



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TOZALTI KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLEN İÇME SUYU İSALE
HATLARINDAKİ ST37 ÇELİK BORULARDA ISIL İŞLEMİN
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Cihat ATABEY

**Haziran-2024
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TOZALTI KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLEN İÇME SUYU İSALE
HATLARINDAKİ ST37 ÇELİK BORULARDA ISIL İŞLEMİN
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Cihat ATABEY

**Danışman
Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK**

**Haziran-2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Cihat ATABEY tarafından hazırlanan “Tozaltı Kaynağıyla Birleştirilen İçme Suyu İsale Hatlarındaki St37 Çelik Borularda Isıl İşlemin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 03/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ

Danışman

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Cihat ATABEY

Tarih: 03.06.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOZALTI KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLEN İÇME SUYU İSALE HATLARINDAKİ ST37 ÇELİK BORULARDA ISIL İŞLEMİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Cihat ATABEY

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2024, 92 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK
Prof. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ
Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

Bu çalışmada, içme suyu isale hatlarında kullanılan 4 mm kalınlığındaki St37 çelik malzemelerin 400 ve 450 A akım değerlerinde tozaltı kaynağı ile birleştirilmesi yapılmış ve birleştirilen kaynaklı bağlantılara farklı sertlik değerleri kazandırmak için ısıtıl işlem uygulanmıştır. Akım değerlerinin ve sertleştirme ısıtıl işleminin çelik malzemelerin çekme dayanımı, sertlik ve mikroyapı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Çekme test sonuçlarına göre 400 ve 450 A akım değerleriyle birleştirilmiş kaynaklı bağlantıların gerilim değerleri sırasıyla 458 MPa ve 401 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değerler, kaynaklı numunenin 390 MPa olan gerilim değerlerinden yüksek çıkmıştır. Sertleştirme ısıtıl işlemi ile numunelerin gerilim değerleri artmış ve gerilim değerleri düşmüştür. Maksimum sertlik elde edilen numunelerin gerilim değerleri kaynaklı numunelerde 1110 MPa, 400 A akım değeriyle birleştirilen numunelerde 1057 MPa ve 450 A akım değeriyle birleştirilen numunelerde ise 1001 MPa elde edilmiştir. Sertlik test sonuçlarına göre ana malzemeden kaynak metaline gittikçe sertlik değeri artmıştır. Ana malzemenin sertliği 140~147 HV arasında ölçülmüştür. Yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği kaynak metalinde, 400 A akım değeri için ölçülen sertlik değerleri 197-205 HV arasında iken, 450 A akım değeri için ölçülen sertlik değerleri 191-195 HV arasındadır. Sertleştirme ısıtıl işlemi ile malzemelerin doğrudan karbona maruz kalan dış yüzeylerinde daha yüksek sertlik değerleri ölçülürken, malzemenin merkezine doğru sertlik değerleri kısmen düşmüştür. Yüksek sertlik kazandırılan çelik numunelerin dış ve iç yüzeylerinde ölçülen sertlik değerleri arasındaki fark, düşük sertlik kazandırılan çelik numunelerin dış ve iç yüzeylerindeki farktan daha fazla olmuştur. Ancak ana malzeme, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve kaynak metalindeki sertlik değerleri birbirine yakın değerlerde ölçülmüştür. Mikroyapı sonuçlarına göre St37 çeliği eş eksenli ferrit fazından oluşmuş, kaynak metalinde ise kaynak sonrası katılaşma ile tipik bir kolonsal yapı meydana gelmiştir. Ana malzeme ve kaynak metal arasında kalan ITAB'da ise bir miktar tane irileşmesi gözlemlense de ana malzeme, ITAB ve kaynak metal mikroyapılarında kayda değer bir farklılık oluşmamıştır. Sertleştirme ısıtıl işlemi ile karbona maruz kalan yüzeylerde ise martenzitik mikroyapı elde edilmiş ve merkeze doğru ilerledikçe yapıda ferrit fazı artmıştır. Bu durum, 400 ve 450 A akım değerlerinin St37 çeliğinin birleştirilmesinde tercih edilebilir değerler olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıl İşlem, Mekanik Özellikler, Mikroyapı, Tozaltı Ark Kaynağı.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ST37 STEEL PIPES IN POTABLE WATER TRANSMISSION LINES JOINED BY SUBMERGED ARC WELDING

Cihat ATABEY

**Batman University Graduate Education Institute
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2024, 92 Pages

Jury

**Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK
Prof. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ
Asst. Prof. Dr. Serkan BATI**

In this study, 4 mm thick St37 steel materials used in drinking water transmission lines were joined by submerged arc welding at current values of 400 and 450 A, and heat treatment was applied to impart different hardness values to the joined welded connections. The effects of current values and hardening heat treatment on the tensile strength, hardness and microstructure of steel materials were analyzed. According to the tensile test results, the stress values of the welded connections joined with current values of 400 and 450 A were obtained as 458 MPa and 401 MPa, respectively. These values were higher than the stress values of the un-welded sample, which was 390 MPa. With the hardening heat treatment, the stress values of the samples increased, and the strain values decreased. The stress values of the samples with maximum hardness were obtained as 1110 MPa for the un-welded samples, 1057 MPa for the samples joined with a current value of 400 A, and 1001 MPa for the samples joined with a current value of 450 A. According to the hardness test results, the hardness value increased from the base material to the weld metal. The hardness of the base material was measured between 140~147 HV. In the weld metal where high hardness values were obtained, the hardness values measured for 400 A current value were between 197-205 HV, while the hardness values measured for 450 A current value were between 191-195 HV. While higher hardness values were measured on the outer surfaces of the materials directly exposed to carbon through the hardening heat treatment, the hardness values partially decreased towards the center of the material. The difference between the hardness values measured on the outer and inner surfaces of the steel samples with high hardness was greater than the difference in the outer and inner surfaces of the steel samples with low hardness. However, the hardness values of the base material, heat affected zone (HAZ) and weld metal were measured to be close to each other. According to the microstructure results, St37 steel consisted of an equiaxed ferrite phase, and a typical columnar structure was formed in the weld metal with post-welding solidification. Although some grain coarsening was observed in the HAZ between the base material and the weld metal, there was no significant difference in the microstructures of the base material, HAZ and weld metal. A martensitic microstructure was obtained on the surfaces exposed to carbon through the hardening heat treatment, and the ferrite phase increased in the structure as it moved towards the center. This situation revealed that the current values of 400 and 450 A are preferable values for joining St37 steel.

Keywords: Heat Treatment, Mechanical Properties, Microstructure, Submerged Arc Welding.

ÖNSÖZ

Bu tez, “Tozaltı Kaynağıyla Birleştirilen İçme Suyu İsale Hatlarındaki St37 Çelik Borularda Isıl İşlemin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi” başlığı altında gerçekleştirilmiş bir araştırma çalışmasını kapsamaktadır. Bu süreçte, bir dizi önemli konu ele alınmış ve çeşitli deneyler gerçekleştirilerek elde edilen veriler ışığında çeşitli sonuçlara ulaşılmıştır.

Giriş başlığı altında, tezin genel amacı ve önemi belirtilmiş, tozaltı kaynağı üzerine yapılan literatür çalışmaları analiz edilmiştir. Genel bilgiler başlığı altında, kaynak yöntemi, kaynağın tarihçesi, kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması, tozaltı kaynağı, avantajları ve dezavantajları, ısıl işlem gibi araştırma yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Tezin odak noktası olan tozaltı kaynağı ve içme suyu isale hatlarındaki St37 çelik borularda uygulanan ısıl işlemin materyal yöntemi başlığında, kullanılan malzeme ve deney yöntemleri detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bulgular ve tartışma başlığı altında, elde edilen veriler analiz edilmiş ve çıkarılan sonuçlar detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu aşamada, tozaltı kaynağı ile birleştirilen St37 çelik borularda uygulanan ısıl işlemin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi üzerine elde edilen bulgular detaylı bir şekilde açıklanmış ve sonuçlar tartışılmıştır. Sonuçlar ve öneriler başlığı altında, araştırmanın genel anlam ve önemi bir kez daha vurgulanmış ve ileriye dönük çalışmalara ışık tutacak öneriler sunulmuştur.

Bu tez çalışması boyunca bana sadece akademik bilgi ve rehberlik sağlamakta kalmayıp aynı zamanda ilham verici bir öğretmenlik yaptığından dolayı değerli danışman hocam Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK’e en derin şükranlarımı sunarım. Deneysel çalışmalarda gösterdiği büyük destek ve katkılardan dolayı Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI’ya teşekkür ederim. Bilgisi ve deneyimi, bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasına önemli bir katkı sağlamıştır. Ayrıca sevgileri ve destekleri ile hayatım boyunca bana güç ve motivasyon veren aileme sevgi, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Cihat ATABEY
BATMAN-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Çalışmaları	5
2. GENEL BİLGİLER.....	22
2.1. Kaynak Yöntemi	22
2.1.1. Kaynağın tarihçesi	23
2.1.2. Kaynağın avantajları ve dezavantajları	24
2.1.3. Kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması	25
2.1.4. Kaynak uygulama alanları	28
2.1.5. Otomasyon olarak yapılan kaynak sistemleri	28
2.2. Tozaltı Kaynağı.....	29
2.2.1. Tozaltı kaynağında metal transferine etki eden parametreler	31
2.2.2. Tozaltı kaynağının avantajları ve dezavantajları	33
2.3. Isıl İşlem	34
2.3.1. Normalleştirme	38
2.3.2. Tavlama	40
2.3.3. Küreselleştirme	43
2.3.4. Çeliğin sertleştirilmesi	43
2.3.5. Çeliğin kimyasal ısıl işlemi.....	46
2.3.6. Temperleme	48
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	50
3.1. Kaynak Edilecek Malzeme	50
3.2. Spiral Kaynaklı Borunun Tozaltı Kaynağıyla Üretimi	50
3.3. Kaynaklı Borudan Numune Çıkarma	52
3.4. Numunelerin Isıl İşlemi	54
3.5. Laboratuvar Testleri.....	57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	59
4.1. Çekme Testi Sonuçları.....	59

4.2. Sertlik Sonuçları	66
4.2.1. Yatay sertlik sonuçları	66
4.2.2. Dikey sertlik sonuçları	71
4.3. Mikroyapı Sonuçları	74
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
5.1. Sonuçlar	85
5.2. Öneriler	85
KAYNAKLAR	86
ÖZGEÇMİŞ	92



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Elektrik ark kaynağının şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.2. Bir dalgıç kaynakçı tarafından su altında ark kaynağının yapılışı	25
Şekil 2.3. Tozaltı kaynağının şematik gösterimi	30
Şekil 2.4. Demir-sementit faz diyagramı.....	35
Şekil 2.5. Basit bir ısıtım işlem döngüsünün grafiksel gösterimi	36
Şekil 2.6. Çökeltmeyle sertleştirilen alaşım için genelleştirilmiş ısıtım işlem döngüsü.....	37
Şekil 2.7. Karbürleme işlemi için tipik ısıtım işlem döngüsü.....	37
Şekil 2.8. Çeliklerin normalleştirme ve sertleştirme işlemlerine yönelik sıcaklık aralıkları	39
Şekil 2.9. Çeşitli tavlama işlemleri için sıcaklık aralıkları	40
Şekil 3.1. Tozaltı kaynağıyla spiral boru üretimi	51
Şekil 3.2. Spiral kaynaklı borunun kesilmesi ve düzeltilmesi.....	52
Şekil 3.3. Kesilen kaynaklı numuneler ve freze tezgâhında çekme numunesine getirilmesi	53
Şekil 3.4. Lama tipi dikdörtgen geometriye sahip çekme numunesinin boyutları	54
Şekil 3.5. Kaynaksız ve kaynaklı çekme numunelerine ait görüntüler	54
Şekil 3.6. Isıtım işlem uygulaması ve sertlik ölçümüne ait görüntüler.....	56
Şekil 3.7. Shimadzu marka çekme test cihazı	57
Şekil 3.8. Sertlik deneyi ve mikroyapı analizi için numune hazırlama aşamaları.....	58
Şekil 4.1. Kaynaksız (St37) ve 400-450 A akım değerlerinde kaynak edilmiş çelik numunelerin gerilim–gerinim grafiği.....	59
Şekil 4.2. Çekme testi sonucu kaynaksız (St37) ve 400-450 A akım değerlerinde kaynak edilmiş çelik numunelerde kopma görüntüleri.....	60
Şekil 4.3. Kaynaksız St37 çeliğinde sertleştirme ısıtım işlemlerine ait gerilim–gerinim grafiği.....	61

Şekil 4.4. Çekme testi sonucu kaynaksız ve sertleştirme ısı işlemi görmüş St37 çelik numunelerde kopma görüntüleri	62
Şekil 4.5. 400 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemlerine ait gerilim–gerinim grafiği	62
Şekil 4.6. Çekme testi sonucu 400 A akım değerinde birleştirilmiş ve sertleştirme ısı işlemi görmüş St37 çelik numunelerde kopma görüntüleri	63
Şekil 4.7. 450 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemlerine ait gerilim–gerinim grafiği	64
Şekil 4.8. Çekme testi sonucu 450 A akım değerinde birleştirilmiş ve sertleştirme ısı işlemi görmüş St37 çelik numunelerde kopma görüntüleri	65
Şekil 4.9. Kaynaksız (St37) ve tozaltı kaynağı ile farklı akım değerlerinde birleştirilmiş çelik numunelerde yatay eksendeki sertlik değişimi	66
Şekil 4.10. Kaynaksız St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemlerine bağlı yatay eksendeki sertlik değişimi.....	68
Şekil 4.11. 400 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemlerine bağlı yatay eksendeki sertlik değişimi	69
Şekil 4.12. 450 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemlerine bağlı yatay eksendeki sertlik değişimi	70
Şekil 4.13. Kaynaksız St37 ana malzeme ve tozaltı kaynağı ile farklı akım değerlerinde birleştirilmiş numunelerin kaynak metalinde dikey eksendeki sertlik değişimi.....	71
Şekil 4.14. Kaynaksız St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemlerine bağlı dikey eksendeki sertlik değişimi.....	72
Şekil 4.15. 400 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemlerine bağlı dikey eksendeki sertlik değişimi	73
Şekil 4.16. 450 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemlerine bağlı dikey eksendeki sertlik değişimi	73
Şekil 4.17. St37 çelik numunenin (ana malzemenin) optik mikroskop görüntüsü.....	74
Şekil 4.18. 400 A akımla birleştirilen kaynaklı bağlantıda ITAB ve kaynak metaline ait optik mikroskop görüntüleri.....	75
Şekil 4.19. 450 A akımla birleştirilen kaynaklı bağlantıda ITAB ve kaynak metaline ait optik mikroskop görüntüleri.....	76
Şekil 4.20. 30 HRC sertliğe getirilmiş St37 çeliğinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri.....	77

Şekil 4.21. 45 HRC sertliğe getirilmiş St37 çeliğinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri.....	78
Şekil 4.22. 60 HRC sertliğe getirilmiş St37 çeliğinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri.....	79
Şekil 4.23. 30 HRC sertliğe getirilmiş kaynaklı bağlantıda kaynak metalinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri	80
Şekil 4.24. 45 HRC sertliğe getirilmiş kaynaklı bağlantıda kaynak metalinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri	81
Şekil 4.25. 60 HRC sertliğe getirilmiş kaynaklı bağlantıda kaynak metalinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri	82
Şekil 4.26. 30 ve 45 HRC sertliğe getirilmiş kaynaklı bağlantılarda ITAB'dan elde edilen optik mikroskop görüntüleri	83
Şekil 4.27. 60 HRC sertliğe getirilmiş kaynaklı bağlantıda ITAB'dan elde edilen optik mikroskop görüntüsü.....	84

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 2.1. Kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması	25
Tablo 3.1. St37 çelik malzemesinin kimyasal ve mekanik özellikleri	50
Tablo 3.2. Kaynak parametreleri	51
Tablo 3.3. Çekme numunelerinin ısıtıl işlem için sınıflandırılması	54
Tablo 4.1. Çekme testi sonuçlarından elde edilen gerilim–gerinim değerleri	65



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A₁	: Isıtma sırasında östenitin oluşmaya başladığı sıcaklık
A₃	: Isıtma sırasında demirin östenite dönüşümünün tamamlandığı sıcaklık
A_{cm}	: Sementitin östenit içindeki çözünmesinin tamamlandığı sıcaklık
Fe₃C	: Sementit
α	: Ferrit veya Alfa
γ	: Östenit veya Gama
δ	: Delta

Kısaltmalar

EDS	: Enerji Dağılımlı Spektrometre
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
MAG	: Metal Aktif Gaz Kaynağı
MIG	: Metal Asal Gaz Kaynağı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
WIG/TIG	: Wolfram (Tungsten) Asal Gaz Kaynağı
XRD	: X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

Tunç Çağı'ndan beri metallerin birleştirildiği bilinmektedir. Ancak kademeli ve ardından teknolojik ilerlemeler, modern kaynağın gelişmesini sağlamıştır (Ahmad ve ark., 2019). Modern kaynağın gelişmesiyle benzer ve farklı özelliklere sahip metaller, basınç veya ısı tesiri altında ilave kaynak teli kullanılarak veya kullanılmadan da verimli bir şekilde birleştirilmektedir. Günümüz endüstrilerinde kullanılan kaynak işlemleri direnç kaynağı, ark kaynağı, katı hal kaynağı ve benzerleridir. Uygulama alanlarına bağlı olarak kullanımları farklılık gösterse dahi günümüzde ark kaynak yöntemleri oldukça önemli bir yere sahiptir (Choudhary ve ark., 2020).

Ark kaynağının; elektrik ark kaynağı, gazaltı (koruyucu gaz) kaynağı, wolfram (Tungsten) asal gaz (WIG/TIG) kaynağı, metal asal gaz (MIG) kaynağı, metal aktif gaz (MAG) kaynağı ve tozaltı kaynağı gibi farklı yöntemleri bulunmaktadır (Mortazavian ve ark., 2020). Daha yüksek kaynak biriktirme hızı, kalın kesitlerin kolaylıkla birleştirilmesi, üstün yüzey kalitesi vb. özelliklerinden dolayı tozaltı kaynağı endüstriyel uygulamalarda diğer kaynak yöntemlerine göre avantajlar sağlamaktadır (Choudhary ve ark., 2020). Tozaltı kaynağı ile yapılan kaynak, düşük hidrojen ve azot içeriği ile yüksek mukavemet ve süneklik sergiler. Bu da tozaltı kaynağının otomobil, demiryolu ekipman, büyük mühendislik yapı, gemi inşa ve basınçlı kap imalat endüstrileri ile boru kaynağı ve depolama tanklarında yaygın kullanılmasını sağlamıştır (Sharma ve ark., 2020).

Günümüzde tozaltı kaynağı hem yarı otomatik hem de tam otomatik çalışmaya göre uyarlanmıştır. Ancak tam otomatik çalışmaya uyarlanmış tozaltı kaynağı doğal avantajları nedeniyle farklı uygulamalarda popüler olarak kullanılmaktadır. Bu işlemde kimyasal ve elektriksel süreçleri çalıştıran bir ark oluşturmak için sürekli beslenen kaynak teli ucu ile metal taban plakası arasından elektrik akımı geçirilir ve böylece metal yüzeyler eritilerek birleştirilir (Ahmad ve ark., 2019). Tozaltı kaynağında, kaynak esnasında ark doğrudan görünmez. Çünkü ark, akı örtüsünün altında saklıdır. Kaynak akısı, kaynak teli ile sürekli olarak beslenmektedir. Bu örtü, atmosferik kirlenmeyi önler ve ısı transfer verimini artırır (Choudhary ve ark., 2020). Bu sayede ısı kaybı en aza indirilir ve %90'ın üzerinde bir ısı verim elde edilir. Ancak ark oluşumundaki fiziksel olaylar, sisteme müdahale edilmeden incelenemez. Gerekli incelemeler için minyatür ve akıllı aparatların kullanılması gerekmektedir. Bu tür aparatlar çok fazla bilinmediğinden

dolayı, akı örtüsü altında gerçekleşen ark yöntemine güvenmek gerekmektedir (Sengupta ve ark., 2019). Ark'a en yakın olan akı tabakası, ark boşluğunu hava girişinden korumak ve çevreye ark enerjisi kayıplarını sınırlamak için cüruf halinde eritilir. Kaynak teli ark boşluğuna doğru beslenirken, kaynak havuzuna damlacık halinde dökülür. Ark boşluğundaki ve kaynak havuzundaki işlem, ısı ve kütle transferinin fiziksel ve kimyasal etkileşimlerinden meydana gelir. Genel olarak tozaltı kaynağının kimyasal reaksiyon süresi, çelik katılaşma sıcaklığı tarafından belirlenir. Çünkü erimiş kaynak havuzu ile cüruf arasındaki kimyasal reaksiyonlar, kaynak metali kısmen erimiş kaldığı sürece devam eder (Coetsee ve De Bruin, 2022a).

Tozaltı kaynak parametrelerinin doğru değerlerini belirlemek için standart bir prosedür bulunmamaktadır. Geleneksel olarak, optimum kaynak faktörleri, deneyimli kaynakçının kararı, deneme-yanılma yöntemi, her seferinde bir faktör yaklaşımı vb. yöntemlerle belirlenir. Bu yöntemler, kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantıların kalitesi üzerindeki etkisini ilişkilendirmede yetersizdir. Genel olarak, bu yöntemler, süreç parametrelerini arzu edilen seviyeden uzakta verebilir. Asıl zorluk, zaman ve maliyet kısıtlamaları dahilinde minimum distorsiyon, iyi kaynak nüfuziyeti, arzu edilen kaynak dikiş geometrisi ve mükemmel mekanik özelliklere sahip bağlantı oluşturacak parametrelerin en iyi değerlerini seçmektir (Hayajneh ve ark., 2018; Choudhary ve ark., 2020).

Kaynak bağlantısının kalitesi genellikle kaynak işlemi sırasında doğrudan kaynak giriş parametreleri tarafından kontrol edildiğinden; kaynak işlemi çok girişli ve çok çıkışlı bir işlem olarak düşünülebilir (Hayyal ve Faleh, 2022). Tozaltı kaynağında kaynağın kalitesi, kaynak genişliği, takviye yüksekliği, nüfuziyet derinliği, gözeneklik, sertlik, darbe mukavemeti ve çekme mukavemeti gibi çeşitli kaynak çıktı parametreleri ile tanımlanır. Çıkışların bağlı olduğu giriş kaynağı parametreleri; kaynak akımı, gerilim, tel besleme hızı, kaynak hızı, elektrot uzantısı, elektrot çapı, elektrot açısı, plaka kalınlığı ve akı tipidir. Bu parametrelerin optimize edilmemesi durumunda kaynak dikiş geometrisi, mekanik özellikler, kalıntı gerilmeler ve distorsiyon gibi kaynak kalitesini tanımlayan terimler uygun elde edilmemektedir (Sharma ve ark., 2020).

Genel olarak tüm kaynak işlemlerinde minimum kalıntı gerilme, distorsiyon, mükemmel mekanik özellik ve arzu edilen kaynak dikiş geometrisi elde edilmek istenmektedir (Hayajneh ve ark., 2018). Kalıntı gerilmeler, mekanik bileşenlerin çoğu için zaman bazında temel bir problemdir. Bunun nedeni yapıların mukavemetini

zamanla azaltmasıdır. Kalıntı gerilmeler, esas olarak yapılardaki elastik olmayan deformasyonlardan, yani elemanların akma gerilmesini aşan aşırı gerilmelerden oluşur. Belirli konumlardaki bu lokalize aşırı gerilmeler, kalıcı gerilmenin ana kaynağı olan lokalize kalıcı bir deformasyon yaratır. Özellikle kaynakta kalıntı gerilmeler yaygındır (Rajshekhara ve ark., 2022). Kaynak işleminde, kaynak edilen malzemeler ısınır ve kaynak işlemi sonrası bu malzemeler soğumaya bırakıldığında kalıntı gerilmeler meydana gelir. Bunun nedeni eşit olmayan soğutma nedeniyle sıvı formdaki kaynağın soğutulmuş katı bir kaynak içinde tutulması ve bunun da sıkışmış bölgelerde gerilmelere neden olmasıdır. Bu gerilmeler elastik sınırı aştığı zaman kaynaklı malzemede distorsiyon gözlemlenir ve kaynağın erken kırılması söz konusudur (Karagöz, 2021). Bu yüzden distorsiyon temel bir termal problem olarak karşımıza çıkıp, kaynak bölgesinin plastik olarak deforme olmasına neden olur. Distorsiyon farklı işlemlerle kontrol edilebilmektedir. Bunlar, kaynak edilecek malzemeleri ilk pozisyonlarına uygun bir biçimde tasarlamak, kaynak esnasında malzemelerin hareket etmesini önlemek, kaynak yöntemi, paso sayısı vb. işlemler olarak sıralanabilir (Karagöz, 2021).

Kaynak esnasında ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB'da) mikroyapısal değişiklikler meydana gelir. Bu bölge kaynak dikişinin performansı ve distorsiyon üzerinde önemli bir etkisi vardır. Kaynak esnasında çok yüksek ısı girdilerinin oluşması, büyük bir ergime havuzu ve büyük miktarda sıvı metal oluşumuna yol açmakta ve kaynak bölgesini düşük soğuma oranları ile uzun süreli termal çevrimlere tabi tutmaktadır. Bu senaryo, geniş aralıklı katılaşma yapılarının oluşmasını, östenitik tane büyümesini ve bunun sonucunda, kaynak metalinin mekanik özelliklerine zarar verme eğiliminde olan, ağırlıklı olarak tane sınırı ferrit ve tane içi ferrit tarafından oluşturulan kalın yapıların gelişmesini sağlar (Barbosa ve ark., 2019). Ayrıca ITAB'da martenzit-östenit bileşeni ve tane irileşmesi, kaynak bölgesindeki tokluğun bozulmasının ana nedenleridir. İnce bir mikroyapı ve martenzit/östenit bileşenlerinin oluşumunun azalması, tokluğun iyileştirilmesine yol açacaktır (Sharma ve Chhibber, 2020).

Ana malzeme, ITAB ve kaynak arasındaki uyumsuzluk ve uygun olmayan mikroyapılar mukavemet değerinin düşük olmasına neden olur (Apay ve ark., 2018). Kaynak nüfuziyeti ve ITAB gibi gerekli kaynak kalitesi özelliklerini elde etmek için nihai hedefi koruyarak kaynak parametrelerinin kontrollü seçilmesi gerekmektedir

(Sailender ve ark., 2020). Bu nedenle, verimlilik ve kaynak kalitesinden ödün vermeden kaliteli bir kaynak işleminin ve değişkenlerinin/parametrelerinin seçimi önemlidir. Çünkü kaçınılmaz olarak minimum veya hiç kusur geliştirmeyen parametrelerin optimum bir karışımı yüksek bir verimlilik sağlayacaktır (Ahmad ve ark., 2019).

Kaynaklı metal ve alaşımlarının mühendislik özellikleri, onların atomik yapıları, kristal yapıları ve mikroyapıları ile ilgilidir. Mikro bileşenler göreceli olarak değiştirilerek mekanik özellikler değiştirilebilir. Pratikte mekanik özelliklerdeki değişiklik ısıtılma işlemi olarak bilinen bir işlemle sağlanır. Bu işlem, metal veya alaşımının önceden belirlenmiş belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması, bu sıcaklıkta gerekli süre boyunca tutulması ve son olarak bu sıcaklıktan soğutulmasından oluşur. Tüm bu işlemler katı halde gerçekleştirilir. Bu nedenle ısıtılma işlemi, katı haldeki metal ve alaşımlara istenilen özelliklerin elde edilmesi amacıyla uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tanımlanabilir. Metallerin ısıtılma işlemi birçok mühendislik bileşeninin son imalat sürecinde önemli bir işlemdir. Bu işlemin amacı metali yapısal ve fiziksel olarak bazı özel uygulamalara daha uygun hale getirmektir (Rajan ve ark., 2011). Isıtılma işlemi aşağıdaki amaçlar için yapılabilir.

- a. Sünekliğin iyileştirilmesi,
- b. İç gerilmelerin giderilmesi,
- c. Tane boyutunun incilmesi,
- d. Sertliği veya çekme mukavemetini arttırmak,
- e. Metal yüzeyin kimyasal bileşiminde değişiklikler sağlamak,
- f. İşlenebilirlikte iyileşme,
- g. Manyetik özelliklerde değişiklik,
- h. Elektrik iletkenlikte değişiklik,
- i. Toklukta iyileşme,
- j. Soğuk işlenmiş metalde yeniden kristalleşmiş yapının gelişmesi (Rajan ve ark., 2011).

Kaynaklı bağlantılarda en önemli konu gerilim gidermeleridir. Her ne kadar gerilim gidermeleri önemli olsa da diğer ısıtılma işlemleri de kaynaklı bağlantılara yapılabilmektedir. Isıtılma işlemi uygulanırken dikkate alınması gereken çok sayıda önemli faktör vardır. Bunlardan bazıları metal/alaşımın ısıtıldığı sıcaklık, metal/alaşımın yüksek sıcaklıkta tutulduğu süre, soğutma hızı ve ısıtıldığında metal/alaşımı çevreleyen atmosferdir (Rajan ve ark., 2011).

1.1. Literatür Çalışmaları

Kaynak tekniği, farklı uygulama alanlarında yaygın olarak kullanıldığından ve mükemmel kaynaklı bağlantıların elde edilmesi hedeflendiğinden dolayı araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Özellikle tozaltı kaynağında, arkın akı altında gerçekleşmesi bu ilgi odağını arttırmıştır. Tozaltı kaynağı ile ilgili yapılan son yıllardaki bilimsel çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Akay ve ark. (2013a), tozaltı kaynak yöntemi ile iki farklı tel (S1 ve S2Mo) ve toz (LN761 ve P223) kullanarak birleştirdikleri X60, X65 ve X70 çeliklere ait kaynaklı bağlantılarda, kaynak kusurlarını tahribatsız muayene yöntemlerinden olan gözle ve radyografik muayene yöntemleri ile belirlemeye çalışmışlardır. Ayrıca kaynaklı bölgede tel-toz-ana malzeme kompozisyonlarını belirlemek için spektral analiz çalışmaları gerçekleştirmişler ve kaynaklı bağlantıların tokluk özelliklerini belirlemek için çentik darbe testi yapmışlardır. Kaynaklı bağlantılar üzerinde yaptıkları gözle ve radyografik muayeneler sonucunda, kaynak bölgesinde herhangi bir kaynak hatasına rastlanılmadığını ifade etmişlerdir. Spektral analiz sonuçlarına göre, kaynak metali kimyasal bileşimi içerisindeki karbon oranının, ana malzemeden yüksek, ilave metalden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Çentik darbe test sonuçlarına göre, S2Mo teli ve P223 tozu ile birleştirilen numunelerin daha iyi tokluk dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Akay ve ark. (2013b), petrol ve doğal gaz boru hatlarında kullanılan düşük alaşımlı, ince taneli ve yüksek mukavemetli X60, X65 ve X70 çelikleri tozaltı kaynak yöntemi ile iki farklı tel ve toz kullanarak birleştirmişlerdir. Tel ve tozların kaynaklı bağlantıların çekme ve eğilme dayanımları ile sertlik değerine etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çekme testleri sonucunda, tüm numunelerde kopmanın ana malzemeden gerçekleştiğini ve bütün bağlantı dayanımlarının ana malzemelerden daha yüksek elde edildiğini ifade etmişlerdir. Eğme testleri sonucunda, kaynak bölgesinde herhangi bir çatlak ve yırtık gibi hataların gözlenmediğini belirtmişlerdir. Ayrıca sertlik testi sonucunda, en yüksek sertlik değerlerini kaynak metalinden ölçmüşlerdir. Kaynak metalinden ITAB ve ana malzemeye gittikçe sertlik değerinin düştüğünü gözlemlenmiştir. Kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri üzerinde kullanılan tel ve tozun önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Uzun ve Bilge (2016), benzer bileşime ancak farklı karbon oranına sahip çeliklerde, karbon oranının ve tozaltı kaynak işleminin sertliğe etkisini araştırmışlardır. Hızlı ısıtma ve soğutma periyotlarının kaynak kirişi çevresinde lokal olarak sertleşmiş bir bölgenin oluşmasına neden olduğunu ve bu artış büyüklüğünün karbon içeriği ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Sertlikteki artmanın mukavemeti arttırdığını ve sünekliği azalttığını, bunun da kaynak kirişinin etrafında kırılğan bir bölge oluşturabileceğini ifade etmişlerdir.

Çalığülü ve ark. (2017), tozaltı kaynak yöntemi ile P460 ve St52'yi farklı kaynak hızı ve amper değerlerinde birleştirip, bu farklı değerlerin kaynak üzerindeki etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Kaynak ilerleme hızlarını 17-20 cm/dak ve akım değerlerini 450-500, 500-550 ve 550-600 A olarak seçmişlerdir. Elde ettikleri kaynak numunelerinin, çentik darbe testi sonuçlarını, mikrosertlik ölçümlerini, optik mikroskop ve enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizlerini incelemişlerdir. Elde ettikleri veriler neticesinde, artan kaynak hızının kaynağın mekanik özelliklerinin kötüleşmesine neden olduğunu, artan amper değerinin ise çentik darbe test sonuçlarının iyileşmesine katkı sağladığını belirtmişlerdir.

Apay ve ark. (2018), spiral tozaltı kaynak yöntemiyle farklı kaynak parametrelerinde üretilen API X70M PSL2 çelik borularda, kaynak ısı girdisine bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimini incelemişlerdir. Çekme test sonucunda, tüm numunelerde kopmanın ana malzeme üzerinde meydana geldiğini ve kaynak bağlantı dayanımlarının ana malzemeden daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca artan kaynak ısı girdisine bağlı olarak kaynak metali ve ITAB'da sertlik değerinin düştüğünü, tokluk değerinin ise arttığını ifade etmişlerdir.

Choudhary ve ark. (2018), tozaltı kaynağı kullanılarak birleştirilmiş düşük karbonlu çelik levha bağlantılarının sertliği ve darbe dayanımı üzerine CaO , Al_2O_3 , TiO_2 ve MgO 'nun çeşitli kombinasyonlarını içeren akı bileşimlerinin ve gerilimin etkilerini incelemişlerdir. Deneylerini Taguchi L8 ortogonal tasarım düzeneğine göre gerçekleştirmişlerdir. Bir kaynak parametresi olarak gerilimin dikkate alınması gerekken önemli bir parametre olduğunu ve gerilimin akı bileşimi ile kaynak parametresi arasında bir korelasyon işlevi gördüğünü belirtmişlerdir. Gerilim arttıkça darbe dayanımının ve sertlik değerinin düştüğünü, MgO bileşiminin akı içerisindeki oranı arttıkça bu özelliklerin iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

Erden ve ark. (2018), S235JR ve hardoks çelik malzeme ve kombinasyonlarını tozaltı kaynak yöntemi ile 325 A kaynak gücü, 30-32 V gerilim, 40 cm/dak kaynak hızı parametrelerinde 3,2 mm çapındaki kaynak teli kullanarak birleştirmişlerdir. Kaynaklı bağlantıların makro ve mikroyapılarını inceleyerek mikrosertlik değerlerini ölçmüşlerdir. Makro ve mikroyapı çalışmaları sonucunda ITAB'ın S235JR genel amaçlı yapı çeliğinde daha geniş olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca S235JR-S235JR ve/veya S235JR-hardoks çeliklerinin kaynaklı bağlantılarına göre hardoks-hardoks çeliğinin kullanıldığı kaynaklı bağlantılarda daha yüksek mikrosertlik değerlerinin elde edildiğini tespit etmişlerdir. Bunun sebebini hardoks çeliğindeki Ti, V ve Nb gibi elementlerin oluşturduğu karbonitrürlerin dislikasyonların hareketini engellemesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Hayajneh ve ark. (2018), tozaltı kaynağı kullanarak çelik saclardan imal ettikleri I-kirişlerinde, kaynak gerilimi, tel besleme hızı ve kaynak hareket hızının eğilme distorsiyonu üzerine etkilerini deney tasarım ve varyans analiz yöntemleri ile analiz etmişlerdir. Minimum eğilme distorsiyonu için optimum kaynak parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Eğilme distorsiyonu üzerinde kaynak gerilimi ve tel besleme hızının en önemli iki faktör olduğunu, kaynak hareket hızının ise daha az öneme sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Herhangi iki parametre arasında anlamlı bir etkileşim olmamasına rağmen, kaynak gerilimi $\times$ kaynak hareket hızı ve tel besleme hızı $\times$ kaynak hareket hızı arasındaki etkileşimlerin toplam değişkenliğe önemli katkısı olduğunu belirtmişlerdir. Artan kaynak geriliminin eğilme distorsiyonunu arttırdığını, en yüksek kaynak gerilimi seviyesinde tel besleme hızının arttırılmasının distorsiyonu daha yüksek seviyeye çıkarttığını, en yüksek kaynak gerilimi seviyesinde ise kaynak hareket hızının en yüksek seviyeye çıkarılmasının eğilme distorsiyonu azalttığını ifade etmişlerdir. Minimum eğilme distorsiyonu için kaynak parametrelerinin farklı kombinasyonları olsa dahi kaynak geriliminin ve tel besleme hızının düşük, kaynak hareket hızının yüksek olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Taşkaya ve ark. (2018), Ramor 500 zırh çeliklerini tozaltı kaynak yöntemi ile Cr, Ni ve Mn esaslı östenitik ilave tel kullanarak 250 A kaynak gücü, 25 cm/dak ilerleme hızı ve 20, 25, 30 V gerilim değerlerinde kaynak etmişlerdir. Kaynak gerilim değerlerinin kaynaklı bağlantıların dikiş geometrileri ve mikrosertlik üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kaynak birleşme noktalarındaki gerilim değeri arttıkça, dikiş geometri form ölçülerinin arttığını, gerilime bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin birbirine yakın

elde edildiğini, sertliğin ITAB’da azaldığını ve kaynak metalinde ise yüksek artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Vedrtnam ve ark. (2018), otomatik tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen paslanmaz çelik bağlantı elemanlarında, ark gerilimi, akım, kaynak hızı ve nozul-plaka mesafesi gibi kaynak parametrelerinin kaynak geometrisi ve sertliği üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel verileri, yanıt yüzeyi yöntemine uygun olarak toplamışlardır. Ayrıca tozaltı kaynak sürecinde girdi-çıktı ilişkilerini kurmak için regresyon analizi gerçekleştirmişlerdir. Gerilim arttıkça, kaynak dikiş genişliğinin arttığını, ancak kaynak dikiş yüksekliğinin azaldığını, buna karşın akım artışının kaynak dikiş yüksekliğinde bir artışa neden olduğunu ve kaynak genişliğinde ise herhangi bir değişiklik oluşturmadığını, kaynak hızının artmasıyla kaynak dikiş genişliği ve yüksekliğinin azaldığını, nozul-plaka mesafesinin artmasıyla kaynak dikiş genişliğinin azaldığını, ancak kaynak dikiş yüksekliğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Kaynak metalindeki sertliğinin akımdaki artışla arttığını, ancak gerilim ve kaynak hızındaki artışın sertlik üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Ahmad ve ark. (2019), tozaltı kaynağı ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarda akım (470-760 A), gerilim (26-30 V), hız (455-818 mm/dak) ve ısı girdisi (1,17-2,92 kJ/mm) parametrelerinin çekme dayanımı, sertlik, yığılma oranı, takviye yüksekliği ve dikiş genişliği gibi yanıtlar üzerindeki etkilerini ortogonal tasarım yöntemi ve varyans analiziyle incelemişlerdir. Çekme dayanımı üzerinde gerilimin en önemli faktör olduğunu analiz etmişlerdir. Sertlik için ısı girdisinin, yığılma oranı için akımın, takviye yüksekliği için hızın ve dikiş genişliği için gerilimin önemli faktörler olduğunu standartlaştırılmış Pareto grafiklerinden gözlemlemişlerdir. Hedeflenen yanıtlar için optimum kaynak parametrelerini akım, gerilim, hız ve ısı girdisi için sırasıyla 630,90 A; 29,93 V; 817,99 mm/dak ve 1,17 kJ/mm olarak elde etmişlerdir.

Barbosa ve ark. (2019), tozaltı kaynağı yöntemiyle yapılmış 10 kJ/mm’den daha yüksek ısı girdisine sahip kaynak metallerindeki yorulma çatlaklarının büyüme oranlarını incelemişlerdir. Bu bağlamda, telin kimyasal bileşimini (dolgu metali) değiştirerek 25 mm kalınlığında EH36 çeliği üzerine tek geçişli kaynaklar yapmışlardır. Yapılan kaynakların ana metalden daha yüksek bir çatlak yayılma eşiği sunduğunu, aynı sarf malzemeleri kullanarak ısı girdisinin artmasının sivri ferritin hacimsel fraksiyonunu azaltarak kaba birincil ferrit oluşumuna yol açtığını ve buna bağlı olarak kaynaklı bağlantının gerilim ve sertlik özelliklerinin azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca daha

yüksek ısı girdili kaynakların yorulma eşiğinin molibden içeren bir dolgu metali kullanılarak artırılabilirdiğini ve bunun da kaynak mikroyapısındaki yüksek miktarda iğneli ferrit varlığından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle, iğneli ferritin daha büyük hacimsel fraksiyonunu sağlayan kaynak koşulları için yorulma çatlağı büyümesine karşı daha büyük direnç gösterdiğini vurgulamışlardır.

Choudhary ve ark. (2019), AISI 1023 çelik plakaların tozaltı kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak gerilimi, tel besleme hızı, kaynak hızı, nozul-plaka mesafesi, akı durumu ve plaka kalınlığı gibi doğrudan ve dolaylı girdi parametrelerinin kaynak geometrik tepkileri (nüfuziyet, kaynak dikiş genişliği ve yüksekliği) üzerine etkilerini kesirli faktöriyel tasarım kullanılarak analiz etmişlerdir. Yanıt değişkeni ile ilgili matematiksel modeller geliştirmek için doğrusal regresyon kullanmışlardır. Daha sonra, işlenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı, genetik algoritma ve Jaya algoritması kullanarak girdi parametrelerinin çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirilmişlerdir. Tel besleme hızı ve ark gerilimi arttıkça kaynak genişliğinin ve nüfuziyetin arttığını, kaynak hızı ve nozul-plaka mesafesi arttıkça kaynak dikiş genişliğinin ve nüfuziyetin azaldığını gözlemlemişlerdir. Kaynak dikiş genişliği üzerine kaynak hızının en önemli katkıya sahip faktör olduğunu, bunu tel besleme hızı ve ark gerilimi izlediğini vurgulamışlardır. Ayrıca tel ilerleme hızının, kaynak dikiş yüksekliği ve nüfuziyet için en fazla katkıda bulunan faktör olduğu belirtmişlerdir. Çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinden Jaya algoritmasının işlenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı ve genetik algoritma ile karşılaştırıldığında daha iyi optimizasyon sonuçları sunduğunu ifade etmişlerdir.

Taskaya ve ark. (2019), Ramor 500 çeliğini tozaltı kaynağı yöntemi kullanarak 250 A sabit amper, 20, 25, 30 V gerilim ve 20, 25, 30 cm/dak kaynak ilerleme hızlarında birleştirmişlerdir. Kaynak parametrelerinin kaynak dikiş geometrisi ve mikroyapı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kesişimde oluşan yapıları radyografik muayene testi, taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji dağılımlı spektrometre (EDS) ile analiz etmişlerdir. Ayrıca ANSYS paket yazılımını kullanarak kaynaklı bağlantıların termomekanik analizlerini değerlendirmişlerdir. Kaynak genişliğinin artan ark gerilimi ile arttığını ve artan kaynak hızı ile azaldığını tespit etmişlerdir. Radyografik incelemeler sonucunda, tüm kaynaklı bağlantılarda tam nüfuziyetin sağlandığını ve yapıda makro ve mikro çatlakların gözlemlenmediğini, SEM-EDS analizlerinden ise kaynak metalindeki temel faz yapılarının homojen olarak dağıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca termomekanik analiz sonuçlarına bağlı olarak ısı girdisinin

artmasıyla kaynaklı bağlantılarda elastik ve mekanik gerilmelerin arttığını ve deformasyon sonucu kalıcı gerilmelerin oluştuğunu ifade etmişlerdir.

Choudhary ve ark. (2020), tozaltı kaynak süreç parametrelerini optimize etmek için parçacık sürü optimizasyonu ve genetik algoritmayı içeren hibrit bir akıllı algoritma üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında; kaynak gerilimi, tel besleme hızı, kaynak hızı, nozul-plaka mesafesi gibi doğrudan parametrelerin ve akı durumu, plaka kalınlığı gibi dolaylı parametrelerin tel akış tüketimi, metal biriktirme hızı ve ısı girdisi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Hibrit akıllı algoritmanın performansını; başarı oranı, en iyi çözüm, ortalama, hesaplama süresi, standart sapma ve ortalama mutlak yüzde hata gibi endekslere bağlı olarak parçacık sürü optimizasyonu ve genetik algoritmanın performansı ile karşılaştırmışlardır. Hibrit akıllı algoritmanın performansının optimum tozaltı kaynak süreç parametrelerini elde etmek için diğer iki algoritmadan daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Kaynak işlemi sırasında tel akış tüketiminin esas olarak kaynak gerilimi ve kaynak hızından etkilendiğini, düşük tel akış tüketimi için kaynak geriliminin düşük ve kaynak hızının yüksek olmasının uygun olacağını belirtmişlerdir. Metal biriktirme için kaynak tel besleme hızı ve nozul-plaka mesafesinin önemli olduğunu, daha yüksek kaynak metali biriktirmek için kaynağın düşük hız ve yüksek tel besleme hızında yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca düşük kaynak gerilimi ve tel besleme hızında ısı girdisinin azaltılabileceğini vurgulamışlardır.

Coetsee (2020), tozaltı kaynağı ile birleştirdikleri yapı çeliklerinde, $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--CaF}_2$ sistemine dayalı beş farklı akı kullanımının kaynaklı bölgenin kimyasal analizine etkisini araştırmışlardır. CaF_2 ilavesinin oluşan florür gazı bileşiklerinin miktarını ve kimyasını belirlemeye önemli bir etken olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca beş akı türü ile yapılan kaynak işleminde, CaF_2 , MgF_2 , NaF , KF , NaAlF_4 ve AlF_3 gibi ana florür gazlarının elde edildiğini, TiF_3 'ün ise alümina rutil akısının kullanılmasında oluştuğunu ifade etmişlerdir.

Küçüköner ve ark. (2020), dubleks paslanmaz (AISI2205) çelik ve basınçlı kap (P355GH) çeliğini tozaltı kaynak yöntemi kullanarak birleştirmişlerdir. Sırasıyla üç farklı birleştirme işlemi (AISI2205-AISI2205), (P355GH-P355GH) ve (AISI2205-P355GH) yapmışlardır. Kaynaklı malzemelerin yüzey ve yüzey altı kusurlarını manyetik parçacık ve radyografik muayene yöntemleri ile incelemişlerdir. Kaynak bölgesindeki yapısal değişiklikleri tespit etmek amacıyla mikroyapı incelemeleri yapmışlardır. Ayrıca kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için

çekme, bükme, Charpy darbe çentik ve sertlik testlerini gerçekleştirmişlerdir. Mikroyapı çalışmalarında kaynak metalinin dentritik bir yapı içerdiğini ve ana malzeme tarafında erime sınırına komşu bölgede tanelerin kabalaştığını gözlemlemişlerdir. Çekme testleri sonucunda kopmanın AISI2205-AISI2205 birleşim yerlerinde kaynak metalinde, diğer birleşim noktalarında ise P355GH ana malzemede olduğunu belirtmişlerdir. Bükme testi sonrasında kaynak bölgesinde gözle görülür bir hata gözlenmediğini, malzemelerin V-çentik darbe enerjileri karşılaştırıldığında en yüksek tokluk değerinin AISI2205 malzemesinin ITAB'ında, en düşük tokluk değerinin ise P355GH kaynak metalinde ölçüldüğünü ifade etmişlerdir. Sertlik ölçümlerinde ise en yüksek sertlik değerini AISI2205 malzemesinin ITAB'ından elde ederlerken en düşük sertlik değerini P355GH ana malzemesinden ölçmüşlerdir.

Sailender ve ark. (2020), tozaltı kaynağı ile birleştirilen bağlantı elemanlarında, gerilim, tel besleme hızı, kaynak hızı ve nozul-plaka mesafe gibi proses parametrelerinin kaynak nüfuziyeti ve ITAB üzerine etkilerini Taguchi yöntemi ile incelemişlerdir. Ayrıca bu çalışmanın sonuçlarını optimize etmek için gri ilişkiler analiz yöntemini kullanmışlardır. Genel olarak kaynak koşullarını etkileyen en önemli faktörlerin sırasıyla kaynak hızı, tel besleme hızı, nozul-plaka mesafesi ve gerilim olduğunu analiz etmişlerdir. ITAB'ın minimizasyonu için en iyi kombinasyonun daha düşük gerilim ve daha yüksek tel besleme hızı, kaynak hızı ve nozul-plaka mesafesi olduğunu belirtmişlerdir.

Sharma ve ark. (2020), tozaltı kaynak işleminde girdi ve çıktı parametreleri üzerinde yapılan araştırma ve analizleri içeren bir derleme çalışması yapmışlardır. Ark gerilimi veya kaynak akımı arttıkça sertliğin arttığını, ancak çekme ve darbe dayanım değerlerinin azaldığını, gerilim arttıkça kaynak genişliğinin arttığını, kaynak bölgesi ve ITAB mikroyapılarının tamamen farklı olduğunu, manganez, silisyum, kükürt vb. elementlerin kaynağın bazı spesifik özelliklerini arttırmak için akıya alaşımlandığını belirtmişlerdir.

Sharma ve Chhibber (2020), $\text{CaF}_2\text{--CaO--SiO}_2$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--SiO}_2$ akı sistemine dayalı 21 tozaltı kaynak akı bileşiminin Si, Cu, Mo, Ti ve Cr içeriği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Tekil karışım bileşenlerinden C, S, CF ve Al'nin Mo içeriğini desteklediğini, S-Al ikili karışımın Mo içeriği üzerinde olumlu sonuçlar meydana getirdiğini, C-S, C-CF, C-Al ve S-CF ikili karışımlarının ise Mo içeriği üzerinde olumsuz etki meydana getirdiğini ve dolayısıyla Mo içeriğini azalttığını, C-Al, S-CF, S-

Al ve C-Al ikili karışımlarının Si içeriğini önemli ölçüde artırdığını analiz etmişlerdir. S-Al ikili karışımın en etkili sinerjik karışım olduğu sonucuna varmışlardır.

Singh ve ark. (2020), tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen kaynak bağlantılarında, akım, gerilim, tel besleme hızı ve kaynak hızının kaynak metalinin sertliği üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlar ve yapay sinir ağları ile modellemişlerdir. Akımın sertlik üzerinde gerilim, kaynak hızı ve tel besleme hızından daha fazla öneme sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Minimum sertlik değerinin kaynak parametrelerinin yüksek seviyelerinden elde edildiğini, maksimum sertlik değerinin ise düşük kaynak akımı, gerilim, tel besleme hızı ve yüksek kaynak hızından elde edildiğini belirtmişlerdir.

Singh ve Singh (2020), tozaltı kaynak işleminde, kaynak akımı, kaynak hızı, tel çapı, kaynak gerilimi gibi kaynak parametrelerinin bağlantı elemanlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini içeren bir derleme çalışması yapmışlardır. Yaptıkları inceleme sonucunda;

1. Mekanik özelliklerinin kaynağın makro ve mikroyapısına bağlı olduğunu,
2. Tozaltı kaynak işlemi ile %4'ten fazla ferrit içeriğine sahip yüksek kalitede kaynaklar elde edildiğini,
3. Kaynak paso sayısı fazla ise, pasolarda farklı ısıtma ve soğutma oranlarının varlığından dolayı delta ferritinin östenite tam dönüşümünün mümkün olmadığını, bunun da daha fazla çekme mukavemeti ve sertliği olan üstün kaliteli kaynak geliştirdiğini,
4. Ark gerilimi veya kaynak akımı arttırıldığında; sertlik değerinin artacağını, ancak çekme ve darbe dayanımlarının azalacağını,
5. Gerilim arttıkça, kaynak dikiş genişliğinin artacağını belirtmişlerdir.

Sridhar ve ark. (2020), tozaltı kaynağı ile çift taraflı birleştirilen SS 304 östenitik paslanmaz çelik üzerinde kaynak değişkenlerinin (ark, gerilim ve kaynak hızı) kaynak dikiş geometrisi, ergime bölgesi profili ve çekme özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kaynak akımı ve gerilimi arttıkça kaynak nüfuziyetinin ve kaynak dikiş bindirme alanının arttığını ve buna bağlı olarak kaynaklı bağlantılardaki çekme özelliğinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Artan kaynak hızının daha küçük kaynak dikişi ve ergime bölgesi profili ile sonuçlandığını ve bunun da kaynak bağlantısının çekme özelliğini azalttığını belirtmişlerdir. Tek taraflı kaynak işleminde uzama yüzdesinin ana malzemeden daha düşük olduğunu, ancak çift taraflı kaynak işleminde

kaynak dikişı sünekliliğinin etkin bir şekilde artırdığını ifade etmişlerdir. Ayrıca tek taraflı kaynak numunesine kıyasla çift taraflı kaynak numunesinde %55,17'lik açılmal bozulma yüzdesinde azalma görüldüğünü vurgulamışlardır.

Zhang ve ark. (2020a), $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2$ ve $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-MnO}$ akıları kullanılarak, EH36 gemi inşa çeliğinin tozaltı kaynağı sırasında SiO_2 ve MnO 'nun dekarburizasyon davranışlarındaki rollerini incelemişlerdir. Karbon transferi ile ilgili tüm olası reaksiyonların ve bu reaksiyonlar sonucu meydana gelen arayüzleri sistematik olarak değerlendirmişlerdir. SiO_2 ve MnO ilavesinin kaynak metalindeki oksijen miktarını artırdığını ve karbon transfer miktarını ise azalttığını gözlemlemişlerdir. Diğer bir değişle, SiO_2 ve MnO ilavesinin plazmadaki O_2 ve SiO gazlarının kısmi basıncını arttırarak, kaynak havuzundaki oksijen seviyesini geliştiğini ve cüruf-metal ara yüzeyinde SiO_2 , MnO ve FeO gibi daha yüksek oksit aktiviteleri sağladığını ve dolayısıyla dekarburizasyon derecesi üzerinde sinerjik etkiler oluşturduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca cüruf yüzeyleri üzerinde kabarcık çekirdeklenme olasılığının akı formülünden büyük ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir.

Zhang ve ark. (2020b), yüksek ısı girdili tozaltı kaynağı altında eleman transfer davranışlarını araştırmak için bir dizi kaynaşmış $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2$ ikili akı geliştirmişlerdir. İkili akıda SiO_2 miktarını % ağırlıkça değiştirmişler ve SiO_2 içeriğinin Si, Mn ve O transferi üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Oksijenin doğrudan veya dolaylı olarak kaynak metalinin karakteristik özelliklerini belirlediği için en önemli kimyasal reaktif element olduğunu, aşırı Si içeriğinin ürünün beklenmedik şekilde bozulmasına yol açacağını ve bu yüzden Si içeriğinin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerektiğini, daha büyük ölçüdeki Mn içeriğinin ise kaynak metalinin dayanımını, sertliğini ve tokluğunu belirlemede önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Artan SiO_2 miktarı ile kaynak metalindeki O ve Si'nin arttığını ve Mn miktarının azaldığını ifade etmişlerdir.

Abe ve ark. (2021a), tozaltı kaynağı sırasında kaynak oluşumunu X-ışını ile araştırmışlardır. Deneylerinde test kuponunu, X-ışını kaynağı ile yüksek hızlı kamera arasına yerleştirmişlerdir. Ark'ı çevreleyen alanı kaynak yönüne dik bir açıdan gözlemleyerek damlacık transferini, kaynak havuzunu ve ergimiş akıyı (cüruf) incelemişlerdir. Kaynak teline yakın akıda, akının arkın ısısı altında buharlaşarak bir boşluk oluşturduğunu, kaynak havuzunun ark yakınında dalgalı olduğunu ve bu dalgalanmanın artan uzaklaştıkça sakinleşip giderek katılaştığını, cürufun ise kaynak havuzu üzerinde aktif olarak hareket ettiğini, kaynak yönünde genişleyip büzüldüğünü

ve daha sonra katılaştığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca ana metalden daha yüksek bir erime noktasına sahip birçok bileşen içeren akı ile cürufun kaynak havuzundan önce katılaştığını ve katılan cürufun kaynak metal akışını bastırdığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte negatif elektrot darbe gerimi için yüksek bir polarite oranının transfer frekansını azalttığını, damlacık çapını ise arttırdığını ifade etmişlerdir.

Abe ve ark. (2021b), tozaltı kaynağında, kaynak hatalarının nedenlerini torç ile oluk duvarı arasındaki mesafe ve kaynak kusurları arasındaki ilişki temeline bağlı olarak araştırmışlardır. Daha sonra, kaynak ısı girdisi, kaynak dikiş genişliği ve yığılan metalin enine kesit alanı bazında, füzyon eksikliği oluşumunu değerlendirmek için bir model hazırlamışlardır. Aynı kaynak koşulları altında, torç ile oluk duvarı arasındaki mesafenin azaltılmasının, kaynak bağlantısının alttan kesilme olasılığını arttırdığını ve bunun nedeninin ark ısısıyla oluk duvarının aşırı ısınmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Torç ile oluk duvarı arasındaki mesafenin artması ile birlikte oluk duvarında erimiş genişliğinin azaldığını ve füzyon eksikliğinin meydana geldiğini, bunun nedeninin ise oluğa verilen ısı miktarının yetersiz kalarak, oluk duvarından olan mesafenin artmasıyla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Candan ve ark. (2021), S355N ince taneli yapı çeliğinin tozaltı kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde, farklı kaynak tellerinin (S2, S2Mo ve S3Mo) kaynaklı bağlantıların mikroyapı, darbe tokluğu ve sertlik üzerine etkilerini incelemişlerdir. S2 kaynak teli ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarda, kaynak metalinin ince eşeksenel ferrit + perlitten oluştuğunu, S2Mo ve S3Mo kaynak teli ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarda ise kaynak metalinin çok ince asiküler ferrit ve tane sınırının ferritten oluştuğunu gözlemlemişlerdir. En yüksek ve en düşük darbe tokluğunu sırasıyla S3Mo ve S2 kaynak tellerini kullanarak birleştirdikleri kaynaklı bağlantılardan elde etmişlerdir. Darbe tokluğunda olduğu gibi en yüksek sertliği S3Mo kaynak telinden elde etmişlerdir. Ayrıca kaynak metalindeki sertliğin ITAB ve ana malzemeden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Coetsee ve ark. (2021), tozaltı kaynağında akı kimyasının ergimiş akı (cüruf) ve kaynak metali arasındaki element transferi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kaynak metalindeki oksijenin Ti, Al, Mn, Si gibi elementlerle reaksiyona girdiğini ve kaynak metalinde maksimum iğneli ferrit oluşumunun kaynak esnasında kullanılan akı ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Belirli kaynak metali bileşimlerini elde

etmek için akı formülasyonlarının oldukça önemli olduğunu ve bu akılar kullanılarak kaynak metalinin mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceğini ifade etmişlerdir.

Coetsee ve De Bruin (2021), karbon çeliğinin tozaltı kaynağında, erimiş akıdan kaynak metaline Ti elementi transferinin küçük miktarlarda, maksimum 310 ppm ile sınırlı olduğunu ve bu sınırlamanın erimiş kaynak havuzu ara yüzeyinde hakim olan yüksek oksijen potansiyelinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu doğrultuda, kaynak metalindeki Ti transferini arttırarak TiO kapanımlarının arttırılması gerektiğini, kaynak metalindeki oksit kapanımlarının kaynak metali mukavemetini ve tokluğunu iyileştirmek için iğneli ferrit oluşumunda olası çekirdeklenme bölgelerini oluşturduğunu vurgulamışlardır. Kaynak havuzuna oksijen transferine müdahale etmeden Ti transferini arttırmak için Al ilavesinin gerekli olduğunu ve böylece kaynak metalindeki oksijenin Al ve Ti ile reaksiyona girip oksit tabakası oluşturulabileceğini ifade etmişlerdir.

Komen ve ark. (2021), yüksek akımlı tozaltı kaynağı sırasında cüruf ve kaynak havuzu oluşum süreçlerini, ayırık eleman yöntemi ve sıkıştırılmaz düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği yaklaşımlarını birleştiren bir hesaplama yöntemi kullanılarak simüle etmişlerdir. Isı kaynağının yakınındaki kaynak havuzundaki erimiş metalin karmaşık bir hız alanına sahip olduğunu, damlacık transferinin kaynak havuzu yüzeyindeki yüksek sıcaklıktaki erimiş metalin akışını ısı kaynağının arkasındaki kaynak havuzunun tabanına doğru sürdüğünü ve bu akışın kaynağın alt bölgesini ısıtarak derin kaynak nüfuziyeti sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca metal yüzeyi kaplayan cürufun yüzey sıcaklığının düşmesini önlediğini ifade etmişlerdir.

Mohal ve ark. (2021), tozaltı kaynağı ile yapılan birleştirmelerde, akım, gerilim ve kaynak hızının kaynak nüfuziyet ve form faktörü üzerine etkilerini yanıt yüzey yöntemi ile incelemişlerdir. Gerilim ve akım arttıkça form faktörünün arttığını ve kaynak hızı arttıkça azaldığını gözlemlemişlerdir. Form faktörünün kaynak dikiş genişliğine ve yüksekliğine bağlı olduğunu ve bu iki parametrenin artan gerilime bağlı olarak arttığını, ancak kaynak dikiş genişliğinin dikiş yüksekliğinden daha keskin artmasıyla form faktöründe daha yüksek artış olduğunu ifade etmişlerdir. Kaynak hızı arttıkça form faktöründeki azalmanın ise elektrot ile iş parçası arasındaki etkileşimin azalmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Kaynak nüfuziyetinin akımdaki artışla arttığını ve kaynak hızındaki artışla azaldığını vurgulamışlardır. Akımdaki artışın erimiş havuzun momentumunda bir artışa yol açtığını ve bunun sonucunda daha fazla ana metalin erimesine ve kaynağın daha derine nüfuz etmesine neden olduğunu ifade

etmişlerdir. Kaynak nüfuziyetinin doğrudan nüfuz etme alanına ve donatı alanına bağlı olduğunu ve kaynak hızı arttıkça bu nüfuziyetin azaldığını belirtmişlerdir. Tüm kaynak parametreleri arasından kaynak akımının kaynak nüfuziyet ve form faktörü üzerinde en önemli parametre olarak bulunduğunu analiz etmişlerdir.

Saini ve Singh (2021), çelik fabrikası tarafından üretilen cürufu, tozaltı kaynak tozu üretmek için kullanmışlardır. Geri dönüştürülmüş cürufun kaynak metalinin kimyasal bileşimi, mikrosertliği ve mikroyapısı üzerindeki etkileri değerlendirilmişlerdir. Geri dönüştürülmüş çelik cüruf kullanılarak birleştirdikleri kaynaklı bağlantıların kimyasal yapısının ASME spesifikasyonlarına göre kabul edilebilir olduğu belirtmişlerdir. Ayrıca çelik cürufuna geri dönüşüm sırasında %10 CaCO_3 , %20 SiO_2 ve %6 MnO ilavesinin kaynak metalinde sırasıyla %0,10 karbon, %0,11 Si ve %0,8 Mn sağladığını gözlemlemişlerdir. Kaynaklı bağlantılara ait mikroyapıda, çekme ve darbe mukavemetini geliştirmede yardımcı olan iğneli ferrit yapının görüldüğünü ifade etmişlerdir. Ayrıca kaynaklı bağlantıların daha pürüzsüz ve daha derin nüfuziyete sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bunlara ilaveten geri dönüştürülmüş çelik cürufunun maliyetinin, piyasada bulunan eşdeğer saf akı ile karşılaştırıldığında %62 oranında ekonomik olduğunu vurgulamışlardır.

Zhang ve ark. (2021), tozaltı kaynağıyla birleştirilen kaynaklı bağlantılarda, $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-MnO}$ ve $\text{CaO-SiO}_2\text{-MnO}$ akılarının kaynak metalindeki O, Si ve Mn gibi temel elementler üzerine etkilerini baziklik indeks, cüruf-metal denge ve gaz-cüruf-metal denge modellerini kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Baziklik indeks modelinin, MnO ilavesiyle oksijen içeriğinin değişim eğilimini tahmin edebildiğini, ancak aynı baziklik indeksine sahip akılar uygulandığında oksijen seviyelerini ayırt edemediğini gözlemlemişlerdir. Cüruf-metal modelinin O, Si ve Mn içeriğini oldukça iyi tahmin edebildiğini, diğer yandan gaz-cüruf-metal denge modelinin O içeriğini baziklik indeksi modelinden daha iyi tahmin edebildiğini belirtmişlerdir.

Atılğan (2022), 10 mm kalınlığındaki ASTM A36 çeliğini tozaltı kaynak yöntemiyle farklı akım (450, 475, 500, 525 ve 550 A) değerleri kullanarak birleştirmiştir. Akım değerlerinin kaynak bölgesine etkilerini tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri ile incelemiştir. 450 ve 475 A değerleriyle birleştirilmiş numunelerin, kök kaynaklarında eksik nüfuziyet, çekme testlerinde kaynak bölgesinden kopmalar ve göz ile kontrolde kaynak bölgesinde kopma-çatlak görüldüğünü ifade etmiştir.

Coetsee ve De Bruin (2022a), tozaltı kaynağı işleminde, kaynak havuzunda büyük miktarda oksijen bulunduğunu, kromun oksijene yüksek bir afinitesi olduğundan kaynak metaline yüksek miktarda krom geri kazanımı sağlamak için kaynak havuzunun erimiş akış arayüzündeki oksijenin kısmi basıncının kontrol edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Kaynak havuzuna krom transferini arttırmak için alüminyum ile birlikte stabilizatör olarak bakırın uygulanması gerektiğini ifade etmişlerdir. Stabilizatör etkisinin, Cr-Al-Cu alaşımı sıvılaşma sıcaklıklarının saf kromun sıvılaşma sıcaklığından çok daha düşük olması nedeniyle oluştuğunu vurgulamışlardır.

Hayyal ve Faleh (2022), 8 mm kalınlığa sahip ASTM 283 C düşük karbonlu çeliğin çekme gerilmesi üzerine akım, gerilim, kaynak hızı ve kaynak yönteminin (elektrik ark kaynağı, tozaltı kaynağı ve gazaltı tungsten ark kaynağı) etkilerini incelemişlerdir. Kaynak akımı ve hızının kaynak bağlantılarının çekme dayanımı üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu, bunu kaynak gerilimi ve kullanılan kaynak yönteminin takip ettiğini belirlemişlerdir. Elektrik ark kaynağı ve toz altı ark kaynağı ile karşılaştırıldığında, gazaltı tungsten ark kaynak bağlantılarının nispeten daha iyi çekme dayanımı sergilediğini ifade etmişlerdir.

Rajshekhar ve ark. (2022), tozaltı kaynağında kaynak konfigürasyonunun (I, V ve U tipi kaynak bağlantılarının) artık gerilme üzerine etkilerini sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Diğer konfigürasyonlara kıyasla 'U' tipi kaynak bağlantılarında daha az kalıntı gerilme gözlemlendiğini, bunu sırasıyla 'V' ve 'I' tipi kaynak bağlantıları takip ettiğini ifade etmişlerdir.

Çetinkaya ve ark. (2023), kaplanmamış ve ön astar ile kaplanmış S235JR levhaları tozaltı kaynağı ve metal aktif gaz (MAG) yöntemleri ile birleştirmişlerdir. Değişen ısı girdilerinin malzemenin mikrosertlik ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. En yüksek sertliği kaynak metalinin merkezinden elde etmişlerdir. Artan kaplama kalınlığı nedeniyle ark oluşumunun zorlaştığını ve kaynak sırasında oluşan duman miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Değişen kaplama kalınlığının ve kaynak yönteminin kaynakta hataların oluşmasına yol açtığını ve bu durumun mekanik özellikler üzerinde olumsuz etki oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Eisa (2023), Cr-Mo-V çeliğinin tozaltı kaynağı ile birleştirilmesinde tel besleme, kaynak akımı, gerilim ve hızın kaynak nüfuziyeti, kaynak genişliği, çekme mukavemeti ve kaynak sertliği üzerindeki etkilerini Taguchi tabanlı çok kriterli karar verme

yöntemlerini kullanarak analiz etmiştir. Tozaltı kaynağı işlemlerinin optimizasyonunda, Taguchi tabanlı çok kriterli karar verme yöntemlerinin hızlı, dayanıklı ve basit olduğunu belirtmiştir.

Rahmati ve ark. (2023), tozaltı kaynağı ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarda gerilim, akım yoğunluğu, elektrot çıkıntısı, kaynak hızı ve nanopartikül tabakasının kalınlığının penetrasyon derinliği üzerindeki etkisini genetik algoritma ile analiz etmişlerdir. Daha fazla giriş ısı transferine bağlı olarak gerilim ve elektrik akım yoğunluğundaki artışın ana metalin daha fazla erimesine neden olduğunu ve dolayısıyla bu durumun da penetrasyon derinliğini artırdığını ifade etmişlerdir. Ana metal ile nanopartiküller arasındaki termal iletkenlik farkının iş parçasının iç katmanlarına daha az ısı transferi yapacağını, bu nedenle yüksek nanopartikül tabaka kalınlığının penetrasyon derinliğini azalttığını belirtmişlerdir. Öte yandan nanopartikül tabakasının kalınlığındaki artışın kaynağın yüksekliğini ve genişliğini artırdığını vurgulamışlardır.

Shukla ve Singh (2023), tozaltı kaynağında akım, gerilim ve hız parametrelerinin kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Akım, gerilim ve hız kaynak parametrelerine bağlı olarak ısı girdisi arttığında kaynağın sertliğinin önce arttığını, ardından devam eden artan ısı girdisi ile kaynağın sertliğinin azalmaya başladığını belirtmişlerdir. Kaynaklı bağlantıların çekme ve akma mukavemetlerinin sertlik değerinde olduğu gibi ısı girdisine bağlı olarak benzer eğilim gösterdiğini ifade etmişlerdir. Ancak darbe dayanımının (Charpy darbesi ve Izod darbesi), ısı girdisi arttıkça azaldığını belirtmişlerdir. Yüksek termal girdinin neden olduğu gecikmiş soğuma hızının yapıda kaba kaynak metali tanelerinin elde edilmesine, öte yandan, düşük ısı girişinin daha hızlı soğuma hızına ve daha ince mikroyapının oluşmasına neden olduğunu vurgulamışlardır.

Garg ve ark. (2024), tozaltı kaynağı tozlarının üretiminde pirinç samanı külünün kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Ürettikleri tozların kimyasal bileşiminin standartlara göre kabul edilebilir aralıklar içerisinde olduğunu belirtmişlerdir. Kaynaklı bağlantıların çekme mukavemetinin ve bağlantı verimliliğinin ticari tozla üretilen bağlantılara göre sırasıyla %8 ve %9 daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca kaynak metalinde iğnemsî ferrit içeren arzu edilen bir mikroyapı oluştuğunu ifade etmişlerdir.

Tozaltı kaynak yöntemi, sadece malzemelerin birleştirilmesi için kullanılmamaktadır. Aynı zamanda bu yöntem ile malzeme yüzeylerinde kaplama

işlemleri de yapılmaktadır. Ayrıca tozaltı kaynağı ile işlem görmüş malzemeler ısıtılma işlemine de tabii tutulmaktadır. Tozaltı kaynak yöntemi kullanılarak elde edilen bağlantılarda ısıtılma işlemi üzerine yapılmış çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Lúcia Othéro de Brito ve ark. (2001), ASTM A537 basınçlı kap çeliğini 600 A akım, 28/29 V gerilim ve 45 cm/dak ilerleme hızı değerlerinde tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Birleştirdikleri kaynaklı bağlantıların bir bölümünü 650 °C'de 5 saat boyunca ısıtılma işlemine tabi tutmuşlardır. Isıtılma işleminin kaynaklı bağlantının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çekme, tokluk ve sertliğin ısıtılma işlemle azaldığını ve uzamanın arttığı belirtmişlerdir. Isıtılma işlemi sonrası perlitteki karbürlerin ana metalde küreselleştiğini, daha yüksek büyütme ölçeklerinde yapıda bir miktar taneler arası çökme meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Luo ve ark. (2014), kaynak sonrası ısıtılma işlemi uygulanan ve uygulanmayan tozaltı kaynaklı bağlantıların değişimini optik mikroskop, X-ışını kırınımı (XRD) ve mikrosertlik yöntemleri ile incelemişlerdir. ITAB'a yakın füzyon kenar bölgesinde delta (δ) fazının kaybolduğunu ve takip eden kaynak sonrası ısıtılma işlemi ile kaynak merkez bölgesinde östenit fazının azaldığını ve delta fazının arttığını, ayrıca ısıtılma işleminden sonra kaynak merkez bölgesinde bazı ikinci fazların ayrıştığını gözlemlemişlerdir. Isıtılma işlemleri kaynaklı bağlantıların füzyon kenar bölgesinde ve kaynaklı merkezi bölgesinde ayrı ayrı ortaya çıkan iki mikrosertlik değeri elde edildiğini, füzyon bölgesindeki mikrosertliğin kaynak merkezinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, ısıtılma işlemi ITAB yakınındaki füzyon kenar bölgesindeki maksimum mikrosertlik değerinin ortadan kalktığını ve maksimum mikrosertliğin kaynak merkez bölgesinde oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bu durumu ısıtılma işlemi sırasında ikinci fazlardaki değişiklikler, element difüzyonu ve parçacık segregasyonu ile ilişkilendirmişlerdir.

Karabulut ve Türkmen (2016), tozaltı kaynak yöntemi ile mikroyapılı çelik malzemeleri 450 A kaynak akımı, 30-32 V gerilim ve 50 cm/dak kaynak hızında 3,2 mm çapındaki kaynak teli ile kaynak yapmışlardır. Kaynaklı bağlantıya temperleme işlemi uygulayarak, temperleme işleminin sertlik ve çekme dayanımına etkisini incelemişlerdir. Temperleme işleminin kaynaklı bağlantıların sertlik değerini, akma ve çekme dayanımlarını düşürürken % uzamasını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Temperlenmiş kaynaklı bağlantılarda kopmanın ana malzemede, temperlenmemiş kaynaklı bağlantılarda ise ITAB'da meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Nam ve ark. (2018), tozaltı kaynağı ile birleştirilmiş 304 paslanmaz çeliğin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine ısıtılma işleminin etkisini araştırmışlardır. Ana malzemenin östenit ve krom karbürle çevrelenmiş uzun delta-ferrit şeritlerinden oluştuğunu ve kaynakların ise delta ferrit ve östenit matrisinden oluştuğunu belirtmişlerdir. 850 °C veya daha düşük sıcaklıktaki ısıtılma işlemi ile kaynak metalinde krom karbürlerin çöktürüldüğünü ve bunun da uzama azalmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, krom karbürlerin varlığına rağmen mukavemette biraz azalma olduğunu ve bu durumun muhtemelen iç gerilimin gevşemesi ve parçacık sertleşmesinin zayıflamasıyla ilişkili olduğunu vurgulamışlardır. 1050 °C'deki ısıtılma işleminde, krom karbürün çözünmesi ve delta ferritin kaybolması, kısmen deformasyonun neden olduğu martenzitik dönüşümün de yardımıyla daha düşük akma dayanımı ve daha yüksek uzama ile sonuçlandığını ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, 1050 °C'de ısıtılma işleminde, kırılma tokluğu açısından üstün özellik elde edildiğini ve buna bağlı olarak kaynak sonrası ısıtılma işleminin kontrol edilmesiyle kaynak sonrası metalin mekanik özelliklerinin geliştirilebileceğini düşünmektedirler.

Mortazavian ve ark. (2020), yüzeyi aşınmış bir C-Mn rayını, tozaltı kaynağı yöntemi kullanılarak onarmışlardır. Ayrıca tamir ettikleri rayı 1100 °C'ye kadar ısıtıp suda soğutma işlemine de tabi tutmuşlardır. Onarılan raydaki kaynak metalinin, ITAB'ın ve ana malzemenin özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak metalinin 80 HRB değerinde bir sertliğe sahip olduğunu ve perlit, ferrit ve östenitten oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Östenit fazının su verilmiş rayda karbür çökmesine sebebiyet verdiğini ve sertliği 95 HRB'ye kadar çıkardığını belirtmişlerdir. ITAB'da sertliğin 92 HRB değerinde olduğunu ve yapının ince taneli ferrit, perlit ve karbürün düzgün bir dağılımı şeklinde gözlemlendiğini ifade etmişlerdir. Su verilmiş ITAB'da sertliğin 110 HRB'ye kadar çıktığını ve mikroyapının esas olarak martenzit-perlitten oluştuğunu vurgulamışlardır. Ana malzeme sertliğinin ITAB'daki sertlik değerine yakın olduğunu ancak su verme işlemi ile ITAB'ın daha yüksek sertlik gösterdiğini belirtmişlerdir.

Wang ve ark. (2020), tozaltı kaynağını kullanılarak H13 çeliğinin üzerine martenzitik paslanmaz çelik yüzey katmanı oluşturmuşlardır. Temperleme koşullarının (2 saat boyunca 350 °C ~ 650 °C ve 0,5 saat ~ 4 saat boyunca 450 °C) mikroyapı, termal genleşme davranışı ve korozyon direnci üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. H13 çeliği ile yüzey katmanı arasında kayda değer hiçbir çatlak olmadan optimum bir kaynaşma elde edildiğini, temperlemenin kaynaklı numunedeki artık östenit ve kaba

martenzitin ince temperlenmiş martenzit ve karbürlere dönüşümüne yol açtığını gözlemlemişlerdir. Temperleme sıcaklığı ve süresinin artmasıyla kaynak kusurlarının azaldığını ve buna bağlı olarak bağlı ısı genleşme ve ısı genleşme katsayısının önce arttığını, ardından faz geçişi ve mikroyapı kabalaşması nedeniyle azaldığını ifade etmişlerdir. H13 çeliğinkine en yakın termal genleşme davranışını ve daha düşük çatlama hassasiyetini 450 °C’de 2 saat boyunca elde etmişlerdir. Ayrıca yüksek alaşım içeriğine sahip yüzey katmanının H13 çeliğinden çok daha iyi korozyon direnci sergilediğini belirtmişlerdir.

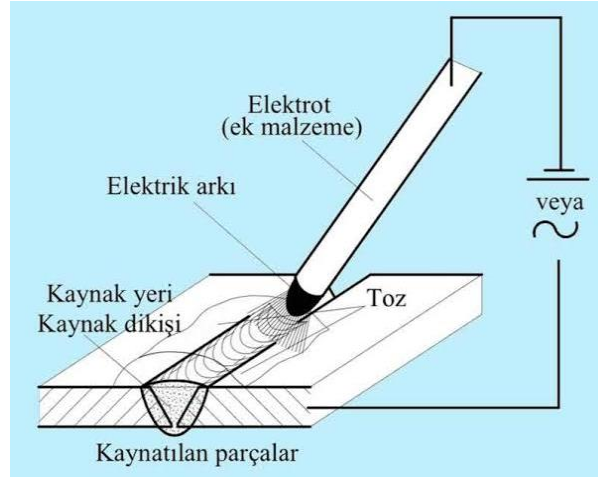
Li ve ark. (2021), bazı geleneksel biçimlendirici ve eklemeli imalat süreçlerinin çelik ürünlerin imalatında yaygın olarak kullanıldığını, stres koşulları ve metalurjik yapının hem yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerin şekillendirilmesinde hem de eklemeli imalat paslanmaz çelik ürünlerinde güçlü bir doku ve mekanik anizotropi meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Bu sorunu çözmek için, ısı kaynağının yüksek verimli tozaltı plazması ile değiştirildiği tozaltı katkılı imalatının etkinliğini araştırmışlardır. Büyük ölçekli düşük karbonlu çelik bileşenlerin büyük bölümünde, sütunludan eş eksenliye tam bir geçiş sağlanarak izotropik bir mikroyapı elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Biriktirilen bileşenin üst bölgesinin ferrit tanelerinden oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Çoklu allotropik dönüşümlerin yerinde içsel bir ısı işlemin (temel olarak çok katmanlı penetrasyon normalleştirme, tam katman penetrasyonlu kritikler arası tavlama ve uzun süreli temperlemenin kombinasyonu) oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca dislikasyonların önemli ölçüde azalttığını, daha ince taneciklerin oluştuğunu ve sonuç olarak mukavemette minimum bozulma ile mükemmel Charpy tokluğu elde edildiğini ifade etmişlerdir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kaynak Yöntemi

Kaynak, parçalar arasında zor ayrılan ve genelde kalıcı bir birleştirme oluşturmak için kullanılan yöntem olup, hemen hemen tüm endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Kaynak, birden fazla parçanın basınç veya ısı tesiri altında ilave kaynak teli (dolgu malzemesi) kullanarak veya kullanmadan verimli bir şekilde birleştirme işlemidir. Basınç ve/veya ısı kullanılarak yapılan birleştirmelere, kaynaklı birleştirme veya bağlantı denir (Çam, 2020).

Kaynaklı birleştirmeler, mikroskobik ve makroskobik olarak iki biçimde açıklanabilir. **Mikroskobik yönden kaynak;** birleştirilecek malzeme atomlarının karşılıklı çekme bölgelerine getirilmesi işlemi olarak ifade edilirken, **makroskobik yönden kaynak;** ek enerji takviyesi ile iki veya daha fazla malzemenin dolgu malzemesi kullanarak veya kullanmadan birleştirilecek malzemenin sürekliliğini sağlayacak şekilde kaynatılması olarak ifade edilir. Bu ifadelerle göre, genel olarak kaynak işlemlerinde makroskobik olarak ifade edilen birleştirme metodunun kullanıldığını söylenebilir. Buna Şekil 2.1’de şematik görünümü verilen elektrik ark kaynağı örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 2.1. Elektrik ark kaynağının şematik gösterimi (Çelik, 2020)

Isı kullanılarak yapılan kaynak işlemlerinde;

- ✓ Birleştirilecek iş parçaları, ana malzeme olarak tanımlanabilir.
- ✓ Birleştirme için gerekli ek enerji takviyesi güç kaynağından sağlanır.
- ✓ Kaynak için gerekli olan dolgu malzemesi elektrot olarak ifade edilir.

- ✓ Birleştirme işlemi, elektrot ve iş parçalarının ergimesi ile oluşan kaynak banyosunun katılaşması sonucunda elde edilir.

Kaynak sonucu birleştirme bölgelerinin özellikleri ana malzeme özellikleri ile aynı veya yakın olması gerekmektedir. Kaynak sürekliliği olarak ifade edilen bu özelliklerin bozulmadığını belirlemek için uygulanabilecek en pratik yöntem kaynak bölgesinde yapılacak sertlik taramasıdır. Ayrıca kaynak sırasında elektrot veya kaynak teli kullanılmışsa, bunların mekanik ve kimyasal özellikleri, kaynak yapılan malzemeler ile aynı ya da benzer olması gerekmektedir. Ancak farklı metallerin birleştirilmesi işlemlerinde kullanılacak ilave dolgu malzemeleri, ana malzemelerden farklı özellikte olabilir (Çelik, 2020).

2.1.1. Kaynağın tarihçesi

Kaynak, eski çağlardan beri var olup, en eski örnekleri Tunç Çağı'ndan gelmektedir. Binlerce yıl önceden basınçlı birleştirme ile küçük altın dairesel kutular yapılmıştır (Miller, 2023).

Orta Çağ'da, demir ısıtılarak çekiçe birçok demir parçası imal edilmiştir. İngiltere'den Edmund Davy, 1800'lü yıllarda pil kullanarak iki karbon elektrot arasında bir ark üretmiştir. Bu gelişme ile bu yüzyılın sonunda gaz kaynağı ile kesme işlemleri yapılmıştır. Ayrıca Auguste De Meritens, bir ark ile kurşun levhaları birleştirmiştir. Bu olay ise ark kaynağının başlangıcı olmuştur. Daha sonraki aşamalarda demir kaynağı ile ilgili araştırmalar başlamış ve karbon ark kaynağı 1800'lü yılların sonlarında ve 1900'lü yılların başlarında popüler hale gelmiştir. Aynı dönemde Detroit'ten Coffin, ark boyunca eriyen bir metal elektrot kullanarak, dolgu metali kullanımının yolunu açmıştır. 1900'lü yıllarda Strohmenger, Büyük Britanya'da dolgu telini kil veya kireç ile kaplamış ve kaynak bağlantılarında kullanmıştır. İsveç'ten Oscar Kjellberg, dolgu telini karbonat ve silikat karışımlarına daldırıp, kurutarak yeni örtülü elektrot ile kaynak çalışmaları yapmıştır. Bunların yanı sıra farklı kaynak yöntemleri bulmak adına çalışmalar yapılmıştır. Demiryolu ray kaynakları için termit kaynağı, punta kaynağı, dikiş kaynağı, projeksiyon kaynağı ve flaş alın kaynağı dahil olmak üzere direnç kaynağı yöntemleri geliştirilmiştir (Miller, 2023).

Birinci Dünya Savaşı ile silah üretiminde kaynaklı imalatlara yönelim başlamış ve bunun üzerine kaynak makineleri ve elektrotlar üretmek üzere fabrikalar

kurulmuştur. Ark ve kaynak alanını dışarıdan uygulanan gazlarla koruma konusunda önemli çalışmalar yapılmış, günümüzde halen kullanılan gaz metal kaynağının temelleri oluşturulmuştur. 1920’de, General Electric Company’den PO Nobel tarafından otomatik kaynak makinesi icat edilmiş ve günümüzde kullanılan robotik kaynakların temeli atılmıştır. Popüler hale gelen otomatik işlem, tozaltı kaynak yöntemidir. Bu yöntem, National Tube Company tarafından Pensilvanya, McKeesport’taki bir boru fabrikası için düzenlenmiştir ve borudaki uzunlamasına dikişleri yapmak için geliştirilmiştir. Ayrıca tersanelerde ve mühimmat fabrikalarında savunma inşası sırasında kullanılan tozaltı kaynağı, en verimli kaynak işlemlerinden biri olup, günümüzde halen popülerliğini korumaktadır (Miller, 2023).

2.1.2. Kaynağın avantajları ve dezavantajları

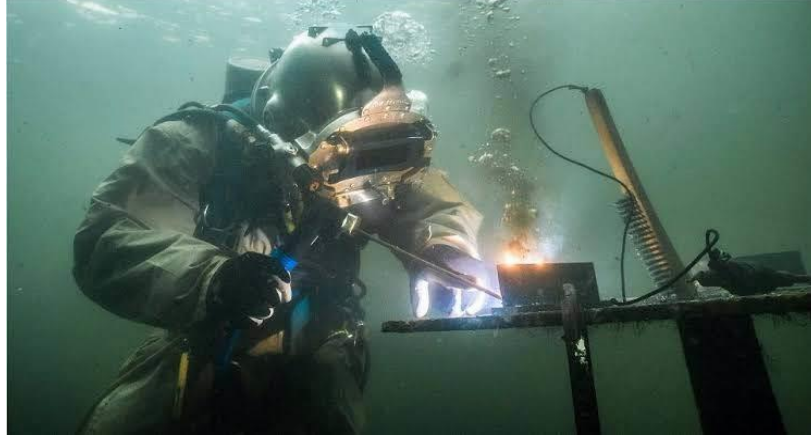
Kaynak ile birleştirme işleminin oldukça çok kullanılmasının ve tercih edilmesinin sebepleri, sağladığı avantajlardır. Bunlar;

1. Kaynak ile birleştirilen parçaların rijit olması ve demontaj yapılmaması,
2. Dolgu teli olarak kullanılan ilave metallerin mukavemeti ana metal ile aynı veya daha yüksek olduğu için kaynak bağlantıları ana malzemeden daha mukavemetli olması,
3. Kaynak ile birleştirme işlemi, perçin ve cıvata gibi mekanik birleştirmelere göre daha ekonomik ve daha hafif olması,
4. Kaynak işlemleri sadece fabrika ortamında değil aynı zamanda sahada da hatta su altında da (Şekil 2.2) manuel veya robotik olarak uygulanabilir olması sayılabilir.

Kaynak işleminin yukarıdaki üstünlükler dışında bazı sınırlamaları da vardır. Bunlar:

1. Kaynak işlemlerinin çoğu manuel olarak yapıldığından ve insan gücüne dayandığından işinde uzman kaynakçılar gerektirir.
2. Kaynak işlemleri için gerekli enerji, işçi sağlığı ve emniyeti hususunda tehlikeli olmaktadır.
3. Kaynak sonucu sökülemeyen bir birleştirme yapıldığından parçaların demontajı yapılmamakta veya demontaj yapılsa bile işçilik ve maliyet gerektirir.

4. Kaynaklı birleştirmeler tespiti oldukça güç kaynak hataları içerebilir. Bu hatalar da birleştirmenin mukavemetini düşürebilir (Çam, 2020).



Şekil 2.2. Bir dalgıç kaynakçı tarafından su altında ark kaynağının yapılışı (Çam, 2020)

2.1.3. Kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması

Kaynak yöntemleri, kaynak bölgesine gerekli olan enerjinin veriliş şekline göre sınıflandırılabilir. Bu enerjiler, ısı ve basınç olarak veya her ikisi beraber kullanılarak yapıldığından, kaynak yöntemlerini;

1. Ergitme kaynağı,
2. Basınç kaynağı olarak gruplandırabiliriz.

Ergitme ve basınç kaynakları da kendi içlerinde sınıflandırılabilir. Kaynağın sınıflandırılması Tablo 2.1’de ayrıntılı olarak verilmiştir (Çelik, 2020).

Tablo 2.1. Kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması (Çelik, 2020)

Kaynak Yöntemleri	
1. Ergitme Kaynağı	2. Basınç Kaynağı
a) Örtülü Elektrot Kaynağı	a) Sıcak Basınç Kaynağı
b) Gazaltı Kaynağı	b) Soğuk Basınç Kaynağı
c) Tozaltı Kaynağı	c) Sürtünme Karıştırma Kaynağı
d) Elektron Işın Kaynağı	d) Direnç Kaynağı
e) Lazer Kaynağı	e) Difüzyon Kaynağı
f) Su Altı Kaynağı	f) Gaz Basınç Kaynağı
g) Döküm Ergitme Kaynağı	g) Ultrasonik Kaynak

Örtülü Elektrot Kaynağı; Demir dışındaki alaşımların ve çeliklerin birleştirme işlemlerinde kullanılan en eski, kullanışlı ve basit olan kaynak yöntemlerinden birisi

örtülü elektrot ark kaynağıdır, örtülü metal ark kaynağı da denir. Endüstriyel kaynak işlemlerinin yarısı bu yöntem ile yapılır. Genellikle 50-500 A arasında akım ve 15-45 V arasında gerilim değerleri ile kullanılmaktadır.

Gazaltı Kaynağı; 1940'lı yılların başında geliştirilmiş olup birleştirme işlemi bir bobin ile devamlı çıplak tel şeklinde beslenen elektrot ucu ile kaynak yapılacak parçalar arasında oluşturulan ark ile yapılmaktadır. Bu yöntem başlangıçta arkı korumak için asal (argon) gaz kullanılarak alüminyumı kaynak etmek için uygulanmıştır. Bu yüzden, yöntem metal asal gaz (MIG) kaynağı da denir. O dönemde aynı yöntem çeliğe uygulanırken asal gazın yerine daha ucuz olan karbondioksit gazının kullanılabileceği görülmüş olup bu yöntemde, karbondioksit kaynağı denilmiştir. Yöntem daha çok metal aktif gaz (MAG) kaynağı olarak bilinir. Bu çalışmalar çerçevesinde, karbondioksit ve argon veya oksijen ve argon karışımı gibi değişik gaz karışımları çeliklerin kaynağında kullanılmıştır.

Elektron Işın Kaynağı; Parçaların kenar kenara ve dikine kaynak yapıldığı bir ark kaynağı yöntemidir. Özel kaynak ekipmanı ile bu yöntemle boru şeklindeki parçalar da kaynak edilebilir. Kaynak esnasında, kaynak aparatı sabit tutulup parçalar kendi eksenlerinde döndürülerek çevresel kaynak yapılır. Bu yöntemle oldukça kalın çelik, titanyum ve Al-alışımı levhalar kaliteli kaynak edilebilir. Kaynak kalitesi oldukça yüksektir ve açısal distorsiyon söz konusu değildir. Uygulama alanları: Depolama tanklarının üretim ve tamirata, basınçlı kaplar, gemi inşaatı ve çelik konstrüksiyon yapılarıdır.

Lazer Kaynağı; Lazer kaynağı, yüksek yoğunluklu ve koherent (aynı yönde/dalga boyunda/fazda) bir ışık demetinin kaynak edilecek iş parçasına odaklanması ile birleştirmenin yapıldığı bir ergitme kaynağı yöntemidir. Lazer ile yüzey işlemede ve lazer kesme işlemlerinde kullanılır. Güç yoğunluğu elektron ışını kaynağından düşüktür. Lazer kaynağının elektron kaynağına göre avantajları vardır. Lazer ışını normal atmosferde iletilebilir, dolayısıyla vakum odası gerektirmez, X-ışınlarını açığa çıkarmaz. Lazer demeti optik lensler ve aynalar ile yönlendirilebilir, otomasyona çok uygundur. Ulaşılamayan bölgelerde kaynak işlemi gerçekleştirilebilir (Çelik, 2020).

Su Altı Kaynağı; Örtülü elektrotla su altında yapılan bir kaynak yöntemidir. Genellikle bakım onarım için kullanılır. Su altında yapılan kaynak ve kesme

tekniklerinin geliştirilme amacı, gemilerin tamiri, petrol platformları, liman inşaat ve onarımlarının yapılması, boru hatlarının döşenmesi ve gemi kurtarma çalışmalarıdır.

Döküm Ergitme Kaynağı; Kırılmış veya aşınmış dökme demir parçaların birleştirme veya doldurma kaynağında, döküm veya işleme hatalarının kaynakla giderilmesinde kullanılır. Kaynak metali ana metal ile renk uyumuna sahiptir ve eğeyle veya talaş kaldırarak işlenebilir. Ark başlangıcı ve yeniden tutuşturması çok kolaydır.

Sıcak Basınç Kaynağı; Sıcak basınç yöntemi ile yanıcı bir gaz (asetilen, propan, hidrojen vb.) oksijen yardımıyla yakılıp istenilen kaynak ısısı elde edilir. Daha sonra kaynatılacak parçalar alın düzlemlerinde birleştirilerek bu parçalara basınç uygulanır. Gazların her ikisi de tüplerden alınır. Kaynağın şekline ve kaynak yapılacak yüzeylerin cinsi ve kalınlığına göre gerekli ayarlamalar yapılır ve bu şekilde elde edilen sıcaklık 3000 °C'yi bulur. Bağlantının sağlanması için gerekli basınç kaynak ısısı ile ters orantılı değişir.

Soğuk Basınç Kaynağı; Bu yöntem ile oda sıcaklığında iki metal arasında yüksek basınç uygulanarak birleştirme sağlanır. Soğuk kaynak işleminde kritik bir nokta, birleştirecek metal yüzeylerin çok temiz olmasıdır. Birleşmeyi engelleyecek herhangi bir yağ, boya ve toz gibi yabancı maddelerden temizlenen yüzeyler çok yüksek basınçlar altında birleştirilir. Metal yüzeylerin birbirine tam olarak birleştirilmesi için birleştirilecek metallerin sünek yapıda olmaları ve öncesinde plastik deformasyona uğramamış olmaları gerekir.

Sürtünme Karıştırma Kaynağı; Genel olarak hafif malzemelerin kaynağında tercih edilir, otomotiv ve havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Sürtünme ve geleneksel punta kaynağının birleşimi ile ortaya çıkan bu tür sayesinde iş takımında mekanik hasarı daha düşük, güç tüketimi daha az, yüksek ısıdan oluşan bozulması düşük ve daha mukavemetli kaynak dikişleri elde edilebilir.

Direnç Kaynağı; 1900'lerin başında geliştirilmiştir. Kaynaklanacak iki parça arasındaki elektrik direncinden açığa çıkan ısıyla yapılan bir kaynak uygulamasıdır. Bu yöntemde, basınç kaynak boyunca değişir. Basınç kullanıldığı için kaynak işlemi düşük sıcaklıklarda yapılabilir ve ara yüzeydeki hava dışarı atıldığından koruyucu gaza ihtiyaç olmaz (Çelik, 2020).

Difüzyon Kaynağı; Difüzyon kaynağı kontrollü bir atmosferde birleştirilmek üzere yüzeyleri hazırlanmış ve temizlenmiş üst üste konmuş iki parçaya, difüzyon ve

birleştirme için yeterli bir süre ısı ve basınç uygulaması ile gerçekleştirilen bir katı hâl kaynak yöntemidir. Difüzyon kaynağı yapılan sıcaklıklar kaynak edilen metalin ergime derecesinin bayağı altındadır ve bu uygulamada temel birleştirme mekanizması, temas yüzeylerindeki atomların karşılıklı yer değiştirmesini sağlayan, katı hâl difüzyonudur. Yıllar önce bu yöntem kullanılarak bakır altın ile kaplanmıştır.

Gaz Basınç Kaynağı; Malzemeyi genellikle ilave metal katmadan basınç altında bölgesel olarak ısıtıp birleştirmektir. Bu işleme katı hal difüzyonu denir ve kaynak oluşturmak için baskı kullanır.

Ultrasonik Kaynak; Ultrasonik kaynak yöntemi, iki parçanın düşük bir sıkıştırma kuvveti ile bir arada tutulduğu ve birleşme elde etmek için ara yüzeye ultrasonik frekansta titreşimli kayma gerilmelerinin uygulandığı bir katı hâl kaynak yöntemidir. Parçalar arasındaki titreşim hareketi, yüzeyde mevcut herhangi bir yüzey filmi kırarak parçalar arası sıkı teması sağlar ve bu sayede yüzeyler arasında kuvvetli bir metalurjik bağ oluşur. Temas hâlindeki yüzeylerde arayüzey sürtünmesi ve plastik deformasyon sonucu ısınma meydana gelir, ancak bu ısınma sonucu açığa çıkan sıcaklık parçaların ergime derecesinin oldukça altındadır. Yöntemde, dolgu metali, cüruf yapıcı veya koruma gazı kullanılmaz (Çelik, 2020).

2.1.4. Kaynak uygulama alanları

Kaynağın uygulama alanları, çelik yapılar (binalar ve köprüler), basınçlı kaplar (boru, buhar kazanları ve depolama tankları üretimi), gemi inşaatı, uzay, havacılık ve otomotiv endüstrisi ve demir yolu şeklinde sıralanabilir. Ancak kullanım alanları bunlarla sınırlı değildir. Esnek bir montaj tekniği ve taşınabilir olması sayesinde, değişik endüstri alanlarında, birçok üretim tesisinde, inşaat sahalarında, tersanelerde, müşterinin tesislerinde ve otomobil tamir atölyelerinde de kullanılabilmektedir (Çam, 2020).

2.1.5. Otomasyon olarak yapılan kaynak sistemleri

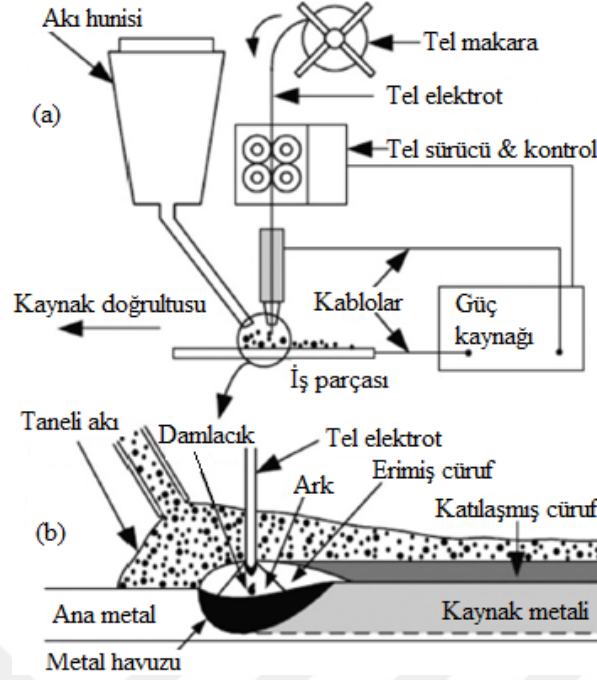
Çoğu kaynak uygulamaları, manuel olarak yapıldığından işçi gücüne ihtiyaç duymakta, bu da beraberinde işçi sağlığı ve güvenliğini gündeme getirmektedir. Kaynak yapan işçilerin sıkı güvenlik önlemi alması, gaz kaynağı ile tutuşma tehlikesinden ve elektrik enerjisi ile çalışan cihazların yaydığı akımlardan korunmaları gerekmektedir.

Ayrıca ark kaynağında ortaya çıkan ultraviyole ışınlarından korunmak için kaynak gözlüğü içeren özel bir kask takmaları gerekmektedir. Bunlara ek olarak, özellikle ark kaynağı uygulamaları gibi bazı ergitme kaynağı işlemlerinde, kaynak esnasında açığa çıkan kıvılcımlar, sıvı metal sıçramaları, duman ve buharlaşan gazlar da risk oluşturmaktadır. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda insan gücüne daha az ihtiyaç olan otomasyon sistemleri ile yapılan kaynak sistemlerine olan rağbet artmaktadır.

Otomasyon sistemler; makine ile kaynak, otomatik kaynak ve robotik kaynak sistemleridir. Bir operatörün sürekli kontrolü altında makine ile gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde, kaynak bir torç yardımı ile yapılmakta, iş parçası veya torç sürekli hareket ederek işlem gerçekleşmektedir. Operatör kaynak işlemini takip eder, herhangi bir hata olmadığı müddetçe sisteme müdahale etmez. Otomatik kaynak ve makine ile kaynak arasındaki fark, otomatik kaynağa işlem süresince ark hareketini ve iş parçalarının konumları herhangi bir insan müdahalesi olmadan ayarlayan bir cihazın bulunmasıdır (Çam, 2020).

2.2. Tozaltı Kaynağı

Tozaltı Kaynağı, 100 yılı aşkın bir süredir geniş bir endüstriyel uygulama ve araştırma geçmişine sahiptir. Gemi yapımı ve basınçlı kap inşaatı gibi ağır mühendislik endüstrilerinde kalın çelik levhaların verimli bir şekilde kaynak edilmesine olanak tanır. Bu işlemde, kaynak teli ucu ile çelik taban plakası arasında bir ark oluşturmak için elektriksel ve kimyasal parametreler birleştirilir. Ham erimemiş akı ve erimiş akı, ark boşluğunu oluşturup kaynak bölgesini kaplar. Tozaltı kaynağında oluşan kapalı ark, açık ark kaynağı yöntemlerine kıyasla yüksek ısı transfer verimliliği sağlar. Kaynak kafası düzenlemesinden sürekli olarak beslenen kaynak teli ve akı, kaynak boyunca hareket eder. Ark boşluğunda, ısı ve kütle transferinin karmaşık fiziksel ve kimyasal etkileşimleri meydana geldiğinden dolayı erimiş kaynak teli kaynak havuzuna akar. Kaynak metali katılaşana kadar cüruf ve çelikten oluşan erimiş kaynak havuzunda kimyasal reaksiyonlar devam eder (Coetsee ve ark., 2021). Tozaltı kaynağının şematik gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Tozaltı kaynağının şematik gösterimi (Choudhary ve ark., 2019)
a) sistem elemanları, b) kaynak işlemi ve ana metal ile etkileşim

Teknolojik ilerlemeler, tozaltı kaynağı için doğru dalga biçimi kontrolü yapabilen dijital güç kaynağının gelişmesine neden olmuştur. Bu dijital güç kaynağı sayesinde polarite oranı, frekans ve faz farkı gibi kaynak parametreleri kontrol edilebilmektedir. Böylece tel besleme hızı, polarite oranından kontrol edilebilmektedir. Bu nedenle, dijital kaynak makinaları kullanılarak daha yüksek verimli kaynaklar elde edilmektedir (Abe ve ark., 2021a).

Otomatik bir kaynak yöntemi olan tozaltı kaynağıyla, bir paso ile 85 mm, iki paso ile 150 mm ve çok paso ile 300 mm kalınlığına kadar parçaların kaynağını yapmak mümkündür. Bu yöntem ile minimum 1,2 mm kalınlığındaki sac kaynatılabilir. Elektrot teli, manuel kaynak yöntemine kıyasla daha yüksek bir akım şiddeti ile yüklenebilir. Böylece derin nüfuziyetli ve geniş banyolu dikişler elde edilir. Örnek verilecek olursa, 4 mm çapındaki bir elektrot elektrik ark kaynağında 150-190 A arasında akımla kaynak yapılırken, tozaltı kaynağında 400-650 A arasında bir akım ile kaynak yapılmaktadır. Tozaltı kaynağında kullanılan elektrotlar, elektrik ark ocaklarında üretilen ve genellikle mangan değerleri yükseltlen, yüksek kaliteli çelik tellerdir. Çapları 1,2-12 mm arasında değişen bu tellerin üzeri, paslanmayı önlemek ve kaynak esnasında tele akım geçişini kolaylaştırmak için, bakır veya bronz ile kaplanır. Kullanılacak dolgu telinin tayininde, kaynak tozunun da hesaba katılması gerekmektedir (Çelik, 2020).

2.2.1. Tozaltı kaynağında metal transferine etki eden parametreler

Tozaltı kaynağında, metal transferi üzerinde önem arz eden kaynak parametreleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Akım,
2. Tel besleme hızı,
3. Gerilim,
4. Kaynak ilerleme hızı,
5. Tel özelliği (çapı, malzemesi)
6. Tel çıkıntısı,
7. Toz (granül akı) özelliği (boyutu, malzemesi).

Akım; kaynak nüfuziyeti için en büyük öneme sahip parametredir. Kaynak dikiş genişliği kaynak akımının değişiminden çok fazla etkilenmez, ancak akım değeri çok yüksek olması durumunda malzeme yanar. Akım çok düşükse, kök kusurlarıyla sonuçlanan yetersiz kaynak nüfuziyeti meydana gelir. Bu nedenle kaynak akımının doğru seçilmesi gerekir (Singh ve Singh, 2020).

Tel besleme hızı; tel besleme hızı ve akım birbiriyle doğrudan ilişkilidir, bu nedenle tel besleme hızındaki artış teldeki akımı artırırken akım yoğunluğu telin kesitine bağlıdır. Bu da daha yüksek akım yoğunluğunun daha yüksek kaynak nüfuziyeti ve füzyonu anlamına gelmektedir (Ahmad ve ark., 2019).

Gerilim; tozaltı kaynak işleminde hem açık devre hem de ark gerilimleri kaynak dikiş şeklini ve kaynak nüfuziyetini etkilediği için önemlidir. Ark gerilim voltajı, akı tabakasının altındaki ark uzunluğunu da yönetir ve ark uzunluğundaki herhangi bir değişiklik, kaynak metal bileşimini değiştirir. Bu da mekanik özelliklerin değişmesi anlamına gelmektedir (Ahmad ve ark., 2019). Ark gerilimi daha yüksekse, kaynak genişliği genellikle daha fazladır. Ayrıca yüksek gerilim, cürufun kaynak bölgesinden daha zor temizlenmesine yol açar ve kaynak bölgesinde alttan kesilmelere de neden olabilir. Bu yüzden kaynak geriliminin belirlenmesinde bağlantı tipi ve metalin kalınlığı gibi bir takım kaynak parametreleri dikkate alınarak karar verilir (Singh ve Singh, 2020).

Kaynak ilerleme hızı; elektrot telinin iş parçasına göre hızı, kaynak ilerleme hızı olarak adlandırılır. Kaynak hızı arttıkça nüfuziyet derinliği azalır. Kaynak hızının çok düşük olması durumunda, kaynak bölgesinde daha fazla derinliğe enerji aktarımı

olacaktır. Ancak maksimum gerekli nüfuziyet derinliği için uygun kaynak ilerleme hızının seçilmesi gereklidir (Singh ve Singh, 2020).

Tel özelliği; elektrotun akım yoğunluğundan tel çapı sorumludur. Akımın elektrot kesit alanına oranı akım yoğunluğu olarak bilinir. Akım yoğunluğu elektrot çapının karesinin tersidir. Tel çapı çok küçük veya çok büyükse, o zaman güçlü bir dengesiz nüfuziyet derinliği olasılığı vardır. Bu nedenle elektrot çapının doğru seçimi önemlidir (Singh ve Singh, 2020). Tel çapının seçiminde malzeme kalınlığı da dikkate alınmalıdır. Ancak kaynak edilecek malzemenin cinsine bağlı olarak da tel malzemesinin belirlenmesi gerekmektedir.

Tel çıkıntısı; kaynak kafası tertibatından kaynak yüzeyine olan mesafe tel çıkıntısı olarak adlandırılır. Tel çıkıntısı mesafesinin yanlış seçimi amperi etkiler. Bu durum telin ısınmasında ark direncini olumsuz etkileyerek telin ana metale yapışmasına veya ana metalin deformasyonuna neden olmaktadır (Ahmad ve ark., 2019).

Toz (akı) özellikleri; tozaltı kaynağında kaynağın koruması, kireç (kalsiyum oksit-CaO), silika (SiO_2), magnezyum oksit (MgO), kalsiyum florür (CaF_2) ve diğer bileşiklerden oluşan granül akı kullanılarak sağlanır. Akı, kaynak sırasında kaynak için istenen malzemeyi içerebilir. Akı, genellikle CaF_2 olarak eklenen çeşitli oksitler ve florürlerin bir karışımından oluşur. Akı formülasyonları, hedeflenen elementlerin erimiş akıdan kaynak metaline eleman transferini arttırmak için tasarlanır. Örneğin, düşük alaşımlı karbon çeliklerinin kaynak metalindeki Si ve Mn seviyelerini kontrol etmek için akı formülasyonlarına SiO_2 ve MnO ilave edilir. Benzer şekilde, kaynak metalindeki Ti'yi arttırmak için akıya TiO_2 eklenir (Coetsee ve De Bruin, 2021; Coetsee ve ark., 2022b). Kaynak metalinde TiO_2 , SiO_2 ve CaF_2 içeriğinin artmasıyla çekme mukavemetinde artış, SiO_2 içeriğinin artmasıyla mikrosertlikte önemli ölçüde bir azalma söz konusudur (Sharma ve Chhibber, 2020).

Akılar kaynaşmış, bağlı, aglomere ve mekanik olarak karıştırılmış olmak üzere 4 çeşittir. Nemi gidermek için higroskopik akılar kullanılır. Yüksek mukavemetli kaynak elde etmek için farklı tipte halojenürler kullanılmaktadırlar (Singh ve Singh, 2020). Kaynağın daha verimli ve etkin bir şekilde yapılabilmesi için granüllü akı, huniden kontrollü bir şekilde ark üzerine sürekli olarak dökülür. Kalın akı tabakası, erimiş metali tamamen sararak, kaynağının özelliği olan ultraviyole radyasyonları ve dumanları bastırmanın yanı sıra sıçrama ve kıvılcımları önler. Ayrıca akı, kaynak bölgesi için

koruyucu bir atmosfer sağlar ve kaynak banyosu ile reaksiyona girerek kaynak metalini deoksidi eder (Akay ve ark., 2013a).

Akılar, ana metale alaşım elementleri sokmanın bir yolu olup kaynak metalinin mikroyapısını iyileştirmek için önem arz etmektedir (Zhang ve ark., 2020a). Mukavemet, sertlik ve darbe mukavemeti gibi mekanik özellikler Si, Mn, Ni, Ti, V gibi elementlerin eklenmesiyle geliştirilebilir. Nikel ve titanyum, ince tane yapısı ile karakterize edilen iğneli ferrit oluşumunu destekler (Choudhary ve ark., 2018).

Genel olarak akı, O₂ kontaminasyonunun ana kaynağı olup, aşağıdaki sebeplerden dolayı dekarburizasyon kontrolünde önemli bir rol oynar.

1. Kaynak arkının varlığında, akıdaki çoğu oksit bileşeni, gaz-metal ara yüzeyinde kaynak havuzunda karbon ile reaksiyona girebilen gazları (O₂ ve SiO gibi) ayrıştırma ve salma eğilimindedir.
2. Dekarburizasyonun derecesini büyük ölçüde belirleyen kaynak havuzunda çözünen oksijen seviyesi, oksit bozunma davranışlarına ve cüruf-metal reaksiyonlarına büyük ölçüde bağlıdır.
3. Kaynak havuzunda çözünen karbon ile erimiş cüruftaki oksitler arasında reaksiyonlar meydana gelebilir (Zhang ve ark., 2020a).

2.2.2. Tozaltı kaynağının avantajları ve dezavantajları

Tozaltı kaynağının birçok avantajı vardır. Bunlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Yüksek kaynak gücü ve kaynak hızına sahiptir.
2. Yüksek nüfuziyet sağlar.
3. Enerji ve elektrot tasarrufu sağlar.
4. Operatör tecrübesi kaynak dikiş kalitesini etkilemez.
5. Emniyetli ve düzgün görüşlü kaynak dikişi elde edilir.
6. Yüksek ark stabilizesi vardır.
7. Seri üretime elverişlidir.
8. Yapımında koruyucu maske kullanmaya gerek yoktur.
9. Toz karışım oranları değiştirilerek, düşük kaliteli elektrotla kaliteli malzemeler kaynatılabilir.
10. Otomatik olarak çalışma imkânı vardır.

11. Gazaltı kaynak makinesine dönüştürülebilir.
12. Dar aralıklara kaynak yapma imkânı vardır.
13. Kaynak ağzı açmaya gerek yoktur.
14. Kazan, basınçlı tank, tüp, boru, otomotiv ve gemi sanayisinde yaygın olarak kullanılır.

Birçok avantajı bulunan tozaltı kaynağının dezavantajları da vardır. Bunlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Pahalı makina ve teçhizata ihtiyaç vardır.
2. İnce sacların kaynağı için uygun değildir.
3. Kısa boylu ve karışık şekilli dikişlerde ekonomik değildir.
4. Yatay ve düşey pozisyonda kaynak mümkün, tavan kaynağı için ise uygun değildir (Çelik, 2020).

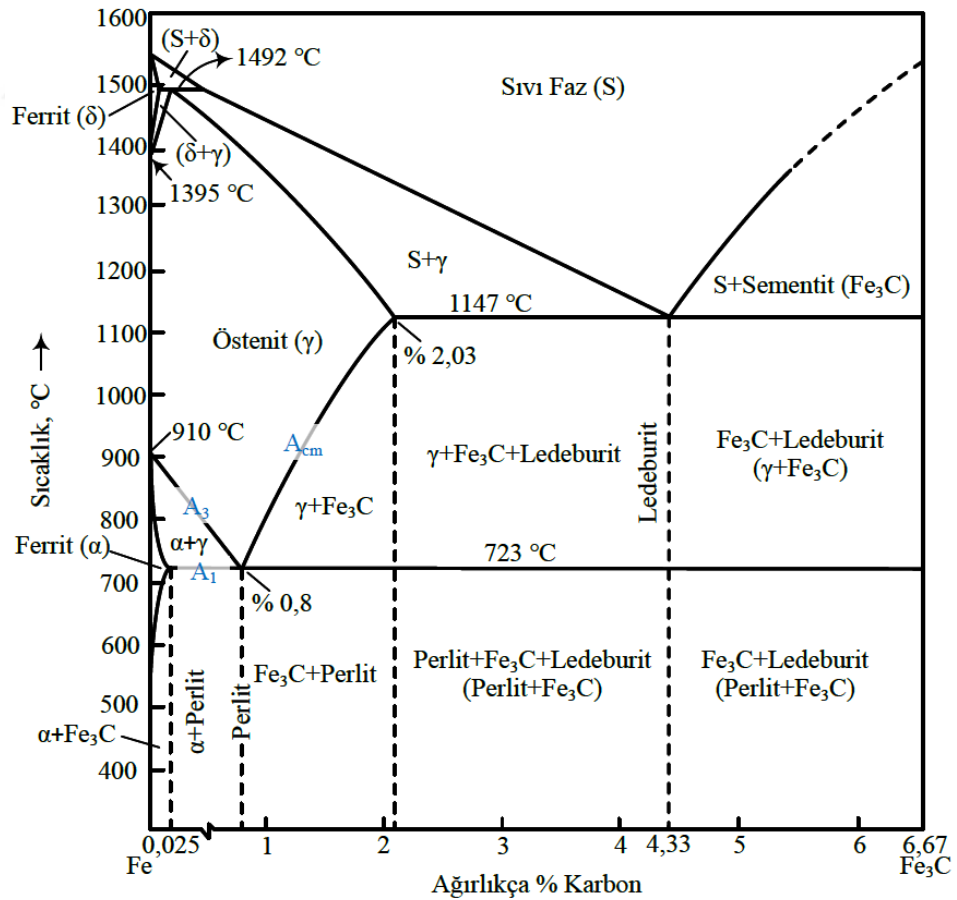
2.3. Isıl İşlem

Isıl işlem, bir malzemenin mikroyapısını değiştirmek ve o malzemeye belirli özellikler kazandırmak amacıyla katı halde yapılan kontrollü ısıtma ve soğutma olarak tanımlanabilir. Hemen hemen tüm metal ve alaşımları, bir tür ısıtma işlemi verir, ancak çelik malzemeler ısıtma işlemi duyarlı en önemli malzemelerdir (ASM Handbook, 2013).

Çeliğin ısıtma işlemi karşı duyarlılığı, demirin bazı önemli özelliklerinden ve karbonun demirdeki metalurjik etkilerinden kaynaklanmaktadır. Temel olarak, tüm çelikler, Demirin az miktarda karbon ve Mn, Cr, Ni ve Mo gibi değişen miktarlarda diğer alaşım elementleriyle birlikte karışımı veya daha doğrusu alaşımlarıdır. Önemli bir etki, karbon atomlarının demir atomlarına göre büyüklüğüdür. Karbon atomu, demir atomunun yalnızca 1/30 boyutundadır ve karbon atomları, daha büyük demir atomlarının boşlukları arasına sığacak kadar küçüktür. Katı demirin ara bölgelerine sığacak kadar küçük olan diğer atomlar hidrojen, azot ve bor'dur. Genel olarak, arayer atomları daha büyük atomların aksine (bir kristal kafes içindeki boşluklara yalnızca "ikame" yoluyla atlayabilenler), bir arayer bölgesinden diğerine atlayarak kolayca yayılabilirler. Bu, sıcaklığın difüzyon üzerindeki etkisiyle birlikte, katı hal ısıtması sırasında karbonun hareketliliğini duyarlı hale getirir (ASM Handbook, 2013).

Bir diğer önemli metalurjik olay, demirin allotropisidir; bu, demir atomlarının kendilerini birden fazla kristal form veya fazda düzenleyebileceği anlamına gelir. Örneğin oda sıcaklığında demir atomları kendilerini ferrit veya alfa demir adı verilen hacim merkezli kübik kristal yapı halinde düzenlerler. Daha yüksek sıcaklıklarda demir atomları, östenit veya gama demir adı verilen yüzey merkezli bir kristal yapı oluşturur. Çeliğin ısıtma işlemlerinde karbon alaşımıyla birlikte bu iki fazın varlığı esastır (ASM Handbook, 2013).

Ferrit ve östenit arasındaki önemli bir fark, demir atomlarının aralığıdır. Östenitteki demir atomları ferritinkinden daha geniş aralıklıdır. Bu, östenitin kristal kafesin ara bölgelerinde daha fazla karbon atomu barındırmasına olanak tanır. Katı çözünürlük, konakçı kafes içinde ne kadar çözünen maddenin çözülebileceğinin (veya dahil edilebileceğinin) bir ölçüsüdür. Sıcaklık, çözünürlüğün kapsamını etkiler çünkü daha yüksek sıcaklıklar, konakçı kafesi genişletir ve böylece çözünen maddenin kafese sığması için daha iyi bir fırsat sağlar (ASM Handbook, 2013). Belirtilen bu esaslar için Şekil 2.4'te verilen demir-karbon veya demir-sementit faz diyagramı oldukça önemlidir.



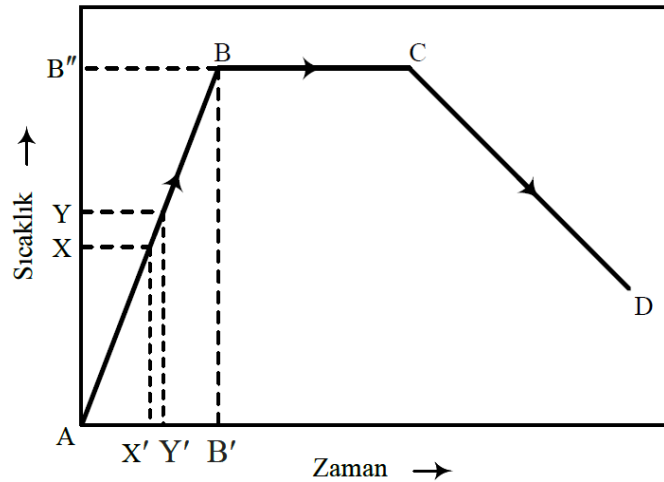
Şekil 2.4. Demir-sementit faz diyagramı (Rajan ve ark., 2011)

Şekil 2.4'te; A_1 : Isıtma sırasında östenitin oluşmaya başladığı sıcaklık, A_3 : Isıtma sırasında demirin östenite dönüşümünün tamamlandığı sıcaklık, A_{cm} : Ötektoid üstü çelikte, ısıtma sırasında sementitin östenit içindeki çözünmesinin tamamlandığı sıcaklık, α : Ferrit veya alfa, γ : Östenit veya gama, δ : Delta ve Fe_3C : Sementitdir.

Östenit oluşumu herhangi bir ısıtma işlemi prosesi için bir ön adımdır. Östenit, çeliğin sırasıyla ötektoid altı, ötektoid veya ötektoid üstü tipte olmasına bağlı olarak ferrit ve perlit, ferrit ve sementit veya sementit ve perlitten oluşan bir agreganın ısıtılmasıyla oluşturulur. Ötektoid çelikte östenit oluşumu ötektoid altı ve ötektoid üstü çeliklerden farklıdır; ilk durumda ötektoid altı ve ötektoid üstü çeliklerde belirli bir sıcaklıkta (A_1) meydana gelirken ikinci durumda belirli bir sıcaklık aralığında meydana gelir (Rajan ve ark., 2011).

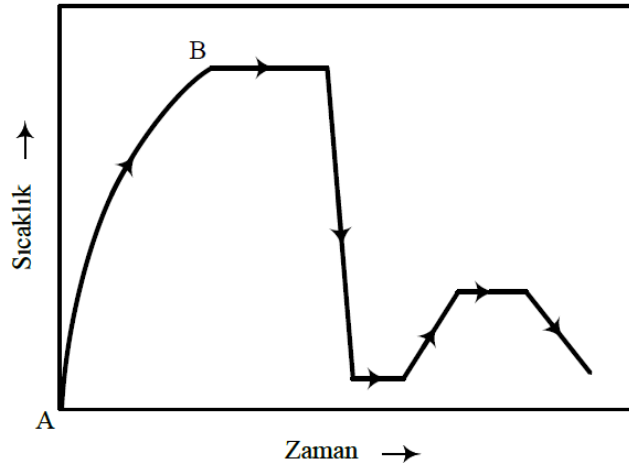
Perlit, ferrit ve sementit olmak üzere iki fazın ötektoid bir karışımıdır. Perlit, çeliğin önemli bir bileşenidir ve yavaş yavaş soğutulan hemen hemen tüm çeliklerde bulunur. Tavlanmış veya normalize edilmiş ötektoid altı çeliklerin mekanik özellikleri esas olarak bu bileşene bağlıdır. Perlit, ötektoid bileşimdeki östenitin alt kritik sıcaklığın hemen altına soğutulmasıyla oluşturulur (Rajan ve ark., 2011).

Herhangi bir ısıtma işlemi prosesi, sıcaklık ve zaman koordinatları ile grafiksel olarak gösterilebilir. Şekil 2.5'te basit bir ısıtma işlemi çevrimi, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de ise bazı karmaşık ısıtma işlemi çevrimleri gösterilmiştir.



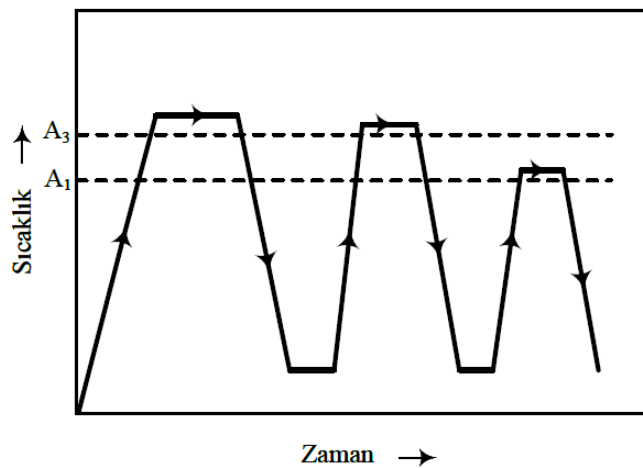
Şekil 2.5. Basit bir ısıtma işlemi döngüsünün grafiksel gösterimi (ısıtma hızı = $XY/X'Y' = AB''/AB' = \text{sabit}$) (Rajan ve ark., 2011)

Şekil 2.5, metal veya alaşımının ısıtıldığı, yüksek sıcaklıkta bir süre tutulduğu ve daha sonra oda sıcaklığına soğutulduğu mümkün olan en basit ısıtma işlemi döngüsüdür.



Şekil 2.6. Çökeltmeyle sertleştirilen alaşım için genelleştirilmiş ısı işlem döngüsü (Rajan ve ark., 2011)

Şekil 2.6, çökeltilerek sertleşebilen bir alaşım için uygun olan tipik bir ısı işlem döngüsünü göstermektedir. Bu durumda alaşım ısıtılır ve önceden belirlenen yüksek sıcaklıkta tutulur. Bu adıma çözümleme adı verilir. Alaşım daha sonra söndürme yoluyla hızla oda sıcaklığına soğutulur. Söndürülmüş alaşım ısıtılır ve oda sıcaklığının üzerinde orta derecede yüksek bir sıcaklıkta tutulur, ardından yavaş yavaş soğutulur. Son adım, yani orta derecede yüksek bir sıcaklığa ısıtmak ve bu sıcaklıkta tutmak, yaşlandırma veya daha spesifik olarak yapay yaşlandırma olarak adlandırılır. Bunun nedeni bazı çökeltmeyle sertleşebilen alaşımların oda sıcaklığında bile sertleşmesidir. Bu tür alaşımlara doğal yaşlandırmayla sertleşebilen alaşımlar adı verilir (Rajan ve ark., 2011).



Şekil 2.7. Karbürleme işlemi için tipik ısı işlem döngüsü (Rajan ve ark., 2011)

Şekil 2.7, karbürleme prosesi için tipik bir ısıtım işlem çevrimini göstermektedir. Düşük karbonlu çelik, bazı karbonlu malzemelerle temas halinde östenit bölgenin sıcaklık aralığında ısıtılır. Bir süre bu sıcaklıkta tutulur ve sonra söndürülür. Söndürülmüş çelik, ilk adımda kullanılan sıcaklıktan biraz daha düşük bir sıcaklığa yeniden ısıtılır. Bir süre bekletildikten sonra hızla oda sıcaklığına soğutulur. Son adımda çelik tekrar yaklaşık 750 °C'ye ısıtılır (bu, alt kritik sıcaklığın hemen üzerindedir), bu sıcaklıkta tutulur ve ardından söndürülür. Bu üç adımla karbürlenmiş çelikte sert bir gövde ve tok bir çekirdek elde edilir (Rajan ve ark., 2011).

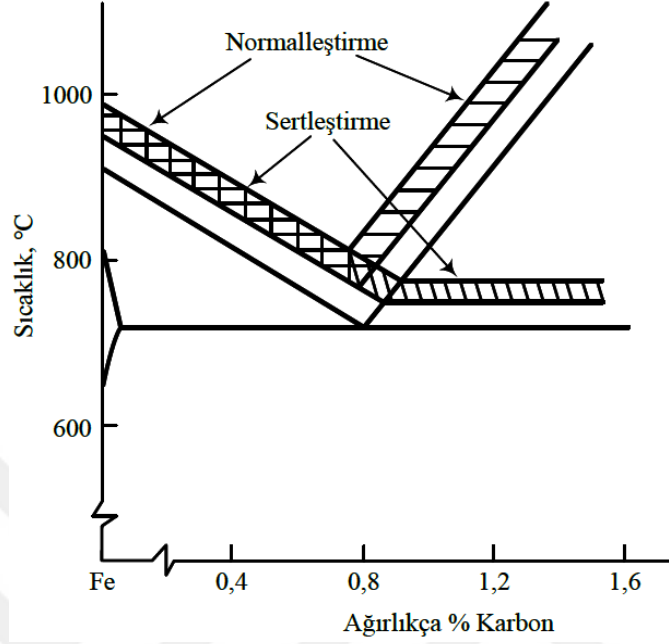
Çeliğin ısıtım işlemi çok geniş bir kavramdır. Bunlar genel olarak;

1. Normalleştirme,
2. Tavlama,
3. Küreselleştirme,
4. Çeliğin sertleştirilmesidir,
5. Çeliğin kimyasal ısıtım işlemi,
6. Temperleme olarak sıralanabilir. (Chandler, 1995; Rajan ve ark., 2011).

2.3.1. Normalleştirme

Normalleştirme, çeliğin üst kritik sıcaklığının (A_3 veya A_{cm}) yaklaşık 40-50 °C üzerine kadar ısıtılması, uygun süre bekletilmesi ve ardından durgun havada veya hafifçe çalkalanmış havada oda sıcaklığına soğutulması işlemidir (Şekil 2.8). Özel durumlarda soğutma hızı, hava sıcaklığı veya hava hacmi değiştirilerek kontrol edilebilir. Normalleştirmeden sonra ortaya çıkan mikroyapı perlitik olmalıdır. Bu, doğası gereği havayla sertleşen bazı alaşımlı çelikler için özellikle önemlidir. Bu tür çelikler için havada soğutma, yapının normalleşmesine yol açmaz. Daha yavaş soğutma hızları gereklidir. Bu işlemdeki sıcaklık tavlama göre daha yüksek olduğundan östenitin homojenliği artar, ferrit ve sementitin nihai yapıda daha iyi dağılması sağlanır. Bu dispersiyon, geliştirilmiş mekanik özelliklerle sonuçlanır. Tane boyutu normalleştirilmiş yapıda tavlama yapıya göre daha incedir. Normalleştirme işlemine tabii tutulmuş çeliğin tane boyutu, kesit kalınlığına göre belirlenir. Soğutma hızları malzemenin dış yüzeyinden merkeze (çekirdeğe) önemli ölçüde farklılık gösterdiğinden, normalleştirilmiş çeliğin kesiti boyunca tane boyutunda farklılıklar vardır. Tane boyutunun incelenmesi normalleştirmenin en önemli amaçlarından biridir ve büyük ölçüde ticari olarak uygulanmaktadır. Bu işlemlerde yer alan yüksek sıcaklıklar

nedeniyle iri taneli haddelenmiş ve dövme çelikler, tane incelmesi için normalleştirme işlemine tabi tutulur (Rajan ve ark., 2011).



Şekil 2.8. Çeliklerin normalleştirme ve sertleştirme işlemlerine yönelik sıcaklık aralıkları (Rajan ve ark., 2011)

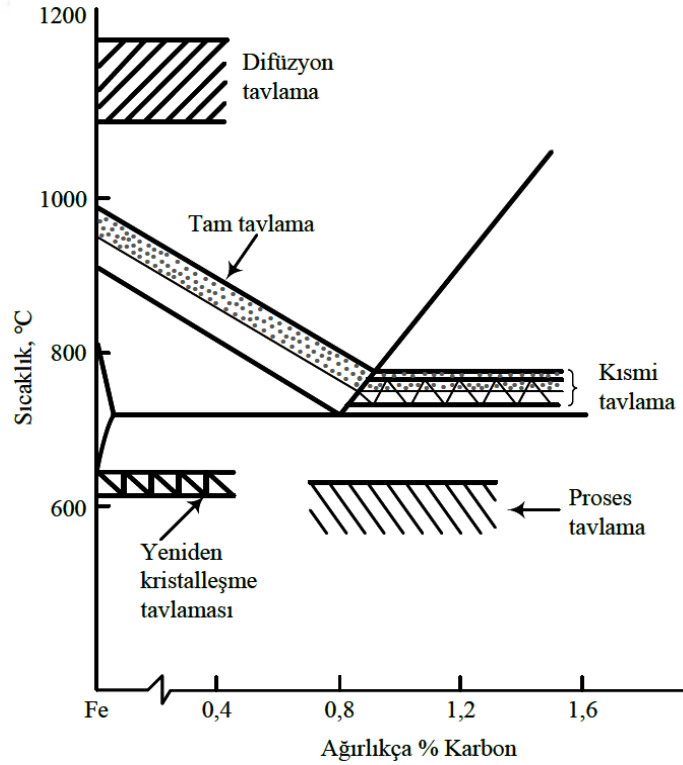
Normalleştirmeye, mukavemet ve yumuşaklığın optimum kombinasyonu elde edilir ve bu da çeliklerde tatmin edici düzeyde işlenebilirlik sağlar. İşlenebilirliği artırmaya yönelik bu yöntem, özellikle ötektoid altı çeliğe uygulanabilir. Özellikle ötektoid üstü çeliklerde tavlama ile karbürün tane sınırlarında çökeldiği ve sürekli bir ağ oluşturduğu gözlemlenmiştir. Normalleştirme bu karbür ağını ortadan kaldırmak için çok etkili bir işlemdir. Böyle bir ağ oldukça kararlıdır ve soğutma sırasında yeniden çökme meydana geldiğinden tavlama işlemiyle ortadan kaldırılmaz. Soğutma sırasında mevcut sürenin kısa olması nedeniyle bu ağ normalleştirilmiş yapıda görünmemektedir. Tane incelmesi, işlenebilirliğin iyileştirilmesi ve sertlik, mukavemet ve tokluk gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesi gibi amaçlardan herhangi bir veya daha fazlasını elde etmek için çeliklere normalleştirme işlemi sıklıkla uygulanır (Rajan ve ark., 2011).

2.3.2. Tavlama

Tavlama, genel olarak çelikleri önceden belirlenmiş bir sıcaklığa ısıtmayı, bu sıcaklıkta tutmayı ve son olarak çok yavaş bir hızda soğutmayı içerir. Çeliğin ısıtıldığı sıcaklık ve tutma süresi, çeliğin kimyasal bileşimi, çelik bileşenin boyutu ve şekli ve istenen nihai özellikler gibi çeşitli faktörler tarafından belirlenir. Tavlama, son işlemi veya daha sonraki işlem için hazırlık adımını oluşturabilir. Bu işlemin çeşitli amaçları vardır. Bunlar;

1. Katılaşma, makineyle işleme, dövme, haddeleme veya kaynaklama sırasında oluşan iç gerilimleri azaltmak,
2. Süneklik ve sağlamlığı iyileştirmek veya eski haline getirmek,
3. İşlenebilirliği arttırmak,
4. Kimyasal eşitsizliği ortadan kaldırmak,
5. Tane boyutunu iyileştirmek,
6. Çelikteki gaz içeriğini azaltmaktır (Rajan ve ark., 2011).

Isıl işlem sıcaklığına bağlı olarak tavlama işlemi farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu süreçler Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Çeşitli tavlama işlemleri için sıcaklık aralıkları (Rajan ve ark., 2011)

Tam Tavlama: Tavlama terimi, belirtilmediği sürece tam tavlama anlamına gelir. Çeliğin östenitik bölgeye ısıtılması ve ardından yavaş soğutulmasından oluşur. Çelik, ötektoid altı çelikler için üst kritik sıcaklığın (A_3) yaklaşık 30-50 °C üzerine kadar ısıtılır. Çelik, önceden belirlenmiş bir süre boyunca bu sıcaklıkta tutulur, ardından fırının içerisinde veya ısı yalıtımlı malzemeden yapılmış bir kapta soğutma gibi çok yavaş bir hızda soğutulur. Bu kadar yavaş soğuma hızı nedeniyle çelikte denge diyagramının öngördüğü denge yapıları elde edilir (Rajan ve ark., 2011).

Difüzyon Tavlama: Homojenleştirici tavlama olarak da bilinen bu işlem, herhangi bir yapısal düzensizliği ortadan kaldırmak için kullanılır. Külçeler, ağır sade karbonlu çelik dökümler ve yüksek alaşımlı çelik dökümler durumunda genellikle dendritler, sütunlu taneler ve kimyasal homojensizlikler gözlemlenir. Bu kusurlar çeliğin kırılabilirliğini artırır ve sünekliğini ve tokluğunu azaltır. Difüzyon tavlama işleminde çelik, üst kritik sıcaklığın (örneğin, 1000-1200 °C) üzerinde yeterince ısıtılır ve bu sıcaklıkta genellikle 10-20 saat gibi uzun süreler boyunca tutulur, ardından yavaş yavaş soğutulur. Bu işlemle ayrıştırılmış bölgeler ortadan kaldırılır ve difüzyon sonucu kimyasal olarak homojen bir çelik elde edilir. Ancak bu kadar yüksek bir sıcaklığa ısıtma, östenitik tanelerin önemli ölçüde kabalaşmasına ve tortu oluşumuna neden olur. Bu da mekanik özelliklerin bozulmasına neden olur (Rajan ve ark., 2011).

Kısmi Tavlama: Kısmi tavlama aynı zamanda kritik tavlama veya eksik tavlama olarak da adlandırılır. Bu işlemde çelik, alt kritik sıcaklık (A_1) ile üst kritik sıcaklık (A_3 veya A_{cm}) arasında ısıtılır. Bunu yavaş yavaş soğutma takip eder. Genel olarak ötektoid üstü çelikler, tam tavlama durumunda gözlemlendiği gibi tane sınırlarında kaba perlit ve sementit ağı yerine bulunur. Bunun nedeni, ötektoid üstü çelikler için tane incelmesinin A_1 'in yaklaşık 10 ila 30 °C üzerindeki bir sıcaklıkta gerçekleşmesidir. Bu proseste düşük sıcaklıklar söz konusu olduğundan, daha yüksek sıcaklıklar içeren tam tavlamaya göre daha ucuzdur. Ötektoid altı çelikler de işlenebilirliklerinin artırılması amacıyla bu işleme tabi tutulur. Ancak tüm ötektoid altı çeliklere bu işlem uygulanamaz. Kaba ferrit ve perlit yapısına sahip çelikler bu işleme uygun değildir. Bunun nedeni, bu süreçte yalnızca kısmi faz dönüşümünün gerçekleşmesidir. Önemli miktarda ferrit dönüştürülmeden kalır ve perlitte birlikte yalnızca bir kısmı östenite dönüşür. Bu kaba veya sivri dönüştürülmemiş ferrit, zayıf mekanik özelliklere neden olur (Rajan ve ark., 2011).

Yeniden Kristalleşme Tavlaması: Pratik olarak yoğun şekilde soğuk şekillendirilmiş tüm çelikler bu işleme tabi tutulur. İşlem, çeliğin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde ısıtılması, bu sıcaklıkta tutulması ve daha sonra soğutulmasından oluşur. Sertliğin veya mukavemetin azalmasına ve sünekliğin artmasına neden olur. Kesit alanında arzu edilen ölçüde azalma, soğuk iş-yeniden kristalleştirme tavlama çevrimlerinin benimsenmesiyle mümkündür. İşlem, hem ara işlem hem de son işlem olarak kullanılır. İşlem çok önemlidir ve çelik tel, levha ve şerit üreten endüstrilerde sıklıkla kullanılmaktadır. İşlemden sonraki nihai yapı, deforme olmuş orijinal tanecikler pahasına üretilen gerilimsiz tanelerden oluşur.

Yeniden kristalleşme tavlama sıcaklığı, malzemenin kimyasal bileşimine, önceki deformasyon miktarına, tutma süresine ve başlangıç tane boyutuna bağlıdır. Yeniden kristalleşmeyi sağlamak için minimum miktarda deformasyon gereklidir. Deformasyonun miktarı, kristalde yeterli sayıda kafes kusuru oluşacak şekilde olmalıdır. Bu kusurlar yeni tanelerin üretimi için çekirdeklenmeyi başlatır. Deformasyon derecesi ne kadar büyük olursa, yeniden kristalleşme sıcaklığı o kadar düşük olur. Bekleme süresinin arttırılmasıyla daha düşük sıcaklıklarda yeniden kristalleşme sağlanabilir. Ancak sıcaklığın etkisi bekletme süresinden daha baskındır. Bu nedenle tutma süresini arttırmak yerine yeniden kristalleşme sıcaklığının yükseltilmesi her zaman tercih edilir. Çeliğin ağır bir şekilde deforme edilmesi ve yeniden kristalleşme sıcaklığının hemen üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılmasıyla ince bir yapı geliştirilebilir. Yüksek karbonlu çelikler ve alaşımlı çelikler daha yüksek yeniden kristalleşme sıcaklıkları gerektirir. İşlem aynı zamanda karbür parçacıklarının topaklaşmasıyla da sonuçlanabilir (Rajan ve ark., 2011).

Proses Tavlama: Bu işlemde çelik, alt kritik sıcaklığın altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta yeterli süre tutulduktan sonra soğutulur. Kritik altı bir tavlama olduğundan soğuma hızının önemi çok azdır. Bu işlemin amacı, soğuk işlenmiş çeliğin sertliğini azaltmak ve sünekliğini arttırmaktır. Böylece daha sonraki işlemlerin kolaylıkla yapılabilmesine olanak sağlanmaktadır. Bu bir ara işlemdir ve bazen süreç içi tavlama olarak da adlandırılır. İşlem yeniden kristalleştirme tavlamasından daha ucuzdur. Soğuk işlenmiş çeliğin tamamen yeniden kristalleşmesinin bu işlemde gerçekleşip gerçekleşmeyebileceği anlamında yeniden kristalleştirme tavlamasından farklıdır. Damgalama, ekstrüzyon, yığma ve çekme gibi soğuk şekillendirme yoluyla üretilen parçalara sıklıkla bu işlem uygulanır (Rajan ve ark., 2011).

2.3.3. Küreselleştirme

Küreselleştirme, ferrit matrisinde karbür kürecikleri veya küresellerinden oluşan bir yapıyla sonuçlanan bir ısıtılma işlemi prosesisidir. Küreselleştirme derecesi ısıtılma işlemi sıcaklığına ve bekletme süresine bağlıdır. Arıtma sıcaklığı artırılarak işlem kısa sürede tamamlanabilir. Ancak uygun sıcaklığın seçimi çok önemlidir. Yüksek küreselleştirme sıcaklıklarında, çözünmüş karbür parçacıkları soğutma sırasında lamel şeklinde yeniden ortaya çıkabilir.

Küreselleştirilmiş bir yapı elde etmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Böyle bir yöntem, çeliğin alt kritik sıcaklığın hemen altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılmasını, bu sıcaklıkta uzun süre tutulmasını ve ardından yavaş yavaş soğutulmasını içerir. Başka bir yöntem, çeliğin dönüşümlü olarak alt kritik sıcaklığın hemen üstünde ve altında ısıtılmasını ve soğutulmasını içerir. Tüm karbür parçacıklarının şekli küresel hale gelinceye kadar işlem devam eder.

Küreselleştirme işlemi aynı zamanda çeliğin alt kritik sıcaklığın üzerine ısıtılmasıyla da gerçekleştirilir. Bu tamamen küreselleştirilmiş bir yapıyla sonuçlanır. Çeliğin alt kritik sıcaklığın üzerine ne kadar ısıtılacağı çeliğin kimyasal bileşimine bağlıdır. Ötektoid çelikler alt kritik sıcaklığın yaklaşık 20-30 °C üzerine ısıtılırken ötektoid üstü çelikler alt kritik sıcaklığın 30-50 °C üzerine ısıtılır. Ötektoid üstü alaşımlı çelikler daha da yüksek sıcaklıklar gerektirir. Orta karbonlu çelikler, düşük kritik sıcaklığın hemen üstüne veya altına ısıtılarak küreselleştirilebilir (Rajan ve ark., 2011).

2.3.4. Çeliğin sertleştirilmesi

Bazı uygulamalar, bileşenlerin ağır işlerde başarıyla kullanılabilmesi için yüksek çekme mukavemeti ve sertlik değerleri gerektirir. Sertleştirme olarak bilinen bir işlemle yüksek çekme mukavemeti ve sertlik değerleri elde edilebilir. Sertleştirme işlemi, genellikle sertleştirme sıcaklığı olarak bilinen önceden belirlenmiş bir sıcaklığa kadar ısıtmayı (Şekil 2.8), bu sıcaklıkta tutmayı ve ardından su, yağ veya tuz banyolarında söndürme gibi hızlı soğutmayı içerir. Bu işlemle geliştirilen yüksek sertlik, hızlı soğumaya eşlik eden faz dönüşümünden kaynaklanmaktadır. Hızlı soğutma terimi, soğutma hızının tavlama ve normalleştirmede benimsenen hızdan daha yüksek olduğu anlamına gelmez. Bunun gerçekte anlamı, soğutma hızının üst kritik soğutma hızına eşit veya daha fazla olmasıdır. Hızlı soğutma, östenitin oldukça düşük sıcaklıklarda denge

dışı ürüne dönüşmesine neden olur. Östenitin düşük sıcaklıkta dönüşümünün ürünü, çeliğin sert bir mikro bileşeni olan martenzittir. Bu işlemi diğer sertleştirme işlemlerinden ayırmak amacıyla su verme yoluyla sertleştirme terimi kullanılmaktadır.

Sertleşme sıcaklığı kimyasal bileşime bağlıdır. Sade karbonlu çelikler için bu yalnızca karbon içeriğine bağlıdır. Ötektoid altı çelikler üst kritik sıcaklığın yaklaşık 30-50 °C üzerine ısıtılırken, ötektoid ve ötektoid üstü çelikler alt kritik sıcaklığın yaklaşık 30-50 °C üzerine ısıtılır. Ötektoid altı çelikler için sertleşme sıcaklığında ferrit ve perlit, östenite dönüşür. Bu östenit, sertleşme sıcaklığından hızlı bir şekilde su vermeyle martenzite dönüşür. Martenzitin varlığı su verilmiş çeliğin yüksek sertliğini açıklar. Ötektoid altı çelik, ötektoid üstü çeliğine eşdeğer bir sertleşme sıcaklığına ısıtılırsa yapı ferrit ve östenitten oluşacaktır. Bu, su verme sırasında ferrit ve martenzite dönüşecektir. Çok yumuşak bir faz olan ferrit, sertleştirilmiş çeliğin sertliğini önemli ölçüde azaltır. Böylece sertleşmenin asıl amacı, yani gelişmiş mekanik özelliklerin elde edilmesi kaybolur. Bu aynı zamanda eksik sertleşme olarak da bilinir ve pratikte genellikle kullanılmaz. Ötektoid üstü çelik için tercih edilen sertleşme sıcaklığı, alt kritik sıcaklık (A_1) ile üst kritik sıcaklık (A_{cm}) arasındadır. Bu aralıktaki sertleştirme sıcaklığının sağladığı avantaj iki yönlüdür. Birincisi, sertleştirilmiş çelikte sementitin varlığıyla ilgilidir. Martenzitik bir matristeki sementit, arzu edilen birçok özelliğe sahiptir. Aşınma direnci bunlardan biridir. Hem martenzit hem de sementitin sert bileşenler olması, ortaya çıkan mikroyapının yüksek aşınma direncinden sorumludur. sementit, martenzitten daha serttir ve bu nedenle iki fazlı mikroyapının aşınma direnci, tek başına martenzit ile elde edilenden daha iyidir. Bu sertleşme sıcaklığının ikinci avantajı, son yapıda ince martenzitin elde edilmesidir. Aslında, ötektoid üstü çeliğin sertleşme için üst kritik sıcaklığın (A_{cm}) üzerine ısıtılması zararlıdır. Çünkü bu kadar yüksek bir sıcaklık, östenitik tanelerin kabalaşmasına ve yüzeyde dekarbürizasyona neden olur. Kaba östenit, zayıf mekanik özelliklere sahip olan kaba sivri martenzite dönüşecektir. Dekarbürleşmiş yüzey sertleştirme işlemine zayıf yanıt verir. Bu faktörlere ek olarak, bu kadar yüksek bir sıcaklıkta su verme, sertleştirilmiş çeliğe ciddi iç gerilimler uygulayacaktır (Rajan ve ark., 2011).

Çeliğin sertleşmeyle geliştirilen özellikleri çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler arasında önemli olanlar;

- a) Çeliğin kimyasal bileşimi,
- b) Çelik parçanın boyutu ve şekli,

- c) Sertleşme döngüsü, yani ısıtma hızı, sertleşme sıcaklığı, bekletme süresi ve soğuma hızı,
- d) Östenitin homojenliği ve tane boyutu,
- e) Soğutma ortamı,
- f) Çelik parçanın yüzey durumudur.

Bütün bu faktörler birbiriyle ilişkilidir. Aslında bu faktörler hemen hemen tüm ısıtma işlemi proseslerini etkiler ve östenitin dengesiz ürüne dönüşmesiyle sonuçlanan hızlı soğuma nedeniyle sertleştirme işlemi için büyük önem taşır.

Sertleştirme, su verme prosedürlerine bağlı olarak çelik bileşen üzerinde çeşitli şekillerde uygulanabilir. Sertleştirmeye dayalı çeşitli söndürme yöntemleri şunlardır:

1. Geleneksel veya doğrudan söndürme,
2. Farklı ortamlarda sırayla kademeli söndürme,
3. Püskürtmeli söndürme,
4. Kendi kendine temperleme ile söndürme,
5. Ostemperleme veya izotermal söndürme,
6. Martemperleme (kademeli söndürme) ile söndürmedir.

Çeliğin söndürülmesi, çeliğin uygun bir yüksek sıcaklıktan hızlı bir şekilde soğutulmasıdır. Bu genellikle sıcak çeliğin su (petrol, bitkisel veya hayvansal yağ; sulu polimer çözeltisi veya sulu (tuz) çözeltisi) gibi buharlaşabilen bir sıvıya daldırılmasıyla gerçekleştirilir. Bazen basınçlı hava kullanılmasına rağmen diğer söndürme ortamları arasında erimiş tuz, akışkan yatak veya gaz bulunur. Su verme işleminin bir sonucu olarak, üretim parçalarının su verilmiş haliyle kabul edilebilir bir mikroyapıya ve kritik alanlarda, parçalar temperlendikten sonra minimum spesifikasyonları karşılayacak mekanik özelliklere sahip olması gerekir. Söndürme işleminin etkinliği, çeliğin sertleşebilirliğine göre söndürme ortamının soğutma özelliklerine bağlıdır. Dolayısıyla sonuçlar, çelik bileşimi veya çalkalama, söndürme sıcaklığı veya söndürme ortamı değiştirilerek değiştirilebilir. Söndürme sisteminin tasarımı ve sistemin bakımının titizlikle yapılması prosesin başarısına katkıda bulunur. Parça tasarımı ayrıca belirli bir söndürme ve procesten kaynaklanacak mekanik özelliklere ve distorsiyona da katkıda bulunur (ASM Handbook, 2013).

2.3.5. Çeliğin kimyasal ısıt işlemleri

Kimyasal ısıt işlem, çekirdek ve çelik bileşenlerde farklı özelliklerin elde edilmesi için kullanılan işlemdir. Dış yüzeyin sert ve aşınmaya dayanıklı, iç çekirdeğin ise daha yumuşak ve tok olması gerekliliğinin olduğu durumlar vardır. Bu tür bir özellik kombinasyonu, bileşenin uzun hizmet ömrü sağlamak için yeterli aşınma direncine sahip olmasını ve aynı zamanda şok yüklere dayanacak kadar yeterli dayanıklılığa sahip olmasını sağlar. Bu tür bir kombinasyon temel olarak iki farklı yöntemle elde edilebilir. İlk yöntem termokimyasal işlem olarak bilinir çünkü çeliğin yüzey bileşimi karbon ve/veya nitrojenin difüzyonu (karbürleme ve nitrürlemede olduğu gibi) ve bazen diğer elementler tarafından değişir. İkinci yöntem, dış yüzeyin hızlı ısıtılması ve soğutulması (alevle sertleştirme, indüksiyonla sertleştirme, akışkan yatakla sertleştirme, elektron ışıını ve lazerle sertleştirme) yoluyla faz dönüşümünü içerir. Her iki yöntemin de amacı aynıdır. Yüzeyi sertleştirilmiş bileşenler arasında bilyalı ve konik yataklar, dişliler, burçlar, kaya delici uçları, kalıplar, tabanca namluları, kam milleri, krank pimleri, valf külbütör milleri ve akslar bulunur (Rajan ve ark., 2011).

Karbürleme: Karbon oranı düşük olan (%0,10 ile %0,25 arasında karbon içeren) çelik malzemelerin sertleştirilmesi için önemli olan konuların başında karbürleme gelmektedir. Gaz karbürleme, paket karbürleme, sıvı karbürleme, vakum karbürleme ve palazma karbürleme gibi yöntemlerle karbürleme işlemi gerçekleştirilir. Gaz karbürleme işlemi, en önemli karbürleme yönteminden biridir. Bu yöntemde düşük karbonlu çeliklerde östenitik mikroyapı üretmek için gereken sıcaklıklarda parçaların yüzey katmanlarında karbon çözündürülür. Karbonun kaynağı karbonca zengin fırın atmosferidir. Ortaya çıkan yüzey katmanları güçlü ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Paket karbürleme işleminde, katı bir bileşikten elde edilen karbon monoksit metal yüzeyinde yeni oluşan karbon ve karbondioksit ayrışır. Karbon metal tarafından emilir; karbon dioksit, saf karbon monoksit üretmek için katı karbürleme bileşiğindeki karbonlu malzemeyle hemen reaksiyona girer. Karbon monoksit oluşumu, karbürleme bileşiğinde mevcut olan baryum karbonat, kalsiyum karbonat, potasyum karbonat ve sodyum karbonat gibi enerji vericiler veya katalizörler tarafından sağlanır. Sıvı karbürleme işleminde siyanürlü veya siyanürsüz tuz banyoları kullanılarak yüzey sertleştirilir. Vakumlu karbürleme işleminde çelik, vakum altında östenitleştirilir, kısmi basınçta hidrokarbon gazıyla karbürlenir, daha sonra yağda veya gaz ortamında su verilir. Plazma karbürleme işlemi ise temel olarak yüzeyin altına daha sonra difüzyon için

karbon taşıyan iyonları çelik yüzeye vermek için akkor deşarj teknolojisini kullanan bir vakum işlemdir (Chandler, 1995). Genellikle karbürleme 900–930 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir ve yüzey katmanı yüzde 0,7–0,9'a kadar karbonla zenginleştirilir (Rajan ve ark., 2011).

Nitrürleme: Düşük karbonlu çeliklerin yüzeylerini sertleştirmek için nitrürleme yöntemleri de kullanılmaktadır. Nitrürleme; Al, Cr, Mo, V ve W gibi kararlı nitrür oluşturan elementler içeren alaşımlı çelikler için en etkili yöntemdir. Gaz nitrürleme, sıvı nitrürleme ve plazma nitrürleme gibi yöntemlerle nitrürleme işlemi yapılır. Gaz nitrürleme işleminde nitrojen, genellikle amonyak olan bir nitrojen gazı ile temas halinde A_1 'in altındaki bir sıcaklıkta katı bir demir alaşımının yüzeyine verilir. Sıvı nitrürleme, gaz nitrürleme çalışma sıcaklığında erimiş tuz banyosunda gerçekleştirilir. Yüzey sertleştirme ortamı, siyanür veya siyanat içeren erimiş, nitrojen taşıyan, erimiş tuz banyosudur. Plazma nitrürleme işleminde ise metale difüzyon için iş parçalarının yüzeylerine yeni oluşan (elemental) nitrojen verilir. Yüksek voltajlı elektrik enerjisi, nitrojen atomlarının iş parçalarına çarpması için hızlandırıldığı bir plazma oluşturur. İyon bombardımanı iş parçalarını ısıtır, yüzeyleri temizler ve aktif nitrojen sağlar (Chandler, 1995). Nitrürleme 590 °C'nin altındaki ferrit bölgesinde gerçekleştirilir. Yani nitrürleme sonrasında faz değişimi olmaz. Nitrürlemeden önce, çekirdeğin mukavemetini ve tokluğunu artıran beynitik yapıyı geliştirmek için çelik bileşenlere uygun ısıtma işlemi (930 °C'ye ısıtılarak sertleştirme ve yağda söndürme, ardından 650 °C'de temperleme) uygulanmalıdır. Tüm işleme ve taşlama işlemleri nitrürlemeden önce tamamlanır. Nitrürlenmeyecek kısımlar elektrolizle biriktirilen ince kalay kaplamayla kaplanır. Kaplama, yüzey gerilimi nedeniyle nitrojenin difüzyonunu kontrol eder. Nitrürlemede ısıtma işlemi süresi 21 saatten 100 saate kadar değişmektedir. Aslında bu, çelik parçaların boyutuna ve sertleştirme derinliğine bağlıdır (Rajan ve ark., 2011).

Düşük karbonlu çeliklerin ısıtma işlemi üzerine yapılmış çalışmalarda;

Adamczyk ve Grajcar (2007), çift fazlı ferrit-martenzitik yapı elde etmek amacıyla C-Mn çeliğinin ısıtma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Isıtma işlem parametrelerinin mikroyapıya ve çekme dayanımına etkisini araştırmışlardır. Başlangıçtaki yapının, elde edilen çift fazlı yapıdaki martenzitin morfolojisini esasen etkilediğini gözlemlemişlerdir. östenitin difüzyonsuz dönüşüm ürünlerinin çevresinde, yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip bir ferrit matris içinde bir ağ, ince lifler veya adalar halinde oluştuğunu belirtmişlerdir. Mukavemet ve süneklilik özelliklerinin en iyi

kombinasyonunu ince lif formunda martenzit içeren çeliklerden elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Akay ve ark. (2009), %0,055 C içeren çelik numuneleri öncelikle 910 °C’de 45 dakika tutularak normalize etmişlerdir ve havayla soğutmuşlardır. Bu numunelerin bir grubunu muhafaza etmişler ve geriye kalan numunelere ara ısıtma işlemi uygulamışlardır. Bu işlemde, numunelere 940 °C östenit bölgesinde 45 dakika tavlama işlemi uygulanmış ve ardından su ile soğutmuşlardır. Daha sonra bu numunelere 780, 825 ve 870 °C’de 60 dakika süreyle ara tavlama işlemi yapmışlar ve suyla soğutmuşlardır. Isıl işlemin mikroyapı, kristal yapıya ve elektrik direnci üzerine etkilerini araştırmışlardır. Ortaya çıkan mikroyapıların, çift fazlı çelikler olarak bilinen ferrit ve martenzite sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Martenzitin hacim oranının artan tavlama sıcaklığıyla arttığını belirlemişlerdir. XRD analiziyle çift fazlı çelik mikroyapıların kübik tetragonal martenzit kristal yapılarına sahip olduğunu analiz etmişlerdir. En düşük direncin (yaklaşık $8.48 \times 10^{-8} \Omega.m$), 780 °C’de ısıtma işlemi görmüş çift fazlı çelik numunelerden elde edildiğini belirtmişlerdir.

Santofimia ve ark. (2009), kalınlığı 1,2 mm olan ve ağırlıkça %1,1 Al içeren düşük karbonlu çeliği 5 °C/s ile 900 °C’ye kadar ısıtmışlar ve bu sıcaklıkta 10 dakika boyunca bekletmişlerdir. Kısmi martenzitik bir yapı elde etmek için gruplara ayırdıkları çelikleri 100 °C/s’de 125, 150 ve 175 °C’ye kadar soğutmuşlardır. Ardından numuneleri tekrar 250-350 °C’ye kadar ısıtmışlar ve bu sıcaklıklarda 3, 10 ve 100 s süreyle beklettikten sonra oda sıcaklığına getirmişlerdir. Farklı sıcaklık ve sürelerde yaptıkları ısıtma işlemin mikroyapıya etkisini analiz etmişlerdir. Optik ve taramalı elektron mikroskopu, elektron geri saçılımlı kırınım, miknatıslanma ölçümleri ve XRD yoluyla yapılan karakterizasyon işlemlerinin temperlemenin farklı aşamalarından sonra kritikler arası ferrit, epitaksiyel ferrit, tutulan östenit, beynit ve martenzitten oluşan çok fazlı bir mikroyapıdan oluştuğunu gözlemlemişlerdir. 350 °C’de 100 saniye süreyle ayrıştırılan numunelerde, önemli miktarda östenit oluştuğunu ifade etmişlerdir.

2.3.6. Temperleme

Sertleştirme işlemi çelikte maksimum sertlik, mükemmel aşınma direnci ve yüksek mukavemet seviyeleri geliştirir. Aynı zamanda süneklik, tokluk ve darbe dayanımı gibi özellikleri de olumsuz etkiler. Ayrıca su vermeyle oluşan iç gerilimler

nedeniyle çeliğe kırılmalık da kazandırır. Kırılmalığın derecesi kimyasal bileşime ve soğuma hızına bağıdır. Kırılmalık derecesi artan karbon içeriği ve soğuma hızının şiddetiyle artar. Bu nedenle, sertleştirilmiş durumdaki çelik, bazı hizmet koşulları için uygun değildir ve bu nedenle nadiren bu şekilde kullanılır. Çeliğe termal enerji sağlanarak nispeten kararlı bir duruma gelmesi sağlanabilir. Bu, iç gerilimlerin azalmasına ve kırılmalık derecesinin azalmasına neden olur. Sertleştirilmiş çeliğin alt kritik sıcaklığın altında ısıtılmasını, ardından havada veya istenen herhangi bir oranda soğutulmasını içeren böyle bir işlem, temperleme olarak bilinir (Rajan ve ark., 2011).

Temperleme işlemi sertleştirilmiş çeliğin sertliğini, mukavemetini ve aşınma direncini marjinal olarak azaltır. Bununla birlikte, bu marjinal kayıp, iç gerilimlerin hafifletilmesi, süneklik ve tokluğun yeniden sağlanması ve tutulan östenitin dönüştürülmesiyle elde edilen avantajlarla yeterince telafi edilir. Temperleme sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, geri kazanılan süneklik o kadar artar. Ancak sertlik, mukavemet ve aşınma direnci özelliklerine dikkat edilmelidir. Sertleştirme tedavisinin amacı budur. Uygun temperleme işlemi, mekanik özelliklerin optimum kombinasyonu ile sonuçlanır. Çeliğin elastik özellikleri de bu işlemde etkilenir. Sertleştirme ve ardından temperleme, çeliğin elastik limitini iyileştirmeye uygun tek geleneksel ısıtım işlemidir (Rajan ve ark., 2011).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tozaltı kaynağıyla birleştirilen içme suyu isale hatlarındaki St37 çelik borularda ısıtıl işlemin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için kaynak edilecek malzeme, spiral kaynaklı borunun tozaltı kaynağıyla üretimi, kaynaklı borudan numune çıkarma, numunelerin ısıtıl işlemi ve laboratuvar ortamında yapılan testler ayrı başlıklar altında detaylarıyla anlatılmıştır.

3.1. Kaynak Edilecek Malzeme

Dayanım, kaynağa uygunluk, korozyon direnci ve ekonomiklik gibi özelliklerinden dolayı fazla basınç gerektirmeyen boru hatlarında St37 çelik tercih edilmektedir. Bu yüzden, tozaltı kaynağı ile birleştirme işleminde 4 mm kalınlığa sahip rulo şeklinde St37 çelik malzeme kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. St37 çelik malzemesinin kimyasal ve mekanik özellikleri

<i>Kimyasal bileşim (ağırlıkça %)</i>							
C	Mn	P	S	Si	N	Cu	Fe
0,19	1,50	0,045	0,045	-	0,014	0,60	Kalan
<i>Mekanik özellikler</i>							
Çekme dayanımı						360-510 N/mm ²	
Akma dayanımı						235 N/mm ²	
Uzama						%24-26	

3.2. Spiral Kaynaklı Borunun Tozaltı Kaynağıyla Üretimi

St37 çelik malzemedan spiral kaynaklı boru elde etmek için rulo halindeki çelik malzemeye spiral sarım yöntemi ile hareket yaptırılmış ve rulo çelik malzemenin boru şekline gelmesi sağlanmıştır. Rulo çelik malzeme boru şekline getirilirken kaynak bölümüne ittirilen saca verilen açı oldukça önemlidir. Bu açı boru çapını belirler. Saca uygun açı verilerek spiral borunun Ø457 mm olması sağlanmış ve sacın birleştirme yerleri otomatik tozaltı kaynağıyla kaynatılarak birleştirilmiştir. Spiral borunun tozaltı kaynağıyla birleştirilmesinde kullanılan kaynak parametreleri Tablo 3.2’de ve tozaltı kaynağıyla yapılan üretim Şekil 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Kaynak parametreleri

<i>Parametreler</i>	Akım	Gerilim	Kaynak Hızı	Açısal Hız	Tel	Toz
<i>Birim & Marka</i>	Amper (A)	Volt (V)	cm/dak	cm/dak	Magmaweld	Magmaweld
<i>Değer & Bileşen</i>	400-450	32	180	60	2,5 mm S2	Bazık alaşımlı SF 304

**Şekil 3.1.** Tozaltı kaynağıyla spiral boru üretimi

2,5 mm S2 tozaltı kaynak teli, yapısında %0,09 C, %0,08 Si ve %1,10 Mn içeren bir tel olup, orta ve yüksek çekme dayanımına sahip olan yapı çelikleriyle basınçlı kap, kazan ve boru gibi ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir. Diğer taraftan, bazık alaşımlı SF 304 kaynak tozu St37 gibi yapı malzemeleriyle spiral ve boyuna kaynaklı bileşenler oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu yüzden St37 rulo malzemesi kullanılarak tozaltı kaynağı ile spiral boru üretiminde S2 tozaltı kaynak teli ve bazık alaşımlı SF304 kaynak tozu kullanılmıştır. S2 kaynak teli ve SF 304 kaynak tozu

kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantılarda, kaynak metalinin akma dayanımı 420 N/mm², çekme dayanımı 500 N/mm² ve uzaması %29'dur (Magmaweld, 2023)

Tozaltı kaynağı ile birleştirilen bağlantılarda optimum kaynak bağlantısı elde etmek için akım, gerilim, kaynak hızı, açısız hız parametrelerinin uygun bir değerde seçilmesi gerekmektedir. Değerin küçük seçilmesi az nüfuziyete sahip bir kaynaklı bağlantı elde edilmesine neden olabilirken, değerinden yüksek seçilmesi malzemenin eriyerek delinmesine neden olabilmektedir. Kaynak edilecek malzeme 4 mm kalınlığa sahip olduğundan dolayı kaynak işleminin yapıldığı firma tarafından önerilen akım, gerilim, kaynak hızı ve açısız hız parametrelerinin Tablo 3.2'deki gibi olması gerektiği belirtilmiş ve bu parametreler çerçevesinde kaynak işlemi yapılmıştır (Tekbor, 2023).

3.3. Kaynaklı Borudan Numune Çıkarma

Spiral kaynaklı borulardan lama tipi dikdörtgen kesitli çekme numuneleri elde etmek için spiral kaynaklı boru oksii-asetilen ile kesilmiştir. Kesme işlemi sonrası spiral kaynaklı parça, pres makinesinde düzeltilmiştir. Yapılan bu işlemlere ait görüntüler Şekil 3.2'de verilmiştir.



a) Oksii-asetilen ile kesme



b) Pres makinesinde düzeltme

Şekil 3.2. Spiral kaynaklı borunun kesilmesi ve düzeltilmesi

Düzeltilen spiral kaynaklı parçalar giyotin makasla genişliği 35 mm ve uzunluğu 200 mm olacak şekilde dikdörtgen kesitte kesilmiştir ve ardından freze tezgâhında kaynak bölgesi numunenin orta kısmına denk gelecek şekilde işlenerek çekme numunesi şekline getirilmiştir. Kesilen numuneler ve freze tezgâhında işlenmesine ait görüntüler Şekil 3.3'te verilmiştir.



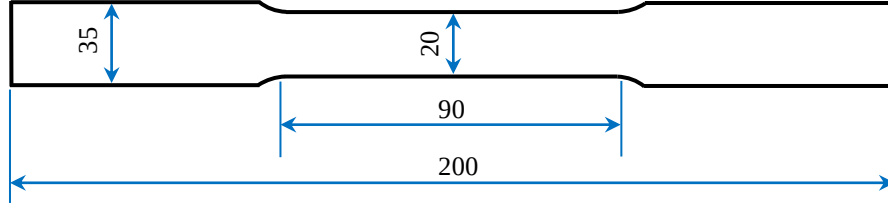
a) Dikdörtgen kesitte kesilmiş numuneler



b) Kesilmiş numunelerden freze tezgâhında çekme numunesi hazırlanması

Şekil 3.3. Kesilen kaynaklı numuneler ve freze tezgâhında çekme numunesine getirilmesi

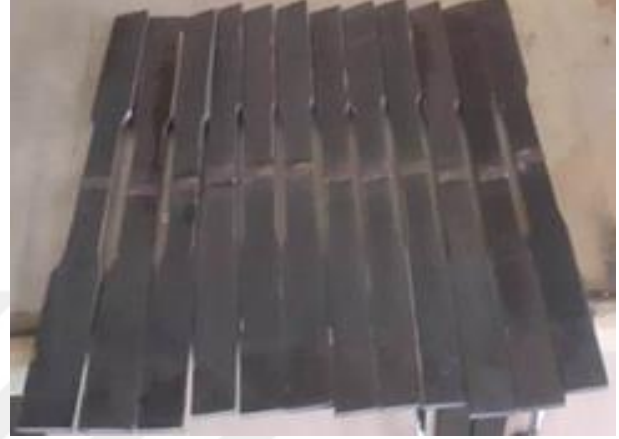
Kaynaklı numunelerde olduğu gibi kaynaklı numuneler de işlenerek çekme numunesi şekline getirilmiştir. Çekme numunelerine ait boyutlar Şekil 3.4'te, görüntüler ise Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Lama tipi dikdörtgen geometriye sahip çekme numunesinin boyutları



a) Kaynaksız numuneler



b) Kaynaklı numuneler

Şekil 3.5. Kaynaksız ve kaynaklı çekme numunelerine ait görüntüler

Böylece, 400 A ve 450 A akım değeriyle tozaltı kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin her birinden 12'şer adet ve kaynaksız bölgeden 12 adet numune olmak üzere toplam 36 adet çekme numunesi hazırlanmıştır.

3.4. Numunelerin Isıl İşlemi

Kaynaklı St37 çelik borularda ısıtıl işlemin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi inceleyebilmek için çekme numunesi şekline dönüştürülen numuneler, Ankara Akalın Isıl İşlem Fabrikasında sertleştirmek üzere gruplara ayrılmıştır. Yapılan işlemlerin gruplandırılması Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Çekme numunelerinin ısıtıl işlem için sınıflandırılması

Çekme Numunesi	Numune Sayısı			
	Isıl İşlemsiz	Isıl İşlemli (Sertlik)		
		30 HRC	45 HRC	60 HRC
Kaynaksız	3	3	3	3
400 amperle kaynak edilmiş	3	3	3	3
450 amperle kaynak edilmiş	3	3	3	3

Isıl işlem yapılacak olan tüm malzemelere sertlik kazandırmak için başta yapılacak ortak işlem olan ön ısıtma, IPSEN marka DM-1/M model meneviş fırınına sepet içerisinde malzeme alınarak başlatılmıştır. Doğalgaz ile çalışılan bu fırın yaklaşık 1 ton kapasitelidir. Düşük karbonlu St37 çelik numuneleri östenitik yapıya kısa sürede çıkarmak malzemelerde çarpılmaya ve kırılmaya sebep olacağından, daha yumuşak bir geçişle 1,5 saat boyunca numuneler 400-450 °C sıcaklıkta meneviş fırınında ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Daha sonra numuneler 900-930 °C sıcaklıkta olan DEGUSSA marka VSgr 150 model şarj fırınına sepet ile alınarak östenitik yapıya ulaşması için 13 saat bekletilmiştir. Bu bekleme sırasında ortama salınan propan gazıyla malzeme üzerine %1-1,2 oranında karbon püskürtülmüştür. Daha sonra fırın sıcaklığı 800-850 °C sıcaklığa düşürülerek difüzyon işleminin tamamlanması için yeterli süre sağlanmıştır. Bu sıcaklıkta ortamdaki karbon oranı %0,7-0,9 oranına düşürülmüş ve 3 saat boyunca bu sıcaklıkta beklenilmiştir. Malzeme yüzeyinde biriken karbonların malzeme içyapısına doğru difüze olması sağlanmıştır. Daha sonra numuneler fırının diğer bölümünde 65-85 °C sıcaklıkta bulunan yağ bölgesine çekilerek yağda soğutma işlemi ile sertleştirilmesi ve yapının martenzite dönüşmesi sağlanmıştır. Malzemelerin alacağı maksimum sertlik bu aşamada gerçekleşen hızlı soğuma sayesinde oluşmuştur.

Maksimum sertlik kazandırılan çekme numunelerinin yağ kalıntılarından arındırılması için çekme numuneleri ön yıkama bölümüne alınarak, 60-70 °C sıcaklığındaki su ve yıkama kimyasal karışımları ile yıkanmıştır. Bu yapılan işlemler ile teoride tavlama olarak bilinen ısıl işlem tamamlanmıştır. Tavlama işlemi sonrasında numunelerin sertlikleri ölçülerek ortalama 56-60 HRC arasında sertlik değerlerine ulaştığı görülmüştür.

Tavlama işlemi biten çekme numunelerindeki gerilimi almak, tokluğu arttırmak, içyapıyı düzenlemek ve sertliği arzu edilen değere getirmek gibi nedenlerden dolayı, çekme numuneleri 2 saat kadar belirli bir sıcaklıkta temperleme işlemine tabii tutulmuştur.

60 HRC sertlik elde etmek istenilen numuneler, nispeten daha düşük olan 200-250 °C sıcaklıktaki meneviş fırınında 2 saat bekletilmiş, daha sonra dışarıya alınarak oda sıcaklığında soğutulmuştur. Numunelerdeki sertlik, 56-60 HRC ölçülmüştür.

45 HRC sertlik elde etmek istenilen numuneler, 480-530 °C sıcaklıktaki meneviş fırınında 2 saat bekletilmiş, daha sonra dışarıya alınarak oda sıcaklığında soğutulmuştur. Ölçülen sertlik, 40-45 HRC değerinde çıkmıştır.

30 HRC sertlik elde etmek istenilen numuneler, daha yüksek olan 500-550 °C sıcaklıktaki meneviş fırınında 2 saat bekletilmiş, daha sonra dışarıya alınarak oda sıcaklığında soğutulmuştur. Numunelerin sertliği 28-30 HRC arasında ölçülmüştür.

Isıl işlem uygulamasının yapıldığı firma, yapılan işlemler ile ilgili sadece numuneler görünecek şekilde yakından görüntü almaya müsaade etmiştir. Isıl işlem uygulaması ve sertlik ölçümünden elde edilen görüntüler Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Isıl işlem uygulaması ve sertlik ölçümüne ait görüntüler

3.5. Laboratuvar Testleri

Isıl işlem görmüş ve görmemiş kaynaklı ve kaynaklı numunelerin Laboratuvar testleri Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü ve Merkezi Laboratuvarında bulunan cihazlarla gerçekleştirilmiştir.

Çekme testi Shimadzu marka çekme test cihazında yapılmış ve çekme deneylerinde numunelerin kavrama uçları arasında kalan gövde uzunluğu sabit tutulmuştur. Çekme deneyine ait görüntü Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Shimadzu marka çekme test cihazı

250 kN yük hücre kapasitesi ve 1 mm/dak çekme hızıyla yapılan deneylerde, numuneye kopuncaya kadar kuvvet uygulanmıştır ve uygulanan kuvvetler cihaza bağlı bilgisayar aracılığıyla kaydedilmiştir. Maksimum kuvvetin kesit alanına bölünmesiyle çekme gerilmesi hesaplanmıştır.

Mikrosertlik deneyi ve mikroyapı analizi için kaynak bölgelerinden numune kesimi yapılmıştır. Numune kesim işlemleri Presi Mecatome T260 kesme cihazında gerçekleştirilmiştir. Kesilen numunelerin hazır haline getirilebilmesi için epoksi içerisinde soğuk kalıplama işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonucunda numuneler, Presi Minitech 233 zımparalama ve parlatma cihazında 240’tan 1200 mesh’e kadar zımpara kâğıtları kullanılarak zımparalanmış ve ardından çuha ile parlatılmıştır. Parlatma işleminde 0,5 µm’lik elmas pasta kullanılmıştır.

Parlatılan numunelerin mikrosertlik ölçümleri AOB marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Numunelere 0,3 g yük uygulanmış ve numunelerin Vickers sertlik değerleri ölçülmüştür. Ölçümler, hem dikey doğrultuda hem de yatay doğrultuda 0,5

mm aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Yatay doğrultudaki ölçüm, sac kalınlığının merkezi referans alınarak ana malzemedan kaynak merkezine doğru yapılmıştır.

Parlatılan numunelerde mikroyapının optik mikroskopta görülmesi için numunelere dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlama işlemi %4 nital çözelti içerisinde yapılmıştır. Dağlanmış numunelerin mikroyapıları Leica DM2500 P model optik mikroskop ve Leica DFC450 C dijital kamera kullanılarak analiz edilmiştir.

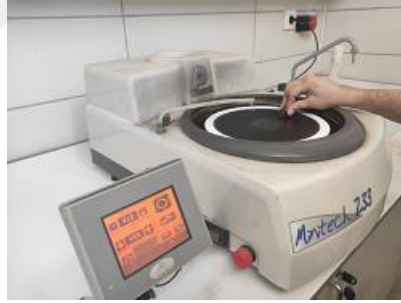
Kaynak bölgesinden numune kesimi, kesilen numunelerin soğuk kalıplama işlemine tabi tutulması, parlatılması, sertlik ölçümü ve optik mikroskop analiz aşama süreçlerini gösteren görüntüler Şekil 3.8’de verilmiştir.



a) Numune kesimi



b) Soğuk kalıplama



c) Zımparalama



d) Parlatılmış numuneler



e) Mikrosertlik ölçümü



f) Optik mikroskop analizi

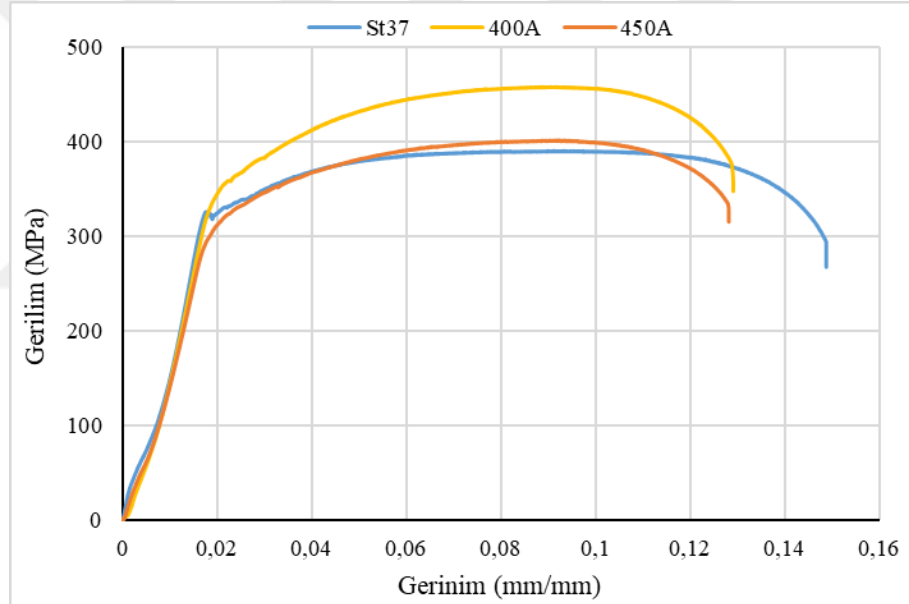
Şekil 3.8. Sertlik deneyi ve mikroyapı analizi için numune hazırlama aşamaları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tozaltı kaynağıyla birleştirilen içme suyu isale hatlarındaki St37 çelik malzemelerin ve bu malzemelere uygulanan ısıtıl işlemin çekme dayanımına etkisi başlık 4.1’de, yatay ve dikey eksenindeki sertliğe etkisi başlık 4.2’de ve mikroyapıya etkisi ise başlık 4.3’te verilmiştir.

4.1. Çekme Testi Sonuçları

Deneysel çalışmada kullanılan St37 çelik malzemenin ve tozaltı kaynağı ile 400 ve 450 A akım değerlerinde kaynak edilmiş St37 çelik malzemelerin çekme testinden elde edilen maksimum gerilim-gerinim grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Kaynaksız (St37) ve 400-450 A akım değerlerinde kaynak edilmiş çelik numunelerin gerilim-gerinim grafiği

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi kaynaksız St37 çelik malzemenin yaklaşık gerilim değeri 390 MPa, yaklaşık gerinim değeri ise 0,15 mm/mm’dir. 400 ve 450 A akım değerleriyle birleştirilmiş St37 çelik malzemelerin yaklaşık gerilim değerleri sırasıyla 458 MPa ve 401 MPa iken, yaklaşık gerinim değerleri ise sırasıyla 0,130 mm/mm ve 0,129 mm/mm olarak elde edilmiştir. Kaynaksız numuneye göre kaynaklı numunelerin daha fazla çekme yüküne dayandığı, ancak daha kısa uzama mesafelerinde koptuğu görülmüştür. Bu durum, kaynak işlemi sırasında ısı girdisine bağlı olarak yapıdaki değişikliklerden kaynaklandığı yorumlanabilir. Akım, kaynak nüfuziyetinde en büyük

katkıya sahip temel bir kaynak parametresidir (Singh ve Singh, 2020; Singh ve ark., 2020), çünkü akım değerinin artması ısı girdisini arttırmaktadır. Akımdaki artışın çekme dayanımını üzerindeki etkileri konusunda farklı görüşler bulunmaktadır. Sharma ve ark. (2020), ark gerilimi veya kaynak akımı arttıkça çekme ve darbe dayanım değerlerinin azaldığını, Sridhar ve ark. (2020), kaynak akımı ve gerilimi arttıkça kaynak nüfuziyetinin ve kaynak dikiş bindirme alanının arttığını ve buna bağlı olarak kaynaklı bağlantılardaki çekme özelliğinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

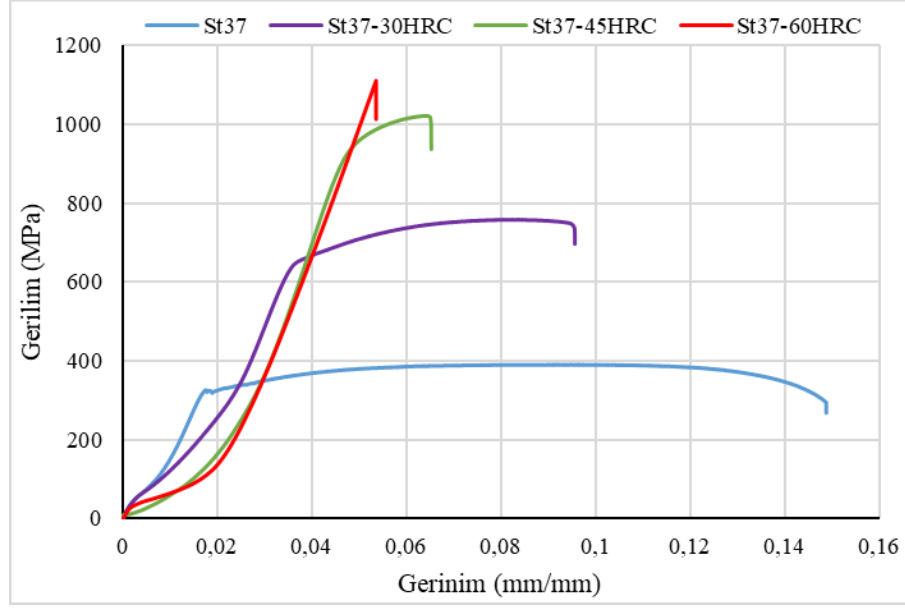
Kaynaksız ve tozaltı kaynağı ile 400 ve 450 A akım değerlerinde kaynak edilmiş St37 çelik malzemelerin çekme testi sonucu elde edilen kopma bölgeleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Çekme testi sonucu kaynaksız (St37) ve 400-450 A akım değerlerinde kaynak edilmiş çelik numunelerde kopma görüntüleri

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere kaynaklı ve kaynaksız numunelerde kopmalar çekme testi cihazının çeneye bağlantı noktasına yakın yerden, ana malzemedan gerçekleşmiştir. Kaynak bölgesinden kopmanın meydana gelmemesi, 400 ve 450 A akım değeriyle birleştirilmiş kaynaklı bağlantıların iyi bir kaynak nüfuziyetine sahip olmasının göstergesidir. Diğer taraftan kopma bölgeleri incelendiğinde, numunelerin önce boyun verdiği ve daha sonra koptuğu görülmektedir. Kaynaksız numunenin kaynaklı numunelere göre daha fazla boyun verdiği açıktır. Bu da Şekil 4.1’deki gerilim-gerinim grafiğinde açıkça görülmektedir.

Kaynaksız St37 çelik malzemedede sertleştirme ısı işlemine bağlı çekme testinden elde edilen maksimum gerilim-gerinim grafiği Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Kaynaksız St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemlerine ait gerilim–gerinim grafiği

Şekil 4.3 incelendiğinde, kaynaksız St37 çeliğine uygulanan sertleştirme ısı işlemine bağlı yapılan sınıflandırmada; 60 HRC sertlik değerine sahip numunenin yaklaşık gerilim değeri 1110 MPa, 45 HRC sertlik değerine sahip numunenin yaklaşık gerilim değeri 1021 MPa ve 30 HRC sertlik değerine sahip numunenin yaklaşık gerilim değeri ise 758 MPa'dır. Ayrıca bu numunelerin yaklaşık gerinim değerleri ise sırasıyla 0,054 mm/mm, 0,065 mm/mm ve 0,096 mm/mm olarak elde edilmiştir. Isıl işlem uygulanıp, sertlik kazandırılan St37 çeliklerin ısı işlemsiz St37 çeliklere göre daha fazla çekme yüküne dayandığı, ancak ısı işlem ile yoğun ısı girdisi olduğu için daha kırılgan yapıya dönüştüğü ve dolayısıyla daha kısa uzama mesafelerinde koptuğu yorumu çıkarılabilir. Sertleştirme ısı işlemi kaynaksız St37 çeliğinin çekme dayanımını %194~285 arasında arttırmış, gerinim değerini ise %36~64 arasında düşürmüştür.

Kaynaksız St37 çelik malzemede sertleştirme ısı işlemine bağlı çekme testi sonucu elde edilen kopma bölgeleri Şekil 4.4'te verilmiştir.

Şekil 4.4 incelendiğinde, 30 HRC sertliğe sahip numune hariç 45 ve 60 HRC sertliğe sahip numunelerin, ısı işlemsiz numune gibi çekme testi cihazının çeneye bağlantı noktasına yakın yerden koptuğu görülmektedir. Kopma bölgeleri incelendiğinde, ısı işlemsiz numune önce boyun vermiş ve daha sonra koparak sünek davranış sergilemiştir. Sertleştirilmiş numunelerde ise sertleştirme ısı işlemine bağlı olarak boyun verme ortadan kalkmış ve numuneler gevrek davranış sergilemiştir.

Kaynaksız ve
sertleştirilmemiş
St37

Kaynaksız, 30
HRC sertliğe
sahip St37

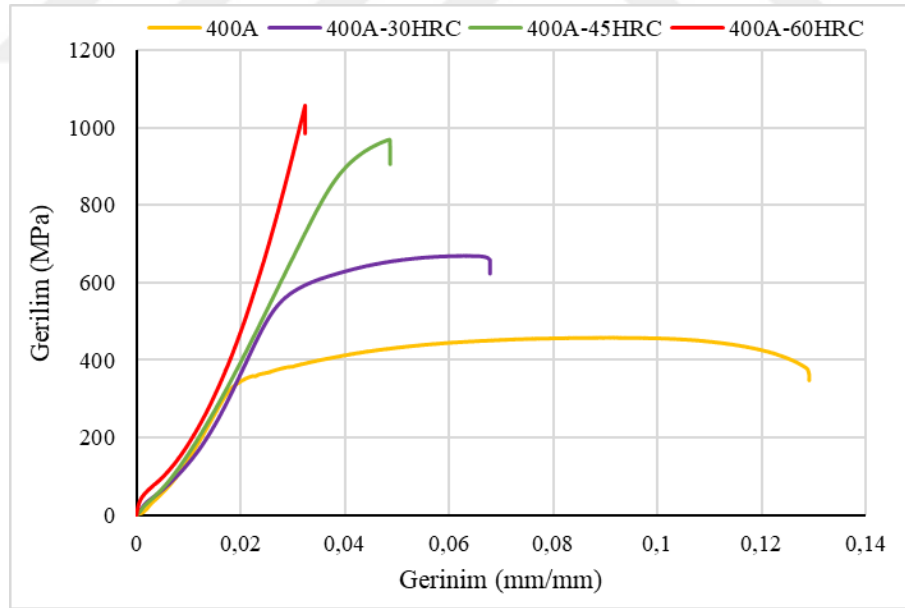
Kaynaksız, 45
HRC sertliğe
sahip St37

Kaynaksız, 60
HRC sertliğe
sahip St37



Şekil 4.4. Çekme testi sonucu kaynaksız ve sertleştirme ısı işlemi görmüş St37 çelik numunelerde kopma görüntüleri

400 A akım değeri ile tozaltı kaynağı ile birleştirilmiş St37 çelik malzemede sertleştirme ısı işlemine bağlı çekme testinden elde edilen maksimum gerilim-gerinim grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. 400 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemlerine ait gerilim-gerinim grafiği

Şekil 4.5'te, 400 A akım değeriyle birleştirilmiş St37 çeliğine uygulanan sertleştirme ısı işlemine bağlı yapılan sınıflandırmada; 60 HRC sertlik değerine sahip numunenin yaklaşık gerilim değeri 1057 MPa, 45 HRC sertlik değerine sahip numunenin yaklaşık gerilim değeri 970 MPa ve 30 HRC sertlik değerine sahip

numunenin yaklaşık gerilim değeri ise 670 MPa'dır. Ayrıca bu numunelerin yaklaşık gerilim değerleri ise sırasıyla 0,033 mm/mm, 0,049 mm/mm ve 0,068 mm/mm olarak elde edilmiştir. 400 A akım değeri ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantının çekme dayanımı (458 MPa) kaynaklı St37 çeliğin çekme dayanımından (390 MPa) yüksek olmasına rağmen, 400 A akım değeri ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantılarda sertleştirme ısı işlemine bağlı elde edilen gerilim değerleri kaynaklı numunelerinkinden %3~6 arasında düşük elde edilmiştir. Sertleştirme ısı işlemi 400 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinin çekme dayanımını yaklaşık %146~230 arasında arttırmış, gerilim değerini ise yaklaşık %25~53 arasında düşürmüştür.

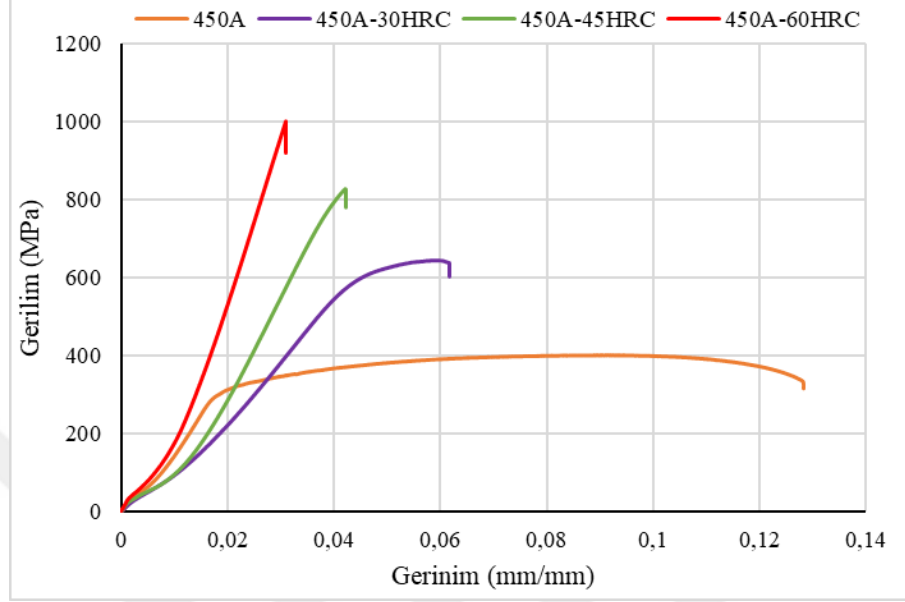
400 A akım değeriyle birleştirilmiş St37 çelik malzemede sertleştirme ısı işlemine bağlı çekme testi sonucu elde edilen kopma bölgeleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Çekme testi sonucu 400 A akım değerinde birleştirilmiş ve sertleştirme ısı işlemi görmüş St37 çelik numunelerdeki kopma görüntüleri

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi ısı işlemisiz numunede kopma, çekme testi cihazının çeneye bağlantı noktasına yakın yerde sünek olarak gerçekleşmişken, sertleştirilmiş numunelerde ise kopma kaynak bölgesinden gevrek olarak gerçekleşmiştir. Kaynaklı numunelerde ısı işlemi ile ikinci defa ısı girdisi olduğu, buna bağlı olarak kopma noktalarının kaynak bölgesine doğru kaydığı ve ITAB'da meydana geldiği görülmüştür. Kopmanın ITAB'da meydana gelmesi, 400 A akım ile kaynak edilen sertleştirme ısı işlemli numunelerin, kaynaklı ve sertleştirme ısı işlemine maruz kalan numunelere göre daha düşük çekme dayanımı sergilemesine neden olmuştur.

450 A akım değeri ile tozaltı kaynağı ile birleştirilmiş St37 çelik malzemede sertleştirme ısıl işlemine bağlı çekme testinden elde edilen maksimum gerilim-gerinim grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. 450 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısıl işlemlerine ait gerilim–gerinim grafiği

Şekil 4.7’de, 450 A akım değeriyle birleştirilmiş St37 çeliğine uygulanan sertleştirme ısıl işlemine bağlı yapılan sınıflandırmada; 60 HRC sertlik değerine sahip numunenin yaklaşık gerilim değeri 1001 MPa, 45 HRC sertlik değerine sahip numunenin yaklaşık gerilim değeri 829 MPa ve 30 HRC sertlik değerine sahip numunenin yaklaşık gerilim değeri 646 MPa’dır. Ayrıca bu numunelerin yaklaşık gerinim değerleri ise sırasıyla 0,031 mm/mm, 0,042 mm/mm ve 0,062 mm/mm olarak elde edilmiştir. 450 A akım değeri ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantının çekme dayanımı (401 MPa) kaynaklı St37 çeliğin çekme dayanımından (390 MPa) yüksek olmasına rağmen, 400 A akım değeri ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantılarda olduğu gibi 450 A akım değeri ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantılarda da sertleştirme ısıl işlemine bağlı elde edilen gerilim değerleri kaynaklı numunelerinkinden düşük elde edilmiştir. Sertleştirme ısıl işlemi 450 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinin çekme dayanımını yaklaşık %160~250 arasında arttırmış, gerinim değerini ise yaklaşık %24~48 arasında düşürmüştür.

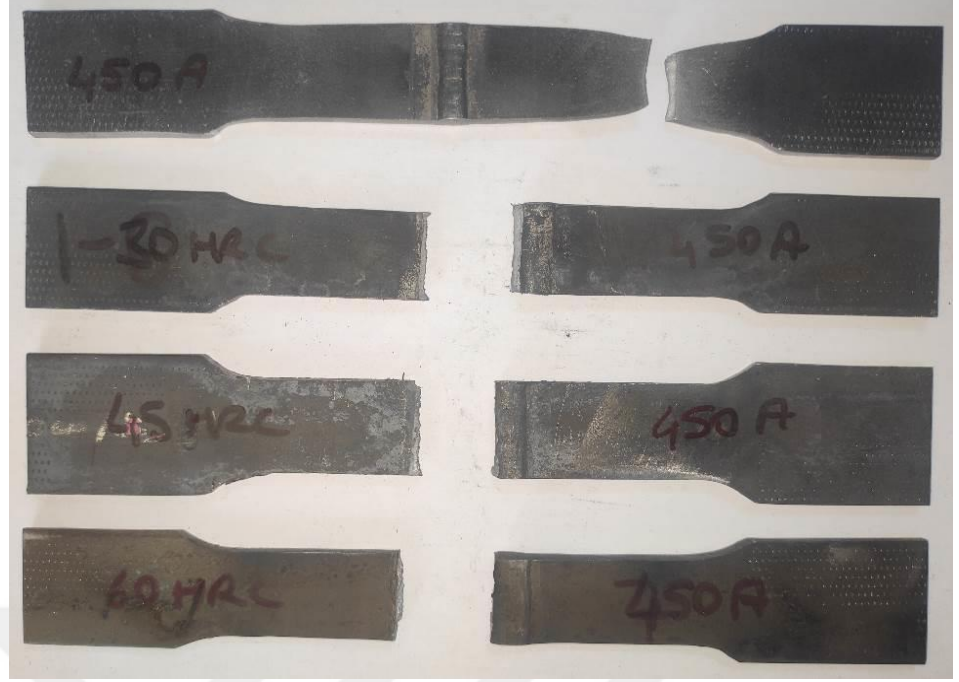
450 A akım değeriyle birleştirilmiş St37 çelik malzemede sertleştirme ısıl işlemine bağlı çekme testi sonucu elde edilen kopma bölgeleri Şekil 4.8’de verilmiştir.

450 amperde
kaynak edilmiş,
sertleştirilmemiş
St37

450 amperde
kaynak edilmiş,
30 HRC sertliğe
sahip St37

450 amperde
kaynak edilmiş,
45 HRC sertliğe
sahip St37

450 amperde
kaynak edilmiş,
60 HRC sertliğe
sahip St37



Şekil 4.8. Çekme testi sonucu 450 A akım değerinde birleştirilmiş ve sertleştirme ısı işlemi görmüş St37 çelik numunelerde kopma görüntüleri

Şekil 4.8’de, 450 A akım değeriyle birleştirilmiş ve ısı işlemine maruz kalan numunelerin çekme testi sonucu elde edilen kopma bölgeleri, Şekil 4.6’daki 400 A akım değeriyle birleştirilmiş ve ısı işleme maruz kalan numunelerin çekme testi sonucu elde edilen kopma bölgelerine benzer olduğu görülmüştür. Sertleştirme ısı işlemi görmemiş numunede kopma, çekme testi cihazının çeneye bağlantı noktasına yakın yerde sünek olarak gerçekleşmiştir. Sertleştirilmiş numunelerde ise kopma kaynak gölgesinden gevrek olarak gerçekleşmiştir.

Tüm çekme testi sonuçlarından elde edilen gerilim–gerinim değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Çekme testi sonuçlarından elde edilen gerilim–gerinim değerleri

Isıl İşlem	Kaynaksız		400 A		450 A	
	Gerilim (MPa)	Gerinim (mm/mm)	Gerilim (MPa)	Gerinim (mm/mm)	Gerilim (MPa)	Gerinim (mm/mm)
Isıl işlemsiz	390,8031	0,148829	458,1678	0,129143	401,8923	0,128221
30 HRC	758,3841	0,095664	669,5774	0,067879	645,7681	0,061714
45 HRC	1021,341	0,065307	969,6725	0,048722	828,6105	0,04225
60 HRC	1110,568	0,053643	1057,478	0,032383	1001,468	0,030936

Genel itibariyle ısı işlem, gerilim değerleri açısından olumlu sonuçlar vermiştir ve malzeme daha fazla çekme yüküne maruz kaldığında dayanımının artmasına katkı

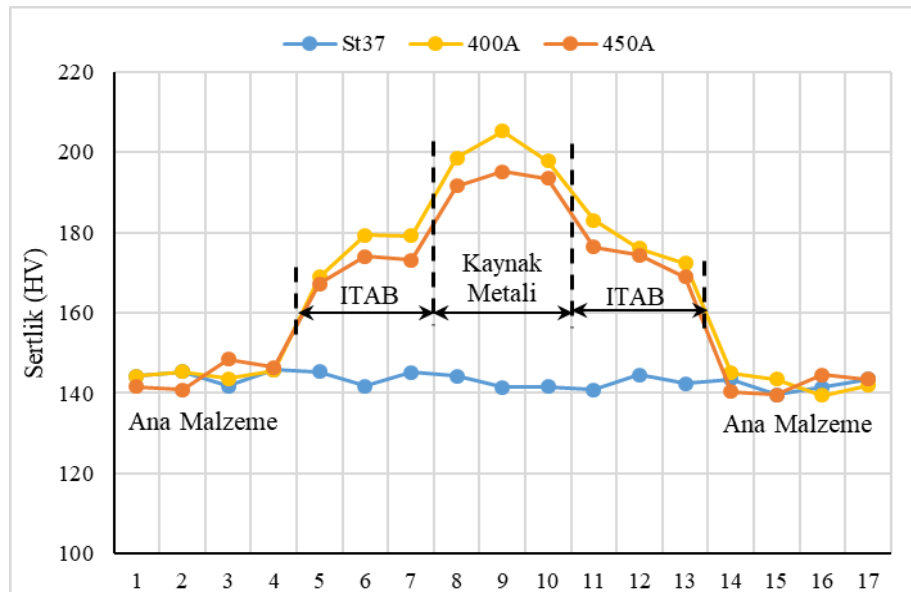
sağlamıştır. Ters orantılı olarak malzemenin sertliği arttıkça, gerinim değerlerinin azaldığı, çekme yüküne bağlı olarak yüksek sertliklerde malzemenin daha kırılgan yapıya dönüştüğü ve daha kısa uzamalarda koptuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 400 A akım değeriyle birleştirilmiş kaynaklı numunelerin dayanımları, 450A akım değeriyle birleştirilmiş kaynaklı numunelerin dayanımlarına göre daha yüksek çıkmış, ancak gerinim değerleri kısmen düşmüştür. St37 çelik malzemenin kaynağı için kullanılan iki farklı akım değerinden 400 A akım değerinin çekme dayanımı için daha olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Uygulanan ısı işlemler neticesinde maksimum gerilim değerleri, kaynaklı numunelerde 1110 MPa, 400 A akım değeriyle birleştirilmiş kaynaklı numunelerde 1057 MPa ve 450 A akım değeriyle birleştirilmiş kaynaklı numunelerde 1001 MPa olarak elde edilmiştir.

4.2. Sertlik Sonuçları

4.2.1. Yatay sertlik sonuçları

Deneysel çalışmada kullanılan St37 çelik malzeme ile tozaltı kaynağıyla 400 ve 450 A akım değerlerinde birleştirilmiş kaynaklı bağlantılarda, ana malzemeden kaynak merkezine – kaynak merkezinden ana malzemeye doğru yatay ekseninde ölçülen sertlik değerlerinin değişim grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Kaynaklı (St37) ve tozaltı kaynağı ile farklı akım değerlerinde birleştirilmiş çelik numunelerde yatay eksenindeki sertlik değişimi

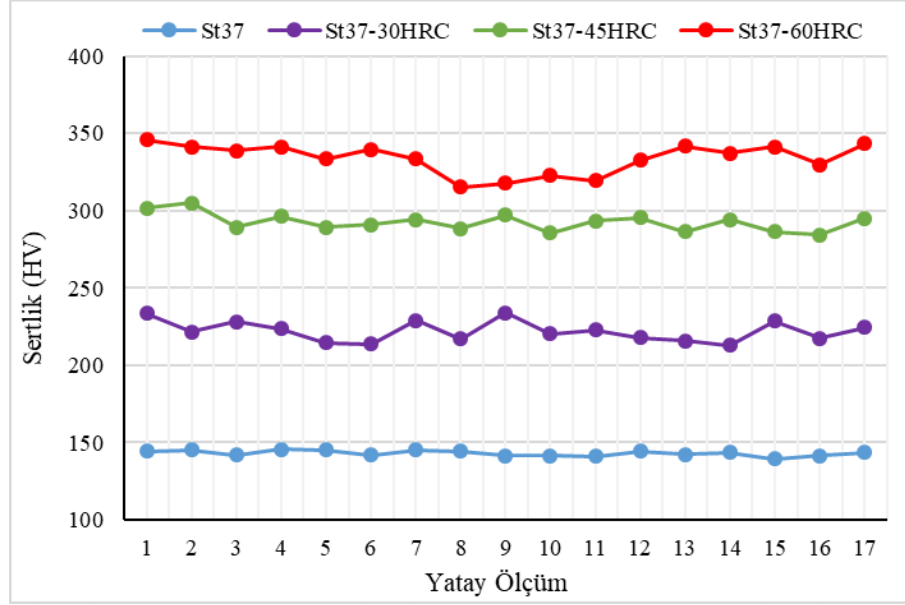
Şekil 4.9’da grafiksel olarak gösterilen St37 çelik malzeme ile tozaltı kaynağı ile 400 ve 450 A akım değerlerinde birleştirilmiş kaynaklı bağlantılardan elde edilen yatay sertlik ölçüm sonuçlarına bağlı olarak;

- ✓ Ana malzemedan kaynak metaline doğru gittikçe sertlik değeri artmıştır.
- ✓ Ana metalin sertliği 140~147 HV arasında ölçülmüştür.
- ✓ 400 A akım ile birleştirilmiş malzemelerin ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinden ölçülen sertlik değerleri 450 A akımla birleştirilmiş malzemeninkinden kısmen yüksek ölçülmüştür.
- ✓ 400 A akımla birleştirilen malzemenin ısı tesiri altındaki bölgesinden ölçülen sertlik değerleri 168~183 HV arasında, kaynak metalinden ölçülen sertlik değerleri 197~205 HV arasındadır.
- ✓ Diğer taraftan 450 A akım değeriyle birleştirilen malzemenin ısı tesiri altındaki bölgesinden ölçülen sertlik değerleri 167~177 HV arasında, kaynak metalinden ölçülen sertlik değerleri ise 191~195 HV arasındadır.

Bu sonuçlara göre kaynaksız numunenin farklı noktalarından yapılan yatay sertlik ölçümlerine göre, numunenin kendi içinde sertlik açısından çok değişiklik göstermediği yorumu çıkarılmaktadır. Kaynaklı numunelerde ise, kaynak bölgesinde ısı girdisi sebebiyle ana malzemeye göre maksimum sertlikler elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalar, özellikle akımdaki artışın sertliği arttırdığı yönünde görüş içermektedir (Vedrtnam ve ark., 2018; Sharma ve ark., 2020). Deneysel çalışmalarımızdan elde ettiğimiz sertlik sonuçlarına göre artan akım değeri, sertliğin azalmasına neden olmuş ve bu kapsamda literatür çalışmalarından farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durumun kaynak edilen malzeme içerisindeki karbon oranı ve ısı girdisine bağlı olarak malzemenin mikroyapısındaki değişikliği ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Kaynak metalinden daha yüksek sertlik ölçülen numunenin çekme dayanımının daha yüksek olması elde edilen sonuçların uygun olduğunu göstermektedir.

Kaynaksız St37 çelik malzemede sertleştirme ısı işlemine bağlı olarak numune kesit merkezinden yatay ekseninde ölçülen sertlik değerlerinin değişim grafiği Şekil 4.10’da verilmiştir.



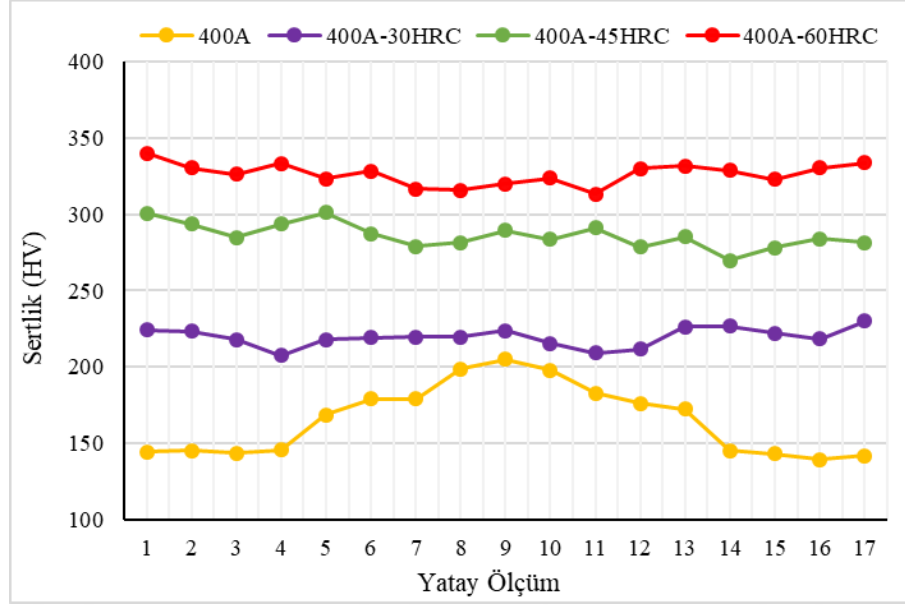
Şekil 4.10. Kaynaksız St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemlerine bağlı yatay eksenindeki sertlik değişimi

Şekil 4.10'da kaynak edilmemiş ve farklı sertleştirme ısı işlemine maruz bırakılmış numunelerin kesit merkezinin yatay ekseninden elde edilen sertlik sonuçlarına bağlı olarak;

- ✓ Sertleştirme ısı işlemi uygulanmayan St37 çeliğinde ölçülen minimum sertlik değeri 139,6 HV iken maksimum sertlik değeri 145,8 HV'dir.
- ✓ Sertleştirme ısı işlemi ile birlikte numune kesit merkezinde yatay ekseninde ölçülen sertlik değeri artmıştır. 60 HRC sertliğe sahip malzemenin merkezinden yatay ekseninde ölçülen sertlik değerleri en yüksek elde edilmiştir. Ölçülen sertlik değerleri 315,2~346,1 HV arasındadır.
- ✓ 45 HRC sertliğe sahip malzemenin merkezinden yatay ekseninde ölçülen minimum sertlik değeri 284,4 HV, maksimum sertlik değeri 305,2 HV'dir.
- ✓ 30 HRC sertliğe sahip malzemenin merkezinden yatay ekseninde minimum ve maksimum ölçülen sertlik değerleri ise sırasıyla 213,1 HV ve 233,8 HV'dir.

Bu sonuçlara göre ısı işlemle malzemeye sertlik kazandırıldığı net bir şekilde ifade edilebilir. Aynı numunelerin farklı noktalarından yapılan yatay sertlik ölçümlerine göre, numunenin kendi içinde sertlik açısından çok değişiklik göstermediği yorumu çıkarılabilir.

400 A akım değeri ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantılarda sertleştirme ısı işlemine bağlı olarak numune kesit merkezinden yatay ekseninde ölçülen sertlik değişim grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir.



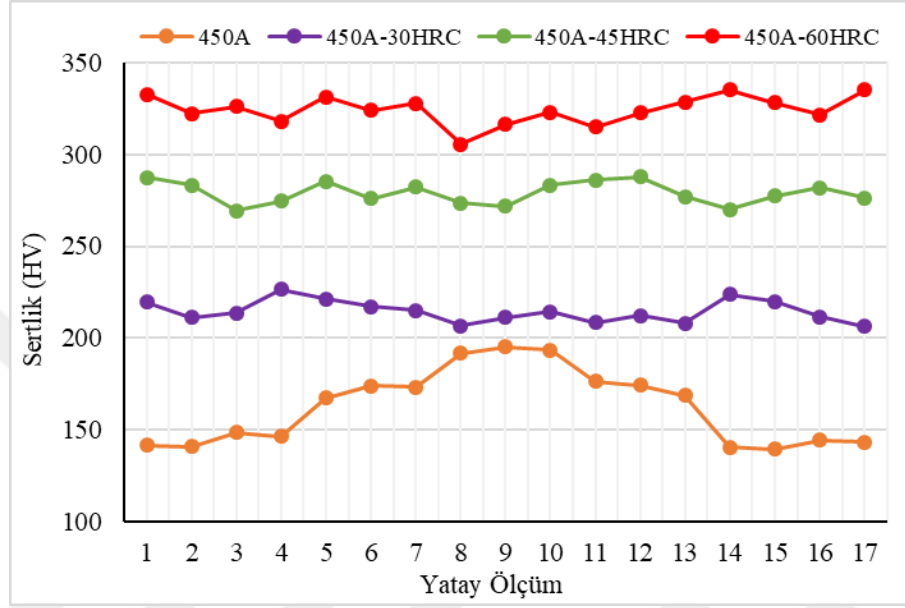
Şekil 4.11. 400 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısı işlemine bağlı yatay eksenlerdeki sertlik değişimi

Şekil 4.11’de 400 A akım değeri ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantılarda sertleştirme ısı işlemine bağlı olarak numunelerin kesit merkezinden yatay eksenlerde ölçülen sertlik sonuçlarına göre;

- ✓ Sertleştirme ısı işlemi uygulanmayan ve 400A akım değeriyle birleştirilen kaynaklı bağlantılarda minimum sertlik değeri ana malzemeden 139,5 HV elde edilmiştir. Kaynak metaline gittikçe sertlik artmıştır. Kaynak metalinden ölçülen maksimum sertlik değeri 205,2 HV’dir.
- ✓ Sertleştirme ısı işlemi uygulanmış kaynaklı bağlantılarda, ana malzemede ölçülen sertlik ile kaynak metalinde ölçülen sertlik benzerlik göstermiştir. 30 HRC sertlik değerine sahip numunelerin sertliği, sertleştirme ısı işlemi uygulanmamış kaynaklı bağlantıdaki kaynak metalinden ölçülen sertlikten kısmen yüksek elde edilmiştir.
- ✓ 30 HRC sertliğe sahip malzemenin merkezinden yatay eksenlerde minimum ve maksimum ölçülen sertlik değerleri sırasıyla 207,7 HV ve 230,1 HV’dir.
- ✓ 45 HRC sertliğe sahip malzemenin merkezinden yatay eksenlerde ölçülen minimum sertlik değeri 269,8 HV, maksimum sertlik değeri 301,3 HV’dir.
- ✓ 60 HRC sertliğe sahip malzemenin merkezinden yatay eksenlerde ölçülen sertlik değerleri en yüksek elde edilmiştir. Ölçülen sertlik değerleri 313,1~340,1 HV arasındadır.

Sertleştirme ısıl işlemi ile malzemeye sertlik kazandırıldığı ve kaynak metalindeki sertliğin ana malzeme sertliğine çıkartıldığı görülmektedir.

450 A akım değeri ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantılarda sertleştirme ısıl işlemine bağlı olarak numune kesit merkezinden yatay ekseninde ölçülen sertlik değişim grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. 450 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısıl işlemlerine bağlı yatay eksenindeki sertlik değişimi

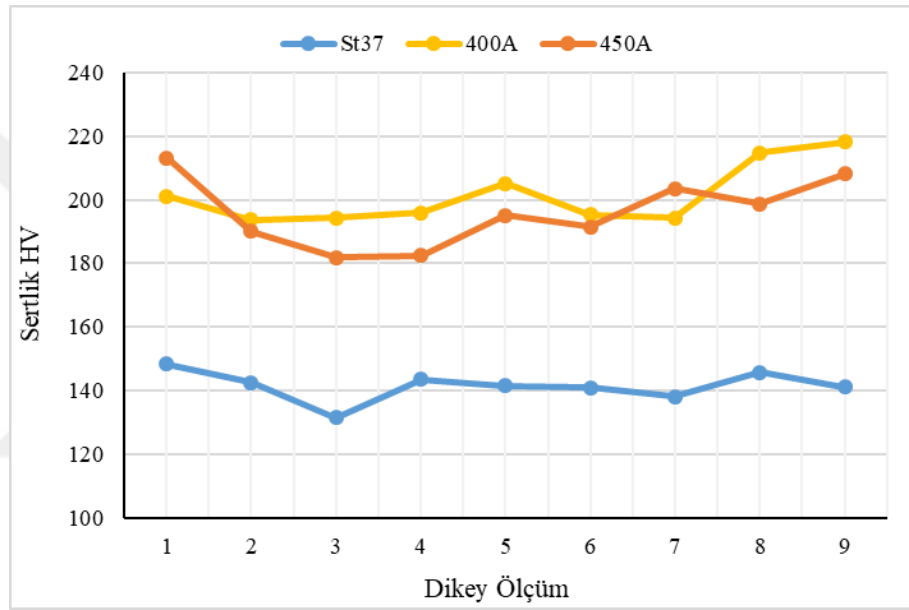
Şekil 4.12’de verilen grafiğe göre;

- ✓ Sertleştirme ısıl işlemi uygulanmayan ve 450A akım değeriyle birleştirilen kaynaklı bağlantılarda minimum sertlik değeri ana malzemedan 139,6 HV elde edilmiştir. Kaynak metaline gittikçe sertlik artmıştır. Kaynak metalinden ölçülen maksimum sertlik değeri 195,1 HV’dır.
- ✓ Sertleştirme ısıl işlemi uygulanmış kaynaklı bağlantılarda, ana malzemede ölçülen sertlik ile kaynak metalinde ölçülen sertlik benzerlik göstermiştir.
- ✓ 30 HRC sertliğe sahip malzemenin merkezinden yatay ekseninde ölçülen sertlik değerleri 206,4~226,5 HV arasındadır.
- ✓ 45 HRC sertliğe sahip malzemenin merkezinden yatay ekseninde ölçülen sertlik değerleri 269,2~287,7 HV arasındadır.
- ✓ 60 HRC sertliğe sahip malzemenin merkezinden yatay ekseninde ölçülen sertlik değerleri ise 305,6~335,3 HV arasındadır.

450 A akım değeri ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantılarda sertleştirme ısı işlemine bağlı numunelerin kesit merkezinden yatay ekseninde ölçülen sertlik sonuçları, 400 A akım değeri ile birleştirilmiş numunelerinki ile benzerlik göstermiştir.

4.2.2. Dikey sertlik sonuçları

St37 çelik malzeme ile tozaltı kaynağıyla 400 ve 450 A akım değerlerinde birleştirilmiş kaynaklı bağlantılarda, numune kesitinden dikey ekseninde ölçülen sertlik değerlerinin değişim grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir.



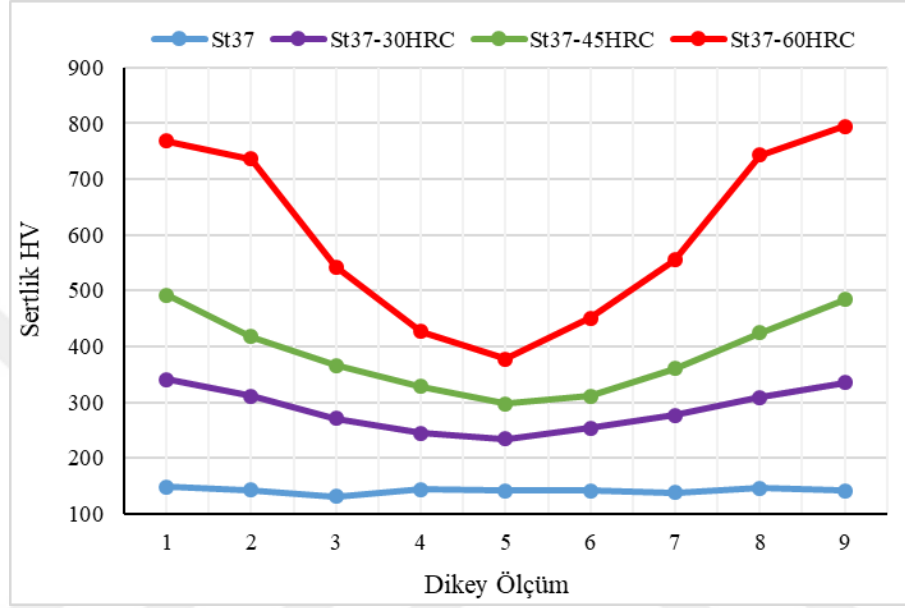
Şekil 4.13. Kaynaksız St37 ana malzeme ve tozaltı kaynağı ile farklı akım değerlerinde birleştirilmiş numunelerin kaynak metalinde dikey eksenindeki sertlik değişimi

Şekil 4.13'te verilen grafik sonuçlarına göre;

- ✓ St37 çeliğinde dikey ekseninde ölçülen minimum sertlik değeri 131,4 HV, maksimum sertlik değeri ise 148,3 HV'dir. Bu değerler yatay ekseninde ölçülen sertlik değerlerine (140~147 HV) oldukça yakındır.
- ✓ 400 A akım değeriyle birleştirilen malzemenin kaynak metalinden ölçülen dikey eksenindeki sertlik değerleri 193,7 ile 218,2 HV arasındadır. Elde edilen bu değerlerin yatay eksenden ölçülen sertlik değerlerine (197~205 HV) oldukça yakın olduğu görülmektedir.
- ✓ 450 A akım değeriyle birleştirilen malzemenin kaynak metalinden ölçülen dikey eksenindeki sertlik değerleri ise 181,9 HV ile 213,1 HV arasında olup,

ölçülen değerler yatay eksenden ölçülen sertlik değerlerine (191~195 HV) yakın çıkmıştır.

Kaynaksız St37 çelik malzemede sertleştirme ısıl işlemine bağlı olarak numune kesitinden dikey eksende ölçülen sertlik değerlerinin değişim grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir.



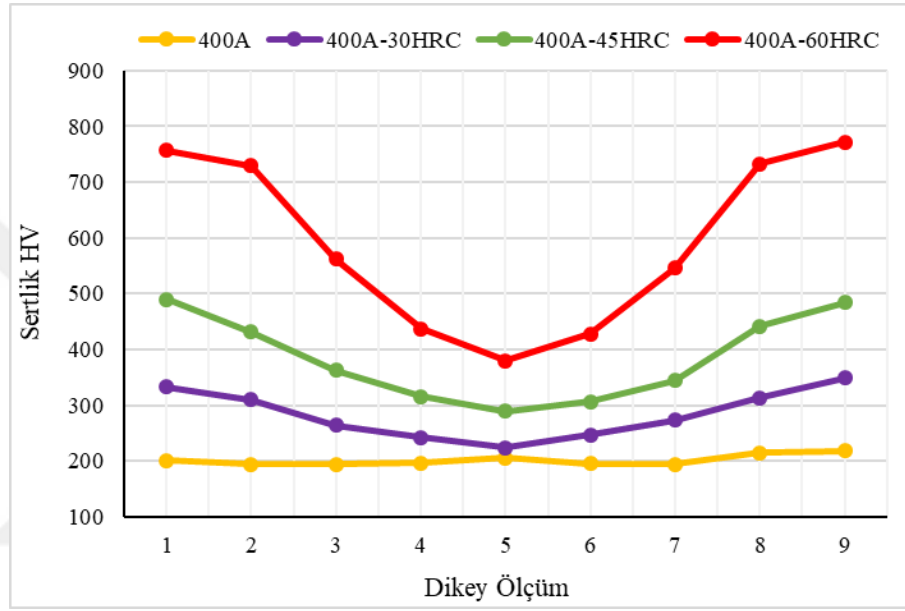
Şekil 4.14. Kaynaksız St37 çeliğinde sertleştirme ısıl işlemlerine bağlı dikey eksenindeki sertlik değişimi

Şekil 4.14'te verilen grafik sonuçlarına göre;

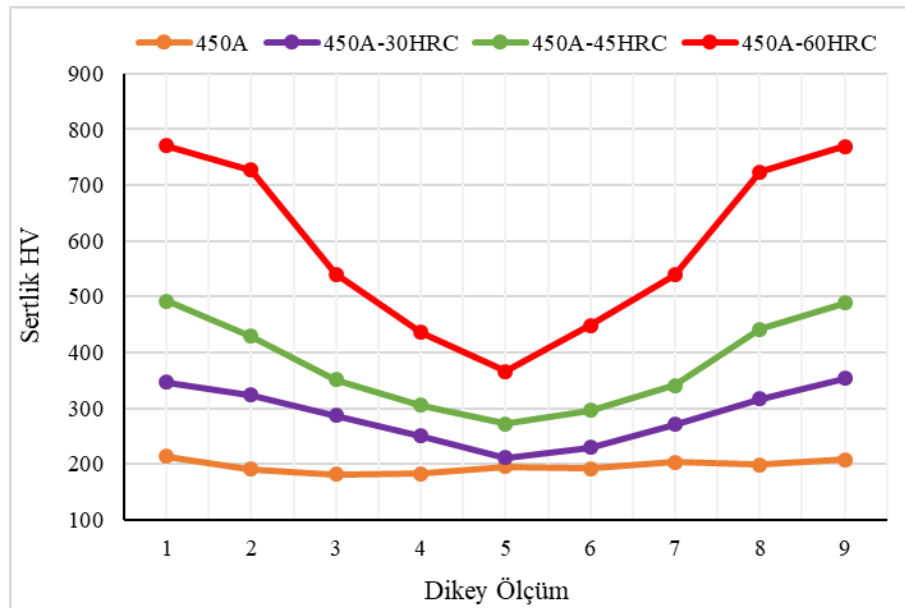
- ✓ Sertleştirme ısıl işlemiyle malzemenin sertliği artmıştır. Malzemenin doğrudan karbona maruz kalan dış yüzeylerinde daha yüksek sertlik elde edilmiştir. Malzeme merkezine gittikçe sertlik düşmüştür. Diğer bir değişle sertleştirme ısıl işlemiyle malzemelerin iç kısımlarında tok bir yapı ve dış kısımlarında ise sert bir yapı elde edilmiştir.
- ✓ 30 HRC sertliğe sahip malzemenin dış yüzeyinden ölçülen maksimum sertlik değeri 341,1 HV iken iç yüzeyinden ölçülen sertlik değeri 233,8 HV'dir. 45 HRC için malzemenin dış ve iç yüzeylerindeki sertlik değerleri sırasıyla 492,5 HV ve 297,2 HV ölçülmüştür. Malzemenin sertliği arttıkça, dış yüzeyde ölçülen sertlik değeri ile iç kısımda ölçülen sertlik değeri arasındaki fark artmıştır. Malzemenin dış ve iç yüzeylerindeki sertlik farkının en fazla olduğu numune 60 HRC sertliğe sahip malzemedir. Bu malzemenin dış yüzeyinden ölçülen maksimum sertlik değeri 794,2 HV iken iç yüzeyden ölçülen sertlik değeri 377,9 HV'dir.

Aynı numunelerin farklı noktalarından yapılan dikey sertlik ölçümlerine göre, numunenin kendi içinde sertlik açısından değişiklik gösterdiği ve bununda ısıtılma sırasında yüzeye püskürtülen karbonun yüzeye yapışmasıyla ilişkili olduğu yorumu çıkarılabilir.

Şekil 4.15'te 400 A akım değerinde ve Şekil 4.16'da ise 450 A akım değerinde birleştirilmiş kaynaklı bağlantılarda sertleştirme ısıtılmasına bağlı olarak numune kesitinden dikey eksende ölçülen sertlik değerlerinin değişim grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.15. 400 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısıtılmasına bağlı dikey eksenindeki sertlik değişimi



Şekil 4.16. 450 A akım değeri ile birleştirilmiş St37 çeliğinde sertleştirme ısıtılmasına bağlı dikey eksenindeki sertlik değişimi

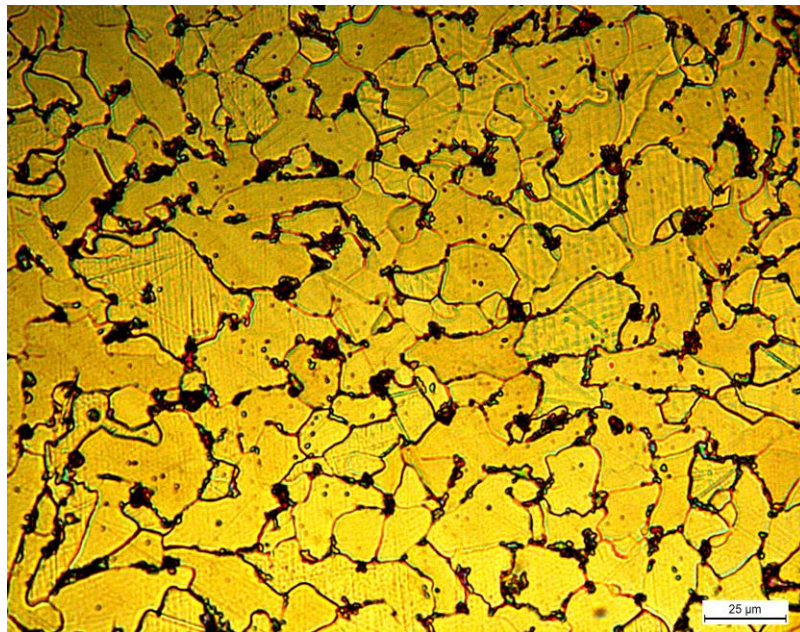
Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilen grafik sonuçlarına göre;

- ✓ 400 A akım ile birleştirilmiş ve 30, 40 ve 60 HRC sertliklere sahip malzemelerin dış yüzeylerinden ölçülen maksimum sertlik değerleri sırasıyla 349,2 HV, 489,9 HV ve 772,2 HV iken, iç yüzeylerinden ölçülen sertlik değerleri ise sırasıyla 223,7 HV, 289,3 HV ve 379,8 HV’dir.
- ✓ 450 A akım ile birleştirilmiş ve 30, 40 ve 60 HRC sertliklere sahip malzemelerin dış yüzeylerinden ölçülen maksimum sertlik değerleri sırasıyla 353,4 HV, 491,5 HV ve 771,1 HV iken, iç yüzeylerinden ölçülen sertlik değerleri ise sırasıyla 211,1 HV, 271,9 HV ve 366,2 HV’dir

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da, 400 ve 450 A akım değeri ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantılarda sertleştirme ısı işlemine bağlı olarak numune kesitinden dikey ekseninde ölçülen sertlik sonuçları, Şekil 4.14’te verilen kaynaksız numunelerinki ile benzerlik göstermiştir. Malzemenin doğrudan karbona maruz kalan dış yüzeylerinde daha yüksek sertlik elde edilmiştir. Malzemenin dış ve iç yüzeylerindeki sertlik farkının en fazla olduğu numune 60 HRC sertliğe sahip malzeme olmuştur.

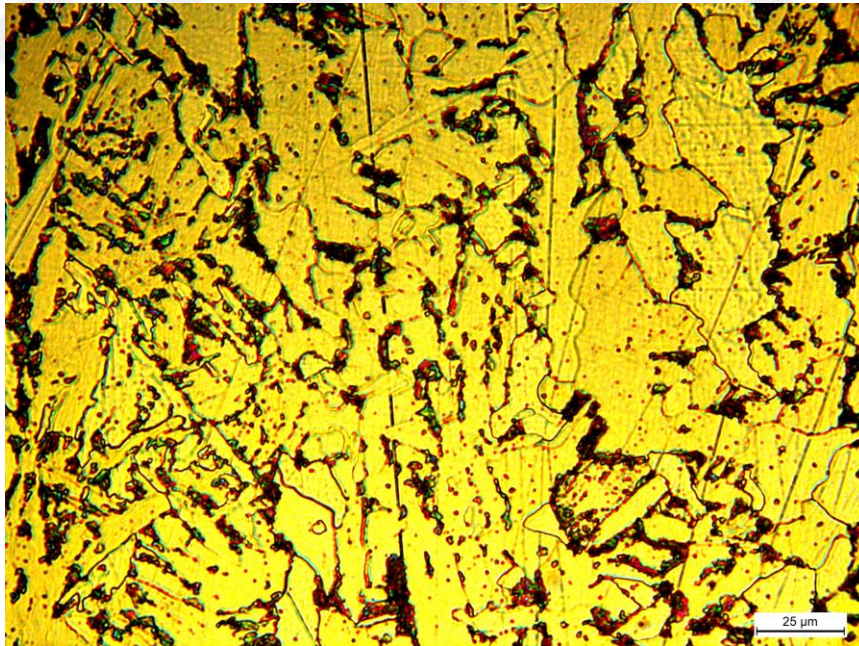
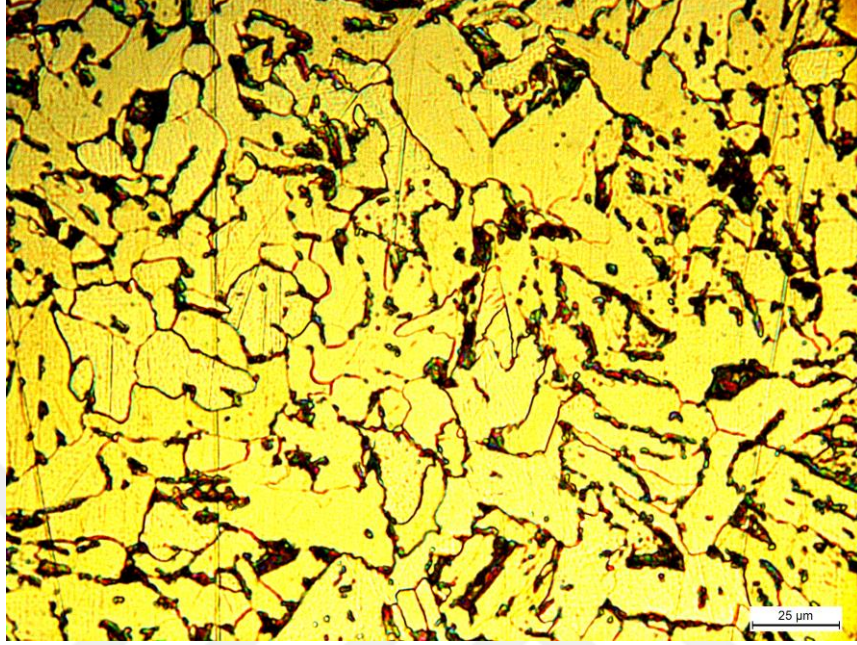
4.3. Mikroyapı Sonuçları

St37 çeliğinin optik mikroskopta alınmış görüntüsü Şekil 4.17’de, 400 ve 450 A akım değerleri ile kaynak edilmiş bağlantı elemanlarının optik görüntüleri ise sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir.

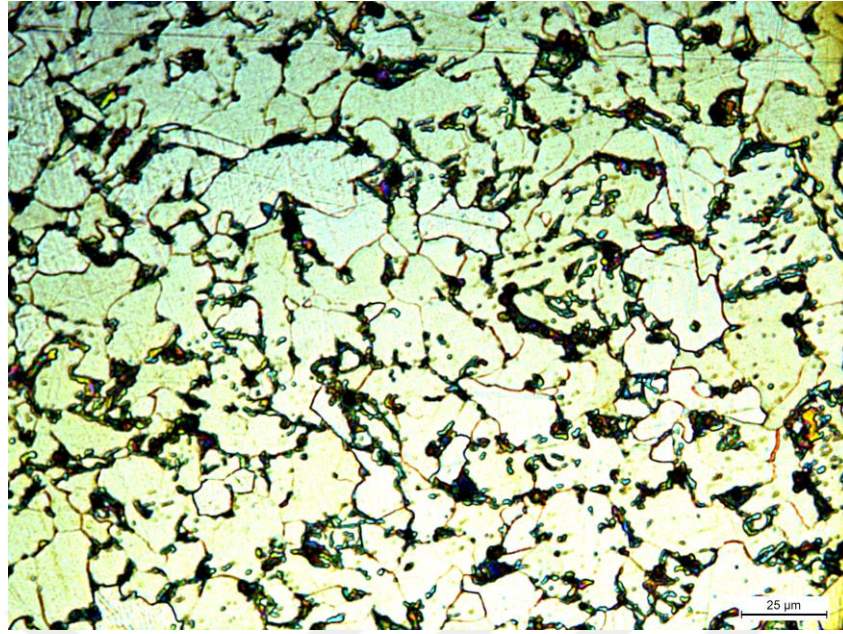


Şekil 4.17. St37 çelik numunenin (ana malzemenin) optik mikroskop görüntüsü

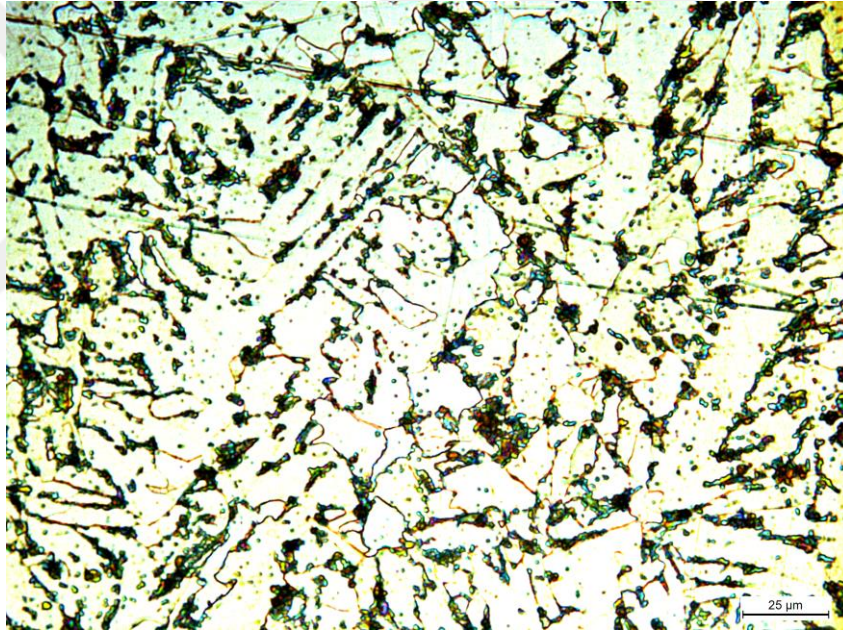
Şekil 4.17'deki St37 çelik numunesinin optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde, içyapının eş eksenli ferrit fazı ile çok az miktarlarda sementit fazından meydana geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18. 400 A akımla birleştirilen kaynaklı bağlantıda ITAB ve kaynak metaline ait optik mikroskop görüntüleri



ITAB



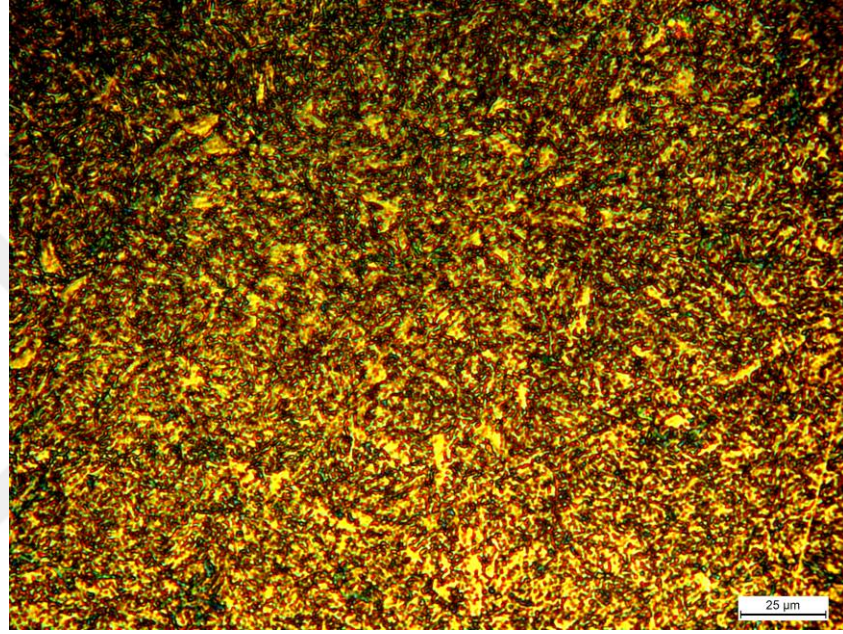
Kaynak Metali

Şekil 4.19. 450 A akımla birleştirilen kaynaklı bağlantıda ITAB ve kaynak metaline ait optik mikroskop görüntüleri

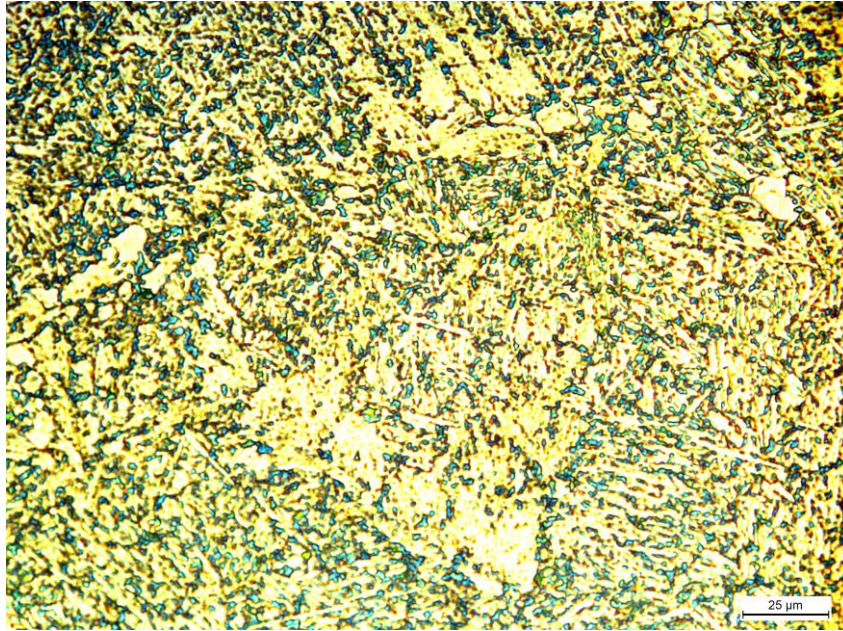
Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da farklı akım değerlerinde birleştirilen bağlantıların ITAB ve kaynak metalindeki optik görüntülere bakıldığında, içyapıların benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Her iki numunenin kaynak metalinde, kaynak sonrasındaki epitaksiyel katılaşma ile oluşan tipik bir kolonsal yapının olduğu görülmüştür. ITAB’da ise bir miktar tane irileşmesi gözlemlense de ITAB’ın içyapısının ST37 çeliğinin içyapısına göre kayda değer bir farklılık oluşmamıştır. Ancak ITAB ve kaynak metalinde ana malzemedan farklı olarak sementit segregasyonu olduğu söylenebilir.

Ana malzeme, ITAB ve kaynak metalinin içyapıları birlikte ele alındığında uygulanan akım değerlerinin St37 çeliği için tercih edilebilir değerler olduğu sonucuna ulaşılabilir. Bu durum, çekme testi sonrası kopmanın ana malzemeden gerçekleşmesi ve kaynak nüfuziyetinin başarılı olmasıyla örtüşmektedir.

30, 45 ve 60 HRC sertliğe sahip St37 çeliklerinin yüzey ve merkezlerinden alınan optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir.

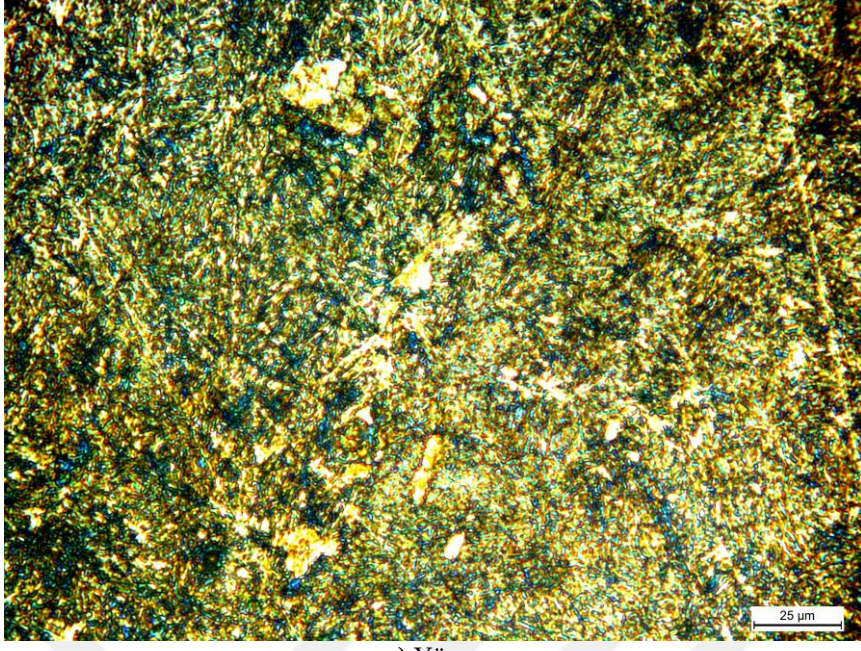


a) Yüzey

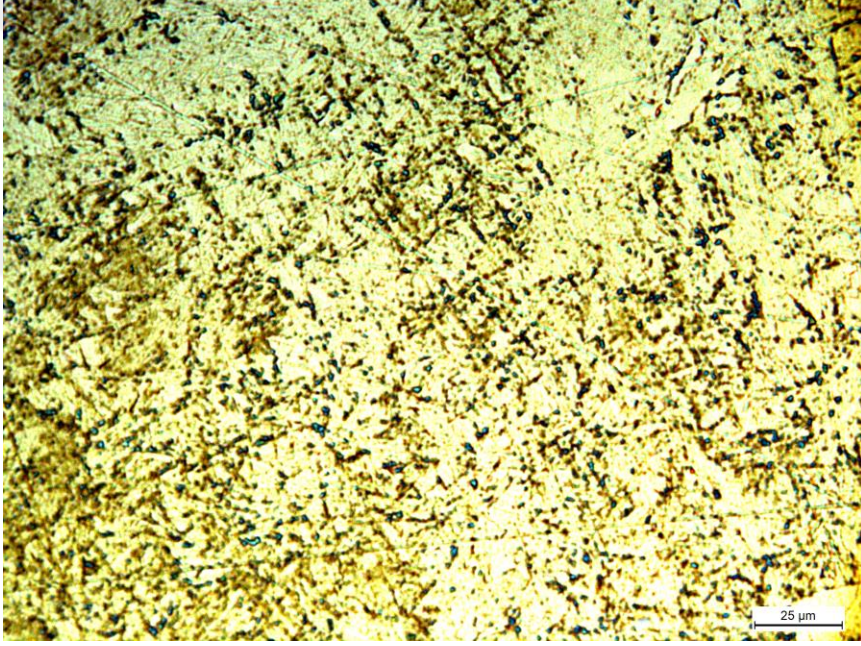


b) Merkez

Şekil 4.20. 30 HRC sertliğe getirilmiş St37 çeliğinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri

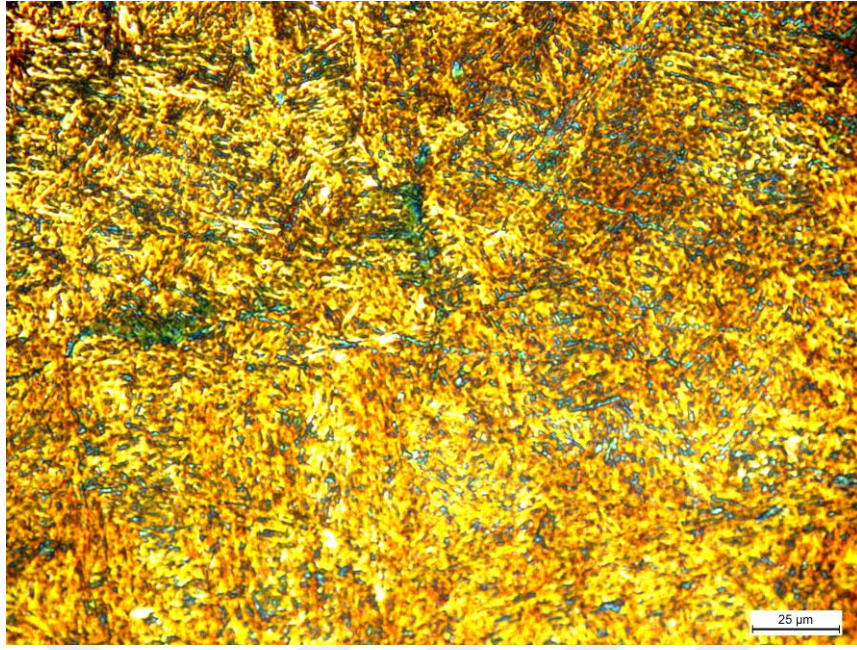


a) Yüzey

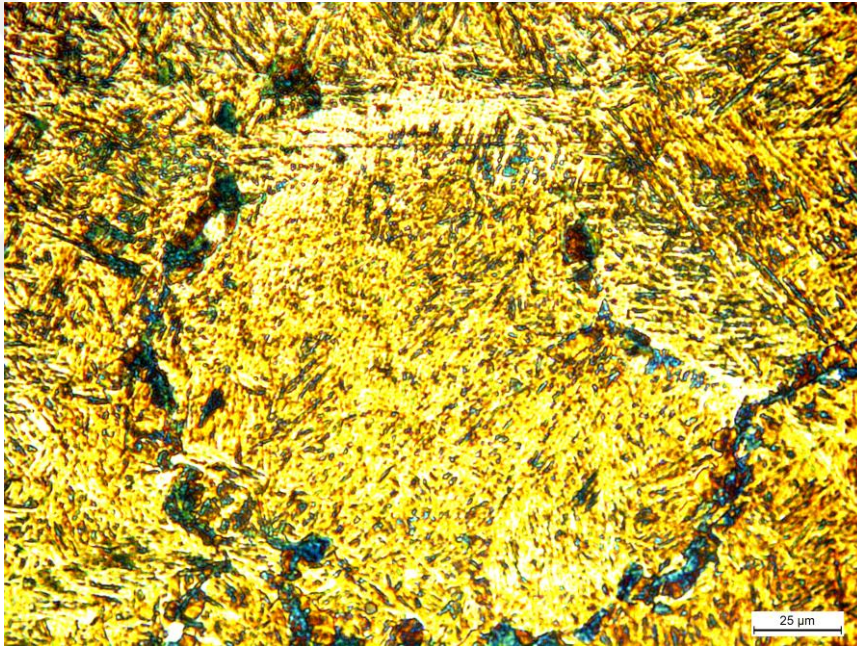


b) Merkez

Şekil 4.21. 45 HRC sertliğe getirilmiş St37 çeliğinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri



a) Yüzey



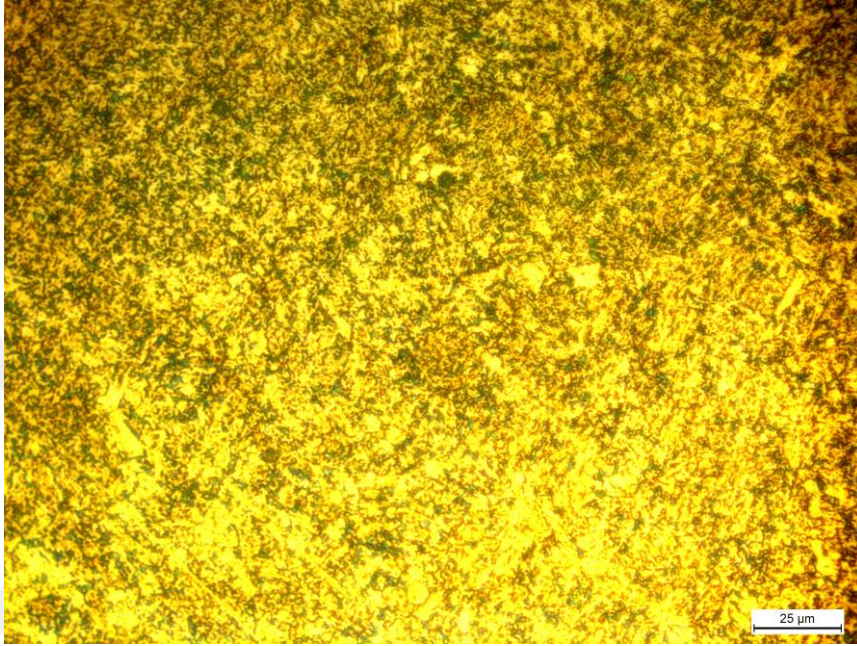
b) Merkez

Şekil 4.22. 60 HRC sertliğe getirilmiş St37 çeliğinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri

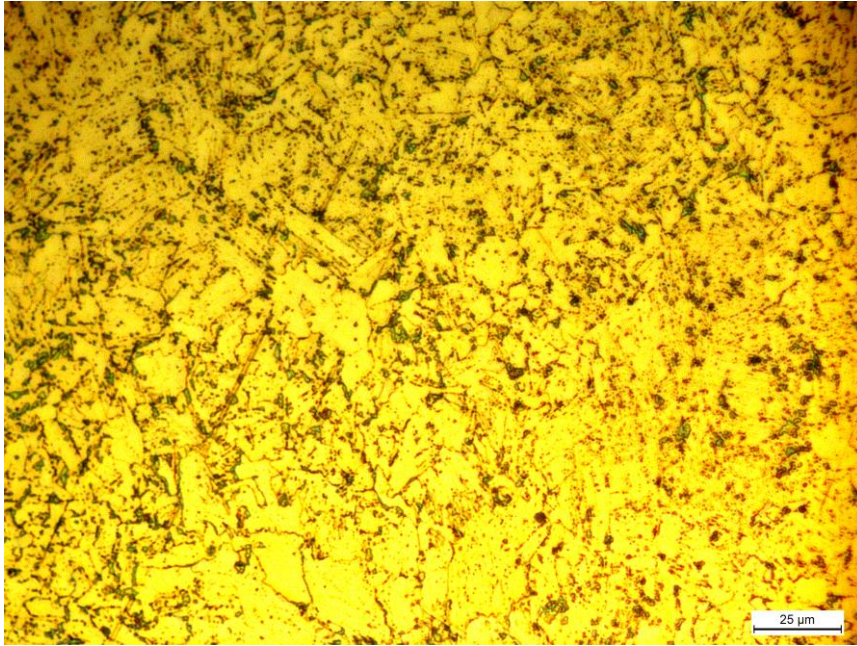
Farklı sertleştirme ısı işlemleri uygulanarak farklı sertlik değerlerine sahip numunelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, numunelerin yüzeyinde daha baskın bir martenzit yapısı gözlemlenirken, numunelerin merkezine ilerledikçe ferrit+sementit fazlarının mikroyapı içerisinde arttığı görülmüştür. Ayrıca 60 HRC sertliğe sahip numuneler, düşük sıcaklıkta (200-250 °C) menevişlendiğinden dolayı martenzit yapısının büyük bir bölümü korunmuştur. Yüksek sıcaklıkta (500-550 °C) menevişlenen ve 30 HRC sertliğe sahip numunede ise martenzit fazının daha fazla temperlendiği ve buna

bağlı olarak ferrit+sementit fazının yapıda daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum sertlik sonuçları ile de uyumludur.

30, 45 ve 60 HRC sertliğe sahip St37 çeliklerinin kaynak bölgesinden alınan yüzey ve merkez optik görüntüleri sırasıyla Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te verilmiştir.

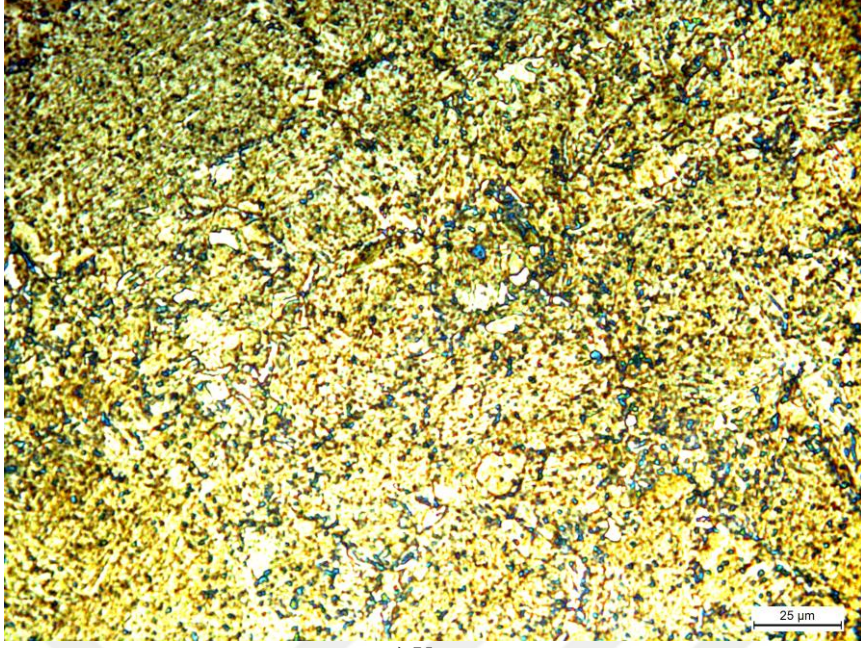


a) Yüzey

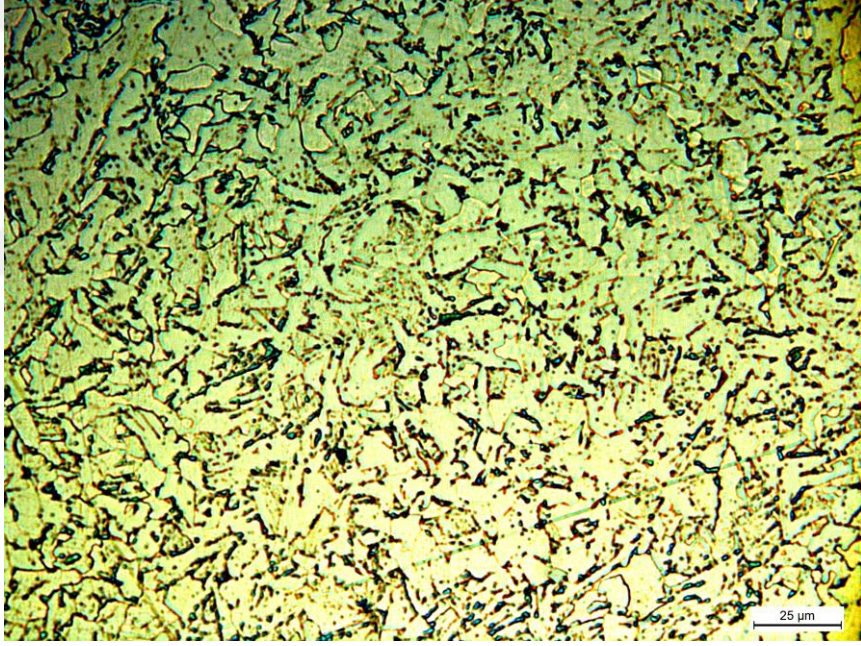


b) Merkez

Şekil 4.23. 30 HRC sertliğe getirilmiş kaynaklı bağlantıda kaynak metalinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri

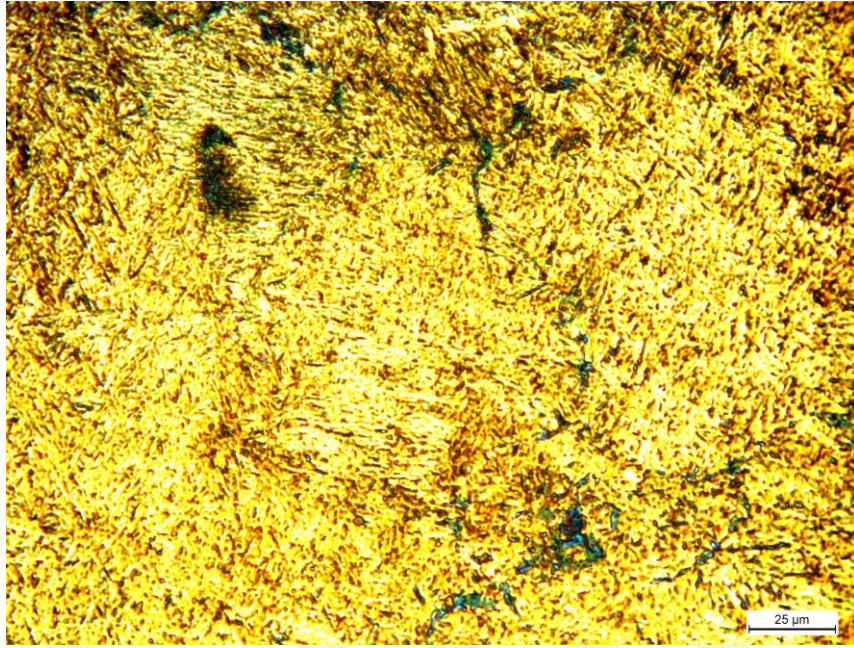


a) Yüzey

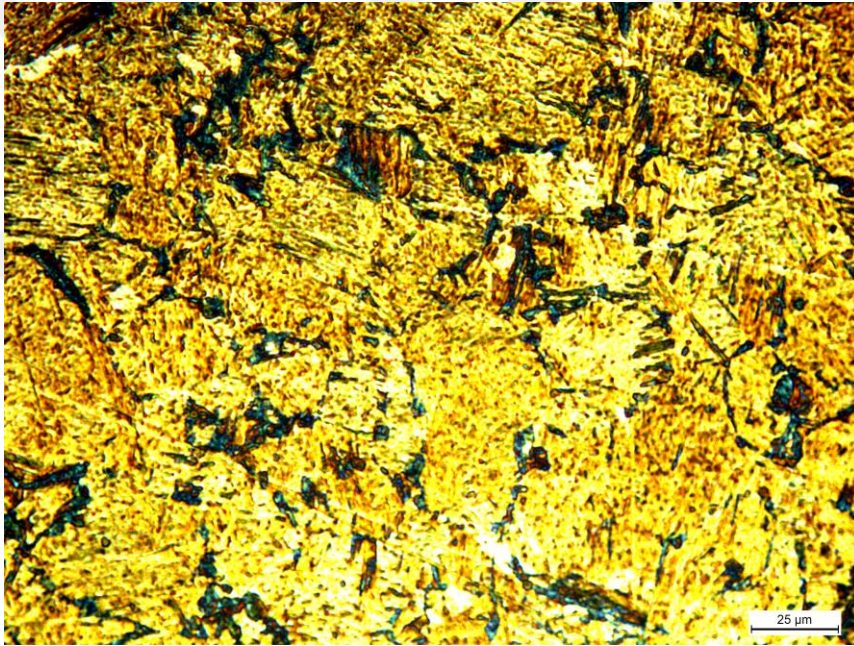


b) Merkez

Şekil 4.24. 45 HRC sertliğe getirilmiş kaynaklı bağlantıda kaynak metalinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri



a) Yüzey

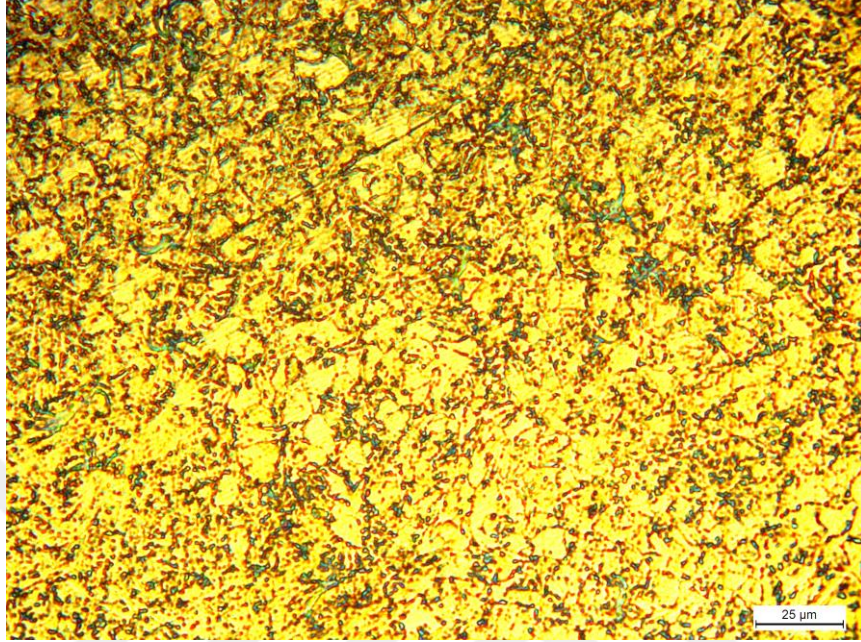


b) Merkez

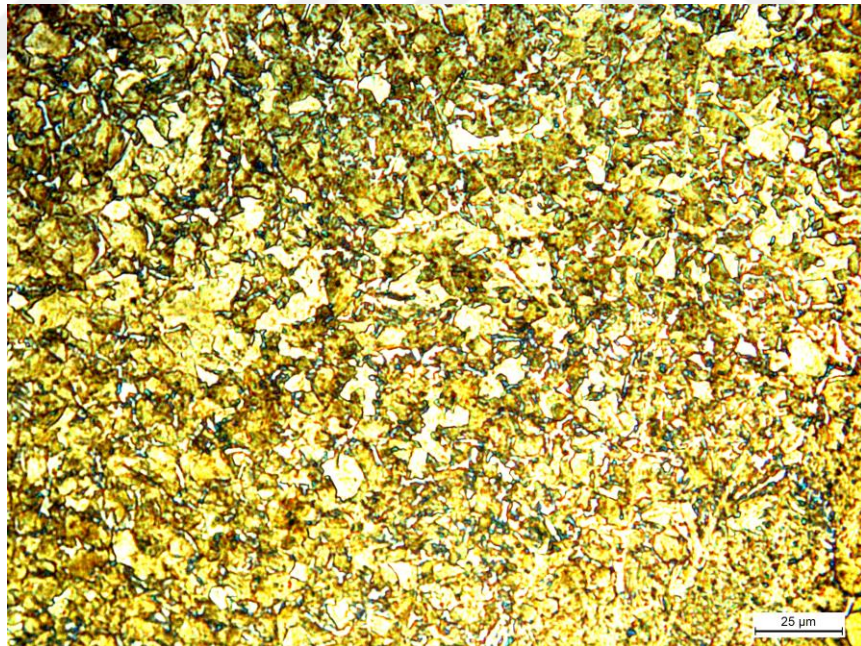
Şekil 4.25. 60 HRC sertliğe getirilmiş kaynaklı bağlantıda kaynak metalinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri

Farklı sıcaklıklarda menevişlenmiş numunelerin kaynak bölgesinin yüzey ve merkezinden alınmış mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, numunelerin yüzeylerinde martenzit ve az miktarda sementit fazı gözlemlenirken, numunelerin merkezine ilerledikçe ferrit+sementit fazlarının mikroyapı içerisinde arttığı ve ferrit tanelerinin belirginleştiği görülmüştür.

30 ve 45 HRC sertliğe sahip St37 çeliklerinin ITAB'dan alınan optik görüntüler Şekil 4.26'da, 60 HRC sertliğe sahip St37 çeliğin ITAB'dan alınan optik görüntü ise Şekil 4.27'de verilmiştir.

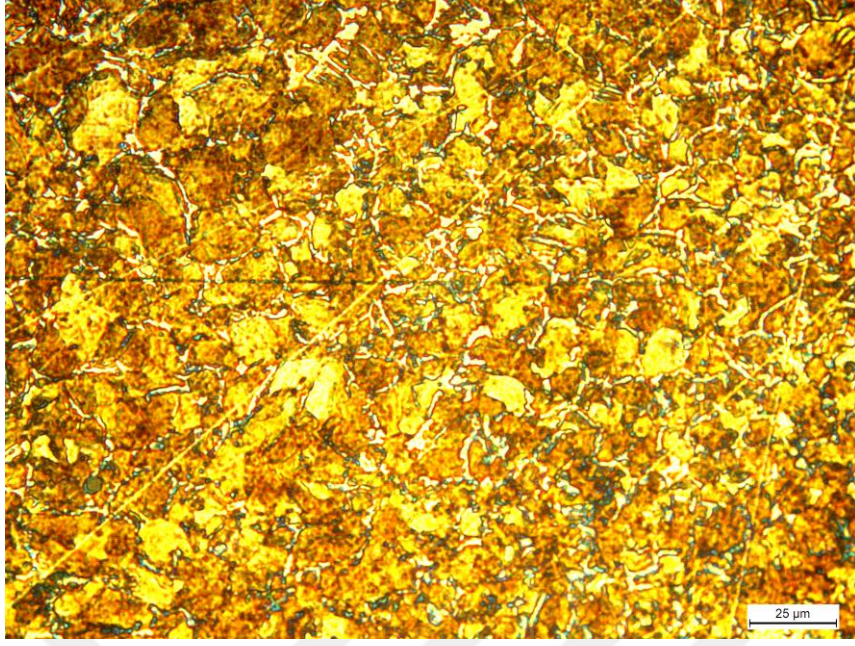


a) 30 HRC



b) 45 HRC

Şekil 4.26. 30 ve 45 HRC sertliğe getirilmiş kaynaklı bağlantılarda ITAB'dan elde edilen optik mikroskop görüntüleri



Şekil 4.27. 60 HRC sertliğe getirilmiş kaynaklı bağlantıda ITAB'dan elde edilen optik mikroskop görüntüsü

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de, ITAB'a ait içyapı görüntüleri incelendiğinde, numunelerin mikroyapılarının ferrit, ferrit+sementit (perlit) ve kısmen martenzit fazlarının karışımından meydana geldiği görülmüştür.

Optik mikroskop görüntüleri genel olarak değerlendirildiğinde, menevişleme sıcaklığı arttıkça mevcut martenzit fazının temperlenmesine bağlı olarak karbür çökeltilerinin yoğunluğunda artış görülmüştür. Artan çökelti miktarı ve ITAB'da gerçekleşen kısmi tane irileşmesi bu bölgenin gevrekliğini arttırmış ve kuvvet altında kopmanın ITAB'da gerçekleşmesi ile sonuçlanmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, tozaltı kaynağı ile 400 ve 450 A akım değerlerinde birleştirilen içme suyu isale hatlarındaki St37 çeliklere sertleştirme ısısal işlemi uygulanarak malzemenin çekme dayanımı, sertliği ve mikroyapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. St37 malzemesi, 400 ve 450 A akım değerleri kullanılarak tozaltı kaynağıyla sorunsuz bir şekilde birleştirilmiştir.
2. Kaynaklı bağlantıların gerilim değerleri, St37 ana malzemesinin gerilim değerinden daha yüksek çıkmıştır. En yüksek gerilim değeri 400 A akım ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantıdan elde edilmiştir.
3. Kaynaklı bağlantılarda, ana malzeme ile kaynak metali arasında ısı tesiri altında bölge oluşmuştur. Ana malzemeden kaynak metaline doğru ilerledikçe sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir.
4. Yapılan sertleştirme ısısal işlemi neticesinde malzemelerin çekme dayanımı artmış ve sünekliği azalmıştır. Buna bağlı olarak daha kısa uzamalarda malzemenin koptuğu ortaya çıkmıştır.
5. Sertleştirme ısısal işlemi, malzemenin doğrudan karbona maruz kalan yüzeylerinde bariz sertlik artışlarına sebep olmuştur, malzemenin merkezine doğru ilerledikçe sertlik değerleri düşmüştür. Malzemenin doğrudan karbona maruz kalan yüzeylerinde mikroyapının martenzitik olduğu, merkeze doğru ilerledikçe içyapıda ferrit fazının arttığı gözlemlenmiştir.
6. Menevişleme sıcaklığına bağlı olarak yapıda karbür çökeltileri meydana gelmiştir. Karbür çökeltileri malzemenin gevrekliğini arttırmıştır.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada, tozaltı kaynağı ile birleştirilen St37 çeliğinde sadece iki farklı amper değeri tercih edilmiştir. Tozaltı kaynağı ile birleştirilen kaynak bağlantılarında, farklı kaynak parametreleri ile kaynak yapılabilir ve kaynaklı bağlantılara farklı ısısal işlemler uygulanabilir. Kaynak parametrelerinin ve ısısal işlem türünün mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenebilir. Ayrıca kaynaklı bağlantılarda oluşan kalıntı gerilmeler belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- Abe, Y., Fujimoto, T., Nakatani, M., Komen, H., Shigeta, M. and Tanaka, M., 2021a, High speed X-ray observation of digital controlled submerged arc welding phenomena, *Science and Technology of Welding and Joining*, 26(4), 332-340. <https://doi.org/10.1080/13621718.2021.1908746>
- Abe, Y., Fujimoto, T., Nakatani, M., Shigeta, M. and Tanaka, M., 2021b, Study on proper welding condition for ultranarrow gap submerged arc welding, *Welding International*, 35(7-9), 369-381. <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1980298>
- Adamczyk, J. and Grajcar, A., 2007, Heat treatment and mechanical properties of low-carbon steel with dual-phase microstructure, *Journal of Achievements in materials and manufacturing engineering*, 22(1), 13-20.
- Ahmad, M. A., Sheikh, A. K. and Nazir, K., 2019, Design of experiment based statistical approaches to optimize submerged arc welding process parameters, *ISA transactions*, 94, 307-315. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.04.003>
- Akay, S. K., Yazici, M. and Avinc, A., 2009, The effect of heat treatments on physical properties of a low carbon steel, *Preceedings of the Romanian Academy, Series A*, 10(1), 000-000.
- Akay, A. A., Kaya, Y. ve Kahraman, N., 2013a, Farklı özellikteki malzemelerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin tahribatlı ve tahribatsız muayenesi, *Sakarya University Journal of Science*, 17(1), 85-96.
- Akay, A. A., Kaya, Y. ve Kahraman, N., 2013b, Tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilen X60, X65 ve X70 çeliklerin kaynak bölgesinin etüdü, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(2), 34-42.
- Apay, S., Gel, M. ve Çil, G., 2018, Tozaltı kaynak yöntemi ile farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen API X70M PSL2 malzemelerin kaynak bölgesinin incelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4), 714-723. <https://doi.org/10.29130/dubited.413766>
- ASM Handbook., 2013, Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, Dossett and GE Totten, editors, Introduction to Surface Hardening of Steels, 269, Materials Park, OH 44073-0002, Printed in the United States of America.
- Atılğan, Y., 2022, Depolama tankı imalatında tozaltı ark kaynağı uygulaması ve kaynak bölgesinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük.
- Barbosa, L. H. S., Modenesi, P. J., Godefroid, L. B. and Arias, A. R., 2019, Fatigue crack growth rates on the weld metal of high heat input submerged arc welding, *International Journal of Fatigue*, 119, 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.09.020>

- Candan, İ., Şahin, Ö. ve Kılıçlı, V., 2021, Tozaltı ark kaynak kaynağında ilave tel kimyasal bileşiminin S355N yapı çeliğinin darbe tokluğu üzerine etkisi, 6th *International Conference on Welding Technologies and Exhibition (ICWET'21)*, 13-15 October 2021, Hatay-Turkey, Paper ID-27, 184-191.
- Chandler, H. (Ed.), 1995, Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels. Second Edition, ASM international, Materials Park, OH 44073-0002, Printed in United States of America.
- Choudhary, A., Kumar, M., Gupta, M. K., Unune, D. K. and Mia, M., 2020, Mathematical modeling and intelligent optimization of submerged arc welding process parameters using hybrid PSO-GA evolutionary algorithms, *Neural Computing and Applications*, 32(10), 5761-5774. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04404-5>
- Choudhary, A., Kumar, M. and Unune, D. R., 2019, Experimental investigation and optimization of weld bead characteristics during submerged arc welding of AISI 1023 steel, *Defence Technology*, 15(1), 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.08.004>
- Choudhary, S., Shandley, R. and Kumar, A., 2018, Optimization of agglomerated fluxes in submerged arc welding, *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5049-5057. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.083>
- Coetsee, T., 2020, Phase chemistry of submerged arc welding (SAW) fluoride based slags, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 9766-9776. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.069>
- Coetsee, T. and De Bruin, F. J., 2021, Improved titanium transfer in submerged arc welding of carbon steel through aluminum addition, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1-4. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1945595>
- Coetsee, T. and De Bruin, F., 2022a, Chemical interaction of Cr-Al-Cu metal powders in aluminum-assisted transfer of chromium in submerged arc welding of carbon steel, *Processes*, 10(2), 296. <https://doi.org/10.3390/pr10020296>
- Coetsee, T. and De Bruin, F., 2022b, Aluminium-assisted alloying of carbon steel in submerged arc welding: Application of Al-Cr-Ti-Cu unconstrained metal powders, *Processes*, 10(3), 452. <https://doi.org/10.3390/pr10030452>
- Coetsee, T., Mostert, R. J., Pistorius, P. G. H. and Pistorius, P. C., 2021, The effect of flux chemistry on element transfer in submerged arc welding: Application of thermochemical modelling, *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 2021-2036. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.046>
- Çalığülü, U., Türkmen, M., Tufanoğlu, E. ve Kejanlı, H., 2017, P460-St52 malzemelerin tozaltı kaynağında amper değerinin etkisi, *II. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu*, 1078-1087.

- Çam, G., 2020, Kaynak Bilimi ve Teknolojisi, 1. Baskı, Nobel Akademik Yayıncılık, ISBN: 978-625-406-452-4.
- Çelik, A., 2020, Kaynak Teknolojisi, 1. Baskı, Nobel Akademik Yayıncılık, ISBN: 978-625-406-751-8.
- Çetinkaya, C., Akay, A. and Özdemir, U., 2023, A comparative investigation into the impact of shop-primer coating on weldability of S235JR steel using MAG and SAW processes, *Politeknik Dergisi*, 26(4), 1587-1600. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1323835>
- Eisa, A., 2023, Optimization of submerged arc welding setting parameters using Taguchi-based MCDM techniques: A comparative analysis, *ERJ. Engineering Research Journal*, 46(1), 33-42. <https://doi.org/10.21608/ERJM.2022.156921.1200>
- Erden, M. A., Gündüz, S., Çalığülü, U. ve Boz, M., 2018, Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen alaşımsız ve hardoks çeliklerin mikroyapı ve sertlik özelliklerinin araştırılması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 221-226. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.406794>
- Garg, J., Singh, K., Kumar, L. and Prasad, L., 2024, Development of submerged arc welding flux from rice straw ash, *Materials and Manufacturing Processes*, 39(2), 259-268. <https://doi.org/10.1080/10426914.2023.2238043>
- Hayajneh, M. T., Al-Dwairi, A. F. and Obeidat, S. F., 2018, Optimization and control of bending distortion of submerged arc welding I-beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 142, 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.12.012>
- Hayyal, H. and Faleh, N. M., 2022, Effect of welding process parameters on tensile of low carbon steel 283 GC, *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 26(1), 79-86. <https://doi.org/10.31272/jeasd.26.1.8>
- Karabulut, H. ve Türkmen, M., 2016, Temperleme işleminin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen mikroyapılı çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 587-594.
- Karagöz, T., 2021, TIG kaynağı yapılan alüminyum bir sac parçanın çarpılma miktarının incelenmesi, *Mühendis ve Makina*, 62(702), 55-69.
- Komen, H., Shigeta, M., Tanaka, M., Abe, Y., Fujimoto, T., Nakatani, M. and Murphy, A. B., 2021, Numerical investigation of heat transfer during submerged arc welding phenomena by coupled DEM-ISPH simulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 171, 121062. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121062>
- Küçüköner, H., Karakoç, H. and Kahraman, N., 2020, Investigation of microstructure and mechanical properties of AISI2205/DIN-P355GH steel joint by submerged arc welding, *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 566-586. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.023>

- Li, Y., Wu, S., Li, H., Dong, Y. and Cheng, F., 2021, Submerged arc additive manufacturing (SAAM) of low-carbon steel: Effect of in-situ intrinsic heat treatment (IHT) on microstructure and mechanical properties, *Additive Manufacturing*, 46, 102124. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102124>
- Luo, J., Dong, Y., Li, L. and Wang, X., 2014, Microstructure of 2205 duplex stainless steel joint in submerged arc welding by post weld heat treatment, *Journal of Manufacturing Processes*, 16(1), 144-148. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.013>
- Lúcia Othéro de Brito, V., Jacobus Cornelis Voorwald, H., das Neves, N. and de S. Bott, I., 2001, Effects of a postweld heat treatment on a submerged arc welded ASTM A537 pressure vessel steel, *Journal of materials engineering and performance*, 10, 249-257. <https://doi.org/10.1361/105994901770344953>
- Magmaweld, 2023, *Tozaltı tel ve tozlari*, <https://www.magmaweld.com.tr/tozalti-tel-ve-tozlari-o-40> [Ziyaret Tarihi 12 Ekim 2023].
- Miller, 2023, *The history of welding*, <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding#:~:text=Welding%20can%20trace%20its%20historic,more%20than%202%2C000%20years%20ago> [Ziyaret Tarihi 4 Ocak 2023].
- Mohal, S., Chaitanya, S., Singh, M., Goyal, R., Kumar, A. and Saini, G., 2021, Analyzing the response of submerged arc welding process parameters on Form factor and dilution, *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.143>
- Mortazavian, E., Wang, Z. and Teng, H., 2020, Repair of light rail track through restoration of the worn part of the railhead using submerged arc welding process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(7), 3315-3332. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05208-x>
- Nam, T. H., An, E., Kim, B. J., Shin, S., Ko, W. S., Park, N., Kang, N. and Jeon, J. B., 2018, Effect of post weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of a submerged-arc-welded 304 stainless steel, *Metals*, 8(1), 26. <https://doi.org/10.3390/met8010026>
- Rahmati, F., Aghakhani, M. and Kolahan, F., 2023, Modeling and optimization of penetration depth using genetic algorithm, focusing on submerged arc welding, In *The 9th International Conference on Industrial and Systems Engineering (ICISE)*. 12-18 September, Ferdowsi University of Mashhad.
- Rajan, T. V., Sharma, C. P. and Sharma, A., 2011, Heat treatment: principles and techniques, Second Edition, PHI Learning Private Limited, New Delhi-110001.
- Rajshekhar, B. A., Ramakrishna, H. V., Gadwal, S. B. and Musalammagri, N., 2022, Effect of weld configuration on structural strength of submerged arc welding, *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 14(1), 10-12. <https://doi.org/10.4273/ijvss.14.1.03>

- Sailender, M., Suresh, R., Reddy, G. C. and Venkatesh, S., 2020, Prediction and comparison of the dilution and heat affected zone in submerged arc welding (SAW) of low carbon alloy steel joints, *Measurement*, 150, 107084. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107084>
- Saini, S. and Singh, K., 2021, Recycling of steel slag as a flux for submerged arc welding and its effects on chemistry and performance of welds, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(3), 1165-1177. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06866-1>
- Santofimia, M. J., Zhao, L. and Sietsma, J., 2009, Microstructural evolution of a low-carbon steel during application of quenching and partitioning heat treatments after partial austenitization, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40, 46-57. <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9701-4>
- Sengupta, V., Havrylov, D. and Mendez, P. F., 2019, Physical phenomena in the weld zone of submerged arc welding-a review, *Welding Journal*, 98(10), 283-313. <https://doi.org/10.29391/2019.98.025>
- Sharma, H., Rajput, B. and Singh, R. P., 2020, A review paper on effect of input welding process parameters on structure and properties of weld in submerged arc welding process, *Materials Today: Proceedings*, 26, 1931-1935. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.422>
- Sharma, L. and Chhibber, R., 2020, Study of weld bead chemical, microhardness & microstructural analysis using submerged arc welding fluxes for linepipe steel applications, *Ceramics International*, 46(15), 24615-24623. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.250>
- Shukla, A. K. and Singh, R., 2023, Mechanical and micro-structural characterisations of submerged arc welded steel plates, *International Journal of Materials, Manufacturing and Sustainable Technologies (IJMMST)*, 2(1), 16-33. <https://doi.org/10.56896/IJMMST.2023.2.1.002>
- Singh, A. and Singh, R. P., 2020, A review of effect of welding parameters on the mechanical properties of weld in submerged arc welding process, *Materials Today: Proceedings*, 26, 1714-1717. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.361>
- Singh, R. P., Singh, A. and Singh, A., 2020, Optimization of hardness of weld in submerged arc welding, *Materials Today: Proceedings*, 26, 1827-1830. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.382>
- Sridhar, P. V. S. S., Biswas, P. and Mahanta, P., 2020, Effect of process parameters on bead geometry, tensile and microstructural properties of double-sided butt submerged arc welding of SS 304 austenitic stainless steel, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(10), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02636-4>

- Taskaya, S., Gur, A. K. and Ozay, C., 2019, Joining of ramor 500 steel with SAW (submerged Arc welding) and its evaluation of thermomechanical analysis in ANSYS package software, *Thermal Science and Engineering Progress*, 13, 100396. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100396>
- Taşkaya, S., Yıldız, T. ve Gür, A. K., 2018, Ramor 500 zırh çeliğinin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde gerilimin etkisi, *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 357-363. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.355049>
- Tekbor, 2023, *Spiral çelik boru*, <https://tekbor.com.tr/uretim/spiral-celik-boru/> [Ziyaret Tarihi 12 Ekim 2023].
- Uzun, F. and Bilge, A. N., 2016, The effect of carbon content and submerged arc welding process on hardness of carbon steels, *Journal for Foundations and Applications of Physics*, 4(1), 1-7.
- Vedrtam, A., Singh, G. and Kumar, A., 2018, Optimizing submerged arc welding using response surface methodology, regression analysis, and genetic algorithm, *Defence technology*, 14(3), 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.01.008>
- Wang, X., Wang, J., Gao, Z. and Hu, W., 2020, Effect of heat treatment on thermal expansion behavior and corrosion resistance of martensitic stainless steel manufactured by submerged arc welding, *International Journal of Electrochemical Science*, 15(5), 3955-3968. <https://doi.org/10.20964/2020.05.31>
- Zhang, J., Coetsee, T., Dong, H. and Wang, C., 2020a, Elucidating the roles of SiO₂ and MnO upon decarburization during submerged arc welding: A thermodynamic study into EH36 shipbuilding steel, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 51(4), 1805-1812. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01869-x>
- Zhang, J., Coetsee, T. and Wang, C., 2020b, Element transfer behaviors of fused CaF₂-SiO₂ fluxes subject to high heat input submerged arc welding, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 51(1), 16-21. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01753-3>
- Zhang, J., Wang, C. and Coetsee, T., 2021, Assessment of weld metal compositional prediction models geared towards submerged arc welding: Case studies involving CaF₂-SiO₂-MnO and CaO-SiO₂-MnO fluxes, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 52(4), 2404-2415. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02190-x>