorununa değinilmektedir. Bu sorunun çözümü için duplex paslanmaz çeliklerin önerildiği ancak maliyet ve metalürjik problemler nedeniyle süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin geliştirilmesi gerekliliği vurgulanmaktadır. Süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin, yüksek mukavemet, düşük tokluk özelliklerinin yanı sıra yeterli korozyon direncine sahip olduğu belirtilmektedir. Makalede, boru hattı yapımında kullanılmak üzere geliştirilen bu çeliklerin ve kaynak edilebilirliklerinin incelendiği bir araştırmanın detayları sunulmaktadır[9].

Süleyman Yavuz'un 2007 yılında yayımlanan yüksek lisans tezinde, "Türkiye'de Boru Üretiminde Kullanılan DKP Sacların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" başlığı altında, endüstride kullanılan boru imalatının önemli bir alanı olan dikişli boruların ele alındığı belirtilmektedir. Tezde, dikişli boruların maliyet avantajına sahip olduğu ancak basınca dayanıklılık açısından dezavantajlı olduğu vurgulanmaktadır. Malzeme seçiminden başlayarak kalite kontrolüne ve kullanıcıya sunumuna kadar birçok alanın bu süreçte etkin olduğu ifade edilmektedir. Tezde ayrıca, çelik boruların kullanım yerindeki performansıyla ilgili artan kalite taleplerinin, teknolojik gelişmelerle birlikte kaynaklı boruların kullanımının artmasına yol açtığı belirtilmektedir. Tezde yapılan

çalışmada, Türkiye'de boru üretiminde kullanılan DKP sacların mekanik ve kimyasal özelliklerinin incelendiği ve bu sacların kalitesinin değerlendirildiği ifade edilmektedir. Yapılan deneylerde çekme numuneleri kullanılarak çeşitli mekanik özelliklerin incelendiği ve çekme yönüne göre farklı değerler elde edildiği belirtilmektedir. Ayrıca, metalik sacların spektral ve EDS analizleri yapılarak malzeme içinde yüksek miktarda kurşuna rastlandığı vurgulanmaktadır. Kaynak bölgesini test etmek amacıyla yapılan deneylerde ise kaynakta herhangi bir tahribat gözlemlenmediği belirtilmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlara dayanarak ANSYS/LS-DYNA programı kullanılarak boru üretiminin teorik modelinin oluşturulduğu ve bu modelle boru üretim hattının tasarlanmaya çalışıldığı ifade edilmektedir[10].

Ali Akın Akay, Yakup Kaya ve Nizamettin Kahraman'ın 2013 yılında yayımlanan makalesi, "Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen X60, X65 ve X70 Çeliklerin Kaynak Bölgesinin Etüdü" başlığı altında petrol ve doğal gaz hatlarında kullanılan X60, X65 ve X70 çeliklerinin tozaltı ark kaynak yöntemiyle birleştirilmesi üzerine yapılan bir araştırmayı ele almaktadır. Bu çalışmada, iki farklı tel (S1 ve S2Mo) ve toz (LN761 ve P223) kullanılarak gerçekleştirilen kaynak işleminin ardından, birleştirmelerin mekanik özellikleri incelenmiştir.

Makalenin sonuçlarına göre, gözle ve ultrasonik muayene yöntemleriyle yapılan incelemelerde kaynak bölgesinde herhangi bir hataya rastlanmamıştır. Çekme testleri sonucunda, tüm numunelerin kopma olayının ana malzemeden gerçekleştiği ve bağlantı dayanımlarının ana malzemelerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Eğme testlerinde ise, kaynak bölgesinde herhangi bir çatlak veya yırtık tespit edilmemiştir. Sertlik testleri sonuçlarına göre, en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metalinde ölçüldüğü, bunu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip ettiği görülmüştür. Makroyapı çalışmalarında da, kaynak bölgesinde çatlaklar, yırtılmalar, boşluklar veya ergime/nüfuziyet azlığı gibi hatalara rastlanmamıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, X70 malzemesinde kullanılan S2Mo tel ve P223 tozunun en verimli mekanik test sonuçlarını verdiği sonucuna ulaşılmıştır[11].

A. Kadir Uysal'ın 2010 yılında yayımlanan doktora tezinde, "Petrol ve Doğalgaz Boru Hattı Çeliklerinin Hidrojen Nedenli Çatlama Davranışı" başlığı altında, sulu H2S içeren asidik servis şartlarına maruz kalan yüksek mukavemetli düşük alaşımlı hat boru çelikleri ve onların kaynaklı birleşmelerinde meydana gelen hidrojen nedenli

çatlama (HIC) davranışları üzerinde çalışılmıştır. Bu kapsamda, doğal gaz ve petrol boru hatlarının maruz kaldığı asidik ortamı temsil etmek amacıyla NACE TM 0284 standart deney çözeltisi kullanılmıştır.

Tezde yapılan deneysel çalışmalarda, API 5L X60, X65 ve X70 çelikleri ile bu çeliklerin fabrikasyon ve saha kaynak uygulamalarının asidik ortamlardaki davranışları iki farklı yöntemle belirlenmiştir. Birinci yöntemde, gerilmesiz test numuneleri standart deney çözeltisine maruz bırakılarak incelenmiştir. İkinci yöntemde ise, kaynaklı numuneler deney çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra, mekanik testlere tabi tutulmuştur.

Farklı kaynak yöntemleri ile kaynaklı numuneler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda, gerilmesiz numunelerin yalnız ana malzeme bölgesinde hidrojen nedenli çatlaklar tespit edilmiş, ancak gerilme uygulanan kaynaklı numunelerde ise ITAB ve kaynak bölgesinden çatlama veya kopmaların görüldüğü belirlenmiştir.

Sonuç olarak, çözeltiden malzeme içerisine absorbe olan ve yapıda bulunan metalürjik süreksizliklerde tuzaklanan hidrojenin, gerilmesiz numunelerde dekohezyon mekanizması yoluyla hidrojen nedenli çatlamaya, gerilme uygulanan kaynaklı numunelerde ise plastisite mekanizması yoluyla gerilmenin yoğunlaştığı bölgelere taşınması sonucunda gerilmeli hidrojen çatlamasının bir türevi olan gerilme yönlenmeli hidrojen nedenli çatlamasına (SOHIC) neden olduğu belirlenmiştir[12].

Zakir Taş'ın 2004 yılında yayımlanan doktora tezinde, "Termomekanik İşlem Görmüş Mikroalaşımlı Çeliklerin Kırılma Mekaniği-Kırılma Tokluğu-Açısından İncelenmesi" başlığı altında mikro alaşımlı çeliklerin yassı mamullerinde mikroyapı ile kırılma mekaniği özellikleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Tez, elastik plastik kırılma mekaniği metotlarıyla kırılma mekaniği özelliklerinin karakterizasyonuna odaklanmıştır, bu bağlamda J-integral konsepti kullanılmıştır.

Mikroalaşımlı çelikler, %0.15'ten daha az Nb, V ve Ti içeren çelikler olarak tanımlanmıştır. Bu çelikler, çeşitli sertleştirme mekanizmaları ve uygun termomekanik işlemlerin uygulanması ile dayanım, tokluk, kaynaklanabilirlik gibi çok iyi özellikler kombinasyonuna sahip bir malzeme grubudur. Çalışmada, petrol ve gaz taşıyan borularda kullanılan X65/API-5L tipi mikroalaşımlı çelikler kullanılmış, ayrıca karşılaştırma amacıyla X60/API-5L ve X52/API-5L tipi mikroalaşımlı çeliklerden de faydalanılmıştır.

Mikroyapıların incelenmesi için optik mikroskop ve tarama elektron mikroskobu kullanılmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme ve çentik darbe deneyleri uygulanmıştır. Kırılma mekaniği deneyleri üç noktadan eğme numunelerinde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve çatlak mukavemet eğrilerinin elde edilmesi için çoklu numune yöntemi kullanılmıştır.

Bu çalışma, mikroalaşımlı çeliklerin kırılma mekaniği özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir katkı sağlamış ve bu malzemelerin petrol ve gaz endüstrisinde kullanımına ilişkin önemli bilgiler sunmuştur[13].

2. ÇELİK BORU ÜRETİMİ

Çelik boru üretimi, modern endüstrinin temel taşlarından birini oluşturan karmaşık ve çok yönlü bir süreçtir. Bu süreç, çeşitli mühendislik disiplinlerinin entegrasyonunu gerektirir ve yüksek teknolojik standartları içerir. İlk adım genellikle çelik üretimidir; yüksek kaliteli çelik hammaddesi, demir cevheri ve metalurjik prosesler aracılığıyla elde edilen yassı yarı mamüldür. Daha sonra, elde edilen bu çelik, boru üretim hattında çeşitli şekillendirme ve işleme adımlarından geçer. Bu adımlar arasında sıcak ve soğuk haddeleme, boru şekillendirme, kaynak, boyama ve kaplama gibi işlemler yer alır. Çelik boruların özellikleri ve kalitesi, kullanılacakları ortama ve uygulamaya bağlı olarak titizlikle belirlenir ve kontrol edilir. Örneğin, petrol veya doğal gaz iletim hatlarında kullanılacak boruların mukavemeti, korozyon direnci, sızdırmazlık ve kaynaklanabilirlik gibi özelliklerine özel önem verilir. Bu nedenle, çelik boru üretimi sürecinde, malzeme seçimi, üretim teknikleri, kalite kontrolü ve testleri dikkatle planlanır ve uygulanır. Sonuç olarak, çelik boru üretimi, modern endüstrinin ihtiyaç duyduğu yüksek performanslı ve güvenilir iletim sistemlerinin temelini oluşturur, aynı zamanda enerji, su ve diğer kaynakların etkin ve güvenli bir şekilde taşınmasını sağlar.

Çelik boru üretimi, endüstriyel uygulamalarda kritik öneme sahip bir süreç olduğundan çeşitli metodlar kullanılarak üretimi gerçekleştirilir. Bu metodlar, üretilen boruların kullanım alanlarına ve gereksinimlerine göre farklılık gösterir. Genel olarak dikişsiz ve dikişli boru üretimi olarak 2'ye ayrılmaktadır.

2.1 Dikişsiz Boru Üretimi

Dikişsiz borular şekillendirilebilen çeliklerden kaynak dikişi yapılmadan imal edilen borulardır. Bu borular çeliklerin sıcak işlenmesi ile imal edilir. Gerekirse, istenilen şekil, boyut ve özellikleri elde etmek için sıcak işlenmiş boruya, daha sonra soğuk veya sıcak haddeleme uygulanabilir.

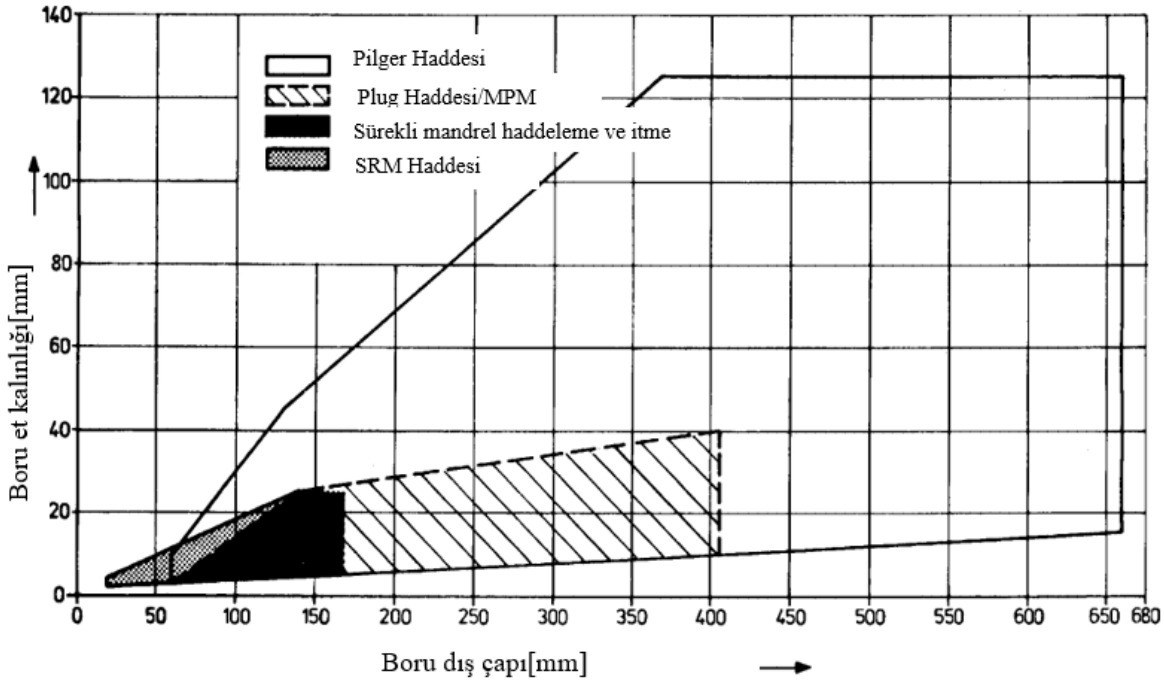
Ana hatlarıyla dikişsiz boru üretim süreçleri 19. yüzyılın sonlarına doğru ortaya çıkmıştır. Patent ve mülkiyet hakları süresi dolunca, başlangıçta izlenen çeşitli paralel gelişmeler belirsizleşmiş ve kendi başlarına şekillendirme aşamaları yeni süreçlere

entegre edilmiştir. Günümüzde ise genellikle modern yüksek performanslı süreçler tercih edilmektedir.

- Yaklaşık olarak 21 ila 178 mm dış çap aralığında sürekli mandrel haddeleme süreci ve itme süreci

- Kontrollü (kısıtlanmış) yüzen mandrel çubuğu ile çoklu stand takımı (MPM) ve yaklaşık 140 ila 406 mm dış çap aralığında takım milli işleme süreci

- Yaklaşık olarak 250 ila 660 mm dış çap aralığında çapraz haddeleme ve pilger haddeleme süreci. Tüm bu süreçler Şekil 2.1'de gösterilmiştir[14].



Şekil 2.1 : Dikişsiz boru üretimi için süreç aralıkları

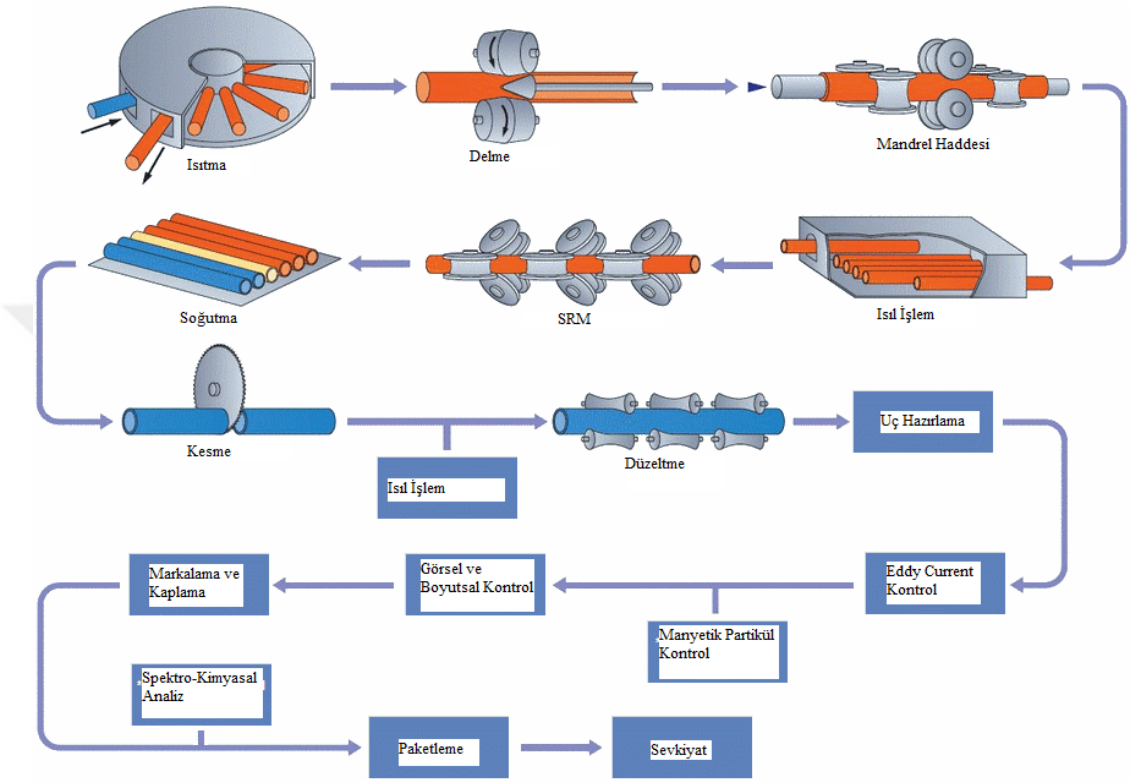
Gösterilen genel boyut aralıklarının ötesinde, birçok tesis farklı boyut aralıklarında da faaliyet göstermektedir.

Önceleri birçok test, deneme ve teknolojiye rağmen 1880'lerin sonlarına doğru Mannesmann kardeşler tarafından yapılan çapraz haddeleme sürecinin bulunması endüstriyel ölçekte boru üretiminin başlangıcı olarak kabul edilir[14].

Günümüzde dikişsiz borular X80 kalitesindeki çeliklere kadar uygulanabilmektedir. Boru üretiminde kaynaklı birleştirmenin bir etkisi olmasa da, sahada yapılan birleştirmeler çoğunlukla kaynaklı olmaktadır. Bu nedenle dikişli boru üretiminde

istenen kaynaklanabilirlik özelliği, dikişsiz borularda da istenmektedir. Dikişsiz boru üretimi adımları Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

Spiral kaynaklı veya düz kaynaklı borularda kaynak dibinde oluşan ITAB bölgeleri dikişsiz borularda oluşmamaktadır. Bu durum dikişsiz boruların mekanik özelliklerine olumlu katkı sağlamaktadır[14].



Şekil 2.2 : Dikişsiz boru üretim akışı[15].

2.2 Dikişli Boru Üretimi

Çelik şerit ve levhanın üretimi mümkün hale gelmesinden beri, insanlar malzemenin bükülmesini ve kenarlarını birleştirmeyi sürekli olarak denemişlerdir, böylece tüp ve boru imal edebilmişlerdir. Bu durum, en eski kaynak süreci olan dövme kaynak sürecinin geliştirilmesine yol açmıştır, ki bu süreç 150 yıldan daha eski bir tarihe dayanmaktadır.

1825 yılında, İngiliz demir eşyası tüccarı James Whitehouse, kaynaklı boru imalatı için bir patent almıştır. Süreç, metal levhaların tek tek bir mandrel üzerinde dövülmesini içermekte ve böylece açık dikişli bir boru üretilmekte, ardından açık dikişin eşleşen kenarları ısıtılarak ve bir çekme bankasında mekanik olarak bir araya getirilerek kaynatılmaktadır.

Teknoloji, şeridin bir kaynak fırınında tek bir geçişte şekillendirilip kaynaklanabileceği noktaya kadar gelişmiştir. Bu dikiş kaynak konseptinin geliştirilmesi, Amerikalı J. Moon ve Alman meslektaşı Fretz tarafından tasarlanan 1931 tarihli Fretz-Moon sürecinde zirveye ulaşmıştır. Bu süreci kullanan kaynak hatları, günümüzde yaklaşık 114 mm dış çapına kadar olan boru imalatında hala başarıyla faaliyet göstermektedir.

Sıcak basınç kaynak tekniğinin yanı sıra, Amerikalı E. Thomson tarafından 1886 ve 1890 yılları arasında çelik şeridin bir fırında kaynak sıcaklığına getirilmesine olanak sağlayan çeşitli diğer işlemler de geliştirilmiştir. Bu temelde, James P. Joule tarafından keşfedilen bir özellikten kaynaklanmaktadır; elektrik akımının bir iletken üzerinden geçirilmesi, elektrik direnci nedeniyle iletkenin ısınmasına neden olur. 1898 yılında, ABD'deki Standard Tool Şirketi, tüp ve boru imalatı için elektrik direnç kaynağının uygulanmasını kapsayan bir patent almıştır.

Elektrik direnci kaynağı ile tüp ve boru imalatı, büyük ölçekli imalat için gerekli fazla miktarda başlangıç malzemesinin üretimi için sürekli sıcak şerit haddehanelerinin kurulmasını gerektirmiştir. Buna istinaden ABD'de ve daha sonra Almanya'da sürekli sıcak şerit haddehanelerinin kurulması önemli bir ivme kazanmıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında, uçak yapımında magnezyumun etkili bir şekilde kaynatılmasını sağlayan bir argon ark kaynak süreci tekrar ABD'de icat edilmiştir. Bu gelişmenin bir sonucu olarak paslanmaz çelik boru imalatı için özellikle gazla korunan kaynak süreçleri geliştirilmiştir.

Son yıllarda enerji sektöründe meydana gelen büyük değişiklikler ve sonucunda büyük kapasiteli uzun mesafeli boru hatlarının inşası, daldırma-ark kaynak sürecinin yaklaşık 500 mm dış çapındaki boru hatlarının kaynağında öncelikli bir konuma sahip olmasına neden olmuştur[14].

Çizelge 2.1 : Dikişli boru üretim prosesleri

Form Verme Prosesi	Kaynak Prosesi	Adlandırma	Kaynak	Ebat Aralığı (OD)
Sürekli	Sıcak Basınç Kaynağı	Fretz-Moon	Boyuna	13-114
Sürekli	Elektrik Direnç Kaynağı(ERW)	Direkt Akım	Boyuna	10-20
		Düşük Frekans		10-114
		Yüksek Frekans (HFI)		20-600
Sürekli	Elektrik Ark Kaynağı	SAW	Spiral	168-2500
		MAG	Spiral/Boyuna	406-2032
		TIG, MIG, ERW		30-500/10-420
Tek form Prosesi-C-Ing Presi	Elektrik Ark Kaynağı	SAW	Boyuna	≥ 500
		TIG, MIG, ERW	Boyuna	200-600
Tek form Prosesi-U/O-Ing Presi	Elektrik Ark Kaynağı	SAW	Boyuna	457-1626
		MAG	Boyuna	

Kaynaklı çelik borular, ya boyuna ya da spiral (helisel) dikişli olarak imal edilir. Bu ürünlerin çapları yaklaşık olarak 6 ila 2500 mm arasında değişmektedir ve et kalınlıkları 0.5 ila yaklaşık 40 mm arasındadır.

Tüm durumlarda başlangıç malzemesi, üretim sürecine, boru veya boru boyutlarına ve uygulamaya bağlı olarak, sıcak veya soğuk haddelenmiş çelik şerit/şerit, sıcak haddelenmiş geniş şerit veya levha şeklinde olabilir.

Birçok durumda borudan istenen fiziksel özellikler ve yüzey özellikleri zaten haddelenmiş düz yarı mamülde de bulunmaktadır. Bu durumun geçerli olmadığı durumlarda, gerekli değerlere ulaşmak için boruya yüzey işlemi, ısıl işlem veya sertleştirme/soğuk işleme uygulanabilir.

Başlangıç malzemesi, sıcak veya soğuk durumda boru şekline dönüştürülebilir. Bu açıdan, sürekli boru şekillendirme ve tek boru şekillendirme süreci arasında bir ayrım yapılmaktadır.

Sürekli boru şekillendirme yönteminde rulo malzemesi bir birikim havuzuna alınır ve ardışık bobinlerin başlangıç ve bitiş uçları birleştirilir. Tek boru üretiminde, boru şekillendirme ve kaynak süreci sonsuz uzunluklar boyunca değil, tek boru uzunluklarında gerçekleştirilir.

Kullanılan kaynak süreçleri genel hatlarıyla iki ana kategoriye ayrılır:

- Basınç kaynak prosesi

- Ergime kaynağı prosesi

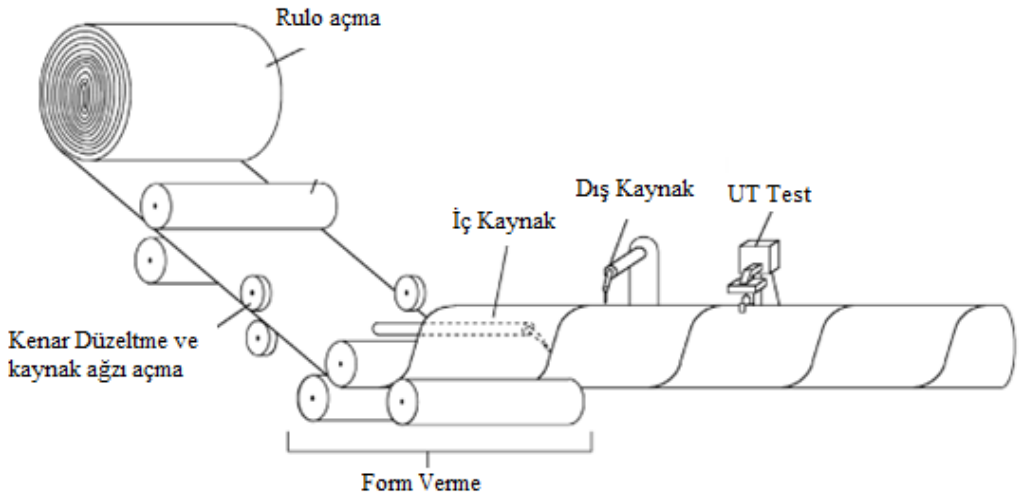
Basınç kaynak prosesi daha iyi bilinen adıyla Fretz-Moon yöntemi olarak bilinir. DC elektrik direnç kaynağı, düşük frekanslı elektrik direnç kaynağı, yüksek frekanslı indüksiyon (HFI) kaynağı ve yüksek frekanslı kontak kaynağıdır. Ergime kaynağı süreçleri daldırma-ark ve gaz korumalı yöntemleri içerir.

Kaynaklı boru üretimi için kullanılan ana yöntemler, Fretz-Moon Prosesi, yüksek frekans indüksiyon kaynağı, paslanmaz çelik tüp ve boru üretimi için daldırma-ark ve gaz korumalı daldırma-ark süreçleri çeşitli gaz korumalı kaynak yöntemleridir[14].

2.2.1 Toz Altı Kaynak Metodu (SAW)

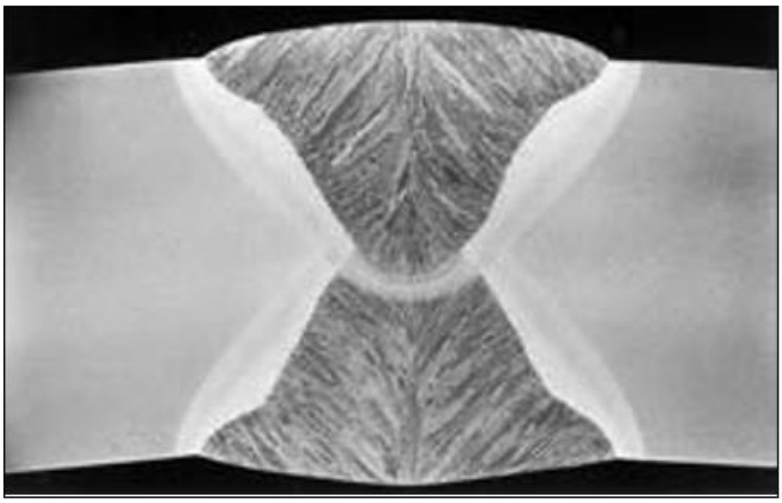
Toz altı kaynak işlemi, gizli bir ark ile gerçekleştirilen elektrikli bir ergitme kaynak yöntemidir. Ark-Kaynağına kıyasla, bu durumda ark görünmez ve bir toz ve akış tabakası altında kaynak yapılır. Şekil 2.3'de üretim prosesi adımları şematize edilmiştir[14].

Toz altı kaynağın (SAW) belirleyici özelliklerinden biri, yüksek akım gücünün uygulanmasıyla birleştirilen olumlu bir ısı dengesi nedeniyle yüksek bir birikim hızıdır. Kullanılan dolgu metal, birbirine bağlı, parlak kaynak teli formunda olup, otomatik olarak ayarlanan bir hızda sürekli olarak ergimiş metal havuzuna beslenir. Kaynak akımı, kaynak telinin içine kaydırılan kontaklar aracılığıyla boru üstündeki ana metalden iletilir ve boru malzemesine bağlı toprak bağlantısı aracılığıyla geri döner[14].



Şekil 2.3 : Toz altı kaynak metodu ile boru üretim prosesi

Şekil 2.4'de bu metdola elde edilen bir kaynak makro görüntüsü görülmektedir. Burada dolgu metali+ITAB+Ana metal görülmektedir[14].

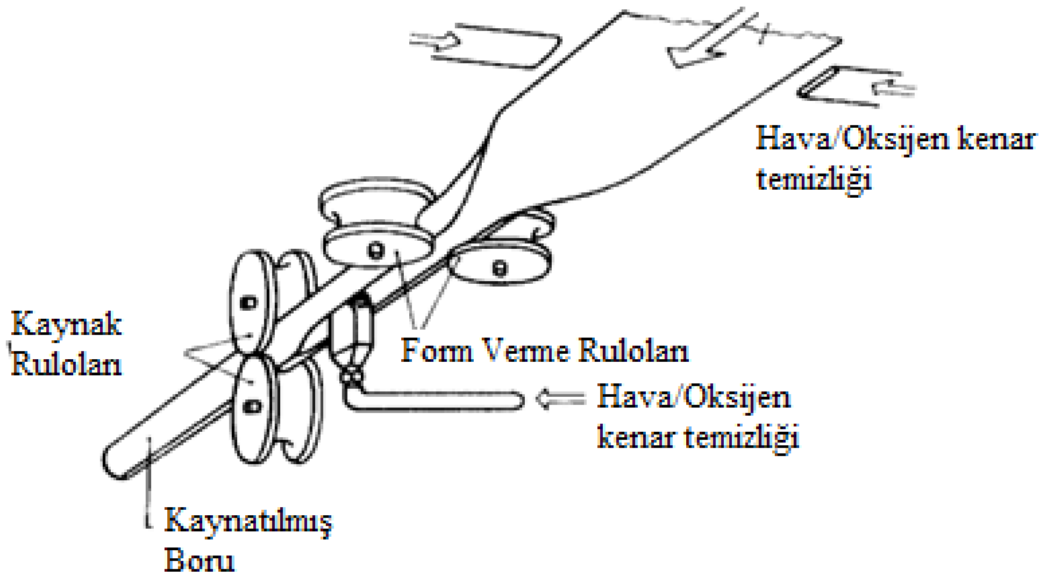


Şekil 2.4 : Toz altı kaynak metodu ile kaynak kesitinin makro görüntüsü

2.2.2 Fretz-Moon Prosesi

Bu süreç, icat edenlerin adını almıştır. Çelik levha sürekli bir şerit halinde kaynak sıcaklığına kadar ısıtılır ve bir şekillendirme ve kaynak hattında işlenir. Sürekli olarak rulolar tarafından açık dikişli bir boruya şekillendirilir ardından kenarlar bir araya getirilir ve eskiden kullanılan dövme kaynak tekniğiyle benzer bir süreçle kaynak yapılır. Şekil 2.5'de gösterilmiştir[14].

Bu şekilde, dış çapı 40 ila 114 mm arasında olan borular üretilebilir ve sırasıyla 200 ila 100 m/dak hızlarında kaynak yapılabilir[14].



Şekil 2.5 : Fretz-Moon Prosesi-Alttan görünüş

Başlangıç malzemesi olarak kullanılan sıcak haddelenmiş çelik sac bobinleri açılarak havuzlarda depolanır. Bu kısım sürekli üretim süreci sırasında bir tampon görevi görür ve ardışık bobinler tarafından sağlanan şeridin son ucu, bir sonraki bobin tarafından sağlanan şeridin öncü ucuna kaynatılır. Bu sürekli şerit, yüksek bir sıcaklığa ısıtıldığı bir tünel fırınından geçer. Yan yana yerleştirilmiş brülörler, şerit kenarlarındaki sıcaklığı, şerit merkezindeki sıcaklıkla karşılaştırıldığında yaklaşık olarak 100 ila 150 °C daha yüksek bir kaynak sıcaklığına çıkarır. Şekil 2.5'deki rulo istasyonu, sürekli gelen şeridi açık dikişli bir boruya şekillendirir; borunun çevresi, önceki istasyona 90° kaydırılmış olan akışkan rulo kaynak istasyonunda (yaklaşık olarak % 3) biraz azaltılır. Bu kaynak istasyonunun ürettiği sıkıştırma basıncı, kenarların bir araya getirilmesine ve kaynaklanmasına neden olur. Kaynak yapısı, borunun boyutlandırılmasını sağlayan, tekrar 90° kaydırılmış, azaltıcı rulo istasyonlarında daha da sıkıştırılır. Kaynak hattının ilerisinde bulunan testere, sonsuz boruyu istenen uzunluklara keser ve ardından soğutma yataklarına taşınır.

Modern Fretz-Moon tesislerinde, sonsuz boru doğrudan bir gerdirme-azaltma prosesine geçer. Burada aynı dökümden aynı sıcaklıkta farklı çaplara kadar, (yaklaşık 13 mm'ye kadar) üretim yapılabilir. Boru dizisi daha sonra soğutma yataklarına yerleştirilmek üzere istenen uzunluklara kesilir.

Bu tesis kombinasyonu-Fretz-Moon tesisi olarak bilinir ve tek bir sabit boru çapı için kullanılabileceği için avantaja sahiptir, bu da maliyetli rulo değiştirme ve yeniden ayarlama işini ortadan kaldırır[14].

2.2.3 Elektrik Direnç Kaynağı

2.2.3.1 DC Prosesi

Doğrudan akımla çalışan işlemler (örneğin, Newcor'un DC sistemi) veya yarı doğrudan akım etkisini kullanan işlemler (Yoder'ın kare dalga sistemi), küçük boruların boyuna kaynağını gerçekleştirmek üzere geliştirilmiştir. Çapları 20 mm'ye kadar olan ve özel durumlarda 30 mm dış çapa kadar olan, et kalınlıkları 0.5 ila yaklaşık 2.0 mm olan boruların üretimi içindir. DC kaynağının, düşük frekanslı ve yüksek frekanslı yöntemlere göre avantajları, özellikle iç kısımda son derece düzgün bir birleşme elde edilmesinden kaynaklanır ve bu sayede geometrik olarak tam birleşme sağlanır yani minimal kertik oluşur. Bu avantaj, düzgün bir iç kaynak gerektiren borularda ve iç çapak çıkarmanın mümkün olmadığı durumlarda, örneğin ısı değiştiriciler için veya sonraki çekimler için, önemlidir.

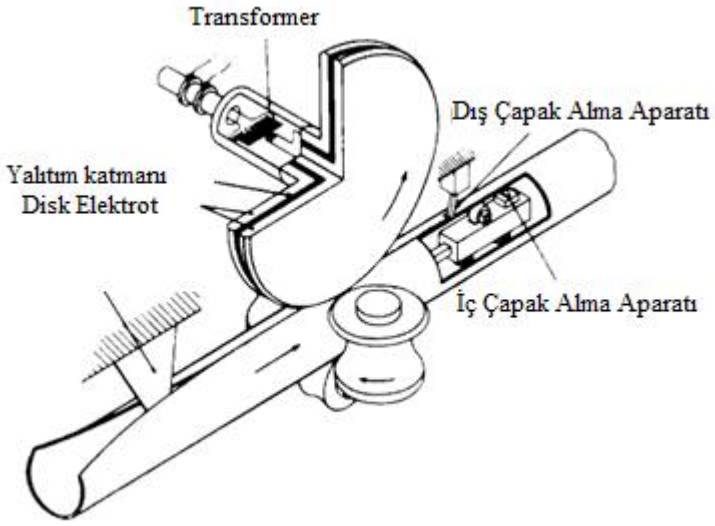
DC sürecinin uygulama alanı, kullanılan disk elektrotları tarafından iletilen elektrik gücü tarafından sınırlıdır. Ulaşılan kaynak hızları 50 ila 100 m/dak arasında değişir. Üretilen borular, hiçbir istisna olmaksızın daha sonra soğuk gerdirme-azaltma işlemine tabi tutulur, bu işlemde ana gövdenin kalınlığı kaynak bölgesinden biraz daha fazla artar, sonuç olarak bu borular hiçbir iç kaynak çapağı göstermez. Toleranslar nedeniyle, başlangıç malzemesi olarak soğuk haddelenmiş şerit kullanılır[14].

2.2.3.2 Düşük Frekans Kaynak Prosesi

Bu süreçte, kaynak işlemi 50 ila 400 Hz arasında değişen alternatif akım frekanslarıyla gerçekleştirilir. Bakır alaşımından yapılmış iki izole diskten oluşan bir elektrot, sadece güç kaynağı olarak değil, aynı zamanda şekillendirme aracı ve gerekli kaynak basıncını oluşturan eleman olarak da hizmet eder.

Elektrotlar, tesisin kritik bileşenlerini oluşturur çünkü sadece üretilen borunun çapına uygun bir olukla donatılmaları gerekmez, aynı zamanda bu yarıçapın üretim operasyonları sırasında aşınmaya karşı sürekli olarak izlenmesi gerekir. Basınç kaynağı işlemi sırasında çıkan malzeme, kaynak bölgesinde iç ve dış çapak oluşturur, bu çapak, kaynak noktasının hemen aşağısında iç ve dış düzenler tarafından inline

olarak çıkarılır. Düşük frekanslı kaynak Şekil 2.6'da gösterilmiştir[14]. Yöntemi ve metodu dikkatlice izlendiğinde, mükemmel bir kaynak üretebilir. Bu süreç, çapları 10 ila 114 mm arasında değişen boyuna kaynaklı boruların üretiminde kullanılır ve et kalınlığına bağlı olarak yaklaşık 90 m/dak'lık kaynak hızlarına kadar ulaşabilir[14].



Şekil 2.6 : Düşük frekans Kaynak Prosesi

2.2.3.3 Yüksek Frekans Kaynak Prosesi

Düşük frekanslı elektrik direnç kaynağı sürecinin geliştirilmesini takiben, 1960'larda yüksek frekanslı bir alternatifin tanıtımı gerçekleşmiştir. Bu kaynak teknolojisi o zamandan beri geniş çapta pazara hakimiyet sağlamıştır. Süreç, boru şekillendirme ve enerji girişi işlemlerinin ayrı üniteler tarafından gerçekleştirildiği yüksek frekanslı bir alternatif akımın (200-500 kHz aralığında) uygulanmasını içerir[14].

Bu kaynak yöntemi dolgu malzemesi/elektrot olmadan açık olan levhanın kenarlarını bir araya getirmek için basınç ve ısıyı aynı anda kullanır. Kaynak istasyonundaki sıkıştırma ve basınç ruloları, açık levhanın kenarlarını yavaş yavaş bir araya getirir ve kaynak için gerekli basıncı uygular. Yüksek frekanslı alternatif akım, kaynak işlemi için gereken ısıyı üretmek için enerji kaynağı olarak birçok avantaj sunar. Örneğin, normal alternatif akıma göre iletkenin kesit alanı üzerinde çok yüksek bir akım yoğunluğuna sahiptir. Yüksek frekansta HF akımın etkisi, iletkenin merkez çekirdeğinde manyetik bir alan oluşturmaktadır. İletkenin ohmik direnci bu alanın içinde en yüksektir, bu nedenle elektronlar iletkendeki dış yüzey bölgesinde en az dirençli yolu izler (yüzey etkisi). Akım, böylece şerit kenarları boyunca açık dikişli levhanın kaynak noktasına (kaynak noktası) kadar akar ve negatif iletkenin yakınlığı

tarafından teşvik edilen sonraki konsantrasyon, yüksek bir enerji kullanımına yol açar. Curie noktasının altında (768 °C), akımın nüfuz derinliği sadece birkaç yüzüncü milimetreye denk gelir. Çelik bu sıcaklığın üzerine çıkarıldığında manyetik olmaz ve akım nüfuz derinliği, yaklaşık 450 kHz bölgesindeki frekanslarda birkaç ondalık milimetreye yükselir.

Kaynak akımı, kaynaklanacak levha üzerine iletken ortamları kullanarak veya indüktif ortamlar kullanılarak açık levhaya entegre edilebilir.

Levhalar geniş bir ürün yelpazesi üretmek için bir rulo şekillendirme prosesinde veya ayarlanabilir bir rulo istasyonunda (doğal fonksiyon şekillendirme) açık levhaya boru şekli verilir. Bu ürünler arasında, yaklaşık 20 ila 609 mm OD ve 0.5 ila yaklaşık 16 mm et kalınlığındaki boru hattı ve yapısal boru, ve ayrıca bir sonraki gerilim giderme prosesi için besleme malzemesi olarak boru kalıpları bulunur.

Başlangıç malzemesi, bobin halindeki rulo çelik şerit veya sıcak haddelenmiş geniş şerit formunda sağlanır. Boru kaynak makinesi, şeridi bir şerit havuzundan çekerek 10 ila 120 m/dak arasında değişen hızlarda sürekli olarak çalışır[14].

Yüksek frekans kaynağını oluşturan iki önemli etken;

Yüzey etkisi

Yakınlaşma etkisi

Bu etkiler Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Yüksek frekansta akım sadece yüzeyden akmaktadır. Yüzey etkisi, bir iletken üzerinden geçen akımın frekansı arttıkça Şekil 2.7'de görüldüğü gibi akımın yüzeyden akma eğilimi artacağının ifadesidir. Yüksek frekans akımında nüfuziyet derinliği (2.1) denklemi ile bulunur. 5.03 çelik için sabit bir değerdir.

$$\delta = 5.03\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \qquad (2.1)$$

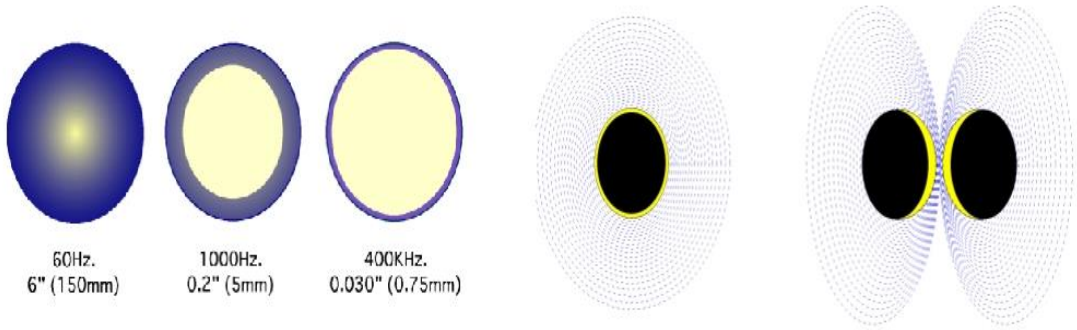
δ: Nüfuziyet derinliği [cm]

ρ: Elektrik direnci [μΩ.cm]

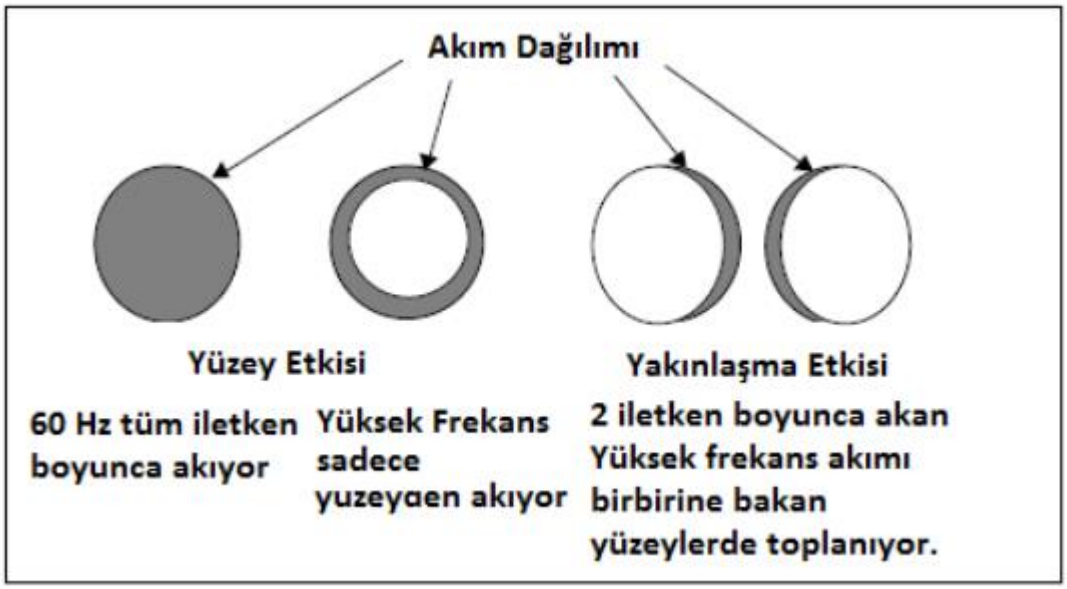
μ: Manyetik geçrigenlik [H/m]

f: Frekans [Hz]

Yaklaşma etkisinde ise İletken bir tel üzerinden akım geçtiğinde tel etrafında manyetik alan çizgileri oluşur. Üstünden akım geçen iki iletken birbirine yaklaştırıldığında manyetik alan çizgileri ve akım Şekil 2.8'de olduğu gibi tellerin birbirlerine bakan yüzlerinde yoğunlaşır[17]. Buna yakınlaşma etkisi denir.

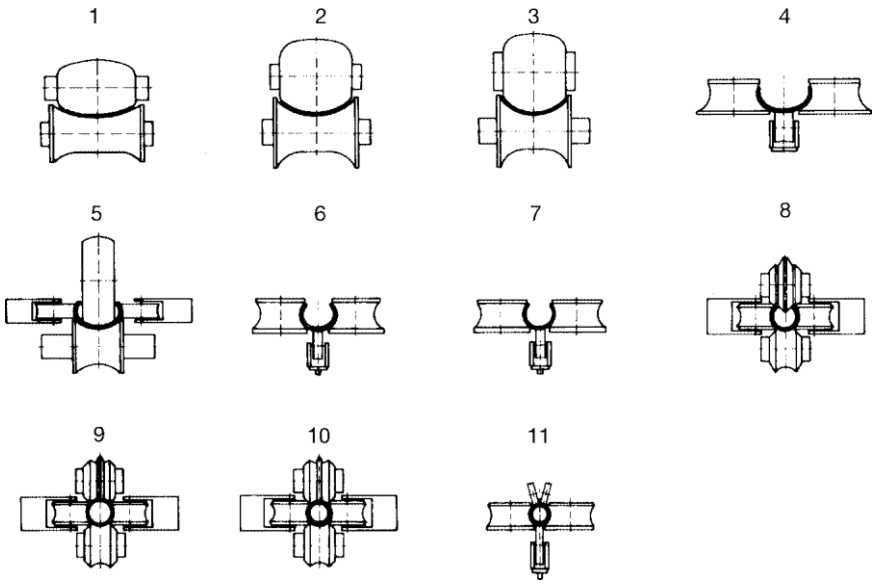


Şekil 2.7 : Yüksek Frekans Etkisi[16].



Şekil 2.8 : Yüksek Frekans Etkisi

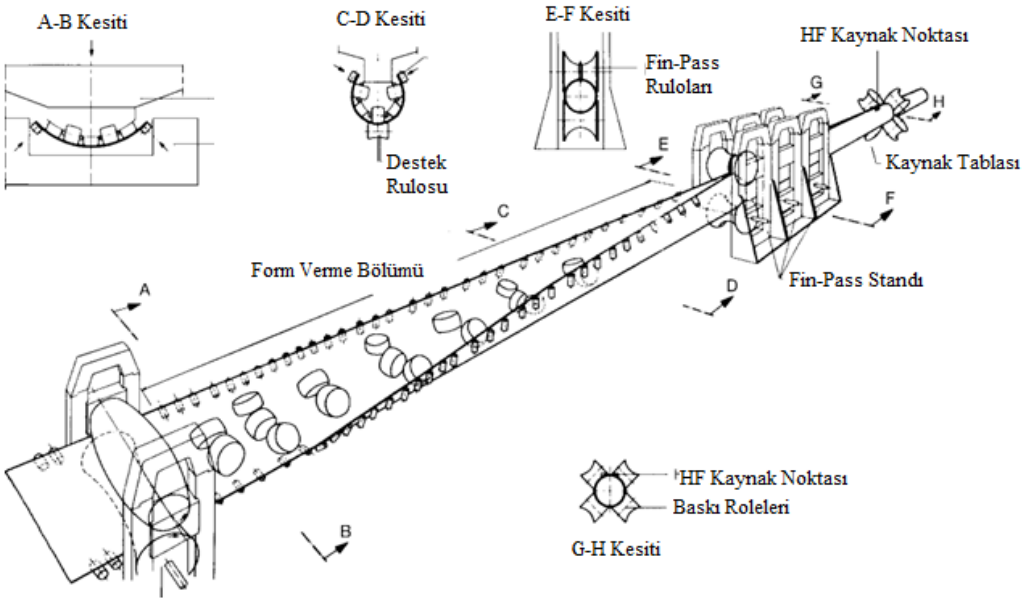
Şekil 2.9 rulo şekillendirme sürecinin diyagramsal bir temsilini göstermektedir. Rulo şekillendirme tesisi, maksimum 609 mm'ye kadar boru çapları için kullanılır ve genellikle, şeridin açık dikişli boruya aşamalı olarak şekil verildiği ve büyük ölçüde tahrik edilen 8 ila 10 adet rulo şekillendirme standından oluşur. Şekil 2.9'da 1 ile 7 aşamalarında belirtilmiştir[14]. Üç fin geçiş standı 8, 9 ve 10 açık dikişli boru kaynak bölümüne doğru yönlendirir. Şekil 2.10 bir dizi rulo standını (rulo kafeslerini) içeren şekillendirme sürecinin prensiplerini gösterir[14].



Şekil 2.9 : Roll form Prosesinin adımları.

Rulo kafesinin ana özelliği, geniş bir ürün çapı aralığında ayarlanabilen bir dizi tahrik edilmeyen iç ve dış şekillendirme rulosunun, şeridi açık dikişli boru şekline yavaşça bükülen bir huni şeklinde bir şekillendirme hattında yapılandırılmış olmasıdır. Girişteki çözülme standı ve çıkış ucu fin geçiş standları genelde tahrik edilir. Şekil 2.10 A-B, C-D ve E-F kesit detayları, hattın farklı bölümlerindeki şekillendirme rulolarının deformasyon derecesini ve düzenini göstermektedir[14].

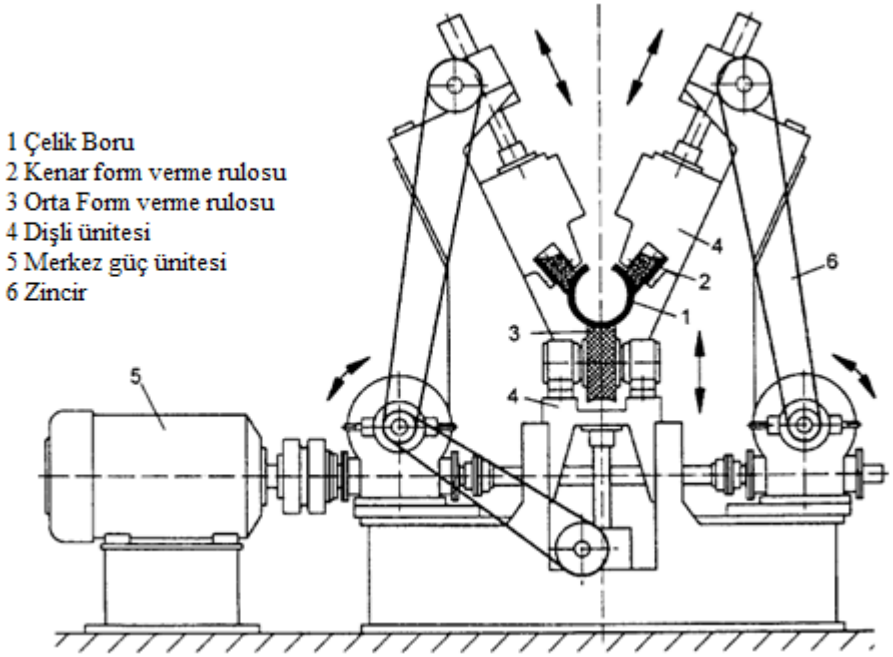
Boru pazarındaki küçük üretim partilerine, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı derecelere ve aşırı et kalınlığı/çap oranlarına yönelik artan talepler nedeniyle, son zamanlarda düz kenar şekillendirme sistemi geliştirilmiştir. Burada, alt şekillendirme ruloları yerine, rulo düz kenarları kullanılmakta ve bu da şekillendirme hattının uzunluğunda önemli bir azalmaya neden olmaktadır. Neredeyse düz bir şerit kenar girişi sayesinde, böyle bir tesis, duvar kalınlığı/çap oranı 1:8 ile 1:100 arasında değişen açık dikişli borular üretebilir[14].



Şekil 2.10 : Roll form Prosesinin adımları

Özellikle küçük üretim partileri ile ilgili olarak maliyet etkinliğinde artış, yenilikçi CTA (Merkezi Ayarlama Mekanizması) şekillendirme sürecinin tanıtılmasıyla, bir boru boyutundan diğerine dönüşüm için gereken dönüşüm sürelerinin azaltılmasıyla elde edilmiştir.

Şekillendirme hattının tüm ruloları bir kirişe monte edilir ve CTA sistemi aracılığıyla tek bir motordan ayarlanır. Şekil 2.11'de CTA prosesi ve bileşenleri gösterilmiştir. Bu, boyut aralığı boyunca hiçbir şekillendirme rulosu (yani takım) değişikliği gerektirmediğinden, önemli zaman tasarrufu ve artan üretkenlik sağlar[14].

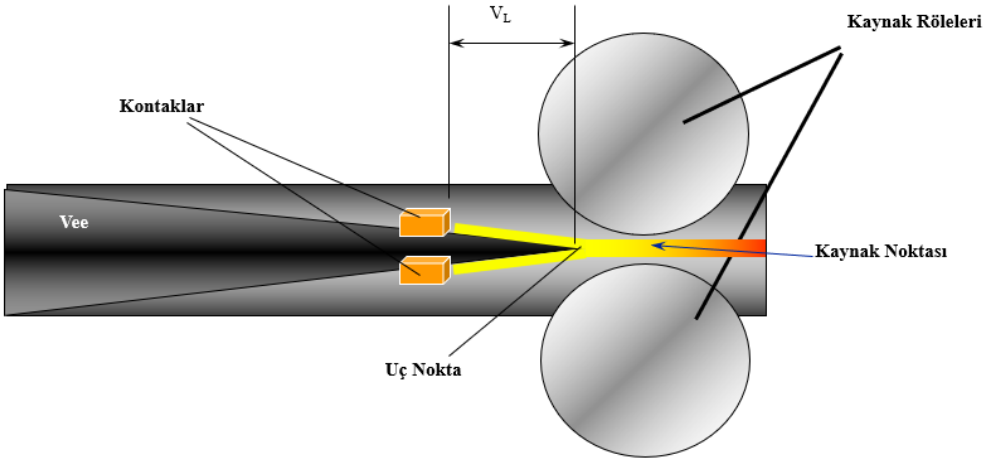


Şekil 2.11 : CTA form verme Prosesi görünümü.

Yüksek Frekans Kaynağı için 2 Metod kullanılmaktadır.

Kontak Metodu

Yüksek frekans kaynağında boru ile temas edecek kısımlar için genellikle bakır malzeme kullanılır. Bu en etkili metotdur. YF akımı kontaklarla boruya akartarılır. Kontaklar bantın her iki kenarına da yerleştirilmiştir. Yerleşim Şekil 2.12'de gösterilmiştir[18].



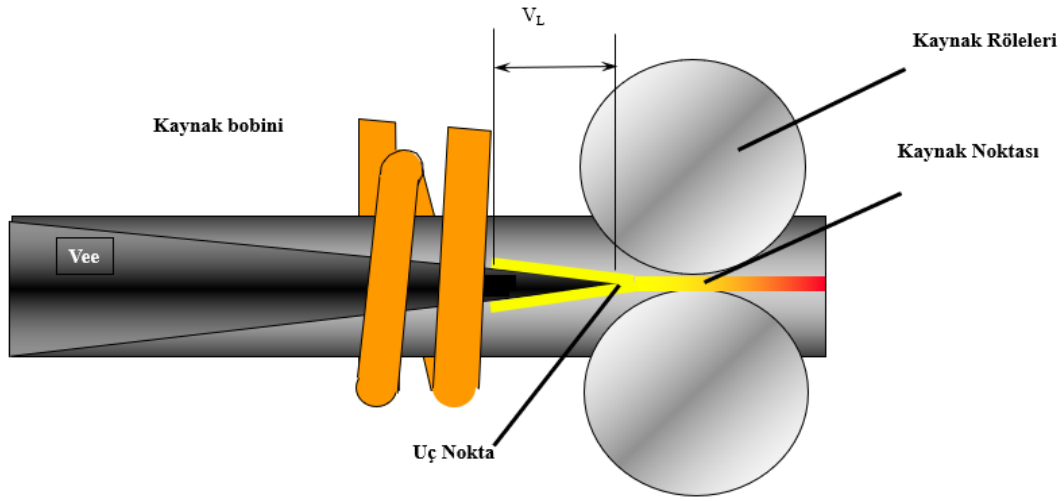
Şekil 2.12 : Kontak Metodu

Kontak metodunda kontakların aşınması ve levhanın yüzey özelliklerinden ötürü kullanımı nispeten daha zordur. Metal yüzeyinde herhangi bir tufal, yüzeysel

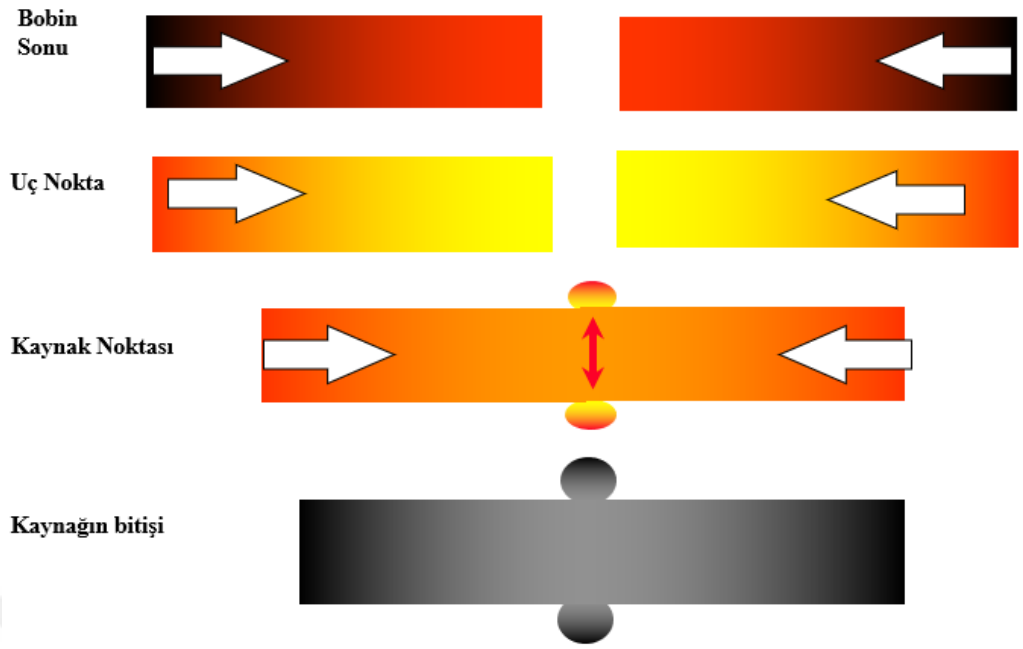
bozukluklar kontakların hızlı aşınmasına neden olacaktır. Ayrıca kaynak bölgesinde sürekli soğutma sıvısına maruz kaldığı için yine kontaklar da çeşitli sorunlara yol açabilmektedir[18].

İndüksiyon Metodu

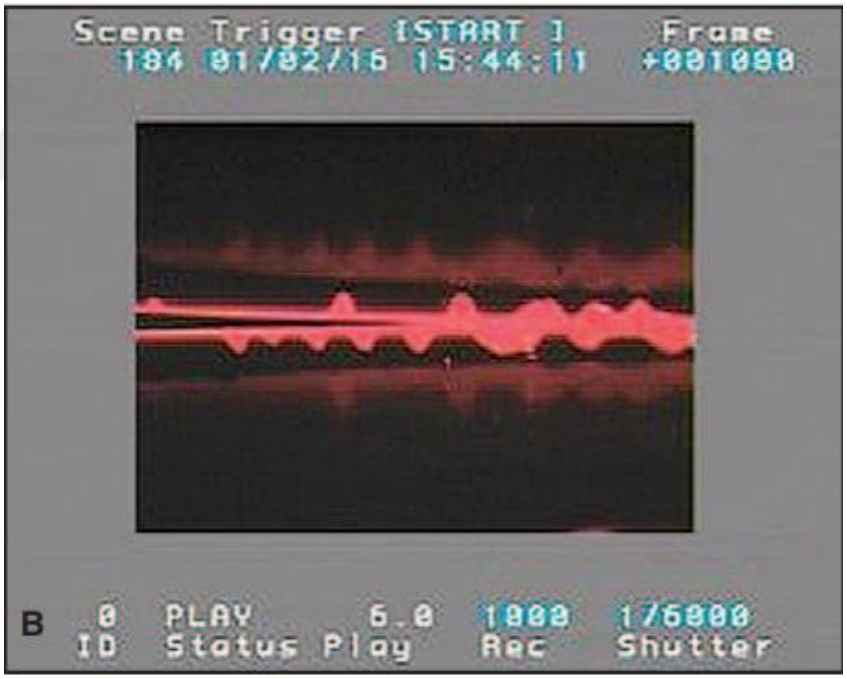
Yüksek frekans ile bant kenarlarını ısıtmak için bakır bobin kullanılır. YF akımı Vee kenarları boyunca akar. Bant kenarları birbirlerine uç noktasında değer. Baskı makaralarında kaynak işlemi gerçekleştirilir. Bu metod sanayii de en çok kullanılan metoddur. Şekil 2.13'de yerleşimi gösterilmiştir. Ayrıca metale herhangi bir kontak durumu olmadığından, dış etkilerden ve metalin yüzey özelliklerinden etkilenmez. Şekil 2.14'de metalin kaynatılması figüre edilmiştir. Şekil 2.15 kaynağın gerçek zamanlı oluşumunu göstermektedir[18].



Şekil 2.13 : İndüksiyon Metodu



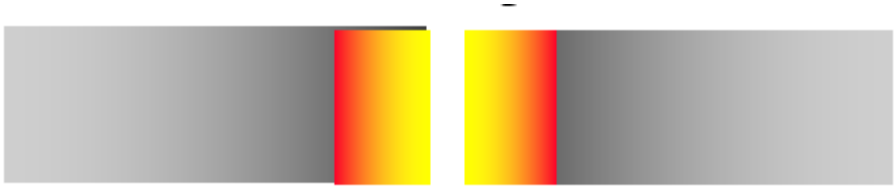
Şekil 2.14 : Kaynağın oluşumu



Şekil 2.15 : Kaynağın gerçek zamanlı oluşumu[19].

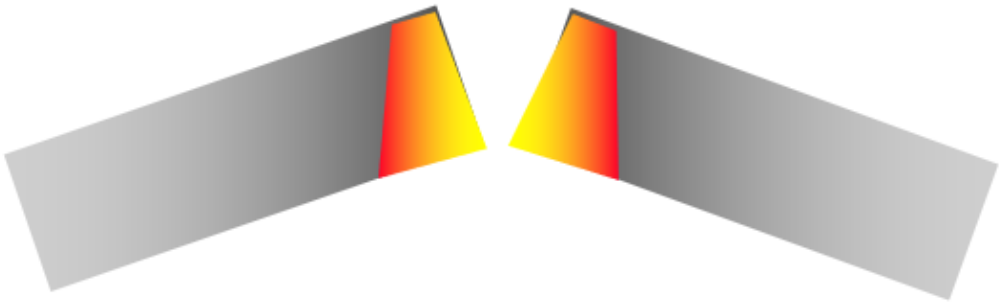
YF indüksiyon kaynağı metodunda kaynatılacak band hazırlığı önem arz etmektedir. Bant kenarları ve makinenin ayarlanması ısı dağılımlarını ve böylece kaynak kalitesini etkilemektedir.

Bant kenarı paralel konumlanmışsa tekdüze ısıtma sağlanır. Çünkü yaklaşma etkisi karşılıklı kenarlarda tekdüze vaziyettedir. Şekil 2.16 paralel konumlanmış bant kenarlarındaki ısı dağılımlarını göstermektedir[18].



Şekil 2.16 : Paralel konumlanmış bant kenarlarındaki ısı dağılımları

Tepeli kenarlar borunun etrafında daha fazla ısı oluşturur çünkü içteki kenarlar birbirine daha yakındır böylece yaklaşma etkisi daha kuvvetlidir. Şekil 2.17'de farklı ısı dağılımları gösterilmiştir[18].

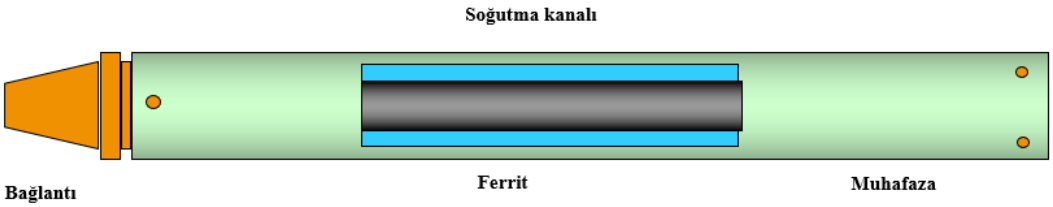


Şekil 2.17 : Paralel konumlanmamış bant kenarlarındaki ısı dağılımları

Bobin veya kontaklar baskı rölelerine mümkün olduğu kadar yakın olmalıdır. Böylece V_L mümkün olan en kısa değerde olur. İndüksiyon kaynağı için bobin çapı, bobin uzunluğu, ve bobinin kaynak baskı rölelerine olan mesafesi uygun değerlerde olmalıdır. Yüksek frekans kaynağında daha etkin bir kaynak için Empederler kullanılır[18].

Empederler

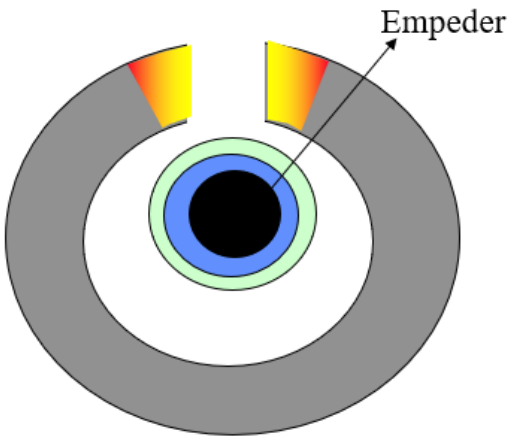
Empeder, boru çevresinde akan YF akımına azaltıcı yönde direnç gösterir. Bu, akım ve sıcaklığın Vee boyunca homojen olarak yayılmasını sağlar. Uygun bir soğutma sağlanmazsa ferrit çok ısınır ve kullanılamaz hale gelir. Şekil 2.18'de kesiti verilmiştir[18].



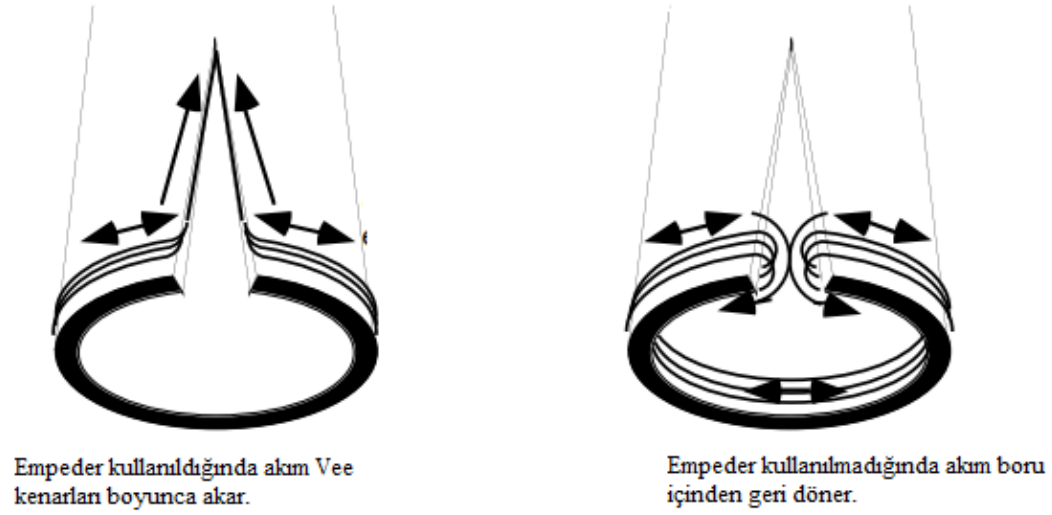
Şekil 2.18 : Empeder kesit görünümü

Empeder olmadan akım ve sıcaklık Borunun çevresine yayılır bu çok fazla güç gerektirir ve boruyu gereksiz şekilde ısıtır. Şekil 2.19'daa boru içi yerleşimi gösterilmiştir[18].

Empeder akımı ve ısıyı bir noktada yani kenarlarda toplar. Bu kaynak için daha az güç gerektirir ve borunun gereksiz ısınmasını önleyip serin tutar. Şekil 2.20'de gösterilmiştir[18].



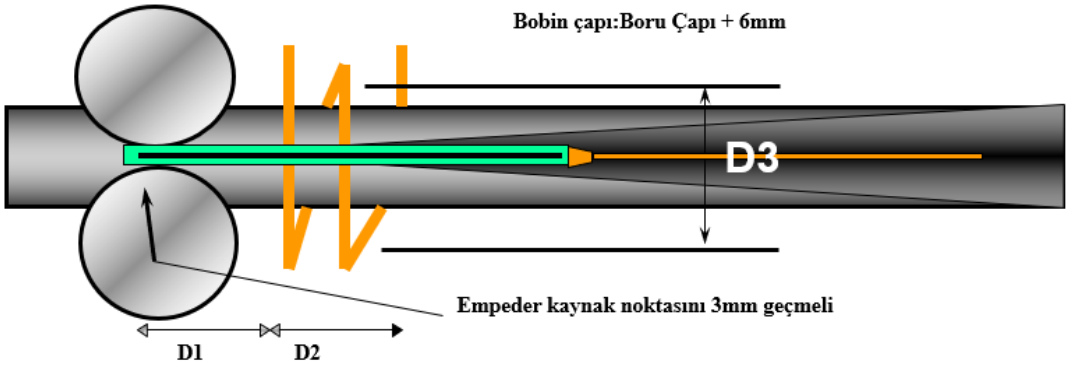
Şekil 2.19 : Empederin boru içine konumlandırılması



Şekil 2.20 : Akıma Empederin Etkisi

Empeder kaynak bölgesinde borunun içine konumlandırılır. Böylece sacın sadece kaynak yapılacak kısmına enerji verilip sadece bu bölge ısıtılmış olmaktadır. Böylece etkin bir şekilde ısıtma sağlanmış olmakta ve kaynak yapılması kolaylaşmaktadır.

Şekil 2.21'de Thermatool'un genel Empeder yerleşimi ve kaynak yerleşimleri ile ilgili olarak tavsiye ettiği değerler gösterilmiştir. Thermatool makine üreticisi olarak müşterilerine bu değerleri standart olarak sağlamaktadır. Bu değerler üretilmek istenen boru çapına göre her firma için farklılıklar arz edebilir. Şekil 2.21'de bazı özellikler üretici tarafından belirtilmiştir[18].



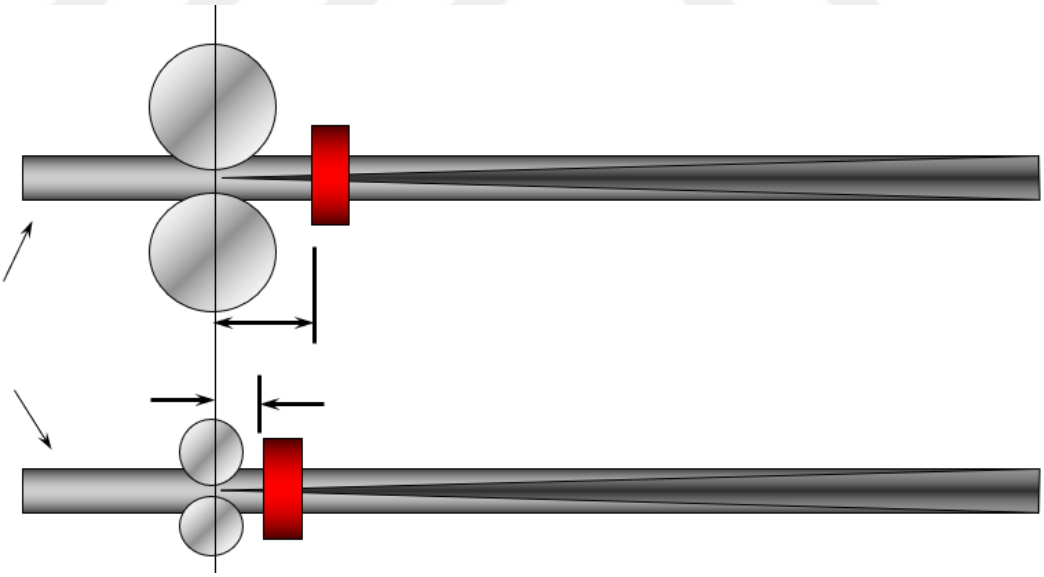
Şekil 2.21 : Thermatool tavsiye edilen değerler

Yüksek frekans kaynak prosesi bu 2 bileşeni de kullanarak yapılır. Yüksek frekans indüksiyon metodu kullanılarak borunun etrafında akımın oluşturulması ve empeder yardımı ile bu akımı kaynak yapılacak Vee bölgesinde yoğunlaştırılmaktadır.

Vee uzunluğunun kaynak üzerine etkisi;

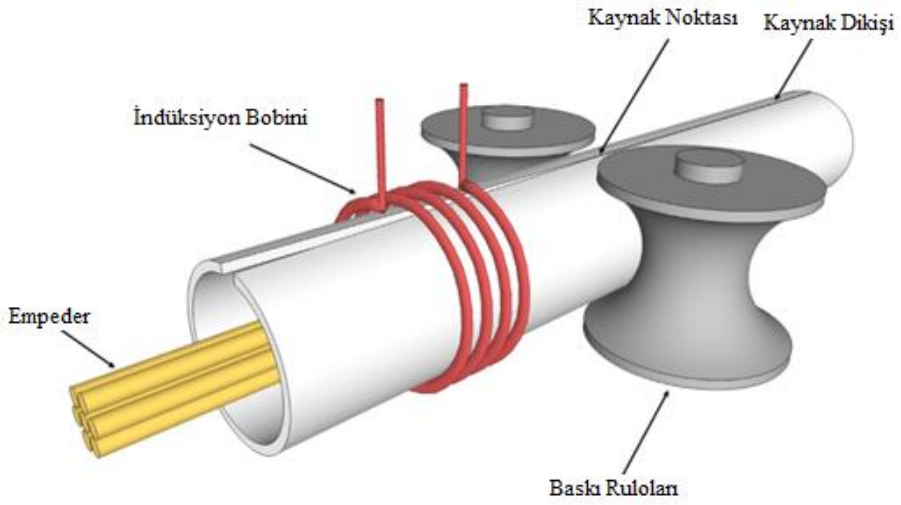
1. Kısa Vee uzunluğu için daha az güç gerekir, çünkü ısıtılması gereken metal kısım azdır.
2. Kısa Vee uzunluğuna sahip boruda, aynı güçte uzun Vee sahip malzemeye göre boruda daha fazla hat hızına müsaade eder.
3. Uzun Vee uzunluğuna sahip malzemede etkili difüzyon (nüfuziyet) için daha fazla güce ihtiyaç vardır.

Aynı çaplı boru üretimi için geniş baskı röleleri kullanıldığında daha uzun Vee uzunluğunu sağlar. Bu da çok fazla güç gerektirir. Çünkü hem daha fazla kenar ısıtılacak hem de geniş kaynak rölesi de ısınacağı için güç kaybına neden olur. Şekil 2.22'de bu durum gösterilmiştir[18].



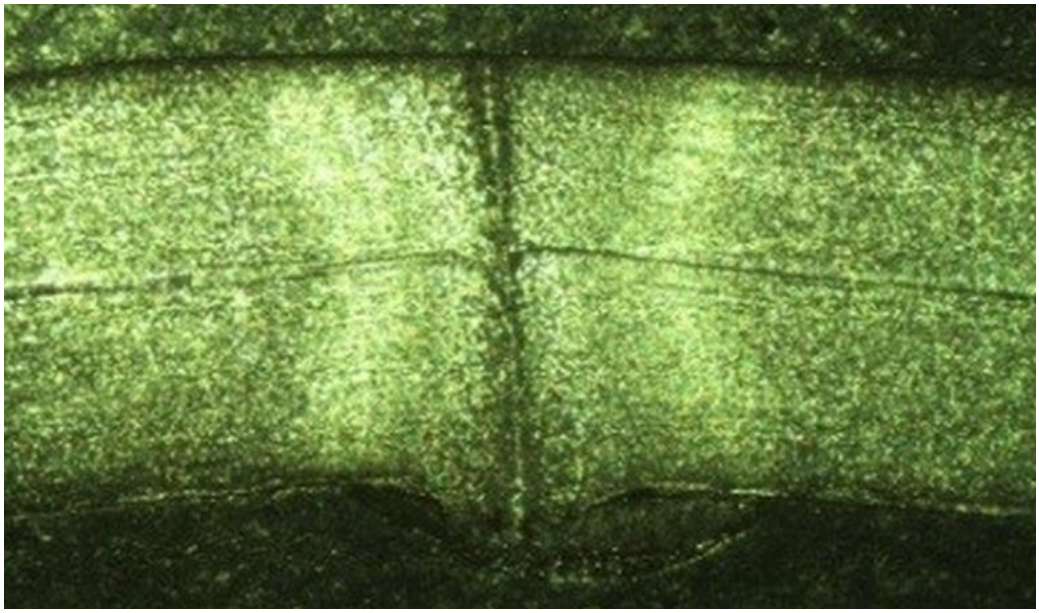
Şekil 2.22 : Büyük çap baskı röleleri ve küçük çap baskı röleleri Vee uzunluğuna etkisi

İndüksiyonla boru üzerinde akım oluşturulması, kontak metoduna göre sanayii'de kullanımı daha yaygındır. Ayrıca dış etkilerden daha az etkilendiği için de tercih sebebi olmaktadır. Şekil 2.23'de Yüksek frekans Kaynak prosesi tüm bileşenleri ile gösterilmiştir[18].

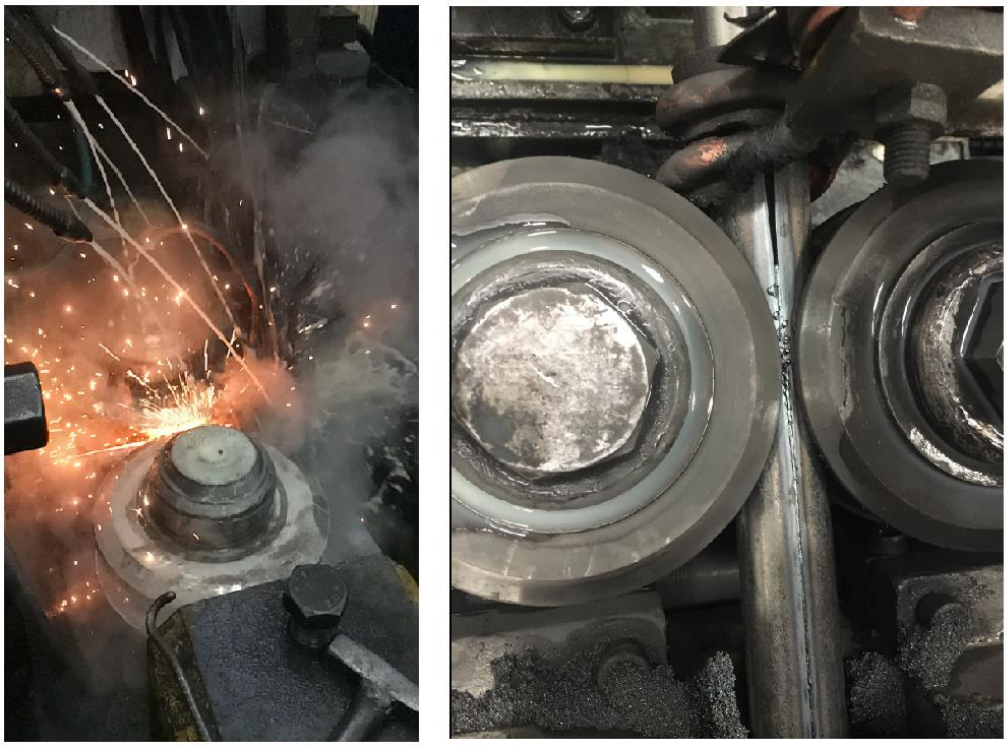


Şekil 2.23 : Yüksek Frekans Kaynak Prosesi

Yüksek frekans kaynağında oluşan kaynak bölgesinin tipik bir görünümü Şekil 2.25'de verilmiştir. Bu tipik yapının tam kaynak bölgesinin ortasında oksit-Ferrit çizgisi denilen bir bölge oluşmaktadır. Kaynağı ve Ana metali gösteren tipik bir makro görüntüsü Şekil 2.24'de gösterilmiştir.



Şekil 2.24 : Tipik Makro görüntüsü



Şekil 2.25 : HFIW Kaynak Prosesi

3. ÜRETİM STANDARTLARI

3.1 EN ISO 10255

“Kaynak edilmeye ve diş açmaya uygun alaşımsız çelik borular-Teknik teslim şartları”. Bu standard, kaynak etmeye ve diş açmaya uygun, dairesel kesitli, alaşımsız çelik boruların özelliklerini ve boru uçlarının nihaî durumu ve kaplamalarıyla ilgili çok sayıda tercihi kapsar. Bu standard, belirtilmiş dış çapları 10,2 mm – 165,1 mm arasında değişen orta ve ağır olmak üzere iki seri ve üç tip kalınlıktaki boruları kapsar.

3.2 EN ISO 10217-1

"Basınç amaçlı kaynaklı çelik borular - Teknik teslim şartları - Bölüm 1: Belirli soğukta çalışma özelliklerine sahip elektrik kaynaklı alaşım dışı ve alaşım çelik borular". Bu standart, belirli sıcaklıkta çalışma özelliklerine sahip elektrik kaynaklı alaşım dışı ve alaşım çelik borular için teknik teslim şartlarını belirtir. Boyutlar, toleranslar, mekanik özellikler ve tahribatsız testler gibi gereksinimleri içerir.

3.3 EN ISO 10217-2

“Basınç amaçlı kaynaklı çelik borular - Teknik teslim şartları - Bölüm 2: Belirli yüksek sıcaklık özelliklerine sahip elektrik kaynaklı alaşım dışı ve alaşım çelik borular". Bu standart, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmış elektrik kaynaklı alaşımsız ve alaşımlı çelik borular için teknik teslim şartlarını belirtir. Boyutlar, toleranslar, mekanik özellikler ve tahribatsız testler gibi gereksinimleri kapsar.

3.4 EN ISO 10217-3

"Basınç amaçlı kaynaklı çelik borular - Teknik teslim şartları - Bölüm 3: Elektrik direnç kaynağı ile kaynaklı çelik borular" olarak adlandırılır. Bu standart, elektrik direnç kaynağı ile kaynaklanmış çelik boruların teknik teslim şartlarını belirler. Boruların boyutları, toleransları, mekanik özellikleri ve testleri gibi konuları kapsar. Bu standart, endüstriyel uygulamalar için kullanılan çeşitli tipteki basınç amaçlı çelik boruların kalitesini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir.

3.5 EN ISO 10219-1

"Çelik boru kare ve dikdörtgen kesitli borular için kaynaklı ve soğuk şekillendirilmiş yapısal çelik boruların teknik teslim şartları - Bölüm 1: Genel gereksinimler" olarak adlandırılır. Bu standart, kaynaklı ve soğuk şekillendirilmiş yapısal çelik boruların teknik teslim şartlarını belirler. Özellikle, kare ve dikdörtgen kesitli çelik boruların üretimine ve teslimatına ilişkin genel gereksinimleri kapsar. Boyutlar, toleranslar, mekanik özellikler, kaynak özellikleri ve testler gibi konuları içerir.

3.6 EN ISO 10219-2

"Çelik boru kare ve dikdörtgen kesitli borular için kaynaklı ve soğuk şekillendirilmiş yapısal çelik boruların teknik teslim şartları - Bölüm 2: Toleranslar, boyutlar ve kütleler" olarak adlandırılır. Bu standart, kare ve dikdörtgen kesitli yapısal çelik boruların toleransları, boyutları ve kütlelerine ilişkin teknik teslim şartlarını belirler. Boruların geometrik özellikleri, toleransları, boyutları ve ilgili testler hakkında ayrıntılı bilgi sağlar.

3.7 API 5L-Line Pipe

API 5L, Amerikan Petrol Enstitüsü (American Petroleum Institute - API) tarafından geliştirilen bir standarttır. Bu standart, petrol ve doğalgaz endüstrisinde kullanılan çelik borular için gereksinimleri belirler. API 5L, boru hatlarında taşınan petrol, doğalgaz ve diğer hidrokarbonların güvenli ve verimli bir şekilde iletilmesini sağlamak için tasarlanmıştır.

API 5L standartı, boruların kimyasal bileşimi, mekanik özellikleri, boyutları, toleransları, test yöntemleri ve işaretlemesi gibi çeşitli konuları kapsar. Bu standart, boruların çeşitli sınıflarını ve çelik türlerini tanımlar ve belirli hizmet koşullarına uygunluklarını sağlar. API 5L, farklı uygulamalar için çeşitli sınıflarda çelik boruları içerir. Örneğin, API 5L Grade B, orta düzeyde mekanik özelliklere sahip bir sınıftır ve genellikle boru hatlarında kullanılırken, API 5L X65 gibi yüksek mukavemetli sınıflar daha zorlu hizmet koşullarında tercih edilir. Bu standart, boru üreticileri, kullanıcıları ve düzenleyici kuruluşları arasında bir standartlaşma sağlar ve endüstride güvenlik ve kaliteyi artırmaya yardımcı olur.

3.8 API 5CT-Casing and Tubing

API 5CT, Amerikan Petrol Enstitüsü (American Petroleum Institute - API) tarafından geliştirilen bir standarttır. Bu standart, petrol ve doğalgaz endüstrisinde kullanılan boru kuyuları için gereksinimleri belirler. API 5CT, boru kuyularında kullanılan çelik boruların üretim, muayene, test, işaretleme ve ambalajlanma gereksinimlerini kapsar.

API 5CT standartı, çeşitli derecelerde ve türlerde çelik boruları tanımlar. Bu borular, petrol ve doğalgaz kuyularında kullanılmak üzere tasarlanmıştır ve çeşitli koşullara dayanacak şekilde üretilirler. API 5CT standartı, boruların kimyasal bileşimi, mekanik

özellikleri, boyutları, toleransları, yüzey koşulları ve diğer teknik özellikleri gibi detaylı gereksinimleri belirler.

Bu standart, boru üreticileri, petrol ve doğalgaz şirketleri, kuyu operatörleri ve düzenleyici kuruluşlar arasında bir standartlaşma sağlar. API 5CT'ye uygun boruların kullanılması, kuyu güvenliğini ve verimliliğini artırırken, aynı zamanda kuyu operasyonlarının maliyetini ve riskini azaltmaya yardımcı olur.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

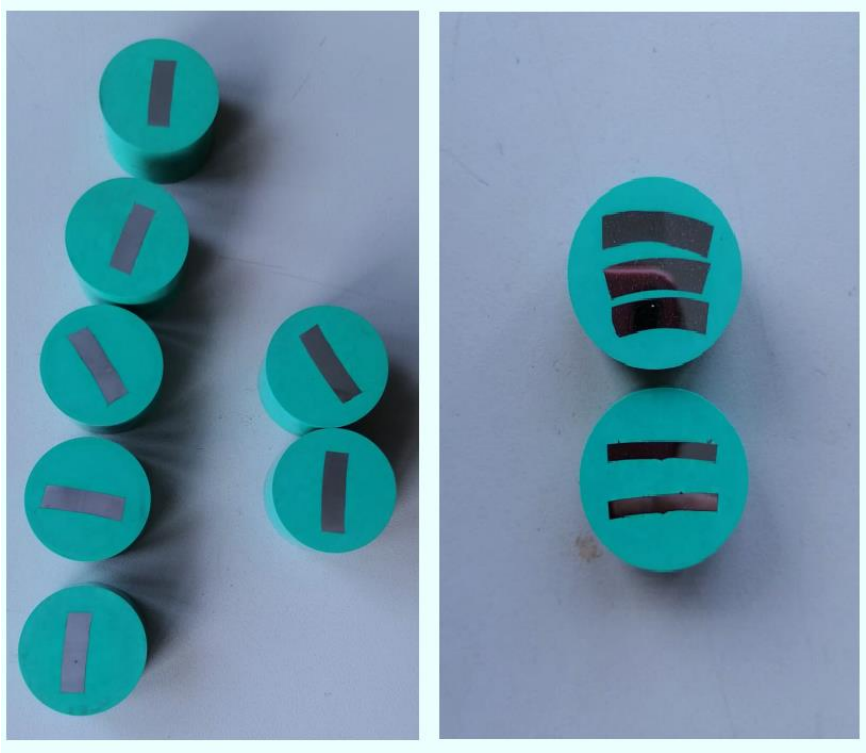
Deneysel çalışmalarda 4 farklı üretim hızı seçilmiştir. Sanayiide bir çok hızda kaynak yapılabilmektedir. Fakat üretim standartları ve boru ebadı göz önüne alındığında hızların sınırlandığı görülmektedir. Tüm standartlar, boru ebatları, ve üretilebilirlik göz önüne alındığında rasyonel bir bağlantı yapılabilmesi için ortak olan hızlar seçilmiştir. Bu nedenle en yoğun kullanılan hızlar için istatistiki çalışma yapılıp hızlar belirlenmiştir. Bu hızlar 25m/dak, 35m/dak, 45m/dak, 55m/dak hızlar olarak belirlenmiştir. Bu hızlara ±2m/dak tolerans dahilindedir. Her standartta farklı hızlar için birbirine yakın çap ve et kalınlığı seçilmiş ve çap 3”-10” et kalınlığı 3mm-9mm arasında sınırlandırılmıştır. Çizelge 4.1’de kullanılan malzemeler ve ilgili standartlar belirtilmiştir. Çekme testi, sertlik testi, kimyasal Analiz, Mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

Çizelge 4.1 : Kullanılan Malzemeler

No	Standart	Malzeme
1	ISO 10255	S195T
2	ISO 10219-1	S235JRH
3	ISO 10219-1	S275JOH
4	ISO 10219-1	S275J2H
5	ISO 10219-1	S355JO
6	ISO 10219-1	S355J2H
7	ISO 10217-1	P235TR1
8	ISO 10217-1	P265TR1
9	ISO 10217-2	P195GH
10	ISO 10217-2	P265GH
11	ISO 10217-2	P295GH
12	ISO 10217-3	P355N
13	ISO 10217-3	P355NH
14	API 5L PSL 1	L210
15	API 5L PSL 1	L245N/ GrBN
16	API 5L PSL 1	L290N
17	API 5L PSL 1	L320N
18	API 5L PSL 1	L360N
19	API 5L PSL 1	L390N
20	API 5CT	J55

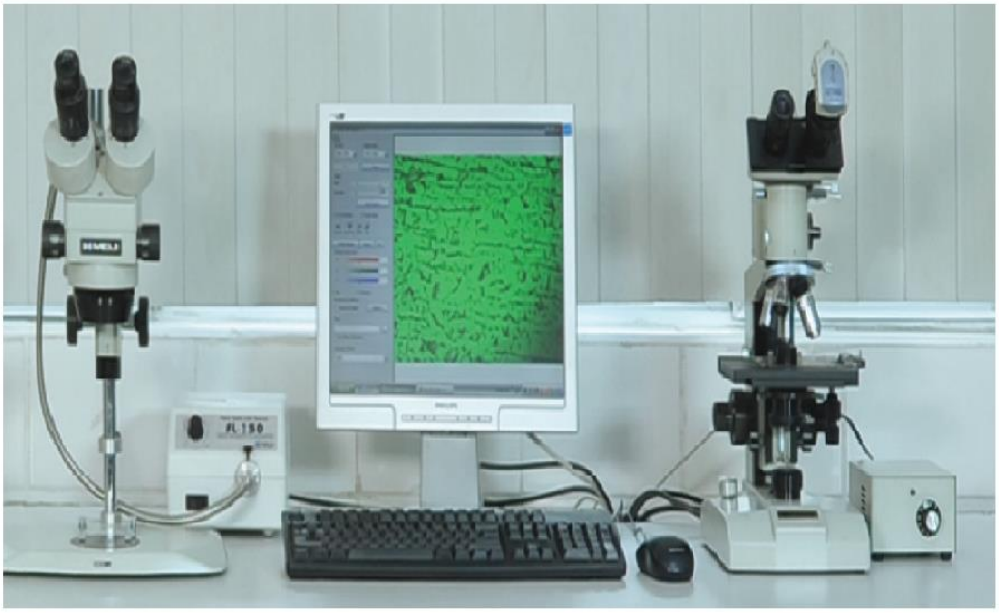
4.1 Metalografik Numune Hazırlama

Numuneler normal çalışma koşullarında üretim sırasında temin edilmiştir. Her 4 farklı hız için ayrı ayrı numunler hazırlanmıştır. Çizelge 4.1'de belirtilen standartlara ait malzemeler yüksek frekans indüksiyon metodu ile boru yapılırken hat üstünden uygun ölçülerde kesilerek alınmıştır. Numuneler metalografik inceleme laboratuvarda hazırlanmıştır. Mikroyapı incelemeleri için numuneler kaynak bölgelerinden dairesel testere ile kesilmiştir. Daha sonra numuneler bakalite alınmıştır. Daha sonra 5 farklı kaba zımparalamadan(400-600-800-1000) sonra, parlatma çuhası kullanılarak elmas pasta ile parlatılmıştır. Parlatmadan sonra Nital2 ile 5-8 saniye kadar dağlanmış ve saf su ile reaksiyon sonlandırılmıştır. Ardından metalografi mikroskobunda 50x ve 100x büyütme ile incelemeler yapılmış ve görüntüler alınmıştır. Makro yapı için ise Pikrik asit ile 30-40^{0}C sıcaklıkda 3-4 dakika kadar dağlanmış ve saf su ile reaksiyon sonlandırılmıştır. Numune örnekleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Metalografik numune örnekleri

Metalografik inceleme için mikroskoplar Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Mikro yapı incelemeleri kamera yardımı ile dijital ortama alınmıştır.



Şekil 4.2 : Metal Mikroskopları

4.2 Sertlik Testleri

Mikrosertlik ölçümleri MATSUZAWA VMT-7S mikrosertlik cihazı ile standart Vickers ucu kullanılarak ölçülmüştür. Ön yük 10kgf olarak kullanılmıştır. Bir sıra boyunca sertlik değerleri alınmıştır. Her numune için 5 ölçüm alınarak sertlik değerleri hesaplanmıştır. Sertlik cihazı Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

Şekil 4.3 : Sertlik Cihazı

4.3 Çekme Testleri

Çekme numuneleri hat üstünde üretim sırasında üretimden direkt alınan boru halindeki numunelerden hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken ISO standartlarında olan numuneler için numuneler EN ISO 6892-1 standartı esas alınarak hazırlanmıştır. API numuneleri için ise ASTM A370 standartı referans alınmıştır. Her numune için çekme testi yapılarak malzemenin mekanik özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Numune örnekleri Şekil 4.4'de verilmiştir.

Şekil 4.4 : Çekme numunesi örnekleri

Çekme testleri Zwick-Roel-250 markalı çekme makinesi ile laboratuvar ortamında yapılmıştır. Test sonucu incelenen mekanik özellikler; akma, çekme mukavemeti ve yüzde kopma uzamasıdır. Test verileri alınarak çekme eğrileri çizilmiş ve mekanik özellikler belirlenmiştir. Çekme makinesı Şekil 4.5'de verilmiştir.

Şekil 4.5 : Çekme Makinesi

4.4 Kimyasal Analiz Testleri

Kimyasal analizler hazırlanan çekme numunelerinin uç kısımları kaba zımpara(400) ile parlatılarak yapılmıştır. Numunelerin analizi için SPEKTROMAXX kimyasal analiz cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz spektral yöntemle numunelerin kimyasal bileşenlerinin analizini yapmaktadır. Cihaz analize başlamadan önce standart numuneler ile kalibrasyonu yapılmış ve argon flash ile temizliği yapılmıştır. Analize başlanırken numunenin cihaza tam yerleşmesi sağlanmış olup, herhangi bir okumama durumunda tekrardan analiz yapılmıştır. Analiz verileri alınarak elemental oranları belirlenmiştir. Cihaz ve destek ünitesi Şekil 4.6'de gösterilmiştir.

Şekil 4.6 : Kimyasal Analiz Cihazı

Kullanılan tüm cihazlar ilgili standartlara göre periyodik olarak kalibrasyonları yapılmaktadır. Ayrıca bu kalibrasyonla belirli periyotlarda doğrulanmaktadır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

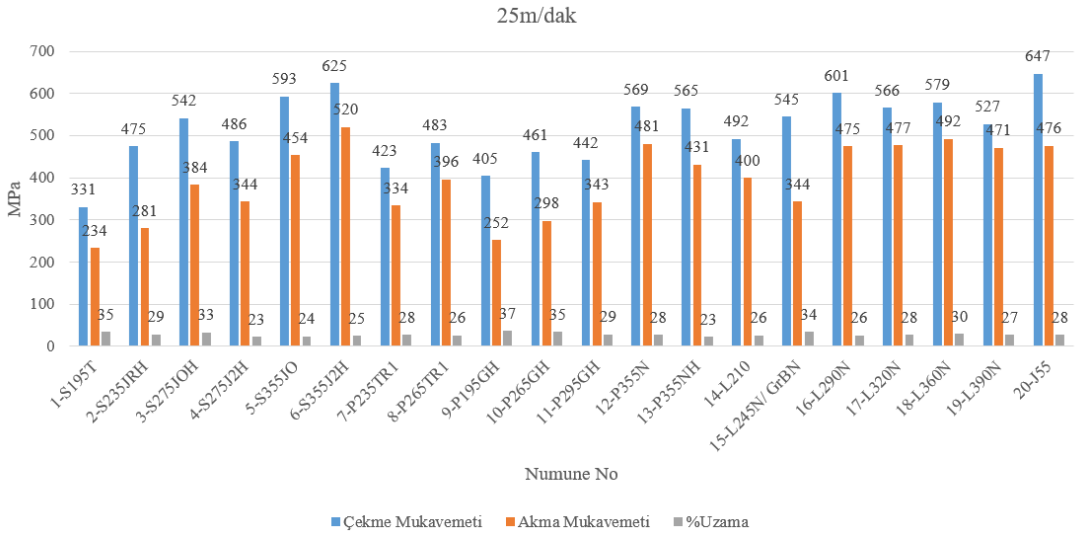
Deneysel sonuçlar beş ana başlıkta incelenmiştir. Farklı hızlardaki davranışların incelenmesi için 25m/dak, 35m/dak, 45m/dak, 55m/dak ve üstü hızlardaki değerler ve analiz sonuçları ayrı ayrı incelenmiştir. Son bölümde ise malzemelerin bu 4 farklı hızdaki özellikleri karşılaştırılmıştır.

5.1 25m/dak Hızındaki Deneysel Sonuçlar

Bu hızda üretilmiş numunelerin deneysel sonuçları 4 ana başlıkta incelenecektir. Bu başlıklar; Çekme testi sonuçları, Sertlik testi sonuçları, Kimyasal analiz sonuçları, ana malzeme ve kaynak bölgesi mikroyapı incelemesi ve karakterizasyonudur.

5.1.1 Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi sonuçları Şekil 5.1'de belirtilmiştir.

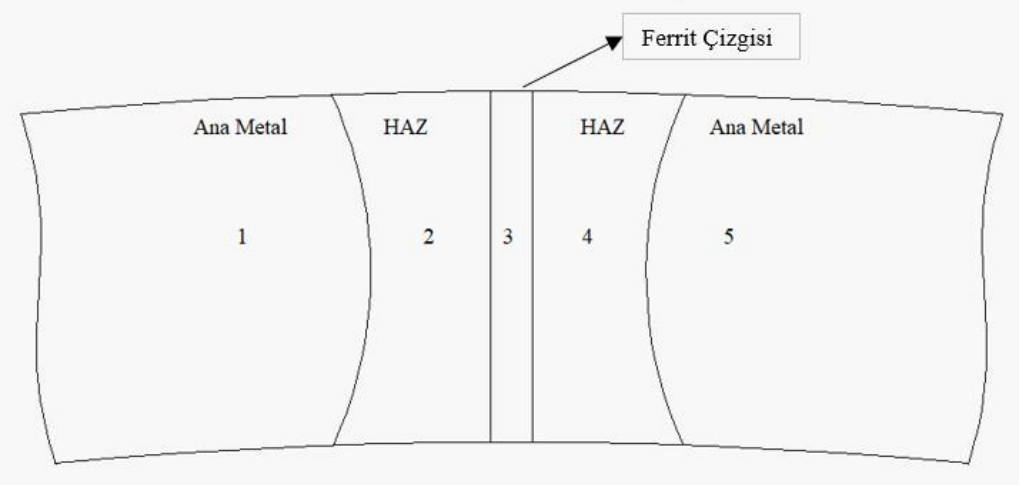


Şekil 5.1 : 25m/dak hızındaki Çekme testi sonuçları

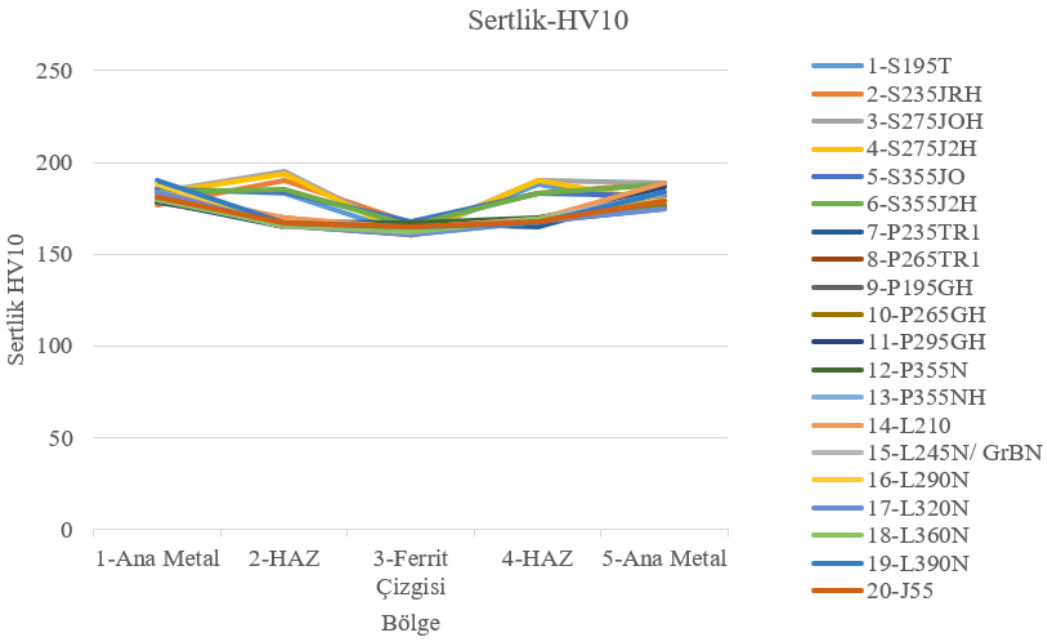
Grafikler incelendiğinde, mekanik özellikler standart akma mukavemetini tüm numunelerin bu hızda karşıladıkları görülmüştür. Çekme mukavemeti ise en yüksek beklenen J55 malzemede görülmüştür. Bu numunenin uzaması diğer numunelere nispeten ortalama değerlerde olduğu görülmüştür. Bu mekanik özellikler ışığında bu numune için kaynak bölgesinin ana malzemeye yakın özelliklerde olduğu düşünülebilir. En fazla %uzama ise %37 ile 9-P195GH numunesinde gerçekleşmiştir.

5.1.2 Sertlik Testi Sonuçları

Sertlik alınan noktalar Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Bir sıra boyunca 5 adet sertlik alınmıştır.



Şekil 5.2 : Sertlik bölgeleri



Şekil 5.3 : 25m/dak hızındaki Sertlik testi sonuçları

Sertlik sonuçlarına bakıldığında Ana metal kısmı tüm numunelerde kaynağın hem sağ tarafında hem de sol tarafında benzer olduğu görülmüştür. Bu da boru şekil verilirken bu hızda herhangi bir sertleşme olmadığını göstermektedir. HAZ bölgesinde ise tane kabalaşmasına istinaden sertliğin azaldığı gözlemlenmiştir. 1-S195T, 2-S235JRH, 3-

S275JOH, 4-S275J2H, 5-S355JO, 6-S355J2H malzemelerde ise sertliğin ani artış gösterdiği görülmüştür bu da bu kısımda martenzit yapısının oluşmasından ötürü olduğu görülmüştür. Mikro yapı incelemelerinden de anlaşıldığı üzere kaynak HAZ bölgesinde oluşan martenzit bu kısımda sertliği nispeten arttırmıştır.

5.1.3 Kimyasal Analiz Sonuçları

Kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Kimyasal Analiz Sonuçları

Numune	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N	Al	Ceş
1-S195T	0,107	0,009	0,307	0,016	0,026	0,001	0,018	0,014	0,031	0,003	0,001	0,001	0,005	0,032	0,1673
2-S235JRH	0,12	0,013	0,57	0,016	0,016	0,001	0,015	0,014	0,018	0,001	0,002	0,001	0,007	0,041	0,221133
3-S275JOH	0,18	0,01	1,16	0,011	0,014	0,001	0,046	0,048	0,034	0,004	0,001	0,001	0,009	0	0,3874
4-S275J2H	0,145	0,246	1	0,011	0,012	0,002	0,067	0,057	0,044	0,004	0,002	0,001	0,008	0,052	0,329933
5-S355JO	0,14	0,2	1,22	0,021	0,009	0,001	0,072	0,035	0,029	0,006	0,001	0,008	0,011	0	0,357667
6-S355J2H	0,162	0,03	1,44	0,011	0,01	0,014	0,069	0,054	0,043	0,006	0,001	0,019	0	0,039	0,4202
7-P235TR1	0,095	0,013	0,455	0,01	0,013	0,001	0,041	0,039	0,021	0,006	0,001	0,001	0,007	0,059	0,181767
8-P265TR1	0,09	0,2	0,71	0,015	0,007	0,002	0,011	0,041	0,017	0,004	0,004	0,001	0,007	0	0,2168
9-P195GH	0,14	0,008	0,55	0,009	0,011	0,001	0,026	0,025	0,023	0,004	0,001	0,001	0,006	0,04	0,240667
10-P265GH	0,136	0,021	0,64	0,008	0,009	0,001	0,014	0,028	0,021	0,004	0,001	0,001	0,009	0,037	0,250667
11-P295GH	0,08	0,188	0,58	0,018	0,01	0,001	0,059	0,047	0,042	0,003	0,001	0,001	0,011	0,041	0,192933
12-P355N	0,127	0,035	1,15	0,019	0,009	0,001	0,028	0,046	0,027	0,005	0,002	0,049	0,004	0,033	0,3304
13-P355NH	0,12	0,043	1,15	0,014	0,009	0,001	0,022	0,046	0,026	0,005	0,001	0,053	0,006	0,045	0,3226
14-L210	0,092	0,199	0,51	0,012	0,007	0,01	0,03	0,051	0,022	0,005	0,003	0,001	0,008	0	0,1884
15-L245N	0,099	0,169	0,64	0,009	0,009	0,002	0,03	0,041	0,034	0,007	0,003	0,001	0,008	0,058	0,2192
16-L290N	0,147	0,186	1,29	0,012	0,004	0,01	0,016	0,017	0,03	0,006	0,022	0,049	0,005	0,043	0,3758
17-L320N	0,054	0,181	1,03	0,011	0,006	0,002	0,019	0,037	0,02	0,003	0,003	0,049	0,008	0,045	0,2346
18-L360N	0,09	0,16	1	0,02	0,007	0,001	0,021	0,04	0,02	0,002	0,002	0,039	0,009	0	0,265533
19-L390N	0,059	0,174	0,97	0,014	0,01	0,018	0,023	0,05	0,027	0,002	0,006	0,049	0,006	0,055	0,232533
20-J55	0,25	0,19	1,38	0,017	0,005	0,002	0,029	0,034	0,022	0,006	0,001	0,002	0,01	0	0,49

Kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında tüm numunelerdeki C oranları 0,1 civarındadır. İlk bakıldığında bu çeliklerin kaynağa elverişli olduklarını düşündürse de asıl kaynağa elverişlilik ölçüsü eş değer karbon hesaplamadır ve IIW'ya göre eş değer karbon oranlarına bakıldığında, numunelerin çoğunluğunun 0,2 karbon civarında olduğu görülmüştür. Bu da kaynağa elverişlilik demektir. Ceş<0,40 olduğunda, çeliğin sertleşme eğilimi çok az olmaktadır, iyi kaynaklanabilirlik özelliğine sahiptirler ve kaynak yapılması için ön ısıtmaya ihtiyaç duyulmaz.

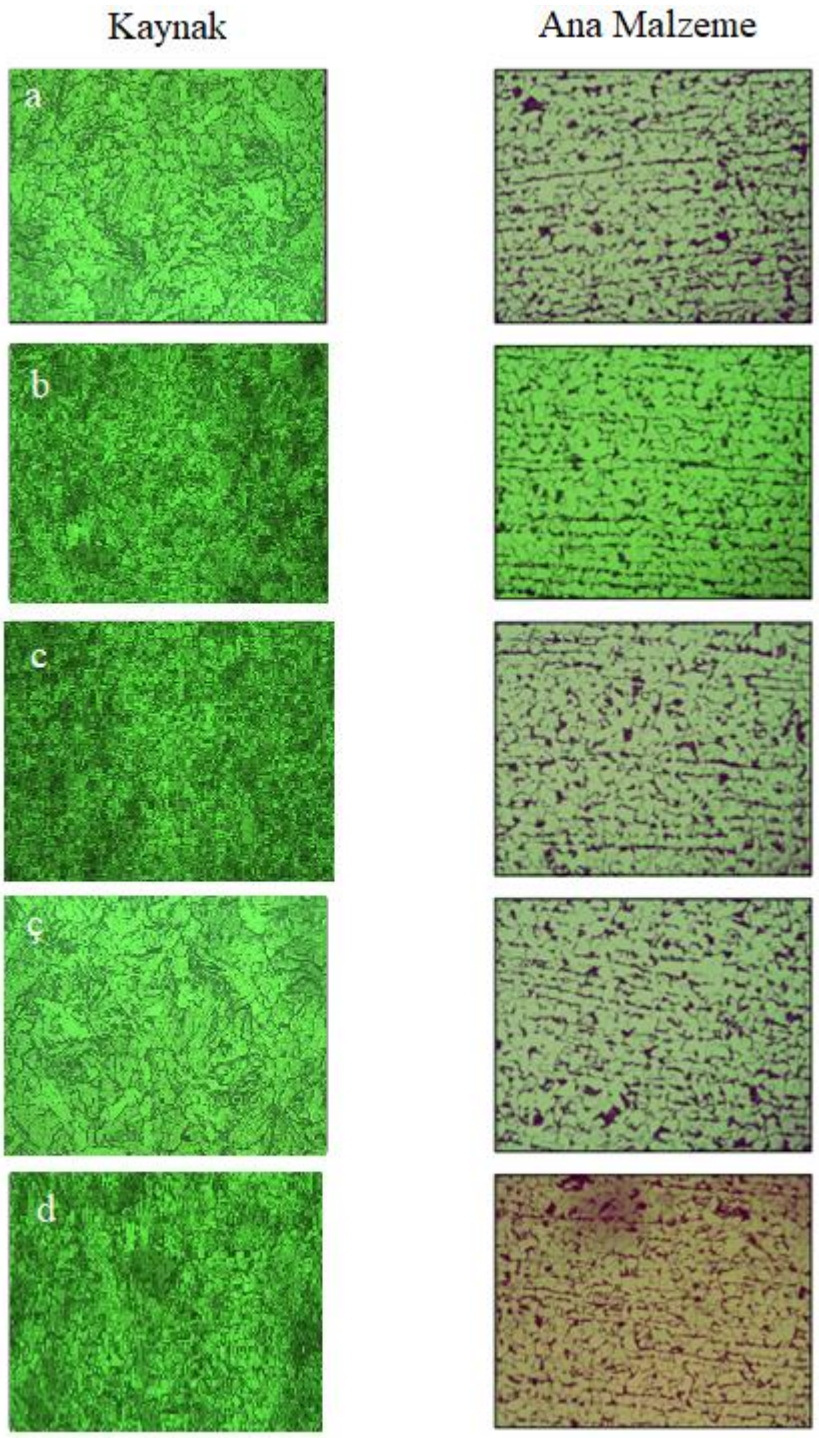
Mn oranlarına bakıldığında 5-S355JO, 6-S335J2H 12,13 ve 20 numaralı numunelerde 1.5 civarlarında olduğu tespit edilmiştir. Bu da nispeten yüksek akma-çekme mukavemeti için kullanıldığını açıklamaktadır ve literatür bilgisi ile örtüşmektedir.

20-J55 numunesinde ise 0,25 oranında karbon tespit edilmiştir. Eş değer karbon oranı ise 0,49 olduğu tespit edilmiştir. Bu ürün daha sonra ısıl işlemle daha yüksek mukavemetli çelik haline getirilmeye uygun olduğundan karbon oranı yüksektir.

Tüm numuneler söndürülmüş çeliklerden üretildikleri için S ve P oranı eser miktarda olduğu görülmüştür.

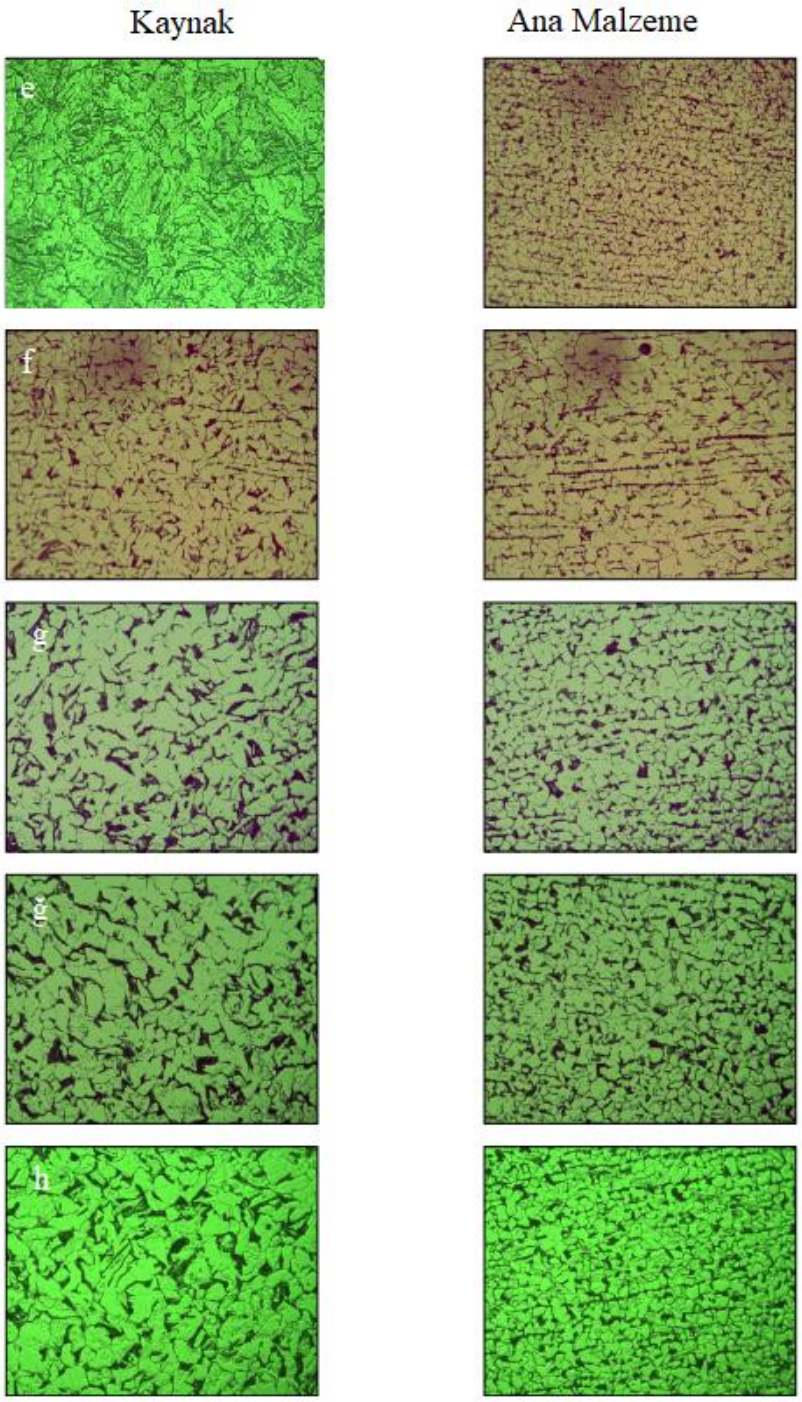
5.1.4 Mikroyapı İncelemesi ve Karakterizasyonu

Mikroyapı incelemeleri Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : Mikroyapı görünümleri (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO

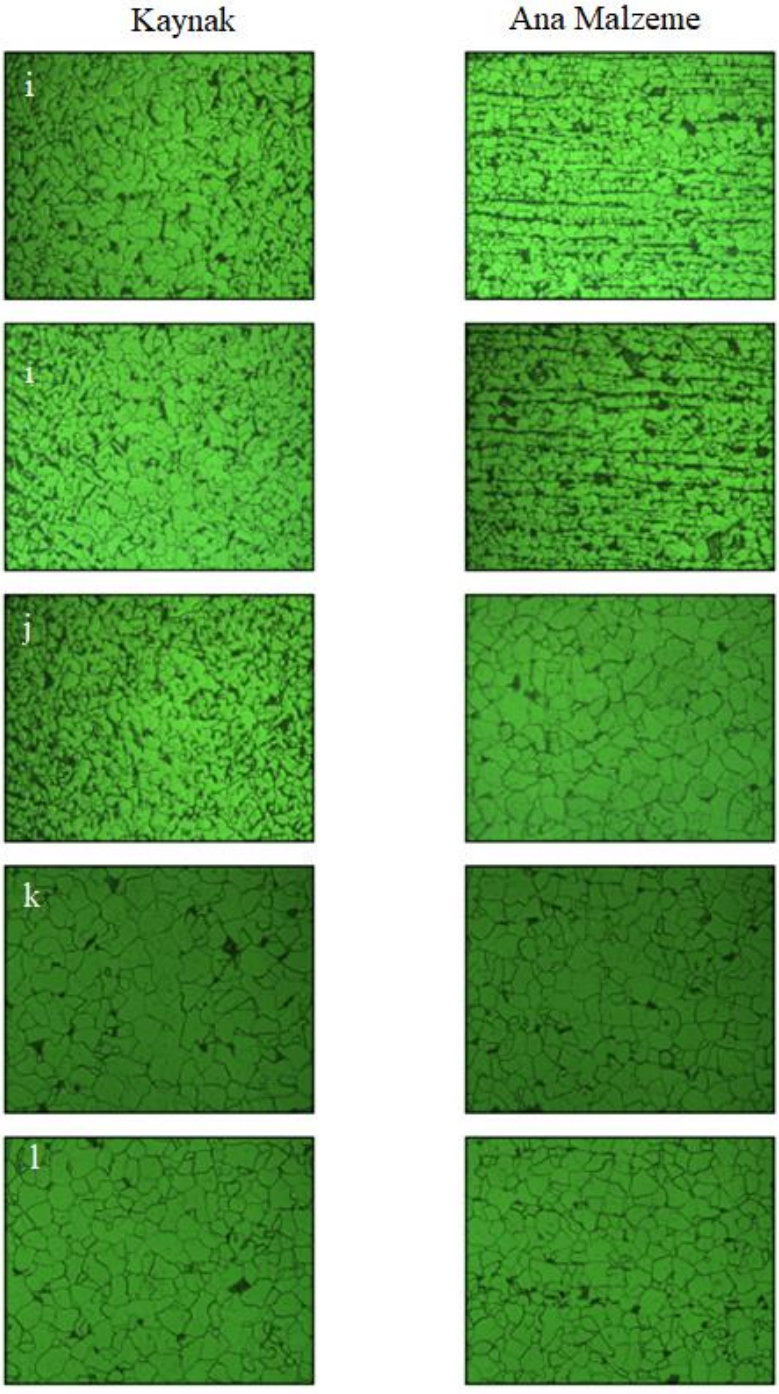
Şekil 5.4 (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO kaynak bölgelerinde martenzit tespit edilmiştir. Ana metal ise ferritik-perlitik yapıdadır. Ayrıca ana metal de perlit izler hadde yönü boyunca olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.5 : Mikroyapı görünümleri (e) 6-S355J2H, (f) 7-P235TR1, (g) 8-P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH

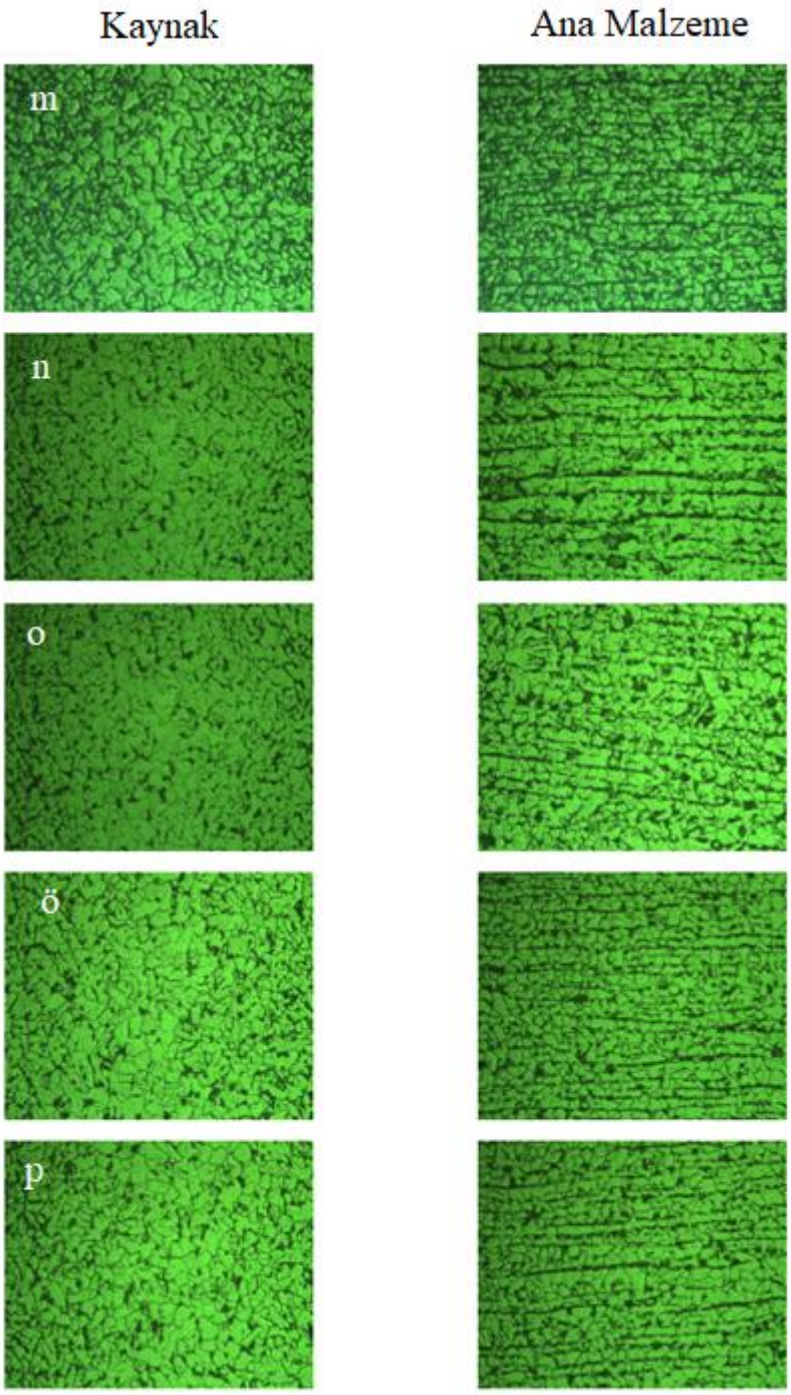
Şekil 5.5 (e) 6-S355J2H numunenin kaynak bölgesinde martenzit yapısı tespit edilmiştir. Ana metal ferritik perlitik yapıdadır. Şekil 5.5 (f) 7-P235TR1, (g) 8-

P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH numunelerinin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur.



Şekil 5.6 : Mikroyapı görünümleri (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245N

Şekil 5.6 (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245N numunelerinde Ana metal ve kaynak bölgesi ferritik perlitik yapıdadır ve numunlerin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur.



Şekil 5.7 : Mikroyapı görünümleri (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55

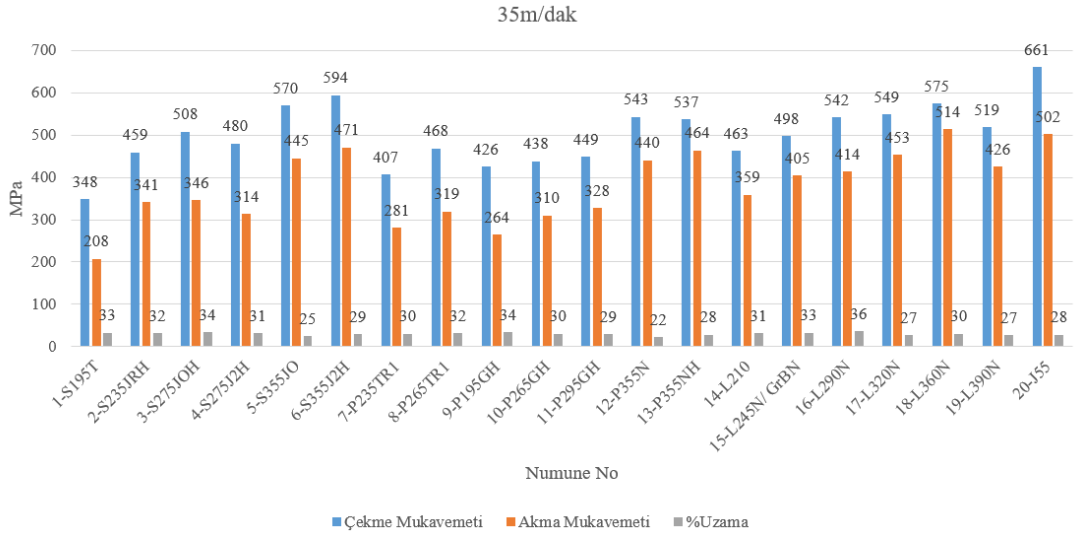
Şekil 5.7 (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55 numunelerinde Ana metal ve Kaynak bölgesi ferritik perlitik yapıdadır ve numunlerin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur.

5.2 35m/dak Hızındaki Deneysel Sonuçlar

Bu hızda üretilmiş numunelerin deneysel sonuçları 4 ana başlıkta incelenecektir. Bu başlıklar; Çekme testi sonuçları, Sertlik testi sonuçları, Kimyasal analiz sonuçları, ana malzeme ve kaynak bölgesi mikroyapı incelemesi ve karakterizasyonudur.

5.2.1 Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi sonuçları Şekil 5.8'de belirtilmiştir.

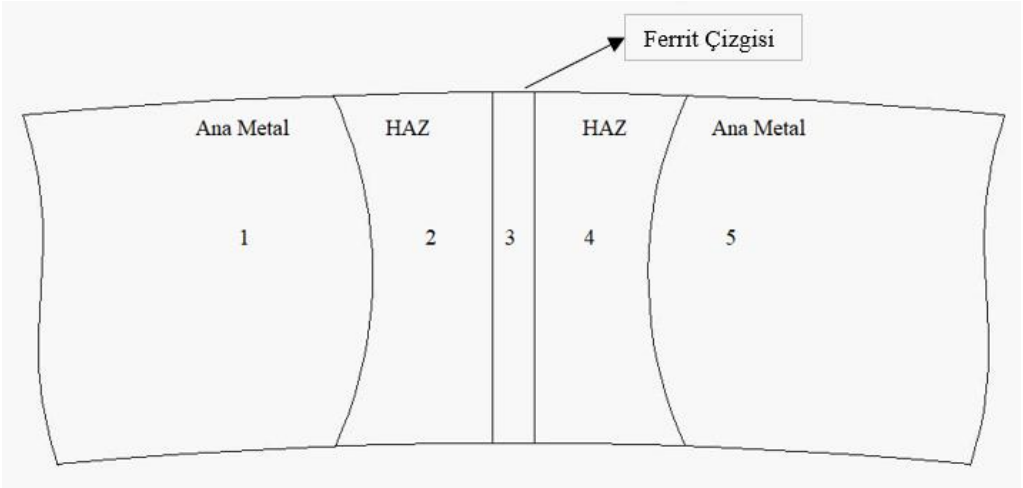


Şekil 5.8 : 35m/dak hızındaki Çekme testi sonuçları

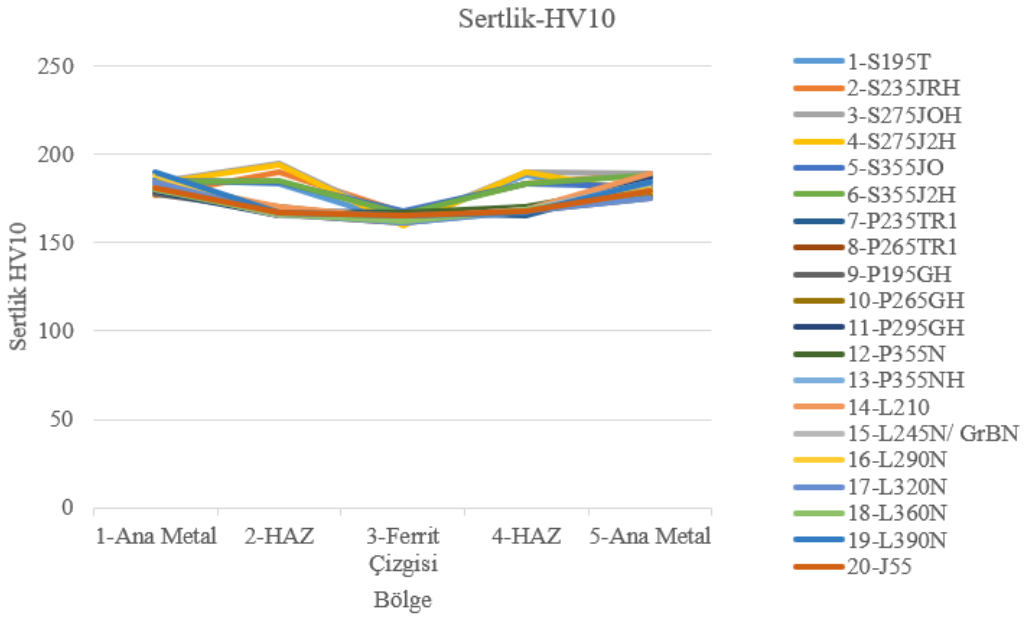
Grafikler incelendiğinde, mekanik özellikler standart akma mukavemetini tüm numunelerin bu hızda karşıladıkları görülmüştür. Çekme mukavemeti ise en yüksek beklenen J55 malzemede görülmüştür. Bu numunenin uzaması diğer numunelere nispeten ortalama değerlerde olduğu görülmüştür. Bu mekanik özellikler ışığında bu numune için kaynak bölgesinin ana malzemeye yakın özelliklerde olduğu düşünülebilir. En fazla %uzama ise %36 ile 16-L290N numunesinde gerçekleşmiştir.

5.2.2 Sertlik Testi Sonuçları

Sertlik testi sonuçları Şekil 5.10'de gösterilmiştir.



Şekil 5.9 : Sertlik bölgeleri



Şekil 5.10 : 35m/dak hızındaki Sertlik testi sonuçları

Sertlik sonuçlarına bakıldığında Ana metal kısmı tüm numunelerde kaynağın hem sağ tarafında hem de sol tarafında benzer olduğu görülmüştür. Bu da boru şekil verilirken bu hızda herhangi bir sertleşme olmadığını göstermektedir. HAZ bölgesinde ise tane kabalaşmasına istinaden sertliğin azaldığı gözlemlenmiştir. 1-S195T, 2-S235JRH, 3-S275JOH, 4-S275J2H, 5-S355JO, 6-S355J2H malzemelerde ise sertliğin ani artış gösterdiği görülmüştür bu da bu kısımda martenzit yapısının oluşmasından ötürü olduğu görülmüştür. Mikro yapı incelemelerinden de anlaşıldığı üzere kaynak HAZ bölgesinde oluşan martenzit bu kısımda sertliği nispeten arttırmıştır.

5.2.3 Kimyasal Analiz Sonuçları

Kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Kimyasal Analiz Sonuçları

Numune	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N	Al	Ceş
1-S195T	0,099	0,009	0,298	0,014	0,026	0,001	0,018	0,015	0,031	0,003	0,002	0,001	0,006	0,04	0,158067
2-S235JRH	0,148	0,018	0,486	0,014	0,016	0,001	0,029	0,018	0,035	0,004	0,002	0,001	0,005	0,038	0,240333
3-S275JOH	0,148	0,023	1,05	0,01	0,012	0,001	0,08	0,049	0,031	0,007	0,001	0,001	0	0,069	0,3394
4-S275J2H	0,183	0,238	0,93	0,01	0,008	0,001	0,052	0,037	0,023	0,004	0,001	0,001	0,012	0,057	0,349533
5-S355JO	0,16	0,24	1,25	0,018	0,005	0,002	0,083	0,037	0,044	0,006	0,001	0,001	0,019	0	0,386533
6-S355J2H	0,165	0,028	1,44	0,011	0,01	0,018	0,049	0,051	0,038	0,007	0,001	0,019	0	0,044	0,420867
7-P235TR1	0,099	0,031	0,475	0,012	0,015	0,001	0,063	0,045	0,03	0,005	0,001	0,001	0,006	0,044	0,192567
8-P265TR1	0,16	0,02	0,61	0,014	0,01	0,001	0,012	0,014	0,117	0,005	0,001	0,001	0,012	0	0,288
9-P195GH	0,144	0,009	0,61	0,009	0,011	0,001	0,015	0,026	0,015	0,007	0,001	0,001	0,009	0,037	0,253
10-P265GH	0,088	0,219	0,59	0,017	0,008	0,001	0,039	0,039	0,034	0,005	0,001	0,001	0,007	0,035	0,199533
11-P295GH	0,09	0,2	0,55	0,019	0,008	0,002	0,042	0,04	0,023	0,002	0,001	0,001	0,009	0	0,192333
12-P355N	0,136	0,04	1,1	0,015	0,009	0,001	0,032	0,049	0,079	0,008	0,001	0,047	0,004	0,054	0,342333
13-P355NH	0,117	0,037	1,1	0,017	0,009	0,001	0,024	0,045	0,026	0,005	0,002	0,048	0,005	0,046	0,311533
14-L210	0,087	0,184	0,54	0,019	0,005	0,001	0,039	0,045	0,027	0,002	0,004	0,001	0,012	0,032	0,1892
15-L245N	0,118	0,204	0,69	0,014	0,005	0,002	0,02	0,033	0,026	0,004	0,005	0,001	0,006	0,043	0,243533
16-L290N	0,107	0,186	1,25	0,015	0,008	0,002	0,014	0,041	0,023	0,003	0,004	0,002	0,008	0,049	0,325
17-L320N	0,077	0,219	0,98	0,015	0,007	0,002	0,023	0,042	0,018	0,004	0,002	0,048	0,008	0,039	0,249467
18-L360N	0,1	0,17	1,02	0,018	0,006	0,002	0,023	0,043	0,021	0,002	0,001	0,039	0,011	0	0,2792
19-L390N	0,088	0,182	0,99	0,014	0,005	0,021	0,021	0,041	0,027	0,003	0,003	0,05	0,007	0,041	0,263733
20-J55	0,23	0,22	1,37	0,019	0,006	0,002	0,028	0,034	0,021	0,006	0,001	0,002	0,01	0	0,468067

Kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında tüm numunelerdeki C oranları 0,1 civarındadır. İlk bakıldığında bu çeliklerin kaynağa elverişli olduklarını düşündürse de asıl kaynağa elverişlilik ölçüsü eş değer karbon hesaplamadır ve IIW'ya göre eş değer karbon oranlarına bakıldığında, numunelerin çoğunluğunun 0,2 karbon civarında olduğu görülmüştür. Bu da kaynağa elverişlilik demektir. Ceş<0,40 olduğunda, çeliğin sertleşme eğilimi çok az olmaktadır, iyi kaynaklanabilirlik özelliğine sahiptirler ve kaynak yapılması için ön ısıtmaya ihtiyaç duyulmaz.

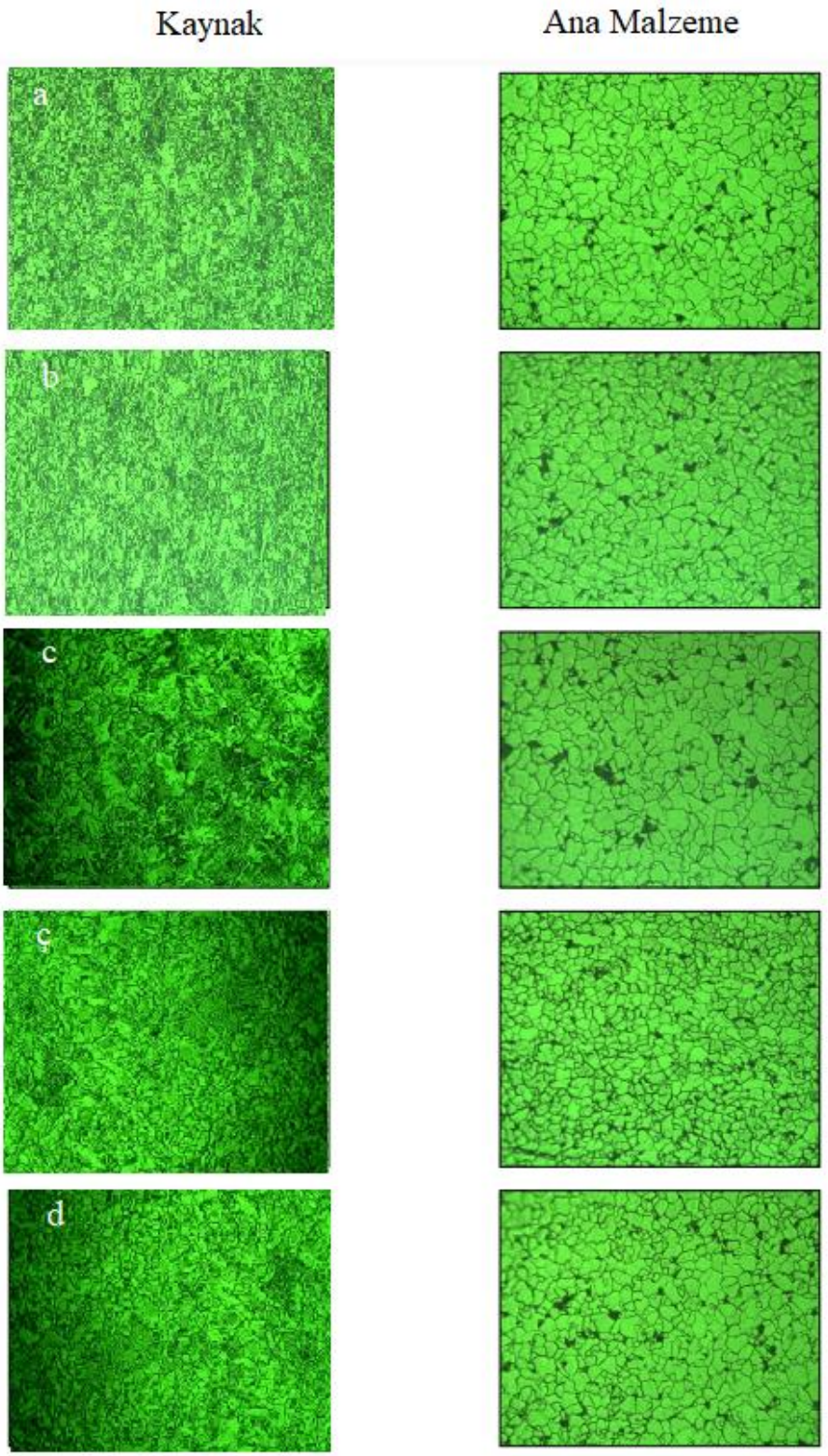
Mn oranlarına bakıldığında 3-S275JOH, 5-S355JO, 6-S335J2H 12-P355N, 13-P355NH, 16-L290N ve 20-J55 numaralı numunelerde 1-1.5 civarlarında olduğu tespit edilmiştir. Bu da nispeten yüksek akma-çekme mukavemeti için kullanıldığını açıklamaktadır ve literatür bilgisi ile örtüşmektedir.

20-J55 numunesinde ise 0,23 oranında karbon tespit edilmiştir. Eş değer karbon oranı ise 0,468 olduğu tespit edilmiştir. Bu ürün daha sonra ısıl işlemle daha yüksek mukavemetli çelik haline getirilmeye uygun olduğundan karbon oranı yüksektir.

Tüm numuneler söndürülmüş çeliklerden üretildikleri için S ve P oranı eser miktarda olduğu görülmüştür.

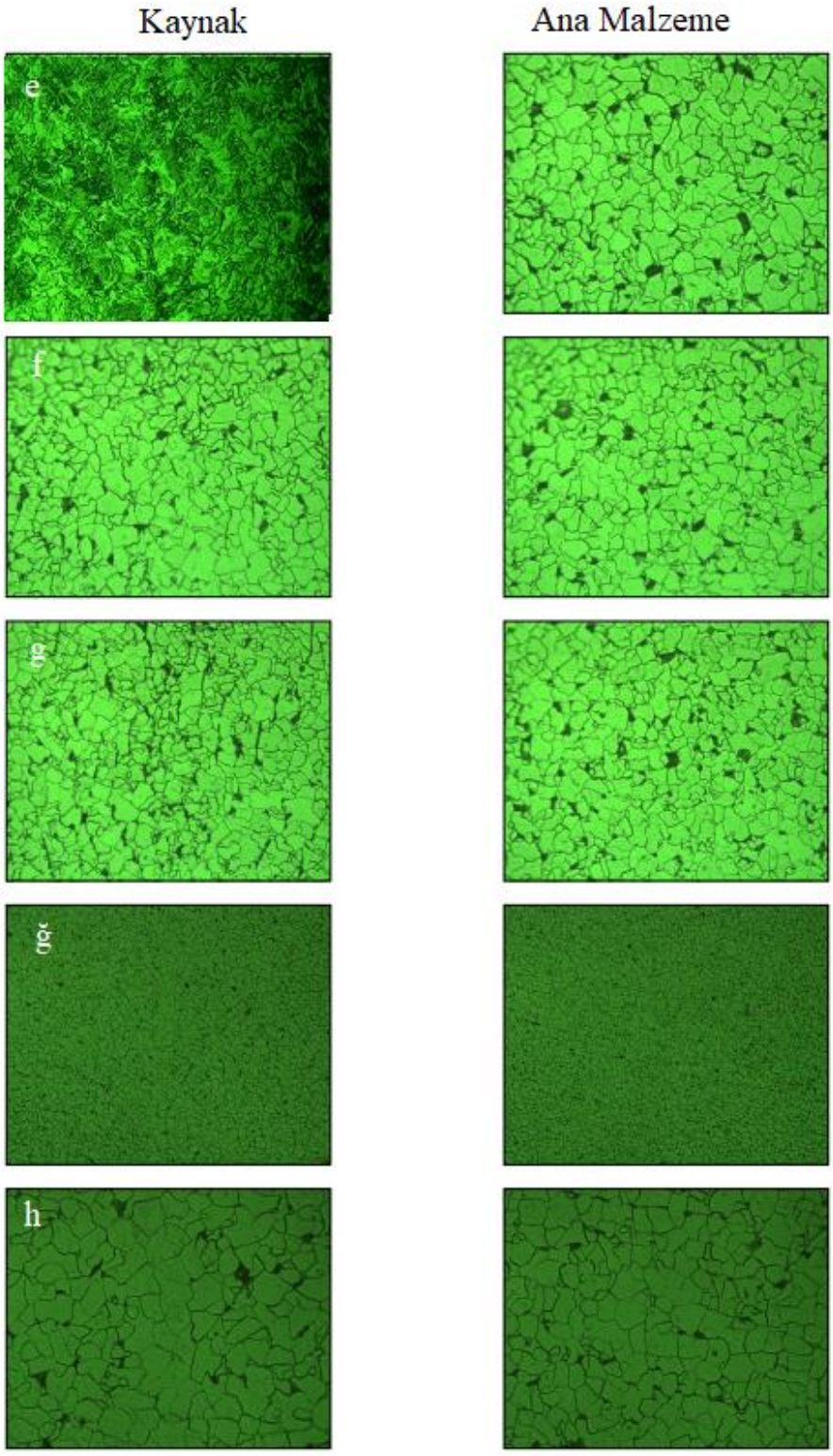
5.2.4 Mikroyapı İncelemesi ve Karakterizasyonu

Mikro yapı incelemeleri Şekil 5.11-12, Şekil 5.13-14'de gösterilmiştir.



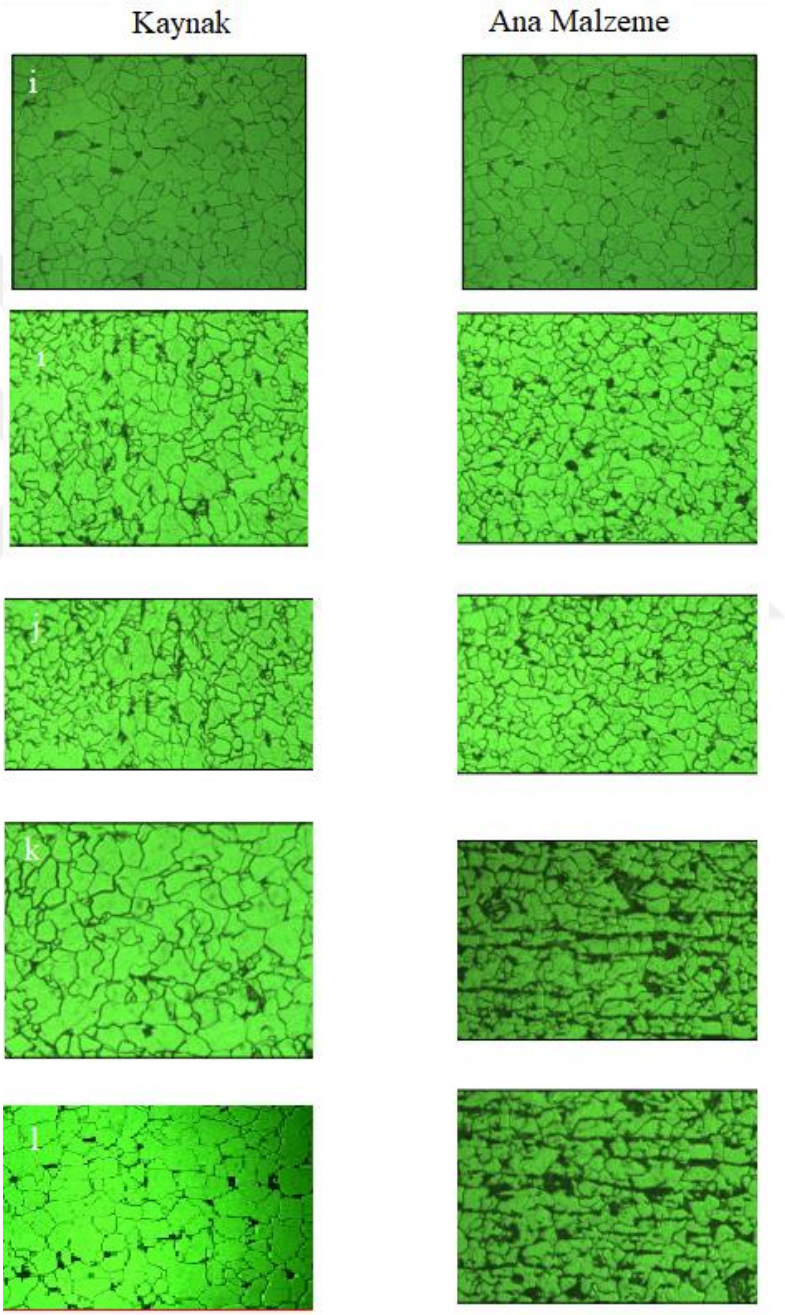
Şekil 5.11 : Mikroyapı görünümleri (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO

Şekil 5.11 (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO kaynak bölgelerinde martenzit tespit edilmiştir. Ana metal ise ferritik-perlitik yapıdadır.



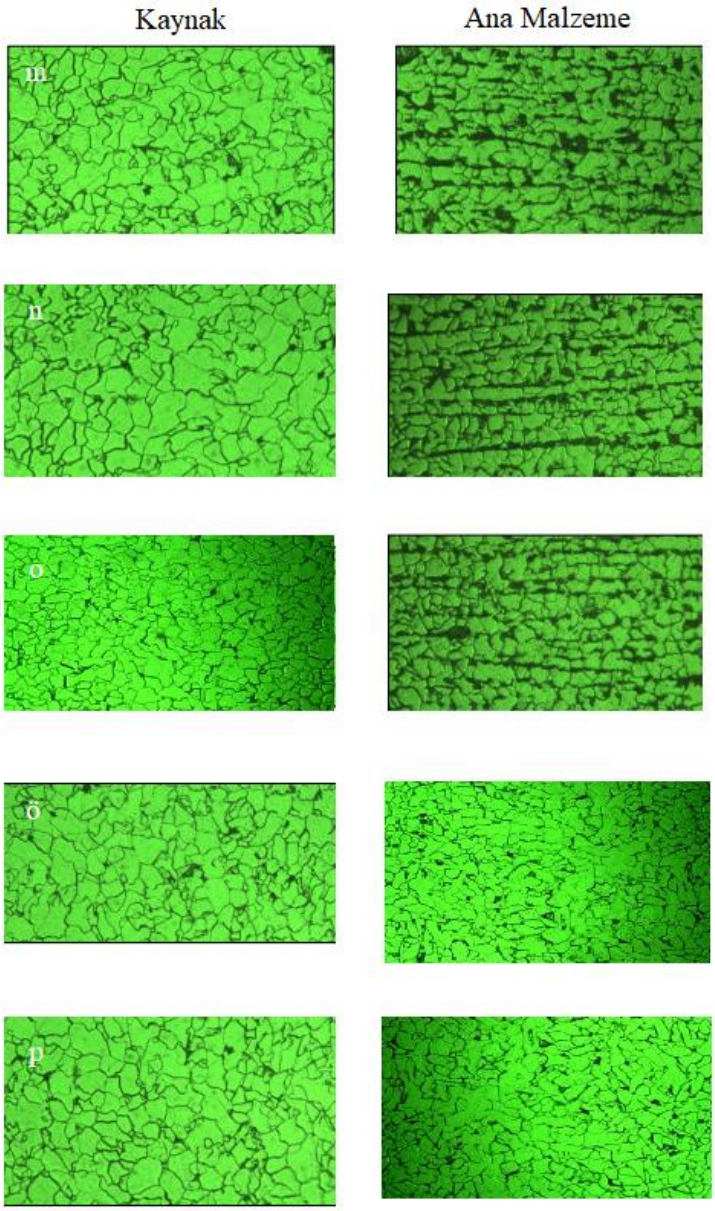
Şekil 5.12 : Mikroyapı görünümleri (e) 6-S355J2H, (f) 7-P235TR1, (g) 8-P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH

Şekil 5 .12 (e) 6-S355J2H numunenin kaynak bölgesinde martenzit yapısı tespit edilmiştir. Ana metal ferritik perlitik yapıdadır. Şekil 5.12 (f) 7-P235TR1, (g) 8-P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH numunelerinin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur.



Şekil 5.13 : Mikroyapı görünümleri (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245N

Şekil 5.13 (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245N numunelerinde Ana metal ve kaynak bölgesi ferritik perlitik yapıdadır ve numunlerin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur. Ayrıca ana metal de perlit izler hadde yönü boyunca olduğu tespit edilmiştir.



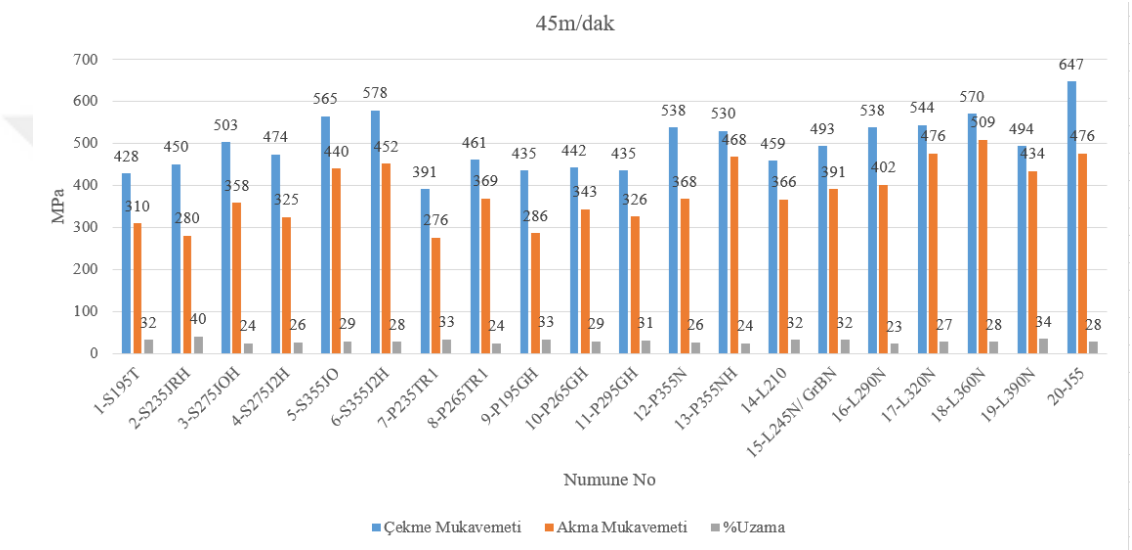
Şekil 5.14 : Mikroyapı görünümleri (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55

Şekil 5.14 (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55 numunelerinde Ana metal ve Kaynak bölgesi ferritik perlitik yapıdadır ve numunlerin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur.

5.3 45m/dak Hızındaki Deneysel Sonuçlar

5.3.1 Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi sonuçları Şekil 5.15'de belirtilmiştir.

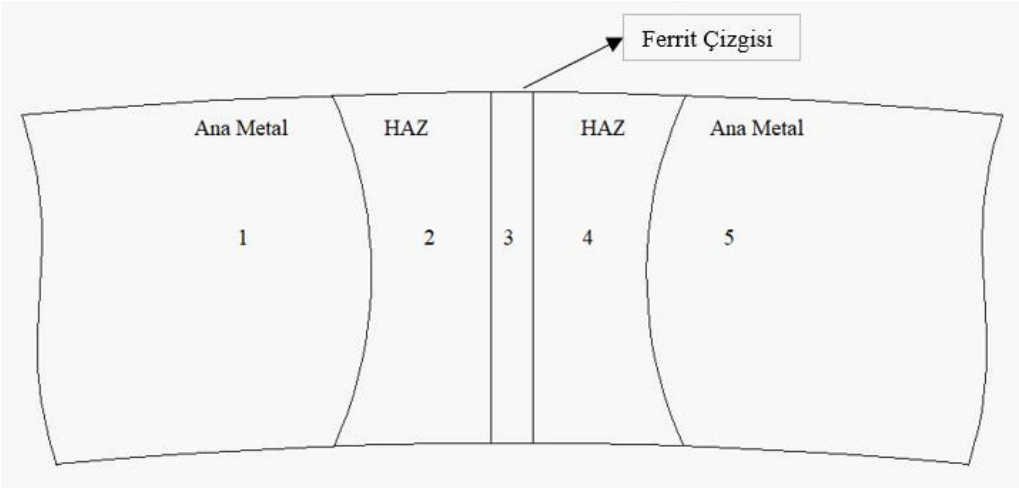


Şekil 5.15 : 45m/dak hızındaki Çekme testi sonuçları

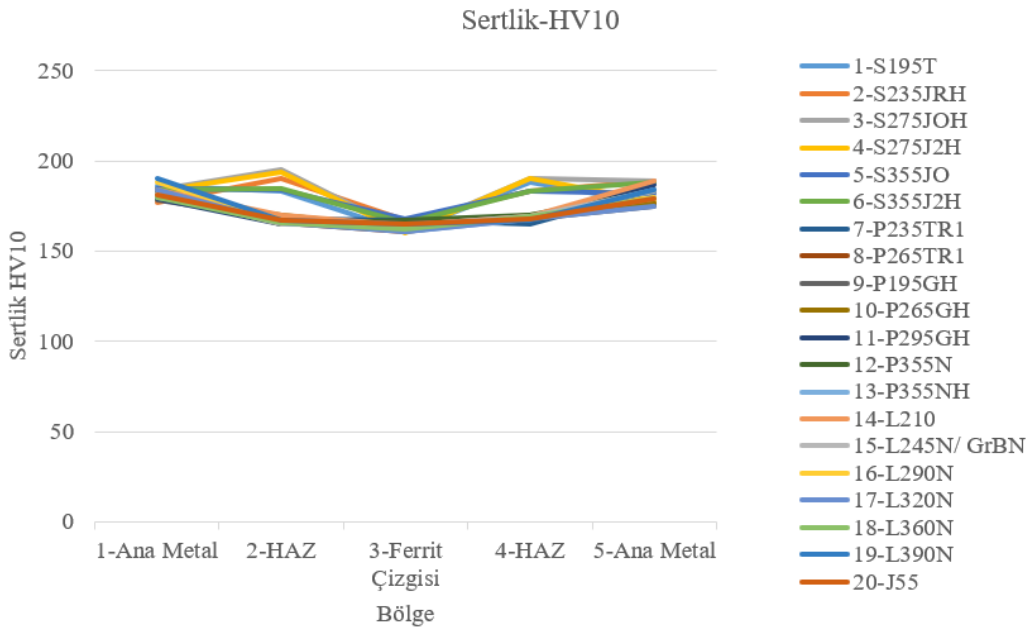
Grafikler incelendiğinde, mekanik özellikler standart akma mukavemetini tüm numunelerin bu hızda karşıladıkları görülmüştür. Çekme mukavemeti ise en yüksek beklenen J55 malzemede görülmüştür. Bu numunenin uzaması diğer numunelere nispeten ortalama değerlerde olduğu görülmüştür. Bu mekanik özellikler ışığında bu numune için kaynak bölgesinin ana malzemeye yakın özelliklerde olduğu düşünülebilir. En fazla %uzama ise %40 ile 2-S235JRH numunesinde gerçekleşmiştir.

5.3.2 Sertlik Testi Sonuçları

Sertlik testi sonuçları Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



Şekil 5.16 : Sertlik bölgeleri



Şekil 5.17 : 45m/dak hızındaki Sertlik testi sonuçları

Sertlik sonuçlarına bakıldığında Ana metal kısmı tüm numunelerde kaynağın hem sağ tarafında hem de sol tarafında benzer olduğu görülmüştür. Bu da boru şekil verilirken bu hızda herhangi bir sertleşme olmadığını göstermektedir. HAZ bölgesinde ise tane kabalaşmasına istinaden sertliğin azaldığı gözlemlenmiştir. 1-S195T, 2-S235JRH, 3-S275JOH, 4-S275J2H, 5-S355JO, 6-S355J2H malzemelerde ise sertliğin ani artış gösterdiği görülmüştür bu da bu kısımda martenzit yapısının oluşmasından ötürü olduğu görülmüştür. Mikro yapı incelemelerinden de anlaşıldığı üzere kaynak HAZ bölgesinde oluşan martenzit bu kısımda sertliği nispeten arttırmıştır.

5.3.3 Kimyasal Analiz Sonuçları

Kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Kimyasal Analiz Sonuçları

Numune	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N	Al	Ceş
1-S195T	0,058	0,01	0,342	0,006	0,011	0,001	0,015	0,015	0,016	0,004	0,001	0,001	0,005	0,012	0,1212
2-S235JRH	0,069	0,01	0,61	0,012	0,01	0,001	0,02	0,04	0,029	0,004	0,002	0,001	0,006	0,033	0,181667
3-S275JOH	0,146	0,016	1,09	0,011	0,017	0,001	0,092	0,054	0,042	0,005	0,001	0,001	0	0,052	0,347
4-S275J2H	0,135	0,186	0,99	0,012	0,007	0,001	0,054	0,04	0,033	0,003	0,002	0,001	0,004	0,078	0,313867
5-S355JO	0,15	0,2	1,25	0,02	0,011	0,002	0,07	0,036	0,051	0,005	0,001	0,008	0,01	0	0,3768
6-S355J2H	0,18	0,017	1,41	0,013	0,015	0,02	0,062	0,047	0,043	0,007	0,001	0,015	0	0,051	0,432467
7-P235TR1	0,067	0,035	0,441	0,014	0,01	0,001	0,09	0,055	0,041	0,004	0,002	0,001	0,006	0,058	0,159567
8-P265TR1	0,097	0,188	0,59	0,019	0,014	0,001	0,052	0,051	0,031	0,006	0,002	0,002	0,005	0,047	0,21
9-P195GH	0,134	0,017	0,61	0,009	0,01	0,001	0,016	0,028	0,02	0,004	0,001	0,001	0,007	0,031	0,2436
10-P265GH	0,08	0,188	0,58	0,018	0,01	0,001	0,059	0,047	0,042	0,003	0,001	0,001	0,011	0,041	0,192933
11-P295GH	0,095	0,227	0,56	0,019	0,009	0,001	0,042	0,038	0,028	0,003	0,001	0,001	0,006	0,033	0,200067
12-P355N	0,19	0,02	1,47	0,014	0,014	0,001	0,026	0,019	0,024	0,006	0,001	0,001	0,009	0	0,4442
13-P355NH	0,13	0,037	1,13	0,013	0,009	0,001	0,021	0,046	0,026	0,006	0,001	0,044	0,007	0,045	0,3294
14-L210	0,089	0,216	0,52	0,018	0,008	0,001	0,075	0,133	0,042	0,006	0,001	0,001	0,011	0	0,199333
15-L245N	0,144	0,212	0,56	0,018	0,009	0,001	0,057	0,048	0,031	0,003	0,001	0,001	0,008	0,053	0,251333
16-L290N	0,142	0,183	1,12	0,014	0,012	0,001	0,016	0,015	0,022	0,003	0,001	0,002	0,008	0,048	0,335933
17-L320N	0,08	0,182	1,04	0,012	0,006	0,002	0,02	0,036	0,019	0,003	0,005	0,049	0,005	0,04	0,262467
18-L360N	0,11	0,17	1,05	0,019	0,004	0,002	0,022	0,039	0,023	0,002	0,001	0,037	0,011	0	0,294267
19-L390N	0,083	0,192	0,98	0,018	0,006	0,02	0,029	0,036	0,051	0,003	0,004	0,049	0,006	0,034	0,262267
20-J55	0,25	0,19	1,38	0,017	0,005	0,002	0,029	0,034	0,022	0,006	0,001	0,002	0,01	0	0,49

Kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında tüm numunelerdeki C oranları 0,1 civarındadır. İlk bakıldığında bu çeliklerin kaynağa elverişli olduklarını düşündürse de asıl kaynağa elverişlilik ölçüsü eş değer karbon hesaplamadır ve IIW'ya göre eş değer karbon oranlarına bakıldığında, numunelerin çoğunluğunun 0,2 karbon civarında olduğu görülmüştür. Bu da kaynağa elverişlilik demektir. Ceş<0,40 olduğunda, çeliğin sertleşme eğilimi çok az olmaktadır, iyi kaynaklanabilirlik özelliğine sahiptirler ve kaynak yapılması için ön ısıtmaya ihtiyaç duyulmaz.

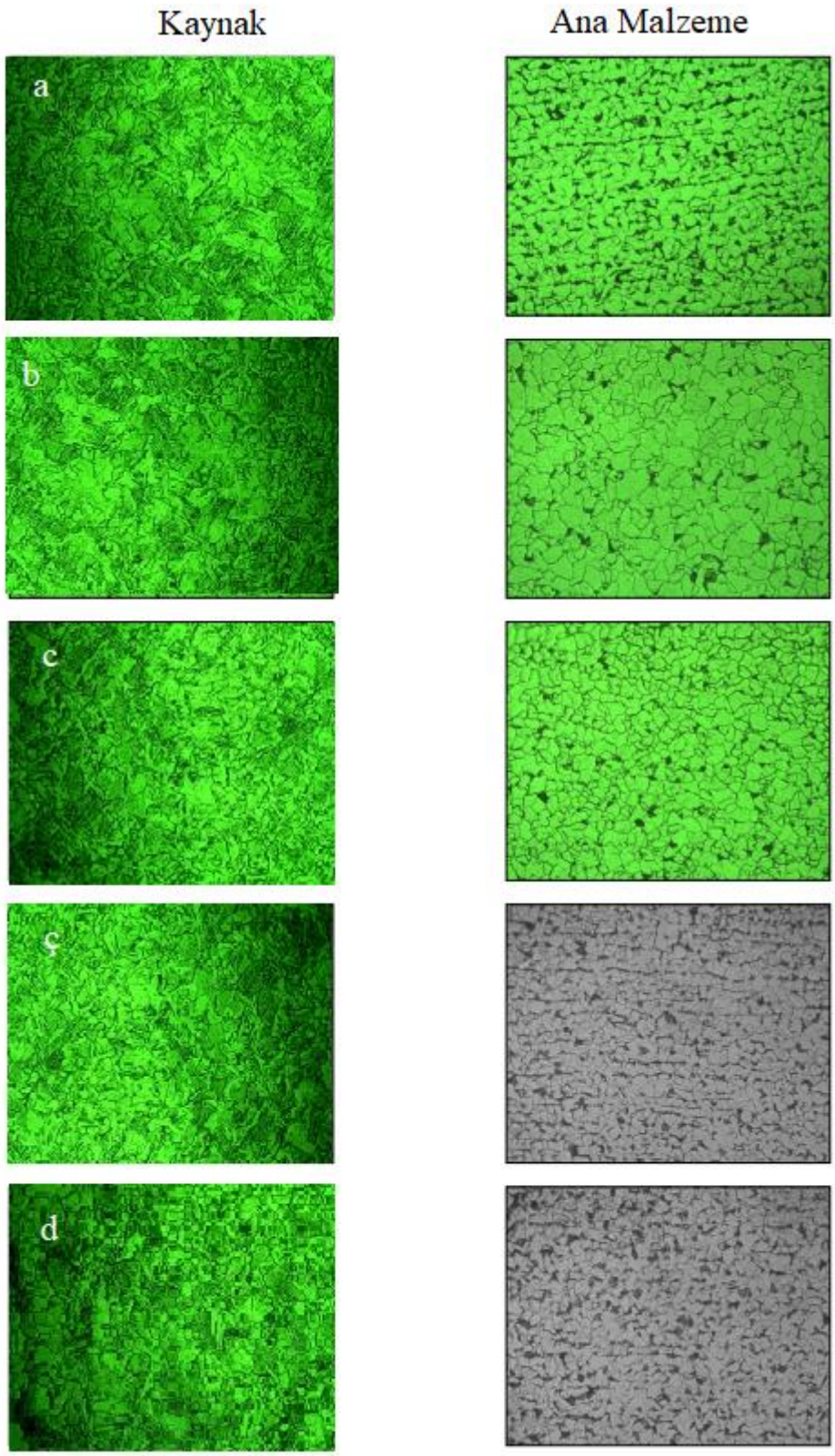
Mn oranlarına bakıldığında 3-S275JOH, 5-S355JO, 6-S335J2H 12-P355N, 13-P355NH, 16-L290N, 17-L320N, 18-L360N ve 20-J55 numaralı numunelerde 1-1.5 civarlarında olduğu tespit edilmiştir. Bu da nispeten yüksek akma-çekme mukavemeti için kullanıldığını açıklamaktadır ve literatür bilgisi ile örtüşmektedir.

20-J55 numunesinde ise 0,25 oranında karbon tespit edilmiştir. Eş değer karbon oranı ise 0,49 olduğu tespit edilmiştir. Bu ürün daha sonra ısıl işlemle daha yüksek mukavemetli çelik haline getirilmeye uygun olduğundan karbon oranı yüksektir.

Tüm numuneler söndürülmüş çeliklerden üretildikleri için S ve P oranı eser miktarda olduğu görülmüştür.

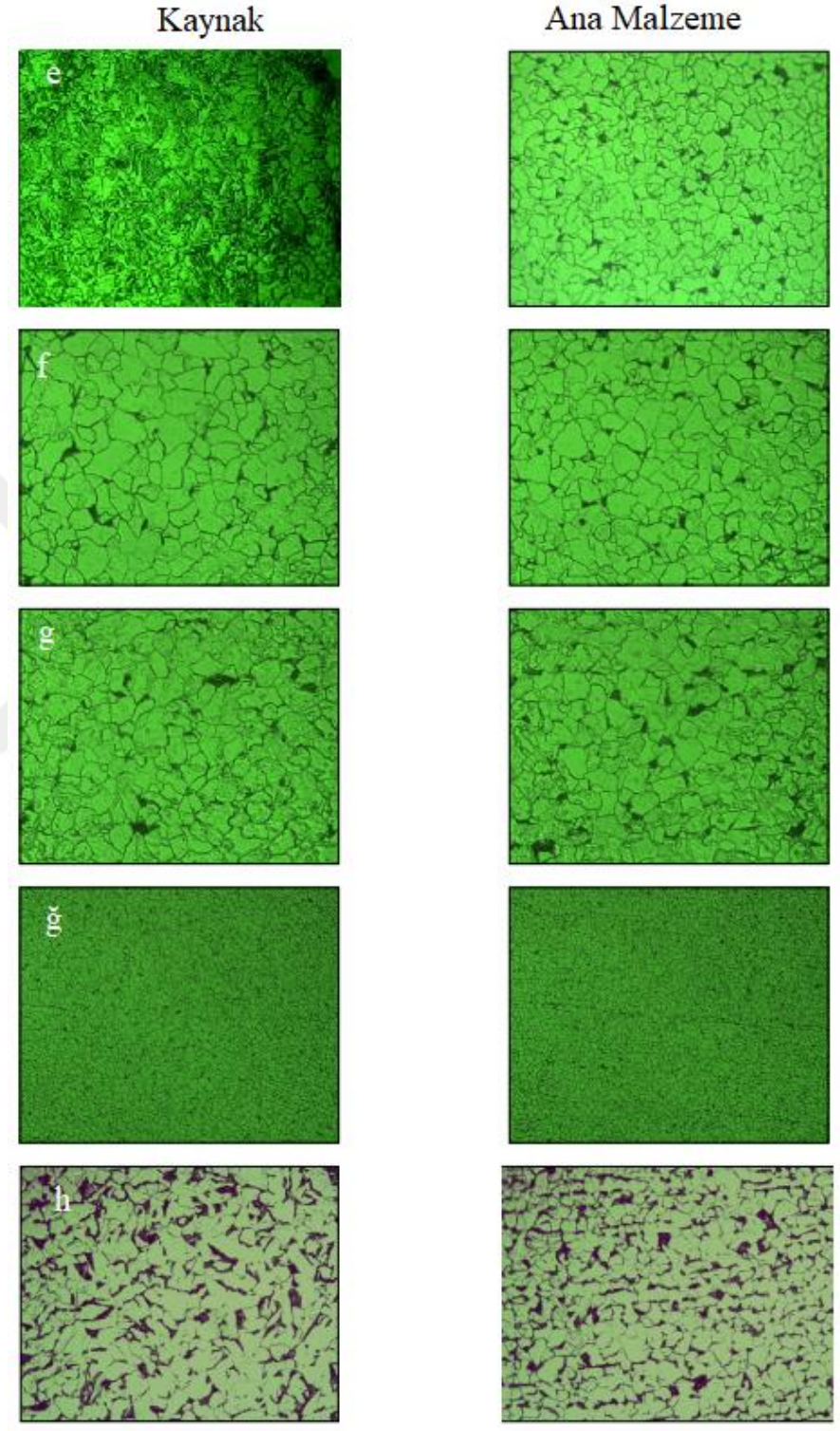
5.3.4 Mikroyapı İncelemesi ve Karakterizasyonu

Mikro yapı incelemeleri Şekil 5.18-19, Şekil 5.20-21'de gösterilmiştir.



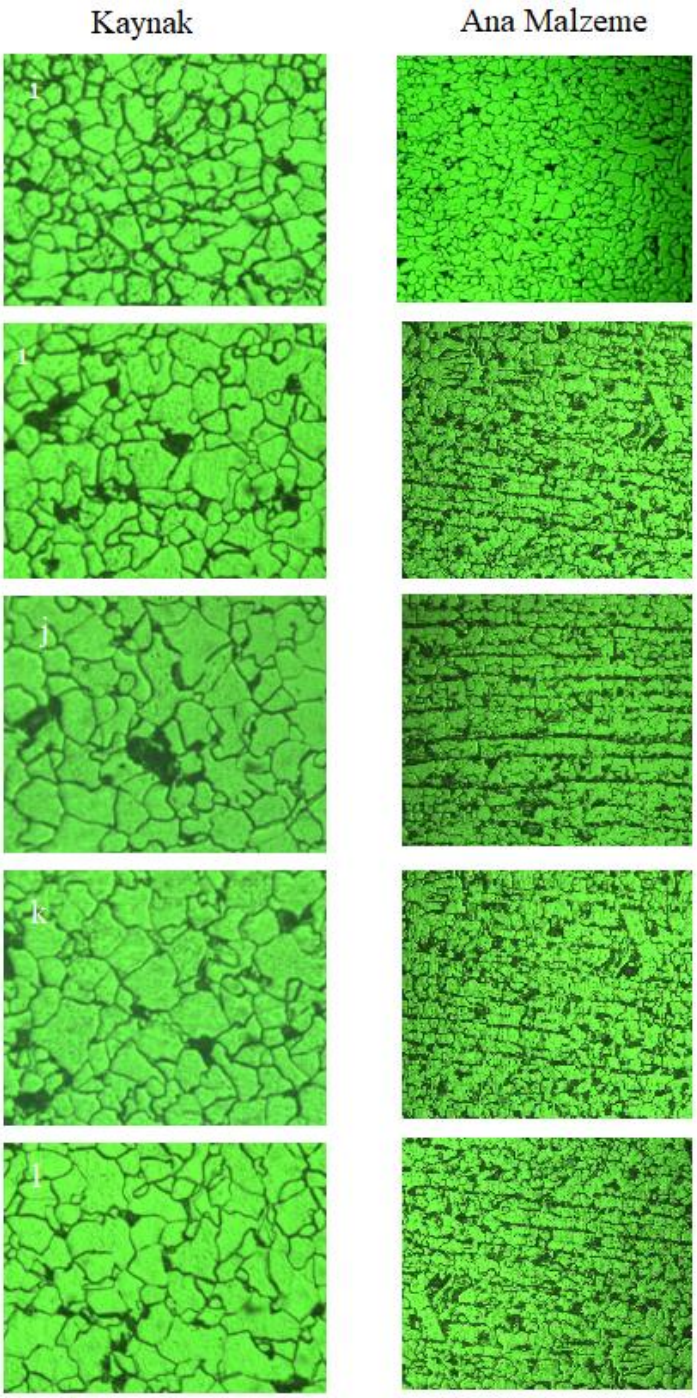
Şekil 5.18 : Mikroyapı görünümleri (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO

Şekil 5.18 (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO kaynak bölgelerinde martenzit tespit edilmiştir Ana metal ise ferritik-perlitik yapıdadır.



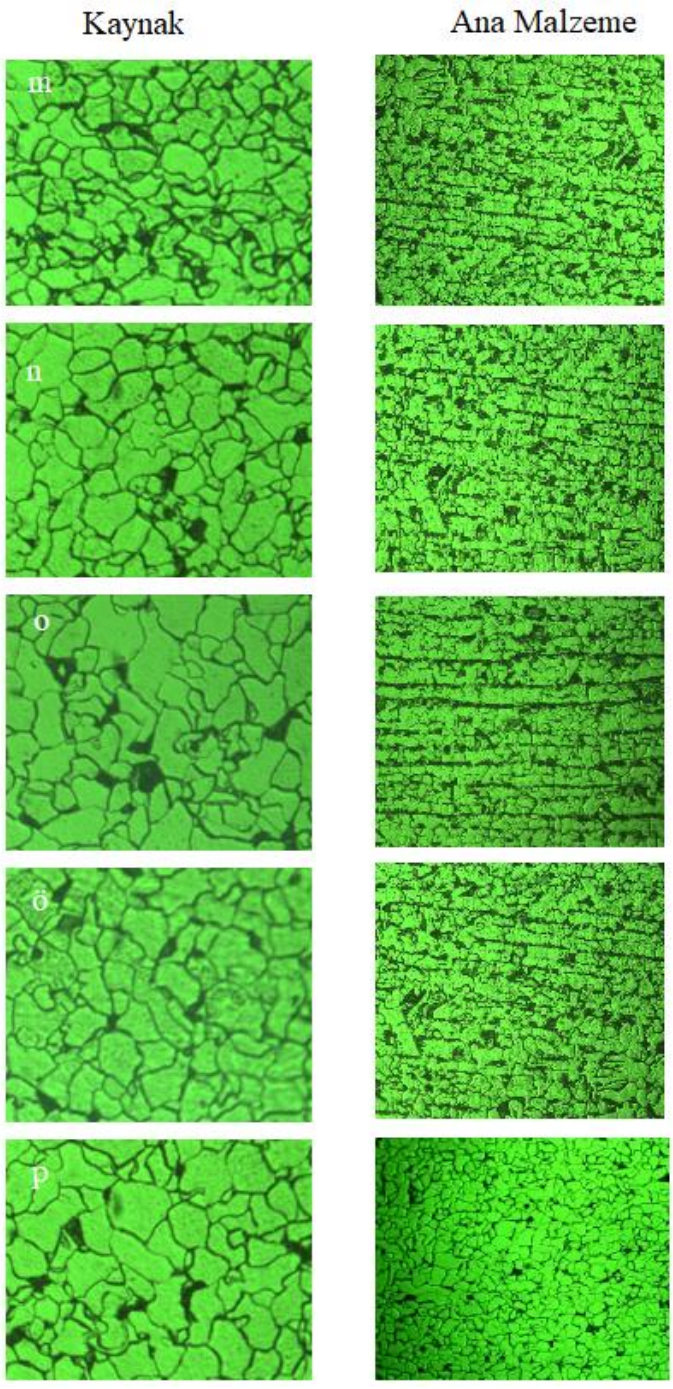
Şekil 5.19 : Mikroyapı görünümleri (e) 6-S355J2H, (f) 7-P235TR1, (g) 8-P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH

Şekil 5.19 (e) 6-S355J2H numunenin kaynak bölgesinde martenzit yapısı tespit edilmiştir. Ana metal ferritik perlitik yapıdadır. Şekil 5.19 (f) 7-P235TR1, (g) 8-P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH numunelerinin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur.



Şekil 5.20 : Mikroyapı görünümleri (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245N

Şekil 5.20 (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245Nnumunelerinde Ana metal ve kaynak bölgesi ferritik perlitik yapıdadır ve numunlerin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur. Ayrıca ana metal de perlit izler hadde yönü boyunca olduğu tespit edilmiştir.

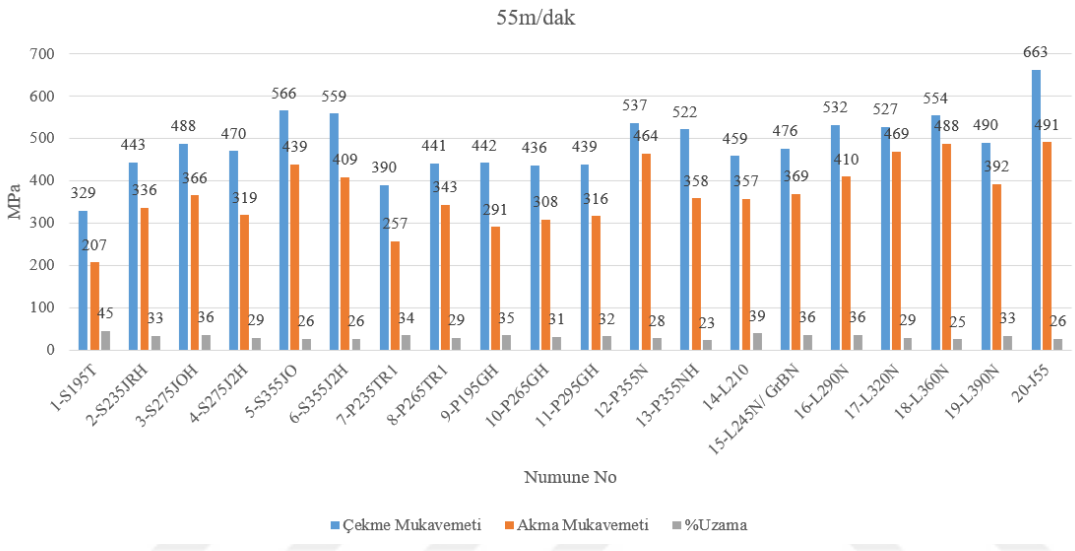


Şekil 5.21 : Mikroyapı görünümleri (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55

Şekil 5.21 (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55 numunelerinde Ana metal ve Kaynak bölgesi ferritik perlitik yapıdadır ve numunlerin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur.

5.4 55m/dak Hızındaki Deneysel Sonuçlar

5.4.1 Çekme Testi Sonuçları

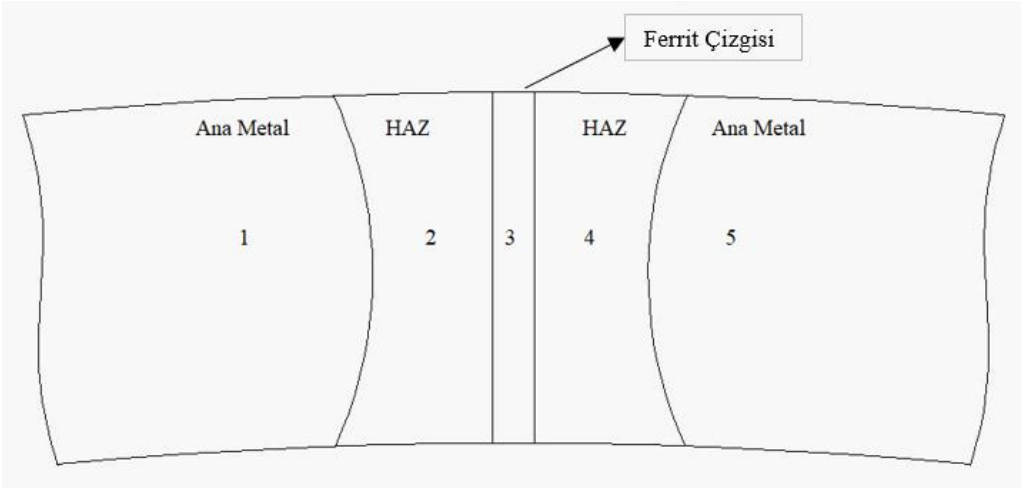


Şekil 5.22 : 55m/dak hızındaki Çekme testi sonuçları

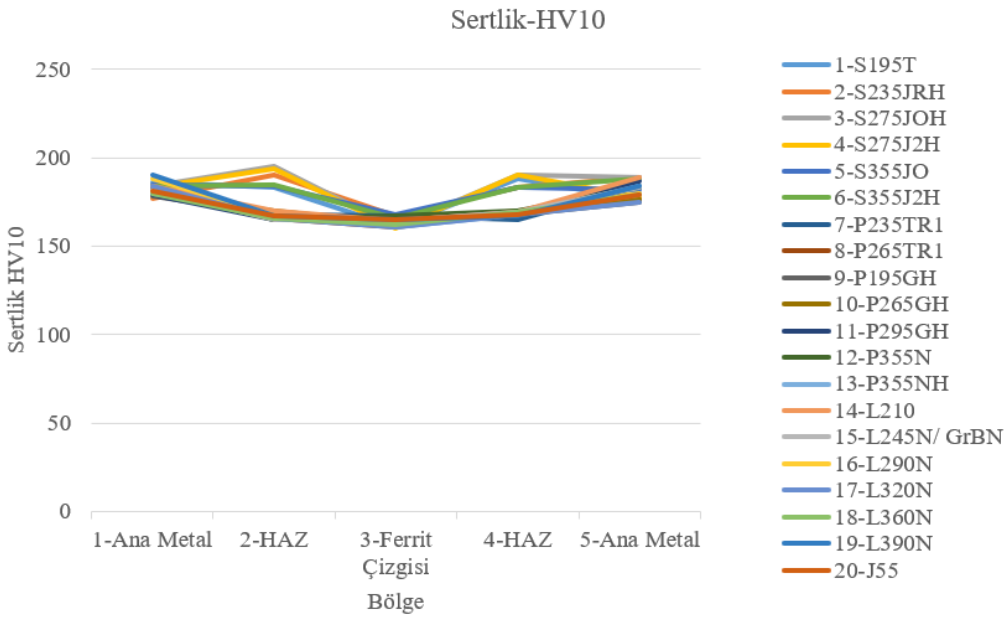
Grafikler incelendiğinde, mekanik özellikler standart akma mukavemetini tüm numunelerin bu hızda karşıladıkları görülmüştür. Çekme mukavemeti ise en yüksek beklenen J55 malzemede görülmüştür. Bu numunenin uzaması diğer numunelere nispeten ortalama değerlerde olduğu görülmüştür. Bu mekanik özellikler ışığında bu numune için kaynak bölgesinin ana malzemeye yakın özelliklerde olduğu düşünülebilir. En fazla %uzama ise %39 ile 14-L210 numunesinde gerçekleşmiştir.

5.4.2 Sertlik Testi Sonuçları

Sertlik testi sonuçları Şekil 5.24'de gösterilmiştir.



Şekil 5.23 : Sertlik bölgeleri



Şekil 5.24 : 55m/dak hızındaki Sertlik testi sonuçları

Sertlik sonuçlarına bakıldığında Ana metal kısmı tüm numunelerde kaynağın hem sağ tarafında hem de sol tarafında benzer olduğu görülmüştür. Bu da boru şekil verilirken bu hızda herhangi bir sertleşme olmadığını göstermektedir. HAZ bölgesinde ise tane kabalaşmasına istinaden sertliğin azaldığı gözlemlenmiştir. 1-S195T, 2-S235JRH, 3-S275JOH, 4-S275J2H, 5-S355JO, 6-S355J2H malzemelerde ise sertliğin ani artış gösterdiği görülmüştür bu da bu kısımda martenzit yapısının oluşmasından ötürü olduğu görülmüştür. Mikro yapı incelemelerinden de anlaşıldığı üzere kaynak HAZ bölgesinde oluşan martenzit bu kısımda sertliği nispeten arttırmıştır.

5.4.3 Kimyasal Analiz Sonuçları

Kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Kimyasal Analiz Sonuçları

Numune	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N	Al	Ceş
1-S195T	0,06	0,01	0,31	0,012	0,012	0,002	0,024	0,019	0,026	0,006	0,001	0,001	0,007	0	0,121133
2-S235JRH	0,1	0,01	0,6	0,015	0,01	0,001	0,049	0,035	0,026	0,007	0,001	0,001	0,011	0	0,2124
3-S275JOH	0,14	0,01	1,05	0,01	0,009	0,001	0,044	0,033	0,034	0,001	0,001	0,001	0	0	0,327333
4-S275J2H	0,149	0,188	0,99	0,014	0,009	0,001	0,058	0,041	0,046	0,003	0,002	0,001	0,006	0,046	0,3308
5-S355JO	0,14	0,18	1,21	0,016	0,008	0,001	0,068	0,034	0,05	0,005	0,001	0,008	0,007	0	0,359667
6-S355J2H	0,166	0,013	1,51	0,017	0,007	0,011	0,081	0,05	0,044	0,006	0,001	0,013	0	0,025	0,4366
7-P235TR1	0,115	0,018	0,49	0,012	0,013	0,001	0,056	0,046	0,035	0,003	0,001	0,001	0,01	0,061	0,211267
8-P265TR1	0,099	0,185	0,69	0,018	0,013	0,002	0,014	0,039	0,029	0,002	0,003	0,001	0,008	0,055	0,224333
9-P195GH	0,13	0,011	0,58	0,008	0,011	0,001	0,016	0,027	0,014	0,004	0,001	0,001	0,007	0,044	0,233333
10-P265GH	0,15	0,02	0,64	0,01	0,014	0,001	0,026	0,03	0,012	0,005	0,001	0,001	0,009	0	0,264
11-P295GH	0,088	0,18	0,61	0,017	0,007	0,001	0,074	0,08	0,036	0,004	0,001	0,001	0,006	0,05	0,208133
12-P355N	0,117	0,037	1,1	0,017	0,009	0,001	0,024	0,045	0,026	0,005	0,002	0,048	0,005	0,046	0,311533
13-P355NH	0,18	0,01	1,53	0,015	0,012	0,001	0,013	0,024	0,024	0,004	0,001	0,001	0,008	0	0,443267
14-L210	0,09	0,23	0,5	0,013	0,007	0,002	0,024	0,069	0,017	0,001	0,001	0,001	0,013	0	0,183333
15-L245N	0,065	0,223	0,64	0,013	0,004	0,002	0,014	0,031	0,02	0,004	0,007	0,001	0,01	0,021	0,180867
16-L290N	0,12	0,202	1,3	0,017	0,007	0,003	0,013	0,042	0,028	0,004	0,006	0,01	0,01	0,036	0,347933
17-L320N	0,083	0,2	1,03	0,014	0,006	0,002	0,023	0,039	0,023	0,003	0,003	0,048	0,007	0,052	0,2646
18-L360N	0,061	0,186	1,02	0,021	0,006	0,02	0,023	0,046	0,033	0,003	0,005	0,05	0,007	0,05	0,2438
19-L390N	0,078	0,18	1,02	0,018	0,007	0,019	0,022	0,068	0,031	0,006	0,004	0,049	0,007	0,046	0,2622
20-J55	0,25	0,25	1,35	0,018	0,006	0,002	0,03	0,036	0,019	0,006	0,001	0,002	0,01	0	0,4846

Kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında tüm numunelerdeki C oranları 0,1 civarındadır. İlk bakıldığında bu çeliklerin kaynağa elverişli olduklarını düşündürse de asıl kaynağa elverişlilik ölçüsü eş değer karbon hesaplamadır ve IIW'ya göre eş değer karbon oranlarına bakıldığında, numunelerin çoğunluğunun 0,2 karbon civarında olduğu görülmüştür. Bu da kaynağa elverişlilik demektir. Ceş<0,40 olduğunda, çeliğin sertleşme eğilimi çok az olmaktadır, iyi kaynaklanabilirlik özelliğine sahiptirler ve kaynak yapılması için ön ısıtmaya ihtiyaç duyulmaz.

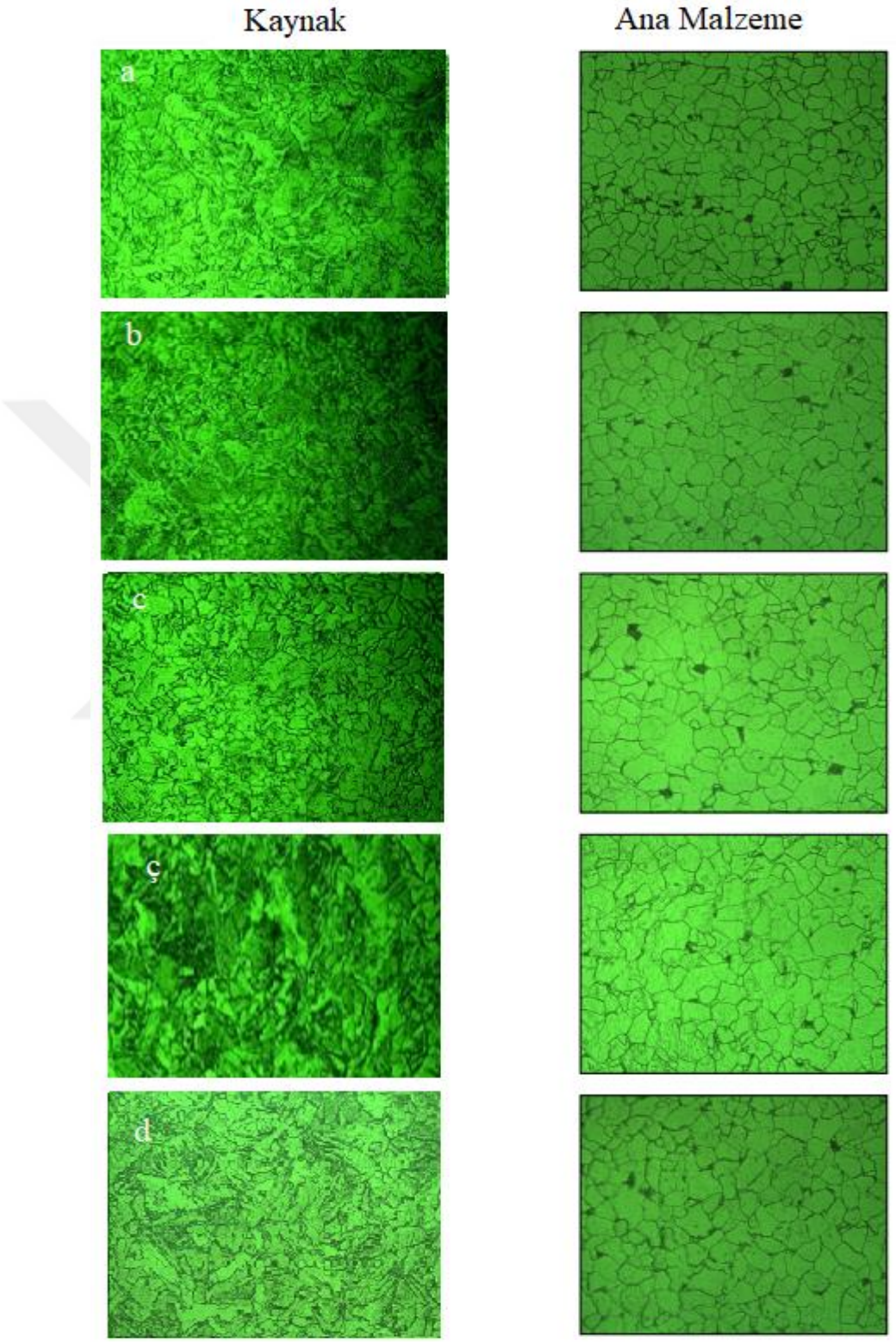
Mn oranlarına bakıldığında 3-S275JOH, 4-S275J2H, 5-S355JO, 6-S335J2H 12-P355N, 13-P355NH, 16-L290N, 17-L320N, 18-L360N, 19 L390N ve 20-J55 numaralı numunelerde 1-1.5 civarlarında olduğu tespit edilmiştir. Bu da nispeten yüksek akma-çekme mukavemeti için kullanıldığını açıklamaktadır ve literatür bilgisi ile örtüşmektedir.

20-J55 numunesinde ise 0,25 oranında karbon tespit edilmiştir. Eş değer karbon oranı ise 0,484 olduğu tespit edilmiştir. Bu ürün daha sonra ısıl işlemle daha yüksek mukavemetli çelik haline getirilmeye uygun olduğundan karbon oranı yüksektir.

Tüm numuneler söndürülmüş çeliklerden üretildikleri için S ve P oranı eser miktarda olduğu görülmüştür.

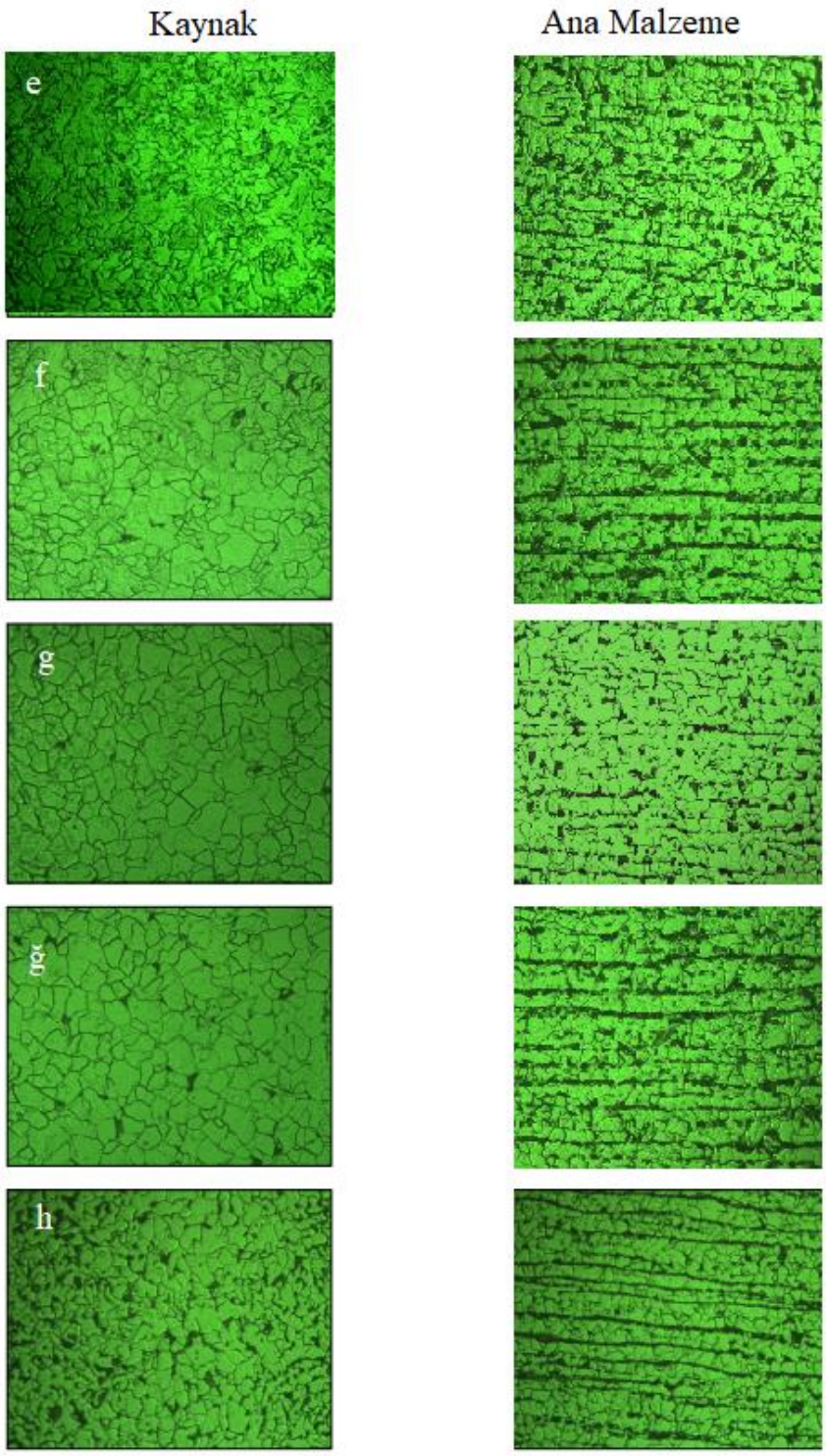
5.4.4 Mikroyapı İncelemesi ve Karakterizasyonu

Mikro yapı incelemeleri Şekil 5.25-26, Şekil 5.27-28'de gösterilmiştir.



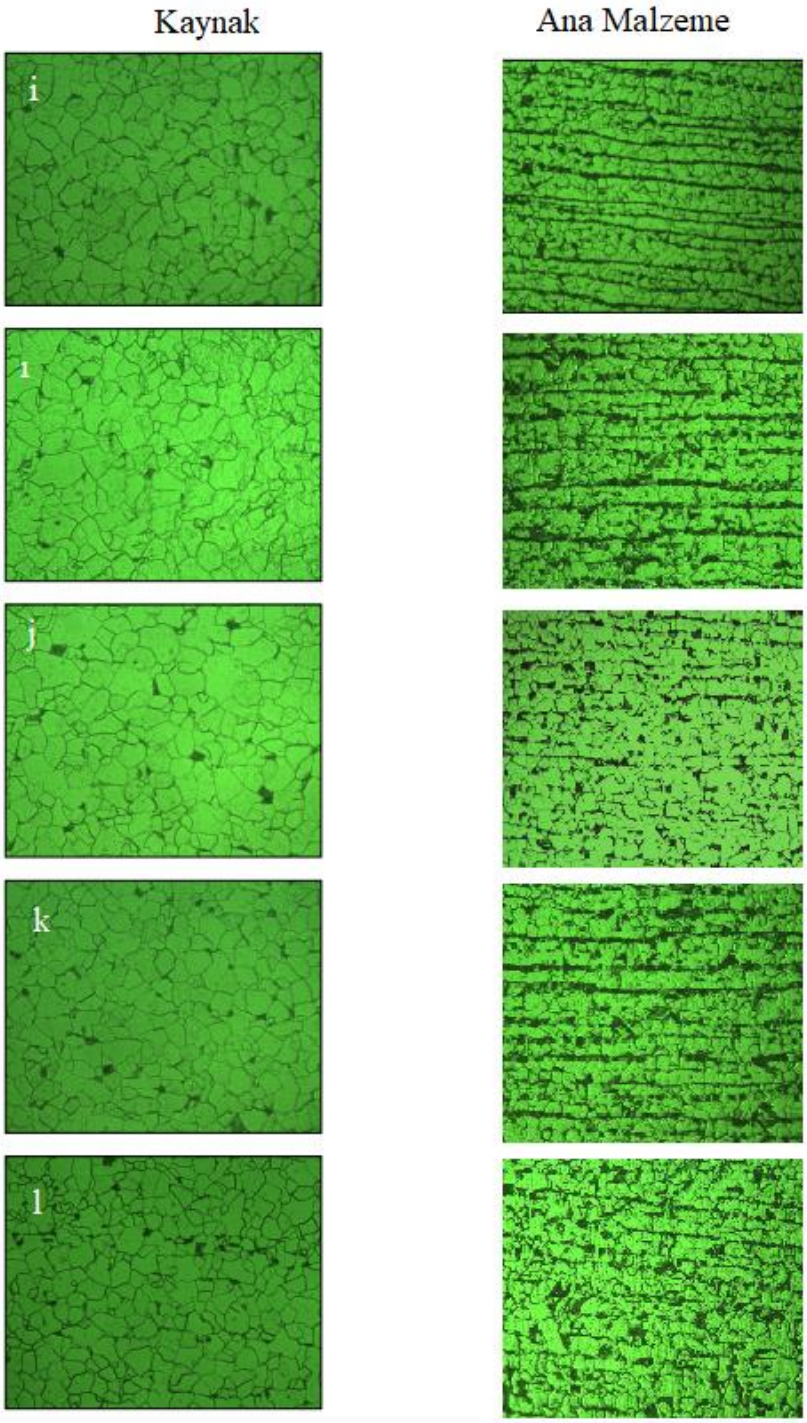
Şekil 5.25 : Mikroyapı görünümleri (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO

Şekil 5.25 (a) 1-S195T, (b) 2-S235JRH, (c) 3-S275JOH, (ç) 4-S275J2H, (d) 5-S355JO kaynak bölgelerinde martenzit tespit edilmiştir. Ana metal ise ferritik-perlitik yapıdadır.



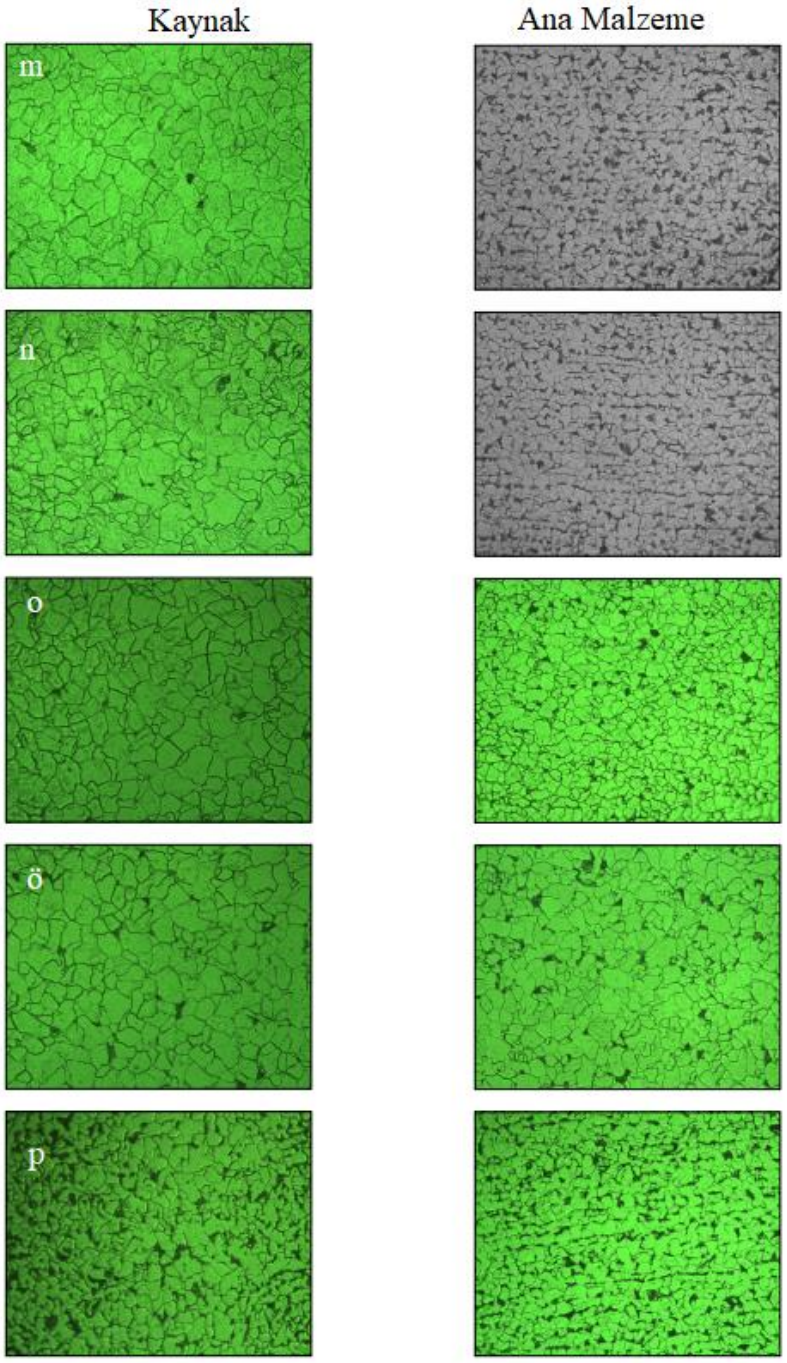
Şekil 5.26 : Mikroyapı görünümleri (e) 6-S355J2H, (f) 7-P235TR1, (g) 8-P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH

Şekil 5.26 (e) 6-S355J2H numunenin kaynak bölgesinde martenzit yapısı tespit edilmiştir. Ana metal ferritik perlitik yapıdadır. Şekil 5.26 (f) 7-P235TR1, (g) 8-P265TR1, (ğ) 9-P195GH, (h) 10-P265GH numunelerinin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur.



Şekil 5.27 : Mikroyapı görünümleri (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245N

Şekil 5.27 (i) 11-P295GH (ı) 12-P355N (j) 13-P355NH (k) 14-L210 (l) 15-L245Nnumunelerinde Ana metal ve kaynak bölgesi ferritik perlitik yapıdadır ve numunlerin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur. Ayrıca ana metal de perlit izler hadde yönü boyunca olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.28 : Mikroyapı görünümleri (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55

Şekil 5.28 (m) 16-L290N (n) 17-L320N (o) 18-L360N (ö) 19-L390N (p) 20-J55 numunelerinde Ana metal ve Kaynak bölgesi ferritik perlitik yapıdadır ve numunlerin kaynak bölgesinde tane kabalaşması görülmüştür. Üretim standartları gereği kaynak sonrası direkt dikiş tavlama uygulandığı için tane kabalaşması beklenen durumdur.

5.5 Sonuçların Karşılaştırılması

Çekme testlerinde tüm hızlardaki numunelerin akma dayanımları, standart akma değerlerini karşıladığı görülmüştür. En yüksek çekme dayanıma sahip olan malzemenin 20-J55 numunesi olduğu görülmüştür.

Tüm numunelerin sertlik değerleri HAZ bölgesinde dalgalanma eğilimi göstermiştir.

Tüm numuneler Ceş bakımından kaynak edilmeye uygun olduğu tespit edilmiştir.

Tüm mikro yapılarda ferrit çizgisi oluşmuştur.

6-S355J2H numunede, 4 farklı hızda da kullanılan kimyasal analizlerde çok fark olmamasına karşın, Çekme testi sonuçları hız ile doğrusal olarak azalmaktadır. Hız arttıkça çekme mukavemeti düşmekte (625, 594, 578, 559) buna rağmen %uzamalarında ise 25, 29, 28, 26 elde edilmiştir. Böylece bu numune için yavaş hızın daha uygun olduğu söylenebilir.

9-P195GH numunede, 4 farklı hızda da kullanılan kimyasal analizlerde çok fark olmamasına karşın, Çekme testi sonuçları hız ile doğrusal olarak artmaktadır (405, 426, 435, 442) buna rağmen %uzamalarında ise 37, 34, 33, 35 elde edilmiştir. Böylece bu numune için yüksek hızın daha uygun olduğu söylenebilir.

11-P295GH numunede, Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri 4 numunenin de benzer olduğu görülmüştür. 4 hız da bu numune için uygun olduğu görülmüştür.

6. GENEL SONUÇLAR

Yapılan tez çalışmasında farklı standartla numuneler kullanılarak, yüksek frekans indüksiyon kaynağı ile kaynatılmış olup, her hız için ayrı ayrı testler yapılmıştır. Numunelerin mekanik, Kimyasal ve Metalografik özellikleri incelenmiş olup sonuçları aşağıda verilmiştir.

1-S195T Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde Martenzit yapısında mikro yapı tespit edilmiştir. Sertliği nispeten diğer numunelere göre fazladır, hız arttıkça martenzit oranı ve sertliği de artmış durumdadır, C oranları %0,15 civarında. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 310 MPa olan 3.hızın en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 3421 olması daha uygundur.

2-S235JRH Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde Martenzit yapısında mikro yapı tespit edilmiştir. Sertliği nispeten diğer numunelere göre fazladır, hız arttıkça martenzit oranı ve sertliği de artmış durumdadır, C oranları %0,10 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 341 MPa olan 2.hız arsındaki hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 2314 olması daha uygundur.

3-S275JOH Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde Martenzit yapısında mikro yapı tespit edilmiştir. Sertliği nispeten diğer numunelere göre fazladır, hız arttıkça martenzit oranı ve sertliği de artmış durumdadır, C oranları %0,15 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 346 MPa olan 2.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 2143 olması daha uygundur.

4-S275J2H Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde Martenzit yapısında mikro yapı tespit edilmiştir. Sertliği nispeten diğer numunelere göre fazladır, hız arttıkça martenzit oranı ve sertliği de artmış durumdadır, C oranları %0,15 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 344 MPa olan 1.hız

en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 1342 olması daha uygundur.

5-S355JO Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde Martenzit yapısında mikro yapı tespit edilmiştir. Sertliği nispeten diğer numunelere göre fazladır, hız arttıkça martenzit oranı ve sertliği de artmış durumdadır, C oranları %0,15 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 445 MPa olan 2.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 2143 olması daha uygundur.

6-S355J2H Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde Martenzit yapısında mikro yapı tespit edilmiştir. Sertliği nispeten diğer numunelere göre fazladır, hız arttıkça martenzit oranı ve sertliği de artmış durumdadır, C oranları %0,17 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 520 MPa olan 1.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 1234 olması daha uygundur.

7-P235TR1 Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,1 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 281 MPa olan 2.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 2134 olması daha uygundur.

8-P265TR1 Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,1 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 396 MPa olan 1.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 1423 olması daha uygundur.

9-P195GH Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,13 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri

daha uygun olan ve Akma dayanımı 252 MPa olan 1.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 1234 olması daha uygundur.

10-P265GH Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,09 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 310 MPa olan 2.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 2341 olması daha uygundur.

11-P295GH Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,09 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri 4 numunenin de benzer olduğu görülmüştür. 4 hız da bu numune için uygun olduğu görülmüştür.

12-P355N Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,12 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 368 MPa olan 3.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 3142 olması daha uygundur.

13-P355NH Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,12 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 431 MPa olan 1.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 1432 olması daha uygundur.

14-L210 Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,08 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 400 MPa olan 1.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 1324 olması daha uygundur.

15-L245N Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,1 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 344 MPa olan 1.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 1234 olması daha uygundur.

16-L290N Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,1 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 414 MPa olan 2.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 2134 olması daha uygundur.

17-L320N Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,1 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 477 MPa olan 1.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 1423 olması daha uygundur.

18-L360N Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,1 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 514 MPa olan 2.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 2134 olması daha uygundur.

19-L390N Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,08 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 426 MPa olan 2.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 2134 olması daha uygundur.

20-J55 Ana metal ferritik perlitik yapıda ve normal tane boyutundadır. Kaynak bölgesinde ferritik perlitik yapılı ve kabalaşmış tane yapısı tespit edilmiştir. Sertliği

ferrit çizgisine yaklaştıkça dalgalanma göstermektedir. C oranları %0,25'dir. Ceş oranları %0,49 civarındadır. Tüm ölçülen özellikler göz önüne alındığında, mikro yapısı ve mekanik özellikleri daha uygun olan ve Akma dayanımı 476 MPa olan 1.hız en optimum hızı olduğu görülmüştür. Hız tercihleri sırasıyla 1234 olması daha uygundur.

Eş değer karbon oranları ($C_{eş}$) tüm numuneler de %0,4 civarında olduğu ve kaynak edilmeye uygun oldukları tespit edilmiştir.

Tüm bu bilgiler göz önüne alındığında ve kullanımı daha rahat olabilecek Şekil 6.1'de ki Hız-Standart tercih matrisi çizilebilir.

Standart	Malzeme	25m/dak	35m/dak	45m/dak	55m/dak
ISO 10255	1-S195T	1	2	4	3
ISO 10219-1	2-S235JRH	2	4	3	1
ISO 10219-1	3-S275JOH	3	4	1	2
ISO 10219-1	4-S275J2H	4	1	3	2
ISO 10219-1	5-S355JO	3	4	1	2
ISO 10219-1	6-S355J2H	4	3	2	1
ISO 10217-1	7-P235TR1	3	4	2	1
ISO 10217-1	8-P265TR1	4	2	1	3
ISO 10217-2	9-P195GH	4	3	2	1
ISO 10217-2	10-P265GH	1	4	3	2
ISO 10217-2	11-P295GH	4	4	4	4
ISO 10217-3	12-P355N	3	1	4	2
ISO 10217-3	13-P355NH	4	1	2	3
API 5L PSL 1	14-L210	4	2	3	1
API 5L PSL 1	15-L245N	4	3	2	1
API 5L PSL 1	16-L290N	3	4	2	1
API 5L PSL 1	17-L320N	4	2	1	3
API 5L PSL 1	18-L360N	3	4	2	1
API 5L PSL 1	19-L390N	3	4	2	1
API 5CT	20-J55	4	3	2	1

Şekil 6.1 : Hız-Standart tercih matrisi

6.1 Öneriler

Yapılan çalışmada görüldüğü üzere, farklı standartlardaki malzemelerin farklı hızlardaki kaynatıldığında malzemelerin davranışları da farklılık arz etmektedir. Bu çalışmada 4 farklı hız seçilmiştir. Daha yüksek hızlar(>55m/dak) için de bu çalışma

tekrarlanabilir ve mikro yapılar için SEM ve XRD ile oluşabilecek fazları da göz önüne alarak kapsamlı bir çalışma daha iyi sonuçlar verebilir.

Ayrıca standart numune miktarını azaltıp 10-100m/dak hızlar arasındaki tüm hızlardaki malzemelerin karakterizasyonu da ayrı bir çalışmanın konusu olabilir.

KAYNAKLAR

[1] **Şirin, K.,** 1997, "Yüksek frekans indüksiyon kaynaklı boru üretiminde proses parametrelerin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-15.

[2] **Cheng, J., Cao, J., Zhao, J., Liu, J., Zhao, R., & Liu, S.** (2020). The flower pattern and rolls design for ERW pipes with the different specification in the flexible roll forming process. *Thin-Walled Structures*, 154, 106809.

[3] **Jo, M. C., Lee, S. G., Sohn, S. S., Kim, K. S., Kim, W. K., Lee, C. S., & Lee, S.** (2017). Effects of coiling temperature and pipe-forming strain on yield strength variation after ERW pipe forming of API X70 and X80 linepipe steels. *Materials Science and* Engineering: A, 682, 304-311.

[4] **Lee, J., Kim, D., Quagliato, L., Kang, S., & Kim, N.** (2017). Change of the yield stress in roll formed ERW pipes considering the Bauschinger effect. *Journal of Materials Processing Technology*, *244*, 304-313.

[5] **Mahmutoğlu M., Z., Çimenoğlu H.**, "% 0.03 Nb ve % 0.05 V'lu bir boru hattı çeliğinde mikroyapı-mekanik özellik ilişkisi", *İTÜ dergisi*, İstanbul, Türkiye, 1

[6] **Uzun, H.,** "Kaynaklı API 5L X65 Boru Hattı Çeliklerinin Kırılma Tokluğu", Sakarya Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü dergisi*, Sakarya, Türkiye

[7] **Şirin, K.,** 2004, "Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral boru üretiminde kaynak parametrelerinin kaynak dikiş kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi", Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, Türkiye, 9-97.

[8] **Ada H.,** 2006, "Petrol ve Doğalgaz Boru Hatları İçin Üretilen Boruların Tozaltı ve Spiral Kaynak Yöntemiyle Kaynaklanabilirliği ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Ankara, Türkiye, 7-108.

[9] **Taban E., Kaluç E.,** "Petrol ve Doğalgaz Boru Hatlarının Yapımında Kullanılan Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler Ve Kaynak Edilebilirliği", *Mühendis ve Makine dergisi*, İstanbul, Türkiye

[10] **Yavuz S.,** "Türkiye'de Boru Üretiminde Kullanılan DKP Sacların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,* Karabük, Türkiye.

[11] **Akay A., A.,, Kaya Y., Kahraman N.,** (2013) "Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen X60, X65 ve X70 Çeliklerin Kaynak Bölgesinin Etüdü" *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi,* Zonguldak, Türkiye.

[12] **Uysal K.,** 2010, "Petrol ve Doğalgaz Boru Hattı Çeliklerinin Hidrojen Nedenli Çatlama Davranışı", Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,* İstanbul, 4-6.

[13] **Taş Z.,** 2006, "NB-V-Alaşımlı Boru Çeliklerinde Mikroyapı - Mekanik Özellikler İlişkisi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Gebze, Kocaeli, 153- 155.

[14] **Brensing, K. H., & Sommer, B.** (2008). Steel tube and pipe manufacturing processes. *Salzgitter Mannersmann Rohrenwerke*, 1, 1-63.

[15] **Url-1**<*https://www.wermac.org/pipes/pipemaking.html*>, Erişim tarihi 20.02.2024

[16] **Wright, J.,** (1999). Optimizing efficiency in HF tube welding processes. *Tube & Pipe Technology*.

[17] **Nichols, Rober K.** (1999). High Frequency Welding - The Process and Applications. *PE Thermatool Corp.*

[18] **Thermatool.** (2017). Welding Tutorial [Powerpoint Slaytları].

[19] **Kim, D., Kim, T., Park, Y. W., Sung, K., Kang, M., Kim, C., ... & Rhee, S.** (2007). Estimation of weld quality in high-frequency electric resistance welding with image processing. *Welding Journal*-New York-, 86(3), 71.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Sarp KILIÇ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2013, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2014 yılından beri Kalite yönetim sistemleri üzerine çalışmaktadır.
- 2022-2024 arasında Berrmak Makine-Kalite Müdürü
- 2020-2022 Ferco Çelik-Kalite Müdürü
- 2018-2022 Habasit-Kalite Müdürü
- 2014-2018 Çayırova Boru-Kalite Mühendisi