

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARK ESASLI KAYNAK YÖNTEMLERİYLE KAYNAK
İŞLEMİNDE ISI TÜKETİMİ İLE MALZEME/KALINLIK
İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ**

Makina Mühendisi Erkan BOS

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Nurullah GÜLTEKİN

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTIMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖNSÖZ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ARK KAYNAK YÖNTEMLERİ VE ESASLARI	3
2.1 Elektrik Arkının Tanımı	3
2.2 Ark Kaynak Yöntemleri	6
2.2.1 TIG (WIG) Kaynağı	7
2.2.2 Plazma Kaynağı	9
2.2.3 Elektrik Ark Kaynağı	10
2.2.4 MIG/MAG Kaynağı	11
2.2.5 Toz Altı Kaynağı	12
3. ARK KAYNAK YÖNTEMLERİNDE ISI TÜKETİMİ	14
3.1 Isı Tüketiminin Hesaplanması	14
3.2 Isı Tüketimini Etkileyen Faktörler	15
3.2.1 Kaynak Akımı	15
3.2.2 Kaynak Gerilimi	18
3.2.3 Kaynak Hızı	21
3.2.4 Verim Katsayısı	23
3.2.5 Isı Tüketimini Etkileyen Diğer Faktörler	25
3.2.5.1 Koruyucu Gazların Etkileri	25
3.2.5.1.1 Argon	25
3.2.5.1.2 Helyum	26
3.2.5.1.3 Karbondioksit	26
3.2.5.1.4 Karışım Gazlar	26
3.2.5.2 Elektrot Örtülerinin Etkileri	28
3.2.5.3 Kaynak Tozlarının Etkileri	30
3.2.5.4 Kaynak Metali Transfer Tipinin Etkisi	33
3.2.5.4.1 Kısa Ark Metal Transferi (Kısa Devreli Metal Transferi)	33
3.2.5.4.2 Küresel Metal Transferi (Globular Metal Transferi)	34
3.2.5.4.3 Sprey Ark Metal Transferi	34

3.2.5.4.4	Darbeli Sprey Ark Metal Transferi.....	35
3.2.5.5	Kutuplamanın Etkisi	35
3.2.5.6	Elektrot Uç Açısının Etkisi.....	38
3.2.5.7	Serbest Tel Uzunluğunun Etkisi	39
3.2.5.8	Torç Açısının Etkisi.....	40
4.	ISI TÜKETİMİ İLE MALZEME/KALINLIK İLİŞKİSİ.....	42
4.1	Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	42
4.1.1	Isı Girdisi İle Tepe Sıcaklığı İlişkisi.....	44
4.1.2	Isı Girdisi İle Soğuma Hızı İlişkisi	46
4.2	Isı Tüketimi İle Malzeme Özellikleri İlişkisi.....	50
4.2.1	Ergime sıcaklığı (T_m).....	50
4.2.2	Isı İletim Katsayısı (k)	51
4.2.3	Özgül Isınma Isısı (c_m).....	53
4.2.4	Isıl Genleşme Katsayısı (α).....	55
4.2.5	Karbon Eşdeğeri ($C_{eş}$).....	56
4.2.6	Ön Tavlama	60
4.2.7	Oksit Oluşturma Eğilimi.....	62
4.3	Isı Girdisinin Kaynak Bölgesi Mikroyapısına Etkisi	64
4.3.1	Isı Girdisi-Sertlik İlişkisi	70
4.3.2	Isı Girdisi-Tokluk İlişkisi	75
4.3.3	Isı Girdisi-Tane Büyüklüğü İlişkisi	78
4.4	Isı Girdisi-Kalınlık İlişkisi	81
4.4.1	Kalınlık-Soğuma Hızı İlişkisi	82
5.	ARK ESASLI YÖNTEMLERDE ISI TÜKETİMİ-MALZEME-KALINLIK İLİŞKİSİ İLE İLGİLİ TEORİK YAKLAŞIMLAR VE BU YAKLAŞIMLARIN ÖRNEKLENDİRİLMESİ.....	84
5.1	Isı Tüketiminin Hesaplanması	85
5.2	ITAB'da Tepe Sıcaklık Dağılımının Hesaplanması İle ITAB'ın Ve ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Bulunması	86
5.3	Çeliklerde Kimyasal Bileşim-Soğuma Hızı İlişkisi.....	88
5.4	Kalınlık Faktörü Ve Soğuma Hızının Hesaplanması	90
5.5	Örnek 1 : Üç mm Kalınlığındaki Fe 37 Çeliklerin Farklı Ark Yöntemleri İle Kaynağında Isı Tüketimlerinin, Tepe Sıcaklıklarının, Soğuma Hızlarının Karşılaştırılması Ve Sonuçların Değerlendirilmesi	92
5.5.1	Yöntemlere Göre Isı Tüketimlerinin Hesabı	93
5.5.2	Yöntemlere Göre ITAB Genişliklerinin Hesabı	93
5.5.3	Yöntemlere Göre ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı	94
5.5.3.1	Örtülü Elektrot İle Kaynak Yönteminde ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı	95
5.5.3.2	MAG Kaynağında ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı	96
5.5.4	Yöntemlere Göre ITAB'da Tepe Sıcaklıklarının Dağılımı	97
5.5.5	Yöntemlere Göre Kalınlık Faktörlerinin Hesabı	97
5.5.6	Yöntemlere Göre Kaynak Eksenlerindeki Soğuma Hızlarının Hesaplanması	98
5.5.7	Örnek 1 İçin Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	99

5.6	Örnek 2 : Üç mm Kalınlığındaki AISI 304 Paslanmaz Çeliklerin Farklı Ark Yöntemleri İle Kaynağında Isı Tüketimlerinin, Tepe Sıcaklıklarının, Soğuma Hızlarının Karşılaştırılması Ve Sonuçların Değerlendirilmesi.....	101
5.6.1	Yöntemlere Göre Isı Tüketimlerinin Hesabı	102
5.6.2	Yöntemlere Göre ITAB Genişliklerinin Hesabı	102
5.6.3	Yöntemlere Göre ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı	103
5.6.3.1	Plazma Yöntemi İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı.....	104
5.6.3.2	TIG Yöntemi İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı.....	105
5.6.4	Yöntemlere Göre ITAB'da Tepe Sıcaklıklarının Dağılımı	106
5.6.5	Yöntemlere Göre Kalınlık Faktörlerinin Hesabı	106
5.6.6	Yöntemlere Göre Kaynak Eksenlerindeki Soğuma Hızlarının Hesaplanması	107
5.6.7	Örnek 2 İçin Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	108
5.7	Örnek 3 : Altı mm Kalınlığındaki Fe 37 Çelik ve AISI 304 Paslanmaz Çeliklerin Aynı Ark Yöntemi İle Yapılan Kaynaklarında Isı Tüketimlerinin, Tepe Sıcaklıklarının, Soğuma Hızlarının Karşılaştırılması Ve Sonuçların Değerlendirilmesi	110
5.7.1	Yöntemlere Göre Isı Tüketimlerinin Hesabı	111
5.7.2	Yöntemlere Göre ITAB Genişliklerinin Hesabı	111
5.7.3	Yöntemlere Göre ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı.....	112
5.7.3.1	Toz Altı (Fe 37) Yöntemi İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı	113
5.7.3.2	Toz Altı (AISI 304) Yöntemi İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı	114
5.7.4	Yöntemlere Göre ITAB'da Tepe Sıcaklıklarının Dağılımı	115
5.7.5	Yöntemlere Göre Kalınlık Faktörlerinin Hesabı	115
5.7.6	Yöntemlere Göre Kaynak Eksenlerindeki Soğuma Hızlarının Hesaplanması	116
5.7.7	Örnek 3 İçin Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	117
5.8	Örnek 4 : Malzeme Kalınlığının Ve Ön Tavlamanın Isı Tüketimlerine, Tepe Sıcaklıklarına, Soğuma Hızlarına Etkisi Ve Sonuçların Değerlendirilmesi	120
5.8.1	Yöntemlere Göre Isı Tüketimlerinin Hesabı	121
5.8.2	Yöntemlere Göre ITAB Genişliklerinin Hesabı	121
5.8.3	Yöntemlere Göre ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı.....	122
5.8.3.1	Örtülü Elektrot (Fe 37) Yöntemi İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı	123
5.8.3.2	*Örtülü Elektrot (Fe 37) Yöntemi İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı	124
5.8.4	Yöntemlere Göre ITAB'da Tepe Sıcaklıklarının Dağılımı	125
5.8.5	Yöntemlere Göre Kalınlık Faktörlerinin Hesabı	125
5.8.6	Yöntemlere Göre Kaynak Eksenlerindeki Soğuma Hızlarının Hesaplanması	126
5.8.7	Örnek 4 İçin Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	127
6.	ISI TÜKETİMİ - MALZEME - KALINLIK İLİŞKİSİ İLE İLGİLİ TEORİK YAKLAŞIMLARDAN YARARLANILARAK YAPILMIŞ ÖRNEK TASARIM VE HESAPLAMALARDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	130
7.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	132
7.1	Deneysel Metot Ve Numunelerin Hazırlanması	132
7.2	Deneysel Çalışma 1	134

7.2.1	Deneysel Çalışma 1 İçin ITAB Genişlikleri Ölçüm Sonuçları.....	135
7.2.2	Deneysel Çalışma 1 İçin Mikroyapı İncelemesi Ve Sertlik Ölçümleri Sonuçları	136
7.2.2.1	Örtülü Elektrot Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları.....	136
7.2.2.2	Örtülü Elektrot Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	137
7.2.2.3	MAG Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları	138
7.2.2.4	MAG Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	139
7.3	Deneysel Çalışma 2	141
7.3.1	Deneysel Çalışma 2 İçin ITAB Genişlikleri Ölçüm Sonuçları.....	142
7.3.2	Deneysel Çalışma 2 İçin Mikroyapı İncelemesi Ve Sertlik Ölçümleri Sonuçları	142
7.3.2.1	TIG Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları.....	142
7.3.2.2	TIG Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	144
7.3.2.3	Plazma Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları	145
7.3.2.4	Plazma Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	146
7.4	Deneysel Çalışma 3	148
7.4.1	Deneysel Çalışma 3 İçin ITAB Genişlikleri Ölçüm Sonuçları.....	149
7.4.2	Deneysel Çalışma 3 İçin Mikroyapı İncelemesi Ve Sertlik Ölçümleri Sonuçları	151
7.4.2.1	Toz Altı (Fe 37) Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları	151
7.4.2.2	Toz Altı (Fe 37) Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları	152
7.4.2.3	Toz Altı (304) Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları	153
7.4.2.4	Toz Altı (304) Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları	154
7.5	Deneysel Çalışma 4	156
7.5.1	Deneysel Çalışma 4 İçin ITAB Genişlikleri Ölçüm Sonuçları.....	157
7.5.1.1	Örtülü El. (Ön Tavsız) Uygulaması İçin ITAB Genişlikleri Ölçüm Sonuçları ...	157
7.5.1.2	Örtülü El. (Ön Tavlı) Uygulaması İçin ITAB Genişlikleri Ölçüm Sonuçları	159
7.5.2	Deneysel Çalışma 4 İçin Mikroyapı İncelemesi Ve Sertlik Ölçümleri Sonuçları	160
7.5.2.1	Örtülü El. (Ön Tavsız) Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları	160
7.5.2.2	Örtülü El. (Ön Tavsız) Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları	162
7.5.2.3	Örtülü El. (Ön Tavlı) Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları	163
7.5.2.4	Örtülü El. (Ön Tavlı) Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları	164
8.	DENEYSEL UYGULAMALARDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR	166
9.	TEORİK ARAŞTIRMA VE DENEYSEL UYGULAMA SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	169
	KAYNAKLAR.....	172
	ÖZGEÇMİŞ.....	175

SİMGE LİSTESİ

$C_{eş}$	Karbon eşdeğeri
c_m	Malzemenin özgül ısınma ısısı
$Cr_{eş}$	Krom eşdeğeri
c_s	Suyun özgül ısısı
d	Elektrot çapı
I	Kaynak akımı
k	Malzemenin ısı iletim katsayısı
l_0	Başlangıçtaki uzunluk
l_b	Boyuna çekme miktarı
m_m	Ergitilen malzeme kütlesi
m_s	Birim zamanda boru içerisinden geçen suyun kütlesi
$Ni_{eş}$	Nikel eşdeğeri
q	Birim dikiş enerjisi
Q	Ark gücü
Q_e	Elde edilen enerji
Q_m	Malzemeyi eritmek için gerekli ısı miktarı
R	Soğuma hızı
R_k	Kritik soğuma hızı
t	Malzeme kalınlığı
T_0	Malzemenin ilk sıcaklığı
T_c	Kritik sıcaklık
T_m	Malzemenin ergime sıcaklığı
T_p	Tepe sıcaklığı
U	Kaynak gerilimi
V_k	Kaynak hızı
Y	Erime çizgisinden uzaklık
Y_1	İri taneli bölgenin genişliği
Y_2	İnce taneli bölgenin genişliği
Y_3	Kısmen dönüşmüş bölgenin genişliği
Y_z	ITAB genişliği
α	Isıl genişleme katsayısı
η	Verim katsayısı
ρ	Malzemenin yoğunluğu

ρc_m	Volumetrik özgül ısı
ΔT_m	Malzemenin ortam ile ergime sıcaklığı arasındaki fark
ΔT_s	Giriş ve çıkıştaki suyun sıcaklık farkı
τ	Kalınlık faktörü

KISALTIMA LİSTESİ

AF	Asiküler (iğnesel) Ferrit
E.S.	Ergime Sınırı
F	Ferrit
IIW	Milletlerarası Kaynak Enstitüsü
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
M	Martenzit
Ö	Östenit
P	Perlit
S	Sorbit
WF	Widmanstätten Ferrit
δF	Delta Ferrit

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1.1 Elektrik arkı	4
Şekil 2.1.2 Ark sütununun ve arkta gerilim dağılımının şematik görünümü.....	4
Şekil 2.1.3 Arkın statik karakteristiği	5
Şekil 2.1.4 Alternatif akım arkı dinamik karakteristiği	5
Şekil 2.1.5 Elektrot-iş parçası etrafında oluşan manyetik alan ve ark üflemesi	5
Şekil 2.2.1.1 TIG (WIG) kaynak donanımı prensip şeması.....	7
Şekil 2.2.2.1 Plazma kaynağı için gerekli donatım.....	9
Şekil 2.2.3.1 Elektrik ark kaynağı prensip şeması.....	10
Şekil 2.2.4.1 MIG kaynağı donatımı ve işlemden dikiş oluşumu.....	11
Şekil 2.2.4.2 CO ₂ ile koruyucu gaz kaynağında metelsel banyoda ve ark ortamında oluşması muhtemel reaksiyonlar	12
Şekil 2.2.5.1 Toz altı kaynağının prensip şeması	13
Şekil 3.2.1.1 40 cm/dk kaynak hızında penetrasyon-kaynak akımı ilişkisi	15
Şekil 3.2.1.2 Akım türünün ergime oranına etkisi	17
Şekil 3.2.1.3 Kaynak akımının ergime oranına etkisi.....	17
Şekil 3.2.1.4 Kaynak akımının ergime oranına etkisi.....	18
Şekil 3.2.2.1 Kaynak gerilimi – ark uzunluğu ilişkisi	19
Şekil 3.2.2.2 40 cm/dk kaynak hızında penetrasyon-gerilim ilişkisi	19
Şekil 3.2.2.3 Kaynak gerilimi – ergime oranı ilişkisi	20
Şekil 3.2.2.4 Kaynak geriliminin koruyucu gaz ile değişimi.....	20
Şekil 3.2.3.1 Kaynak metali yığılması ve yanma oluşu hataları	21
Şekil 3.2.3.2 Kaynak hızının ergime oranına etkisi.....	22
Şekil 3.2.3.3 Kaynak hızı-nüfuziyet ilişkisi.....	22
Şekil 3.2.4.1 Ergimeyen elektrotla kaynak işlemi esnasındaki enerji dağılımı	23
Şekil 3.2.4.2 Islak kalorimetre	24
Şekil 3.2.4.3 Kuru kalorimetre.....	24
Şekil 3.2.5.1.4.1 Çeşitli koruyucu gazların dikişe etkileri.....	28
Şekil 3.2.5.4.1.1 Kısa ark metal transferi	33
Şekil 3.2.5.4.2.1 Küresel metal transferi ve büzülme kuvveti etkisi	34
Şekil 3.2.5.4.3.1 Sprey ark metal transferi	35
Şekil 3.2.5.4.4.1 Darbeli spreylere ark oluşum aşamaları	35
Şekil 3.2.5.5.1 Kutuplamanın örtülü elektrot ve MIG-MAG yöntemlerinde dikişe etkileri	36
Şekil 3.2.5.5.2 TIG yönteminde akım ve kutuplama türünün dikişe etkileri	37
Şekil 3.2.5.6.1 Kaynak sırasında akım türü ve şiddetine göre elektrot uç biçiminin görünüşü	38
Şekil 3.2.5.6.2 Elektrot uç biçimi - dikiş kesiti ilişkisi.....	39
Şekil 3.2.5.7.1 Serbest tel uzunluğunun dikiş formuna etkisi	39
Şekil 3.2.5.7.2 Kaynak akımının serbest tel uzunluğu ile değişimi.....	40
Şekil 3.2.5.7.3 Kısa-globular-sprey arka göre uygun serbest tel uzunlukları.....	40
Şekil 3.2.5.8.1 Torç açısıyla dikiş formunun değişimi.....	40
Şekil 4.1.1 Isı tesiri altındaki bölgenin sınırları.....	42
Şekil 4.1.2 %12 karbon ihtiva eden normal karbonlu bir yapı çeliğindeki ısının tesiri altında kalan bölgenin Fe-Fe ₃ C diyagramı karşısındaki durumu	43
Şekil 4.1.1.1 13 mm kalınlığındaki çelik bir levhada ITAB'da sıcaklık dağılımları.....	46
Şekil 4.1.2.1 Kritik soğuma hızı	49
Şekil 4.2.2.1 Isı iletim katsayısının sıcaklık ve C miktarına bağlı olarak değişimi.....	52
Şekil 4.2.5.1 Soğuma hızı ile C _{eş} arasındaki etkileşim.....	59

Şekil 4.2.5.2 Çelikte ITAB çatlaklarının oluşumunda etkili temel faktörler.....	60
Şekil 4.2.6.1 Isı girdisi ve ön tav sıcaklığının tepe sıcaklığının dağılımına etkisi	61
Şekil 4.3.1 Çeliklerin kaynağında sıcaklığın ITAB mikroyapısına etkisi	64
Şekil 4.3.2 Çeşitli metal ve alaşımlarının kaynağında ITAB’da oluşabilecek iç yapılar	65
Şekil 4.3.3 Fe – Fe ₃ C denge diyagramı	66
Şekil 4.3.4 0,5 kJ/mm enerji girişi için kaynak metalinde ve ITAB’ın tane irileşen kısmında oluşan mikroyapılar	69
Şekil 4.3.5 1 kJ/mm enerji girişi için kaynak metalinde ve ITAB’ın tane irileşen kısmında oluşan mikroyapılar	69
Şekil 4.3.6 2 kJ/mm enerji girişi için kaynak metalinde ve ITAB’ın tane irileşen kısmında oluşan mikroyapılar	70
Şekil 4.3.1.1 Soğuk şekillendirilmiş malzemenin kaynağındaki sertlik değişimi	71
Şekil 4.3.1.2 Ölçülen sertlik bölgeleri ve değerleri	73
Şekil 4.3.1.3 ITAB’ın tane irileşen kısmındaki sertlik değerleri.....	74
Şekil 4.3.2.1 Enerji girişine bağlı olarak ITAB ve kaynak metalindeki tokluk değerleri	76
Şekil 4.3.2.2 Enerji girişine göre ITAB’ın tane irileşen kısmından elde edilen tokluk değerleri	77
Şekil 4.3.3.1 Çeliklerin ITAB’ında kırılma tokluğu dağılımı	79
Şekil 4.3.3.2 Levha kalınlığına göre ITAB’da maksimum tane çapı değişimi	79
Şekil 4.4.1.1 Kalınlığın ısı çevrime etkileri.....	82
Şekil 4.4.1.2 Deney numunelerinin şematik gösterimi.....	83
Şekil 5.2.1 Bir alın bağlantısında kaynak bölgesinin şematik gösterimi.....	87
Şekil 5.2.2 ITAB’ı oluşturan bölgelerin şematik gösterimi.....	87
Şekil 5.3.1 0,3 C’lu bir çelikte Fe-Fe ₃ C diyagramı ile sürekli soğuma ve kademeli soğuma diyagramları.....	89
Şekil 5.3.2 Soğuma hızı – malzeme bileşimi ilişkisi.....	90
Şekil 5.5.1.1 Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG alın kaynağındaki teorik ısı tüketimleri.....	93
Şekil 5.5.2.1 Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG yöntemleri ile alın kaynağındaki teorik ITAB genişlikleri	94
Şekil 5.5.3.1.1 Örtülü E. ile kaynakta ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişlikleri.....	95
Şekil 5.5.3.2.1 MAG kaynağında ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişlikleri	96
Şekil 5.5.4.1 Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG yöntemleri ile alın kaynağında ITAB’lardaki sıcaklık dağılım eğrileri.....	97
Şekil 5.5.5.1 Yöntemlere göre kalınlık faktörleri.....	98
Şekil 5.5.6.1 Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG yöntemleri ile alın kaynağında kaynak eksenlerindeki soğuma hızları	99
Şekil 5.5.7.1 Soğuma hızlarına göre ITAB’da tahminen elde edilecek iç yapılar	100
Şekil 5.6.1.1 Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin TIG ve Plazma alın kaynağındaki teorik ısı tüketimleri.....	102
Şekil 5.6.2.1 Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin TIG ve Plazma alın kaynağındaki teorik ITAB genişlikleri.....	103
Şekil 5.6.3.1.1 Plazma yöntemi için ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişlikleri	104
Şekil 5.6.3.2.1 TIG yöntemi için ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişlikleri	105
Şekil 5.6.4.1 Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin Plazma ve TIG yöntemleri ile alın kaynağında ITAB’lardaki sıcaklık dağılım eğrileri	106
Şekil 5.6.5.1 Yöntemlere göre kalınlık faktörleri.....	107
Şekil 5.6.6.1 Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin Plazma ve TIG yöntemleri ile alın kaynağında kaynak eksenlerindeki soğuma hızları.....	108
Şekil 5.6.7.1 AISI 304 bileşiminin Schaeffler Diyagramında gösterilmesi	109

Şekil 5.7.1 Örnek uygulamanın şematik gösterimi.....	110
Şekil 5.7.1.1 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağındaki teorik ısı tüketimleri.....	111
Şekil 5.7.2.1 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında teorik ITAB genişlikleri.....	112
Şekil 5.7.3.1.1 Tozaltı (Fe 37) kaynağında ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri.....	113
Şekil 5.7.3.2.1 Tozaltı (304) kaynağında ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri.....	114
Şekil 5.7.4.1 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında ITAB'lardaki sıcaklık dağılım eğrileri.....	115
Şekil 5.7.5.1 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında hesaplanmış kalınlık faktörleri.....	116
Şekil 5.7.6.1 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında kaynak eksenlerindeki soğuma hızları.....	117
Şekil 5.7.7.1 Tozaltı (Fe 37) için soğuma hızına göre ITAB'da tahminen elde edilecek iç yapı.....	118
Şekil 5.7.7.2 AISI 304 bileşiminin Schaeffler Diyagramında gösterilmesi.....	119
Şekil 5.8.1.1 On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çelikler için teorik ısı tüketimleri.....	121
Şekil 5.8.2.1 On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çelikler için teorik ITAB genişlikleri.....	122
Şekil 5.8.3.1.1 Örtülü elek. (Fe 37) için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri.....	123
Şekil 5.8.3.2.1 *Örtülü elek. (Fe 37) için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri.....	124
Şekil 5.8.4.1 On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çeliklerde ITAB'da sıcaklık dağılımları.....	125
Şekil 5.8.5.1 On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çeliklerde kalınlık faktörleri.....	126
Şekil 5.8.6.1 On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çeliklerde kaynak eksenlerindeki soğuma hızları.....	127
Şekil 5.8.7.1 Ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çelikler için soğuma hızlarına göre ITAB'da tahminen elde edilecek iç yapılar.....	128
Şekil 7.1.1 Uygulamaların şematik gösterimi.....	132
Şekil 7.1.2 Sertlik ölçümlerinin şematik gösterimi.....	133
Şekil 7.2.1 Örtülü elektrot (a) ve MAG (b) yöntemleri ile çekilen dikişler.....	135
Şekil 7.2.1.1 Örtülü Elektrot (a) ve MAG (b) yöntemleri için ITAB genişlikleri.....	135
Şekil 7.2.2.1.1 Örtülü El. uygulaması için kaynak bölgesinden alınan mikroyapı resimleri.....	136
Şekil 7.2.2.2.1 Örtülü Elektrot uygulaması için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı.....	137
Şekil 7.2.2.3.1 MAG uygulaması için kaynak bölgesinden alınan mikroyapı resimleri.....	138
Şekil 7.2.2.4.1 MAG uygulaması için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı.....	139
Şekil 7.3.1 TIG (a) ve Plazma (b) yöntemleri ile çekilen dikişler.....	141
Şekil 7.3.2.1.1 TIG yöntemi için kaynak metali iç yapısı (X-Ana metal, E-Elektrot).....	143
Şekil 7.3.2.1.2 TIG yöntemi için kaynak metalinin mikroyapı resimleri.....	143
Şekil 7.3.2.2.1 TIG uygulaması için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı.....	144
Şekil 7.3.2.3.1 Plazma yöntemi için kaynak metali iç yapısı (X-Ana metal).....	145
Şekil 7.3.2.3.2 Plazma yöntemi için kaynak metalinin mikroyapı resimleri.....	146
Şekil 7.3.2.4.1 Plazma uygulaması için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı.....	147
Şekil 7.4.1 Toz Altı (Fe 37) (a) ve Toz Altı (304) (b) yöntemleri ile çekilen dikişler.....	149
Şekil 7.4.1.1 Toz Altı (Fe 37) için ITAB genişliği.....	149
Şekil 7.4.1.2 Toz Altı (Fe 37) için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliği.....	150
Şekil 7.4.2.1.1 Toz Altı (Fe 37) için kaynak bölgesinden alınan mikroyapı resimleri.....	151
Şekil 7.4.2.2.1 Toz Altı (Fe 37) için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı.....	152

Şekil 7.4.2.3.1 Toz Altı (304) için kaynak metali iç yapısı (X-Ana metal, E-Elektrot, T-Kaynak Tozu)	153
Şekil 7.4.2.3.2 Toz Altı (304) için kaynak metalinin mikroyapı resimleri.....	154
Şekil 7.4.2.4.1 Toz Altı (304) için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı.....	155
Şekil 7.5.1 Örtülü E. (Ön Tavsız) - Örtülü E. (Ön Tavlı) yöntemleri ile çekilen dikişler	157
Şekil 7.5.1.1.1 Örtülü E. (Ön Tavsız) uygulaması için ITAB genişliği	157
Şekil 7.5.1.1.2 Örtülü E. (Ön Tavsız) uygulaması için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliği	158
Şekil 7.5.1.2.1 Örtülü E. (Ön Tavlı) uygulaması için ITAB genişliği.....	159
Şekil 7.5.1.2.2 Örtülü E. (Ön Tavlı) uygulaması için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliği	159
Şekil 7.5.2.1.1 Örtülü E.(Ön Tavsız) için kaynak bölgesinden alınan mikroyapı resimleri... 161	
Şekil 7.5.2.2.1 Örtülü E. (Ön Tavsız) için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı.....	162
Şekil 7.5.2.3.1 Örtülü E. (Ön Tavlı) için kaynak bölgesinden alınan mikroyapı resimleri....	163
Şekil 7.5.2.4.1 Örtülü E. (Ön Tavlı) için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı.....	164

TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1	Isı membaı güçlerine göre ark kaynak yöntemleri..... 6
Tablo 3.1	Akım yoğunluğunun ergime oranına etkisi..... 16
Tablo 3.2	Ark kaynak yöntemlerinin verim katsayıları 23
Tablo 3.3	Kaynak tozlarının adları ve bileşimleri..... 30
Tablo 3.4	Kimyasal bileşimlerine göre kaynak tozlarının sınıflandırılması 31
Tablo 4.1	Çeşitli metal ve alaşımların ergime sıcaklıkları..... 51
Tablo 4.2	Çeşitli metal ve alaşımların ısı iletim katsayıları 53
Tablo 4.3	Çeşitli elemetlerin özgül ısınma ısıları..... 54
Tablo 4.4	Çeşitli metallerin 20°C'deki ısıl genişleme katsayıları..... 55
Tablo 4.5	Çeliklerdeki alaşım elemanları ve etkileri 58
Tablo 4.6	C _{es} 'e göre ön tav sıcaklıklarının belirlenmesi 62
Tablo 4.7	Bazı metal ve oksitlerinin ergime sıcakları ile göreceli oksit oluşturma eğilimleri 63
Tablo 4.8	Enerji girişinin HQ130 çeliğinin ITAB sertliğine etkisi..... 72
Tablo 4.9	Numunelerin kimyasal bileşimi 74
Tablo 4.10	HSLA 100 çeliğinin bileşimi 81
Tablo 5.1	Malzeme-kalınlık açısından ark kaynak yöntemlerinin tercihi..... 84
Tablo 5.2	Fe 37 malzeme özellikleri..... 92
Tablo 5.3	Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG alın kaynağında yöntemlere göre uygun kaynak parametreleri..... 92
Tablo 5.4	Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG yöntemleri ile alın kaynağında ITAB'lardaki sıcaklık dağılımı (Hesaplanmıştır)..... 97
Tablo 5.5	Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin alın kaynağında yönteme göre elde edilen sonuçlar 99
Tablo 5.6	AISI 304 malzeme özellikleri 101
Tablo 5.7	Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin TIG ve Plazma alın kaynağında yöntemlere göre uygun kaynak parametreleri 101
Tablo 5.8	Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin Plazma ve TIG yöntemleri ile alın kaynağında ITAB'lardaki sıcaklık dağılımı (Hesaplanmıştır)..... 106
Tablo 5.9	Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik alın kaynağında yönteme göre elde edilen sonuçlar..... 108
Tablo 5.10	Fe 37 ve AISI 304 malzemelerin özellikleri..... 110
Tablo 5.11	Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağı için seçilmiş kaynak parametreleri..... 111
Tablo 5.12	Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında ITAB'lardaki sıcaklık dağılımları (Hesaplanmıştır)..... 115
Tablo 5.13	Altı mm kalınlığındaki Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında elde edilen sonuçlar 117
Tablo 5.14	Fe 37 malzeme özellikleri..... 120
Tablo 5.15	Uygulama için seçilmiş kaynak parametreleri..... 120
Tablo 5.16	Yöntemlere göre ITAB'da sıcaklık dağılımı (Hesaplanmıştır)..... 125
Tablo 5.17	On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çelikler üzerine dikiş çekilmesiyle elde edilen sonuçlar..... 127
Tablo 7.1	Deneyisel çalışma 1 için malzeme ve elektrot bileşimleri ile kaynak parametreleri 134
Tablo 7.2	Deneyisel çalışma 1 için teorik ve ölçülen ITAB genişlikleri 135
Tablo 7.3	Örtülü E. uygulaması için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar . 137

Tablo 7.4	Örtülü El. uygulaması için yapılan sertlik ölçümü sonuçları.....	137
Tablo 7.5	MAG uygulaması için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar.....	139
Tablo 7.6	MAG uygulaması için yapılan sertlik ölçümü sonuçları	139
Tablo 7.7	Deneysel çalışma 2 için malzeme ve elektrot bileşimleri ile kaynak parametreleri	141
Tablo 7.8	Deneysel çalışma 2 için teorik ITAB genişlikleri.....	142
Tablo 7.9	TIG uygulaması için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar	144
Tablo 7.10	TIG uygulaması için yapılan sertlik ölçümü sonuçları	144
Tablo 7.11	Plazma uygulaması için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar	146
Tablo 7.12	Plazma uygulaması için yapılan sertlik ölçümü sonuçları.....	147
Tablo 7.13	Deneysel çalışma 3 için malzeme ve elektrot bileşimleri ile kaynak parametreleri	148
Tablo 7.14	Deneysel çalışma 3 için teorik ve ölçülen ITAB genişlikleri	150
Tablo 7.15	Toz Altı (Fe 37) için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar	152
Tablo 7.16	Toz Altı (Fe 37) için yapılan sertlik ölçümü sonuçları	152
Tablo 7.17	Toz Altı (304) için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar	154
Tablo 7.18	Toz Altı (304) için yapılan sertlik ölçümü sonuçları.....	155
Tablo 7.19	Deneysel çalışma 4 için malzeme ve elektrot bileşimleri ile kaynak parametreleri	156
Tablo 7.20	Örtülü E. (Ön Tavsız) uygulaması için teorik ve ölçülen ITAB genişlikleri..	158
Tablo 7.21	Örtülü E. (Ön Tavlı) uygulaması için teorik ve ölçülen ITAB genişlikleri	160
Tablo 7.22	Örtülü E. (Ön Tavsız) için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar	161
Tablo 7.23	Örtülü E. (Ön Tavsız) için yapılan sertlik ölçümü sonuçları	162
Tablo 7.24	Örtülü E. (Ön Tavlı) için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar...	163
Tablo 7.25	Örtülü E. (Ön Tavlı) için yapılan sertlik ölçümü sonuçları	164

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tez çalışmamda ilgi, tecrübe ve yardımlarını esirgemeyen ve çalışmamı yönlendiren Sayın Hocam Prof. Nurullah Gültekin'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ayrıca tez çalışmamın deneysel uygulama kısmında her türlü ilgi ve desteğini gördüğüm hocalarım Arş. Gör. Dr. İbrahim Şahin ile Prof. Dr. Nihat Tekin'e ve Metalurji Bölümü uzmanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Her zaman yanımda olan aileme de sonsuz teşekkür ederim.

ÖZET

Bu çalışmada, günümüz endüstrisinde, gerek uygulama kolaylığı sunması gerekse kaynak için kontrollü ısı girdisi sağlanması sebebi ile çok geniş bir kullanım alanı bulmuş olan ark kaynak yöntemlerinde ısı tüketimi ile malzeme/kalınlık ilişkisi incelenmiştir.

Literatür taramasında ulaşılan ve kaynak işleminde ısı tüketimi - malzeme - kalınlık ilişkisine atıfta bulunan formüller ve çizelgelerden; yine literatürde verilen ve pratik uygulamalarda kullanılması önerilen parametrelerden faydalanmak suretiyle, teorik uygulamalar yapılmıştır. Teorik uygulamalardan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

DeneySEL çalışmalarda, 3-6-10 mm kalınlıklarında ve 150 x 250 mm ebatlarında Fe 37 ve AISI 304 numuneleri kullanılmıştır. Kaynak dikişleri, numune yüzeylerine tek paso halinde çekilmiştir. Numuneler dikiş çekildikten sonra atmosfer şartlarında soğumaya bırakılmıştır. Kaynak bölgeleri ışık metal mikroskobu ile incelenerek mikroyapıları belirlenmiş ve yine kaynak bölgelerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Aynı zamanda numunelerin ITAB genişlikleri kumpas ile veya mikroskop altında, ITAB'ı oluşturan bölgelerinin genişlikleri de mikroskop altında ölçülmüştür. Elde edilen deney sonuçları, şekiller ve tablolar halinde verilmiştir.

Deneyler sonucunda, teorik uygulama aşamasında öngörülen mikroyapılara büyük bir yaklaşıklıkla ulaşılmıştır. Fe 37 malzemeler için, ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliklerinin ve ITAB genişliklerinin, teorik hesaplara uygun çıktığı görülmüştür. AISI 304 malzemeler için ise, ITAB genişlikleri belirlenememiştir. Tez çalışması, teorik araştırma ve deneysel uygulama sonuçlarının karşılaştırılması ile sonuçlandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ark kaynak yöntemleri, ısı girdisi, ısı tüketimi, malzeme, kalınlık, ITAB.

ABSTRACT

In this study, the relationship between heat input-material-thickness in arc welding processes which are used widely in today's industry because of not only giving controllable heat input but also obtaining simple usage in practical applications, was investigated.

Calculations were made by using formulas and tables which are related to the relationship between heat input-material-thickness in arc welding processes and also welding parameters were used that are offered to use in practical applications in literature. Calculations' results were summarized.

In experimental studies, Fe 37 and AISI 304 samples were used which have 3-6-10 mm thicknesses and 150x250 mm dimensions. Samples were welded on the surface with single-pass weld and then left for cooling in the atmospheric conditions. Microstructure photos of the weldments were taken by microscope and also Vickers Hardness Tests were achieved. Furthermore, the widths of the HAZs were measured by using vernier caliper and the widths of the regions which composes the HAZ were measured by using microscope. The results were shown as figures and tables.

The experimental results showed that the microstructures are nearly accurate comparing to the approximations. For Fe 37 steels, the measurements of the widths of the HAZs and the widths of the regions which composes the HAZ are adequate for calculations. For AISI 304 steels, no measurements could be made. The study was completed by comparing the theoretical and the experimental results.

Key words : Arc welding processes, heat input, material, thickness, HAZ.

1. GİRİŞ

Kaynak; parçaların ısı veya basınç ile ya da her ikisini de uygulayarak, ilave malzeme kullanarak veya kullanmadan yapılan birleştirme işlemidir. Bu işlem esnasında birleştirilecek malzemelerin kaynak bölgeleri plastik veya sıvı duruma getirilmektedir.

Kaliteli bir kaynak dikişi için kaynak metali ile esas metal arasında bir birleşmenin oluşması ve bu birleşmenin bağlantı boyunca sürekli olması gerekmektedir. Diğer bir deyişle, kaynağın mukavemetinin tam olması için bağlantının tüm uzunluğu boyunca her noktada birleşme sağlanmalıdır.

Tüm kaynak uygulamalarında, birleştirme için, kaynak bölgesinde söz konusu parça kalınlığı için yeter derecede ve kontrol altında tutulabilen bir ısı girdisine ihtiyaç vardır. Isı girdisinin en önemli karakteristik özelliği soğuma hızını dolayısı ile kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) mikro yapısını belirlemesidir. Kaynak bölgesine gereğinden fazla ısının sevk edilmesi, kaynak banyosunun büyümesine ve kontrolünün zorlaşmasına, ısı tesiri altındaki bölgenin büyümesine, distorsiyonların artmasına, kaynak metalinin tokluğunun azalmasına, çekme dayanımının azalmasına, gerilme dayanımının azalmasına ve tane irileşmesine sebep olacağından başarısız bir kaynak elde edilir.

Kaynak için gereken ısı, bir ısı membaı tarafından sağlanır ve söz konusu ısı membaı şu temel özelliklere sahip olmalıdır:

- Isı membaı, kaynak banyosunun kontrol edilebilir bir boyutu aşmayacak şekilde küçük olmasını sağlamalıdır.
- Isı membaı kaynak yapılacak metalin ergime sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklara çıkabilmelidir. Eğer sıcaklık farkı az olursa giren ısı aynı hızla bağlantıyı terk edeceğinden bu durumda bağlantıdaki sıcaklık, ergime sıcaklığına çıkamaz.
- Kaynak için gerekli ısı miktarı, kaynak yapılacak metalin fiziksel özelliklerinin yanı sıra bağlantının şekil ve boyutlarına da bağlı olduğundan, kullanılan ısı membaının ürettiği toplam ısı miktarı ve bu ısıyı üretim hızı yeterince büyük olmalıdır.
- Kaynak için en uygun değerlerin saptanması açısından ısı membaı ayarlanabilir olmalı ve bu değerler işlem süresince sabit kalmalıdır.

Günümüz endüstriyel kaynak uygulamalarında kullanılan ısı membaıları şunlardır:

- Gaz ertitme ve termit kaynak yöntemlerinde kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan ısı,

- Direnç esaslı kaynak yöntemlerinde metal ara yüzeylerinde direnç yoluyla üretilen ısı,
- Sürtünme esaslı kaynak yöntemlerinde sürtünme sonucu elde edilen ısı,
- Özel kaynak yöntemlerinden olan laser ve elektron ışını ile kaynak yöntemlerinde ışıktan elde edilen ısı,
- Ark kaynak yöntemlerinde elektrik arkından elde edilen ısı.

Kullanılan ısı mabının çeşitli olması, her biri kendine has özellik ve çekiciliğe sahip birçok farklı kaynak yönteminin doğmasına sebep olmuştur. Bu yöntemlerden bazıları endüstride geniş ölçüde kullanılırken, bazıları ise sadece uzmanlar tarafından bilinmektedir.

Gerek kaynak için kontrollü ısı girdisi sağlanması gerekse uygulama açısından büyük kolaylık sunması, ark kaynak yöntemlerinin çok geniş bir alanda kullanılmasının en önemli sebepleridir. Bu çalışmada ark esaslı kaynak yöntemlerinde ısı girdisi ve etkileri, malzeme – kalınlık ilişkisi içerisinde irdelenecektir.

2. ARK KAYNAK YÖNTEMLERİ VE ESASLARI

Ergitme esaslı kaynak uygulamalarından olan ark kaynak yöntemlerinde, birleştirme için gerekli ısı enerjisi elektrot ile iş parçası arasında oluşturulan “elektrik arki” ile sağlanır.

Ark esaslı kaynak yöntemlerinde kaynak arkını oluşturmak amacıyla kullanılan elektrotlar, ergiyen ve ergimeyen elektrotlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Ergiyen elektrotlar kaynak sırasında ergiyerek metalsel banyoya karışırlarken, ergimeyen elektrotlar ise sadece ark oluşumuna katkıda bulunurlar.

Hemen her kalınlıktaki demir esaslı veya demir dışı metal ve alaşımlarının kaynağında kullanılan ark esaslı yöntemler; uygulama kolaylığına, yüksek ergime gücüne, daha ucuz ve hızlı imalatın yanında hem kalitenin yükseltilmesini sağlayan hem de verimliliği arttıran otomasyona elverişliliği sayesinde günümüzde en çok kullanılan kaynak yöntemleridir.

Ark kaynak yöntemlerinde kaliteli kaynak dikişinin elde edilebilmesi için arkın kararlı olması ve kaynak bölgesinin dış etkilerden korunması gerekmektedir. Örtülü elektrot, koruyucu gaz ve koruyucu toz kullanmak bu durum için alınan önlemler olup ayrıca ark esaslı uygulamaların isimlendirilmesini sağlarlar.

2.1 Elektrik Arkının Tanımı

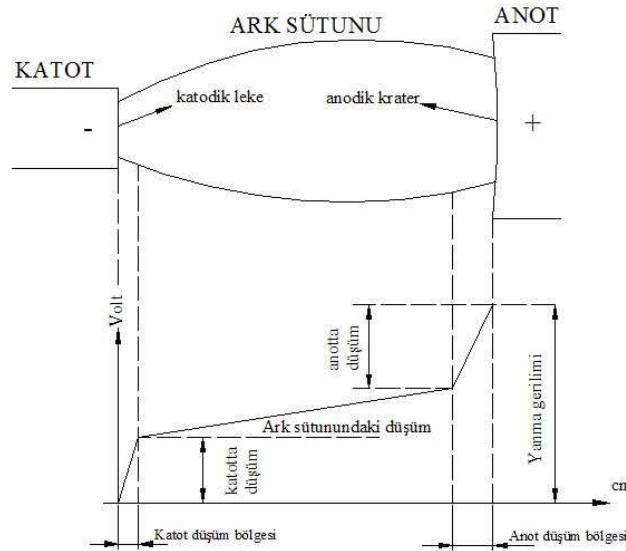
Yüksek yoğunluklu ısı girdisi sağlamasının yanı sıra uygulama kolaylığı sunması sebebiyle günümüz kaynak teknolojisinde en çok kullanılan enerji tipi olan kaynak arkı, elektrik akımı ile kızdırılmış bir katottan yayınan elektronların yüksek hızla bir anodu bombardıman etmesi olarak tanımlanabilir (Kaluç, 2004).

Kaynak işlemi esnasında, elektrot iş parçasına değdirildiğinde devreden akım geçmeye başlar. Akımın hareketi devrede bir sıcaklık artışına sebep olur. Bu sıcaklık artışı, direncin en yüksek olduğu yer olan elektrotun iş parçasına temas noktasında maksimum değere ulaşır. Temas noktasında yüksek akım yoğunluğu nedeniyle açığa çıkan ısı, metalin kaynama noktasına kadar kızmasına ve katottan elektron yayınmasına neden olur. Yayınan elektronların anodu bombardıman etmesi sonucu nötr moleküller iyonize olurlar. İyonizasyon etkisiyle temas noktasındaki hava iletken hale geçer. Bu durumda elektrot bir miktar geri çekilirse akım, iletken hale gelmiş olan havanın içinden akmaya devam eder ve elektrot ile iş parçası arasında ark oluşur.



Şekil 2.1.1 Elektrik arki

Uygulamada kullanılan kaynak arkının gücü 0,3 ile 160 kW; ısı eşdeğeri ise 70 ile 40,000 cal/s arasında değişmektedir. Arkın oluşturduğu ark demetinin ısı enerjisi, katodik leke (negatif elektrotun ucundaki kızgın nokta) ve anodik krater (pozitif elektrotun ucundaki krater şeklindeki oyuk) arasında dağılır (Şekil 2.1.2). Anodik krater ve katodik lekenin sıcaklıkları kullanılan elektrot tipine ve ark atmosferine göre 2000 ile 4000 °C, ark sütununun sıcaklığı ise 5000 °C civarındadır (Anık, 1996).



Şekil 2.1.2 Ark sütununun ve arkta gerilim dağılımının şematik görünümü (Gültekin, 1991)

Arkta, Ohm Kanunu'na uymayan, ark sütununda gayet düşük seviyede olan, katotta ve anotta en yüksek değerlerine ulaşan gerilim düşümleri meydana gelmektedir. Ark geriliminin düşmesini anot yüzeyindeki yüksek elektron konsantrasyonu ve katot yüzeyindeki yüksek konsantrasyondaki pozitif yüklü iyonlar ortaya çıkarmaktadır.

Katot ve anottaki düşümler $10^{-6} - 10^{-5}$ cm lik boyutsal bir aralıkta olup, elektrot malzemesine göre katot düşümü 12 - 17 V, anot düşümü ise 6 - 11 V aralığındadır (Gültekin, 1991).

Akım şiddeti arttıkça, uçlardaki gerilim önce hızla ve daha sonra da yavaş bir şekilde düşer. Aynı zamanda gerilim ve akım şiddeti, elektrotlar arasındaki mesafeye yani ark boyuna da

Ark üfleme, kaynakta dikiş kalitesini bozması nedeniyle, istenmeyen bir olay olup önlemek için aşağıdaki önlemler alınabilir:

- Elektrota uygun bir eğim verilmesi,
- İlk pasonun (kök pasosu) adım yöntemiyle yapılması,
- Kaynak dikişinin puntalanarak yapılması,
- Kısa ark boyu ile kaynak yapılması,
- Alternatif akım kullanılması,
- İnce çaplı elektrotların tercih edilmesi (Anık, 1996).

2.2 Ark Kaynak Yöntemleri

Ergitme esaslı kaynak yöntemlerinden olan ark kaynak yöntemlerinde birleştirme, ark ısı ile ergitilmiş olan ana ve ilave malzemelerin karışımından meydana gelen kaynak metalinin katılaşmasıyla oluşmaktadır.

Kaynak esnasında ısıtma ve onu takip eden soğutma aşamasında kaynak bölgesinde çeşitli iç yapılar ortaya çıkar. Oluşan bu yapılar kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini direkt etkilediğinden, ısınma ve soğuma olaylarının kontrol altında tutulması gerekmektedir. Kaynak sırasında ısınma ve soğuma olaylarının kontrolü, sağlanan ısı girdisiyle doğrudan ilişkilidir.

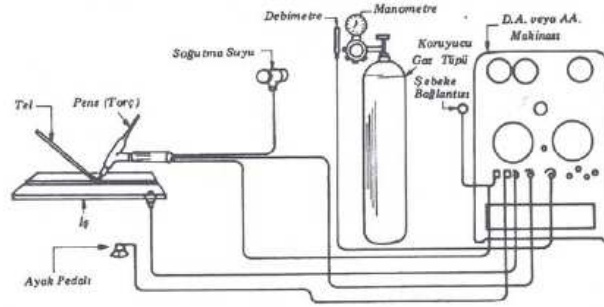
Arzu edilen konstrüksiyona göre kullanılan malzemelerin ve malzeme ebatlarının değişiklik göstermesi, kaynak açısından gerekli ısı girdisinin de değişmesine neden olmaktadır. Gereken ısı girdisi değişiminin kolayca sağlandığı ve günümüz endüstrisinde en fazla uygulama alanı bulmuş ark esaslı kaynak yöntemleri, ısı membaı güçlerine göre şu şekilde sıralanabilir:

Tablo 2.1 Isı membaı güçlerine göre ark kaynak yöntemleri (Gültekin, 1991, 2006)

Yöntem	Isı Membaı Gücü
TIG (WIG) Kaynağı	0,1 - 8 kJ/s
Plazma Kaynağı	0,3 - 20 kJ/s
Elektrik Ark Kaynağı	0,5 – 28 kJ/s
MIG/MAG Kaynağı	1 – 42 kJ/s
Toz Altı Kaynağı	8 – 80 kJ/s

2.2.1 TIG (WIG) Kaynağı

Tungsten (Wolfram) Inert Gas kelimelerinin baş harflerinden oluşmuş TIG (WIG) kaynak yönteminde gerekli ısı enerjisi, ergimeyen bir tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşturulan ark ile sağlanır ve kaynak banyosu tungsten elektrotu çevreleyen bir nozuldan gönderilen He, Ar veya bunların karışımı gazlar kullanılarak korunmaktadır. İlave kaynak metali gerekli durumlarda kaynak bölgesine el ile veya otomatik olarak sevk edilir.



Şekil 2.2.1.1 TIG (WIG) kaynak donanımı prensip şeması (Anık, 1996)

TIG yönteminde kaynak edilen malzemenin türüne göre hem alternatif hem de doğru akım kullanılmaktadır. Bu yüzden kaynak makinaları alternatif ve doğru akım veren kaynak makinaları olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Alternatif akım veren kaynak makinalarına transformatör veya diğer adıyla kaynak trafosu denilmektedir. Şebekeden aldıkları akımı kaynak yapılabilecek niteliklere dönüştürürler. Transformatörlerin özellikleri şu şekilde sıralanır:

- İlk satın alma maliyetleri düşük, ömürleri uzun, bakım giderleri azdır.
- Az yer kaplarlar, hafiftirler ve verimleri yüksektir.
- Boşta çalışma tüketimleri düşüktür.
- Bakır, hafif metaller ve yüksek alaşımlı çeliklerin kaynağı için elverişli değildirler.
- Ark üfleme azdır.

Doğru akım veren kaynak makinaları ise kaynak jeneratörleri ve kaynak redresörleridir. Kaynak jeneratörleri, akım üretici görevi yapan dinamonun bir elektrik, bir benzin veya bir dizel motoru ile tahrik ettirilmesi sonucu kaynak için gerekli elektrik akımını üretirler. Tahrik işlemiyle dinamo rotoru, manyetik alanda döner ve bunun sonucunda üretilen elektrik enerjisi, rotor milindeki kolektörden iki adet kömür fırça aracılığıyla çekilir ve kaynak kabloları

yardımla kaynak yerine gönderilir. Kaynak jeneratörleri aşağıda sıralanan olumsuzlukları nedeniyle tercih edilmezler.

- Bakım giderlerinin yüksek olması,
- Kullanım ömürlerinin kısa olması,
- Maliyetlerinin yüksekliği,
- Verimlerinin düşüklüğü,
- Boşta çalışma tüketimlerinin yüksekliği.

Kaynak redresörü, şebekeden alınan akımın kaynak yapılabilecek değerlere dönüştürülmesini sağlayan bir transformatör ve elde edilen bu kaynak akımını doğru akıma çeviren redresör (doğrultmaç) olmak üzere iki ana kısımdan meydana gelir. Jeneratörlerden birçok bakımdan üstünlükleri yanında, doğru akımın sağladığı tüm üstünlüklere sahiptir. Ayrıca boşta çalışma tüketimleri düşük, verimlilikleri yüksektir. Bakım giderleri düşüktür ve sessiz çalışırlar. Bu nedenlerden ötürü de tercih edilirler.

Kaynak teknolojisinde en önemli gelişmelerden bir tanesi inverterlerin uygulamaya girmesidir. Diğer kaynak makinelerinde normal elektrik devresinden çekilen alternatif akımın frekansı değiştirilmeden sadece gerilimi ayarlanırken, inverterlerde şebekeden çekilen alternatif akım önce bir redresöre girerek doğru akıma dönüştürülür sonra Chooper diye adlandırılan özel bir cihazda yüksek frekanslı alternatif akıma çevrilir. Bu yüksek frekanslı alternatif akımın gerilimi transformatörde kaynak için uygun değere indirgenerek doğrultmaçta doğrultulur ve bir filtreden geçirilerek doğru akım elde edilir.

İnverterler diğer kaynak makinelerine nazaran daha kararlı kaynak arkı sağladıkları gibi yüksek verimli olduklarından elektrik giderlerinde önemli bir azalma ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda kaynak makineleri birden fazla yöntemi (örtülü elektrot ile kaynak, MIG/MAG, TIG kaynak yöntemleri) uygulayabilecek düzenlemelerle piyasaya sunulmaktadır. Ancak bu tip üreteçlerde bir takım sorunlar ortaya çıkmaktadır. Çünkü bir yöntemin verimli olması adına diğer yöntemin performansından feragat edilmektedir. İnverterlerin kullanılmaya başlanması ile birlikte bu tip sorunlar ortadan kalkmış ve istenen yöntemin tam performansla uygulanabilmesi olanağı doğmuştur.

Günümüzde TIG kaynağında inverterler ve redresörler tercih edilmektedir. İnverterler, hafif olduklarından ve kararlı bir ark oluşturduklarından dolayı tercih edilmektedirler. Redresörler ise kaynak yapılan malzemeye göre hem alternatif akımı hem de doğru akımı

sağlamaktadırlar. İhtiyaç olduğunda doğrultmaç devreden çıkarılarak kaynak akımı sadece transformatörden alınmakta (alternatif akım), diğer hallerde ise doğrultmaç devreye sokulmaktadır (doğru akım).

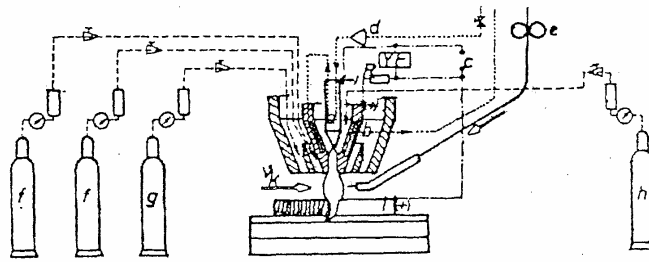
TIG yöntemi alüminyum, magnezyum, bakır ve alaşımlı çeliklerin yanı sıra titanyum, zirkonyum, molibden gibi özel metallerin kaynak işleminde de kullanılmaktadır. Prensip olarak her kalınlıktaki parçalara uygulanır olsa da çok kalın parçalarda işlem süresinin uzaması yöntemin ekonomikliğini yitirmesine sebep olduğundan 7 mm'den kalın parçaların kaynağında önerilmez. (Gültekin, 1991; Kaluç, 2004; Kongel, 2005).

2.2.2 Plazma Kaynağı

Plazma kavramından, molekül, atom, iyon ve elektronlardan oluşmuş; yüksek ısı ile yüklü gaz anlaşılmaktadır. Bu karışım elektriksel bakımdan kendi içinde nötr bir durumdadır. Plazma, bir gazı elektrik arkından geçirerek elde edilen iyonlaşmış ışıklı gaz olarak da tanımlanabilir. Kaynak tekniğinde bu plazmadan yararlanarak malzemelerin kesilmesi ve birleştirme işlemleri gerçekleştirilmektedir.

Plazma arkı, serbestçe yanan arkta farklı olarak, çok iyi bir şekilde su ile soğutulan bir bakır memenin içinde daralan bir arktır. Bu daralma, arkın güç yoğunluğunun dolayısı ile sıcaklığının 10.000-30.000 °K arasında bir sıcaklığa artmasına sebep olmaktadır. Uygulamada plazma arkı dolaylı ve doğrudan olmak üzere iki şekilde elde edilir. Dolaylı ark eldesinde plazma arkı, bakır meme ile elektrot arasında oluşturulurken; doğrudan arkta elektrot ile iş parçası arasında oluşturulmaktadır (Gültekin, 1991 ve Kaluç, 2004).

Şekil 2.2.2.1'de plazma birleştirme kaynağı için gerekli donatım görülmektedir.



a. elektrot (katot), b. bakır meme (anot), c. doğru akım kaynağı, d. soğutma suyu, e. kaynak teli, f. odak gazları (Ar-H₂), g. koruyucu gaz (Ar), h. plazma gazı (Ar), i. parça

Şekil 2.2.2.1 Plazma kaynağı için gerekli donatım (Gültekin,1991)

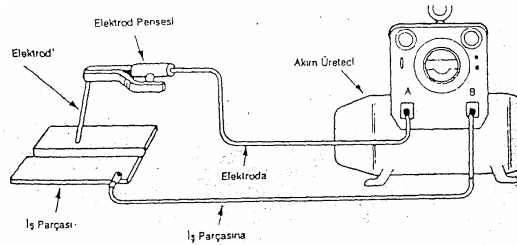
Burada ark, elektrot ile su soğutmalı bakır meme arasında yanmaktadır. Plazma gazı, bakır memenin ortasından parça yönüne doğru püskürtülmektedir. Yüksek sıcaklık etkisiyle plazma

gazı iyonize edilir. Elde edilen bu plazma ile birleştirme sağlanır. Plazma kaynağında, kaynak banyosu ve metal göçümünün atmosfer gazlarından etkilenmemesi için ikinci bir koruyucu gaz kaynak bölgesine gönderilir. Ayrıca kullanılan kaynak cihazlarının çoğunda, plazma memesinin dışında üçüncü bir çevre gazı karışımı gönderilmektedir. Odaklama gazı olarak da adlandırılan bu karışım Ar-He, Ar-H₂, Ar-N₂ gazlarını içermektedir (Gültekin, 1991).

Plazma kaynağında genellikle ilave malzeme kullanılmadan 8-10 mm kadar parçaların alın altına birleştirilmesi mümkün olabilmektedir. Bu yöntemde kaynak hızları, TIG yönteminde ulaşılan hızların 2 katına kadar çıkabilmektedir. Alaşım-sız, düşük veya yüksek alaşımlı çelikler, nikel ve nikel alaşımları, titanyum, zirkonyum, bakır ve alaşımlarının kaynak uygulamalarında yeterli mekanik özelliklere sahip dikişler elde edilmesi sebebiyle tercih edilen plazma kaynağında doğru akımın kullanılmakta ve son yıllarda inverter tipi akım üreteçleri tercih edilmektedir (Kaluç, 2004 ve Kongel, 2005).

2.2.3 Elektrik Ark Kaynağı

Günümüzde ark kaynak yöntemleri arasında en yaygın uygulamaya sahip bu yöntemde ark, ergiyen bir çubuk elektrot ile iş parçası arasında yanar ve kaynak banyosu, havanın zararlı etkilerinden elektrot tarafından sağlanan cüruf ile korunur.



Şekil 2.2.3.1 Elektrik ark kaynağı prensip şeması (Anık, 1996)

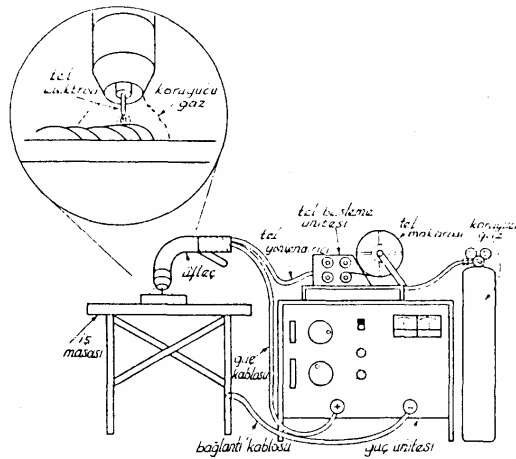
Şekil 2.2.3.1 'de de gösterildiği gibi, hem ark taşıyıcı hem de kaynak ilave malzemesi olarak görev yapan çubuk elektrot, elektrot pensesi ile kaynak kablosu aracılığıyla akım üretecinin bir kutbuna bağlanır. Diğer kutup, parça kablosu ve parça klemensi aracılığıyla iş parçasına tutturulur. Kaynak akımının elektrottan iş parçasına temas noktasından geçmesiyle ısı yükselir, iş parçası ve elektrot ergimeye başlar. Elektrottaki ergiyen metal, damlacıklar halinde metelsel banyoya akar ve kaynak dikişini oluşturur.

Bu yöntemde, güvenilir bir kaynak dikişi elde edilebilmesi için kaynakçının iyi yetiştirilmiş olması gerekmektedir. Ayrıca kaynak işlemi süresince cürufun temizlenmesi ve elektrot değiştirilmesi için harcanan zamanın fazla olmasının yanı sıra kaynak hızı da sınırlıdır.

Paslanmaz çelikler, nikel ve alaşımlarının yanı sıra alaşımsız çelikler, az alaşımlı çelikler ve dökme demirlerin kaynağında kullanılan bu yöntemde, uygun kaynak parametreleri seçilmek şartıyla, 8-10 mm kalınlığındaki parçalar ağız açmadan iki taraftan birer paso çekilerek kaynak edilebilmektedir (Kaluç, 2004).

2.2.4 MIG/MAG Kaynağı

Metal Inert Gas ve Metal Active Gas kelimelerinin baş harflerinden türetilmiş MIG ve MAG kaynak yöntemleri kullanılan cihaz ve donatılar açısından benzerdirler. Farklı tarafı MIG kaynak yönteminde koruyucu gaz olarak He, Ar veya He-Ar karışım gazları kullanılmasına karşın, CO₂ veya CO₂-Ar-O₂ atmosferi altında yapılan MAG yönteminde, katı CO₂ in kaynak tabancasına gelmesi için özel bir elektrik ısıtıcılı, basınç düşürücülü ventil kullanılmasıdır.

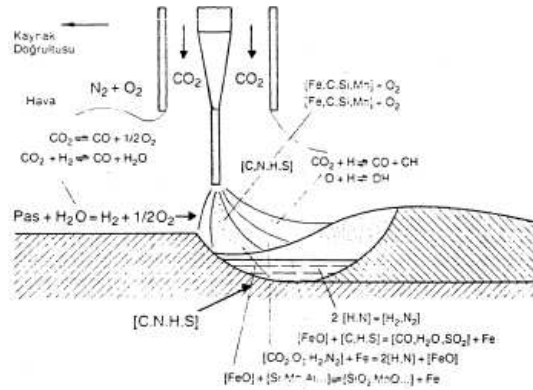


Şekil 2.2.4.1 MIG kaynağı donatımı ve işlemde dikiş oluşumu (Gültekin, 1991)

Uygulama kolaylığı açısından en çok tercih edilen kaynak yöntemlerinden olan MIG/MAG yöntemlerinde ark, koruyucu gaz atmosferi altında kaynak torcundan gelen çıplak kaynak teli ile parça arasında yanar. Torç içerisinde şasenin bağlı olduğu iş parçasına değmesiyle kaynak işlemi başlar ve kaynakçının isteğine göre devam eder. Kaynak için gerekli kanyak teli otomatik tel sürme tertibatı ile kaynak banyosuna iletiildiğinden, kaynakçının becerisi ön planda değildir (Tülbentçi, 1998 ve Kongel, 2005).

Paslanmaz çelikler, alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, nikel ve alaşımları, magnezyum ve alaşımları, az alaşımlı ve alaşımsız çelikler gibi malzemelerin kaynağında yararlanılan MIG yönteminde kullanılan asal gazlar (Ar ve He) maliyeti olumsuz yönde etkilemektedirler. Argon ve helyuma nazaran daha ucuz olan CO₂ in kullanıldığı MAG yöntemi maliyetleri azaltmasına karşın alüminyum ve alaşımları gibi kolayca oksitlenen malzemelerin kaynağında kullanılamamaktadır.

CO_2 gazı kokusuz, renksiz ve havadan yaklaşık 1,5 kat ağır bir gazdır. Bu gaz, metalsel kaynak banyosunu havanın N_2 ve H_2 nüfuziyetinden korumasına karşın oksidasyona engel olamamaktadır. Kaynak sıcaklığında CO ve O_2 ye ayrılan CO_2 , sıvı haldeki demir ile de reaksiyona girerek demir oksit oluşturmaktadır. Demir oksit bünyesine Mn ve Si alarak dikişte bu elementlerin kaybına neden olmaktadır. Ortaya çıkan bu yanma kayıpları kaynak dikişinin bileşimini etkilemekte ve oluşan CO de gözenek meydana getirme ihtimalini arttırmaktadır. Şekil 2.2.4.2’de CO_2 ile koruyucu gaz kaynağında metalsel banyoda ve ark ortamında oluşması muhtemel reaksiyonlar verilmiştir.

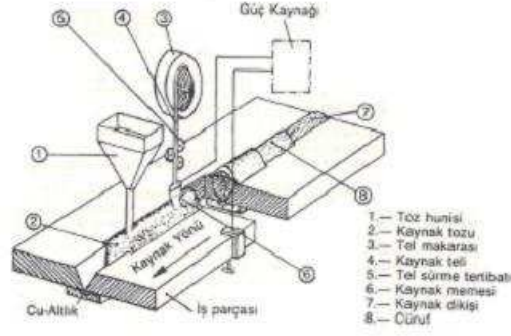


Şekil 2.2.4.2 CO_2 ile koruyucu gaz kaynağında metalsel banyoda ve ark ortamında oluşması muhtemel reaksiyonlar (Tülbentçi, 1998)

Bu nedenlerle kaynak telinin seçim aşamasında kaçınılmaz yanma kayıpları göz önüne alınmalıdır. Çünkü dezoksidan element olarak kullanılan Mn ve Si kaynak telinden sağlanmakta ve bu elementlerin gerekli reaksiyonlara yetebilmesinin yanı sıra gözenek oluşturmama emniyetinin sağlanabilmesi için kaynak telinde yeterli miktarda mevcut olmaları gerekmektedir (Gültekin, 1991).

2.2.5 Toz Altı Kaynağı

Günümüz endüstrisinde geniş bir uygulama alanı bulmuş olan yüksek ergitme gücüne ve kaynak hızına sahip kaynak yöntemlerinin başında toz altı kaynak yöntemi gelmektedir. Bu kaynak yönteminde, bir bobinden gönderilen kaynak teli, bir motorun tahrik ettiği makaralar arasından ve bir memeden geçerek kaynak bölgesine iletilir. Kaynak akımını memeden alan tel ile iş parçası arasında oluşturulan ark, ayrı bir kanaldan gelen bir toz tarafından atmosferin olumsuz etkilerinden korunur. Kaynak teli ve iş parçası arasında oluşan ark, tel ve esas metalin bir kısmını ergiterek istenilen birleşmeyi sağlar (Şekil 2.2.5.1).



Şekil 2.2.5.1 Toz altı kaynağının prensip şeması (Oğuz, 1989)

Bu yöntemde kaynak arkı, bir toz fluks örtünün altında yanmaktadır. Toz fluks, kaynak banyosu için çok iyi bir koruyucudur. Kaynak işlemi esnasında kullanılan tozun bir kısmı ergir ve camsı bir fazda katılarak kaynak dikişini kaplar. Böylece metelsel banyonun soğuma hızını azaltarak sünek bir kaynak dikişinin oluşumunu sağlar. Soğuma esnasında farklı ısıl büzölmelerden dolayı oluşan cüruf kolaylıkla yüzeyden ayrılabilir.

Yüksek kaynak kalitesi, yüksek yığıma hızları, derin nüfuziyet ve temizlik toz altı kaynağının genel karakteristikleridir. Bu yöntemle, düşük karbonlu çeliklerin yanında ön ısıtma ve kaynak sonrası ısıl işlem uygulamaları ile orta karbonlu çelikler, alaşımli çelikler, bazı dökme demirler, bakır ve alaşımları, nikel ve alaşımları kaynaklanabilir. Bu proses yüksek karbonlu çelikler, takım çelikleri, alüminyum, magnezyum, titanyum, kurşun veya çinko kaynağı için uygun değildir. Sözü edilen metaller için gerekli flukslar toz altı kaynağının yüksek sıcaklıklarında kullanımına uygun değildir. Toz altı kaynak yöntemiyle çok yüksek kaynak hızlarına (örneğin 25 mm kalınlığında çelik levha için 750 mm/dk) ulaşılmakta ve akım şiddetinin yüksek olmasından dolayı bir paso ile ağız açılmadan takribi 18 mm kalınlıkta bir parça kaynak edilebilmektedir (Kaluç, 2004 ve Kongel, 2005).

3. ARK KAYNAK YÖNTEMLERİNDE ISI TÜKETİMİ

Kaynak işlemini gerçekleştirmek için, seçilen kaynak yöntemine uygun şiddette bir ısı girdisine ihtiyaç vardır. Ergitme esaslı kaynak yöntemlerinde kullanılan ısı girdisi, metali ilk sıcaklığından ergime sıcaklığına çıkartmak için gerekli ısının yanı sıra ergime sıcaklığındaki katı metali sıvıya dönüştürmek için gerekli ısıyı da sağlamalıdır (Welding Handbook, 1976 ve Kılık, 1983).

Isı girdisi, kaynaklı bağlantının mekanik ve metalürjik özelliklerine doğrudan tesir eden soğuma hızını etkilemekte; kaynak yapılacak metalin özellikleri, kalınlığı ve bağlantı tipi gibi gerçekleştirilen kaynak işleminin özelliklerine de bağlı olarak değişmektedir.

Ark esaslı yöntemlerde kaynak arkı tarafından sağlanan ısı girdisi, kaynak parametrelerinde yapılan ayarlamalarla değiştirilebilmektedir.

3.1 Isı Tüketiminin Hesaplanması

Ark esaslı yöntemlerde kaynak için gerekli enerji, elektrik enerjisinden sağlanmaktadır. Kaynak arkıyla bu elektrik enerjisi ısı enerjisine dönüştürülmekte ve kaynak işlemi için gereken ısı girdisi sağlanmaktadır. Elektrik enerjisi ile elde edilen enerji teorik olarak,

$$Q = U * I \quad (3.1)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Q : Elde edilen enerji (Watt), U : Kaynak gerilimi (Volt), I : Kaynak akımı (Amper).

Ark gücü olarak tanımlanan bu enerji, kaynak arkına verilen enerjidir. Diğer bir deyişle, bir saniyede üretilen ısı miktarını belirtmektedir. Örneğin, 150 A ve 25 V çalışma değerlerine sahip bir elektrik ark kaynağında;

Ark Gücü = 150 * 25 = 3750 Watt = 3750 J/s dir. Bu, kaynakçının arkı kullandığı müddetçe ısının 3750 J/s hızında üretilmekte olduğunu belirtmektedir.

Eğer ark sabit tutulsaydı bu enerji, kaynağa tek bir noktadan verilen ısı girdisi olurdu. Ancak uygulamada kaynak arkı bağlantı çizgisi boyunca hareket ettiğinden, verilen ısı dağılır ve herhangi bir noktadaki ısı girdisi kaynak hızına (arkın hareket hızına) bağlı olarak değişir. Ark gücü ve kaynak hızı bilindiğinde ısı girdisini hesaplamak ve bu değeri kaynak pasosunun birim uzunluğu başına düşen ısı miktarı (birim dikiş enerjisi) olarak ifade etmek mümkündür (Gourd, 1996).

Birim dikiş enerjisi aşağıda verilen (3.2) eşitliği ile hesaplanır:

$$q = \frac{\eta * 60 * U * I}{V_K * 1000} \quad (3.2)$$

q : Birim dikiş enerjisi (kJ/cm)

U: Kaynak gerilimi (V)

I : Kaynak akımı (A)

V_K : Kaynak hızı (cm/dk)

η : Verim katsayısı.

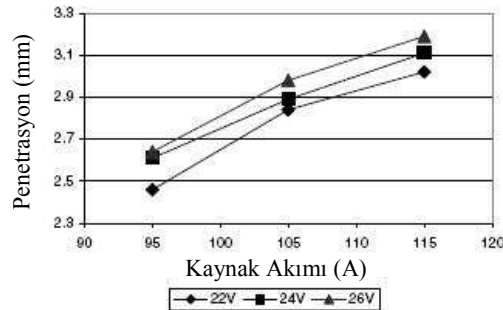
3.2 Isı Tüketimini Etkileyen Faktörler

(3.2) eşitliğinden de kolayca görülebileceği üzere ark kaynak yöntemlerinde ısı tüketimini etkileyen temel faktörler kaynak akımı, kaynak gerilimi, kaynak hızı ve verim katsayısıdır.

3.2.1 Kaynak Akımı

Kaynak akımı, değişen malzeme tipi ve kalınlığa göre gerekli ısının sağlanmasında en etkili parametredir.

Bölüm 3.1'deki (3.2) no'lu eşitliğe göre, akımın artmasıyla birlikte kaynatılacak parçalara sağlanan ısı girdisi de doğru orantılı olarak artmaktadır. Akım şiddeti, dikişin şekli üzerinde etkinliği en fazla olan parametredir. Kaynak akımı, kaynak telinin ergime hızı ve miktarını kontrol etmesinin yanında ergiyen esas metal miktarını da etkileyerek kaynak metalinin kimyasal kompozisyonunu değiştirmekte ve nüfuziyet derinliğini etkilemektedir. Akımın artması ile ergime hızı artar ve nüfuziyet büyür.



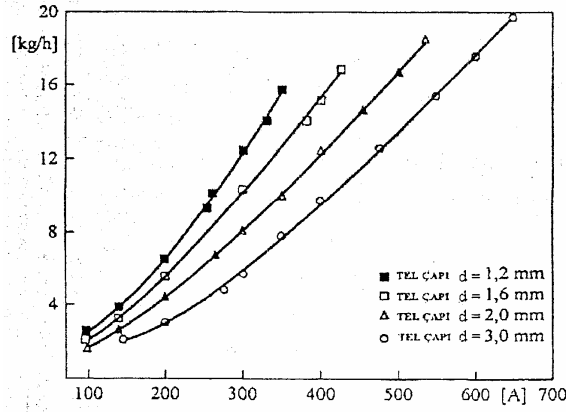
Şekil 3.2.1.1 40 cm/dk kaynak hızında penetrasyon-kaynak akımı ilişkisi (Özsaraç vd., 2005)

Özsaraç vd. (2005), gaz altı kaynak yöntemlerinde kaynak parametrelerinin nüfuziyete etkilerini incelemiştir. 2,5 mm kalınlığındaki Erdemir 6842 tip çelik numune üzerinde, 1

mm çaplı elektrot ve Şekil 3.2.1.1’de görülen kaynak akımı ve gerilimi değerleriyle yaptıkları deneyler sonucunda akımın artmasıyla birlikte nüfuziyetin de arttığını tespit etmişlerdir.

Bu noktada bir diğer önemli husus akım şiddetinin tel veya elektrot kesit alanına oranı olarak tanımlanan “akım yoğunluğu”dur. Tel veya elektrot çapının değişmemesi koşuluyla uygulanan akım şiddetinin artması birim yüzeye etki eden ısı miktarını artırmaktadır. Böylece ana metalde daha derinlere nüfuz edilebilmekte ve ergime oranı da artmaktadır.

Tablo 3.1 Akım yoğunluğunun ergime oranına etkisi (Kongel, 2005)

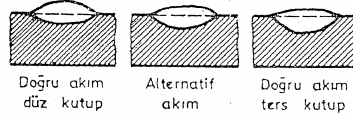


Tablo 3.1’de akım yoğunluğuna bağlı olarak ergitilen elektrot miktarındaki değişim görülmektedir. Deney 30 V ark geriliminde ve ters kutuplama şartlarında gerçekleştirilmiştir. Eğrilere göre 300 A akım şiddetinde dört değişik tel çapıyla gerçekleştirilen kaynak işleminde $d = 3$ mm tel çapı için saatteki ergime miktarı 6 kg, $d = 2$ mm tel çapı için saatteki ergime miktarı 7,8 kg, $d = 1,6$ mm tel çapı için saatteki ergime miktarı 10,7 kg ve $d = 1,2$ mm tel çapı için saatteki ergime miktarı 12,5 kg olarak yaklaşık okunmaktadır. Ayrıca eğrilere göre artan akım şiddeti ile ergime oranının da artmakta olduğu ve 360 A’den sonra $d = 1,2$ mm çaplı telin ergime oranının verilmediği görülmektedir. Bunun nedeni akım yoğunluğunun belirli bir oranı aştığında kaynak elektrotunun bu akım yoğunluğuna dayanamayarak yanmasıdır. Yanma sırasında tel ve elektrot örtüsünde element kayıpları oluşmaktadır (Kongel, 2005).

Bilindiği üzere kaynak işleminde iki tür akım kullanılmaktadır. Bunlar doğru akım ve alternatif akımdır. Bu iki tip akım arasındaki temel fark doğru akımda elektronlar bir kutuptan diğerine akarken, alternatif akımda frekans hızına bağlı olarak kutuplar sürekli değişmektedir. Ülkemizde 50 Hz frekansında alternatif akım kullanılmaktadır.

Doğru akımla alternatif akım arasındaki ergime açısından fark, doğru akımın daha yüksek ve daha alçak akım değerlerinde çalışmaya müsaade etmesinden kaynaklanmaktadır. Doğru akımda çalışma aralığı daha geniş olduğundan ergime oranı alternatif akıma göre daha hassas

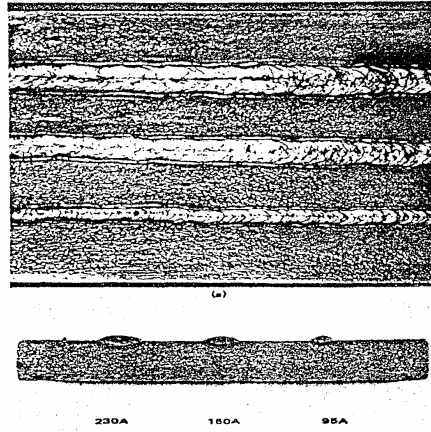
olarak ayarlanabilmektedir. Bu nedenle alternatif akımla elde edilmiş metal terk etme oranı ve nüfuziyet derinliği, aynı akım şiddetiyle kaynak edildiğinde, doğru akım ters kutup ve düz kutupla elde edilenlerin arasında bulunur (Oğuz, 1989).



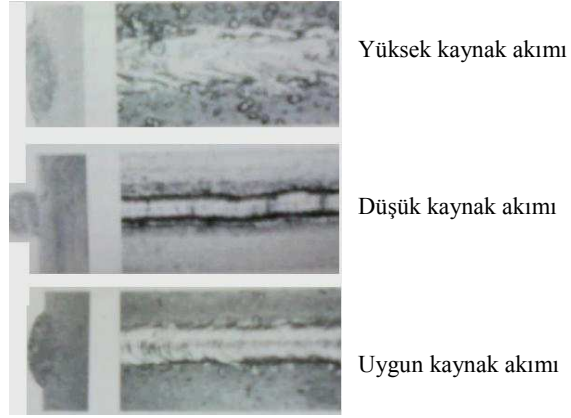
Şekil 3.2.1.2 Akım türünün ergime oranına etkisi (Oğuz, 1989)

Şekil 3.2.1.2'de akım türünün ergime oranına etkisi görülmektedir. Doğru akımla kutuplamayı değiştirerek ergime oranı değiştirilebilmektedir. Alternatif akımda ise ergime oranı ve nüfuziyet, doğru akımın ortalama değerleri arasında değişmektedir.

Şekil 3.2.1.3'te kaynak akımının artışıyla ergime ve nüfuziyet artışı görülmektedir. Kaynak akımı artınca ısının yayıldığı alan artmış, dikiş genişlemiş ve nüfuziyet artmıştır. 95 A akım şiddetiyle gerçekleştirilen kaynak işleminde ana metalin ergime oranının daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2.1.3 Kaynak akımının ergime oranına etkisi (Cary, 1989)



Şekil 3.2.1.4 Kaynak akımının ergime oranına etkisi (Cary, 1989)

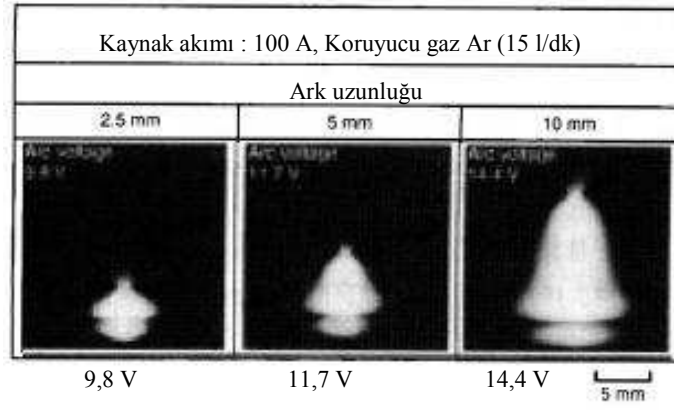
Şekil 3.2.1.4'te düşük kaynak akımında ana metalin ergime oranının ne kadar düşük olduğu ve nüfuziyet azlığı görülmektedir. Yüksek kaynak akımında ise kaynak banyosunun büyüdüğü sıçramaların arttığı görülmektedir.

Çalışma şartlarına göre doğru akımda kaynak değerlerini daha hassas ayarlayarak metal banyosunu kontrol etmek daha kolaydır. Bu nedenle doğru akım alternatif akıma göre üstünlük taşımaktadır. Ayrıca kaynak akım şiddetinin daha düşük olarak ayarlandığı doğru akımla kaynak işlemiyle ince sac parçaların kaynak işlemi daha düşük ısı girdisiyle daha rahat gerçekleştirilmektedir. Fakat kalın parçalarda yüksek ergime oranının istendiği yerlerde ark üflemesinin önemli olduğu durumlarda alternatif akım daha üstündür.

3.2.2 Kaynak Gerilimi

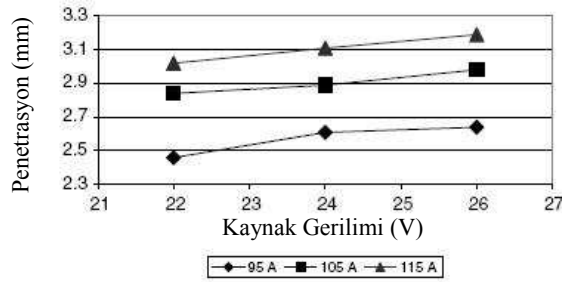
Kaynak gerilimi de kaynak akımı gibi ısı girdisine etki eden parametrelerden biridir. Bölüm 3.1'deki (3.2) no'lu eşitliğe göre, gerilimin artmasıyla birlikte ısı girdisinin artması ve bunun sonucu olarak da tıpkı kaynak akımında olduğu gibi ergime oranının ve nüfuziyetin doğru orantılı artması beklenmektedir. Ancak pratikte durum farklılık göstermektedir.

Kaynak gerilimi, elektrot ile ana malzeme arasındaki mesafe şeklinde tanımlanan ark uzunluğu ile yakından ilişkilidir. Ark uzunluğu, elle gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde kaynakçı tarafından ayarlanır. Bu nedenle kaynakçının el hassasiyetine göre değişmektedir. Zaman zaman ark uzayıp kısalmaktadır. Ark boyunun değişimi de kaynak gerilimini dolayısı ile de ısı girdisini değiştirmektedir.



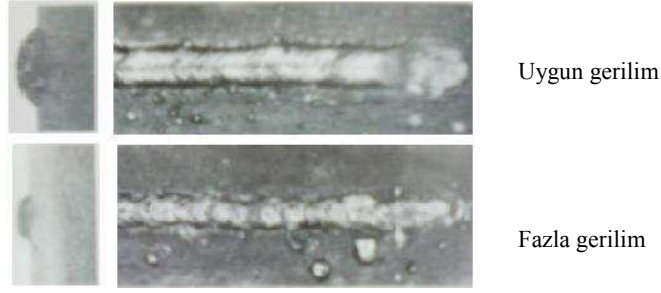
Şekil 3.2.2.1 Kaynak gerilimi – ark uzunluğu ilişkisi (Tanaka vd., 2006)

Ark uzunluğu arttığı zaman kaynak gerilimi artar ve bu sayede gerilimin artmasına bağlı olarak ısı girdisi artar; ark uzunluğu azaldığında ise kaynak gerilimi azalır, ısı girdisi düşer. Ark uzunluğu belli sınırlar arasında olmalıdır. Eğer ark boyu normalden uzun olursa arkın kararlılığı bozulur, çevreye yayılan ısı miktarının artması sonucu arkın etkinliği (ark verimi = verim katsayısı) azalır, nüfuziyet azalır, sıçramalar artar hatta ark söner ve akım geçmez. Ark boyu çok kısa olursa da nüfuziyet çok azalır.



Şekil 3.2.2.2 40 cm/dk kaynak hızında penetrasyon-gerilim ilişkisi (Özsaraç vd., 2005)

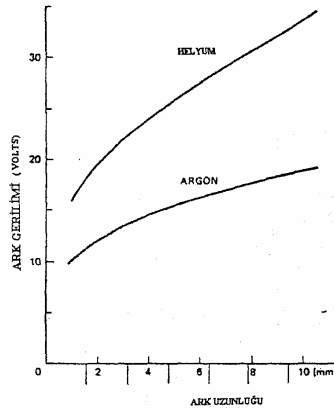
Özsaraç vd. (2005), kaynak parametrelerinin nüfuziyete etkilerini inceledikleri çalışmalarında artan gerilim değerleri ile beraber nüfuziyetin de arttığını tespit etmişlerdir. Ancak dikkat edilirse bu artış Şekil 3.2.1.1'de görülen kaynak akımının sebep olduğu artışa göre daha azdır.



Şekil 3.2.2.3 Kaynak gerilimi – ergime oranı ilişkisi (Cary, 1989)

Şekil 3.2.2.3 de gerilim değerinin ergime oranına etkisi görülmektedir. Yüksek gerilim değerinin seçilmesi durumunda ortaya çıkan nüfuziyet azlığı ve sıçramalardaki artış görülmektedir.

Kaynak gerilimine etki eden diğer önemli bir faktör de kullanılan koruyucu gazın iyonlaşma enerjisidir. Gazın iyonlaşma enerjisi yüksek olması, o gazın daha uzun bir ark ihtiyacı göstermesine ve ark geriliminin değişmesine neden olur. Yaygın kullanılan helyum ve argon gazlarının iyonizasyon enerjileri kıyaslandığı zaman helyumunkinin 24,5 eV, argonunkinin ise 15,7 eV olduğu görülür. Helyum, iyonizasyon enerjisinin yüksek olması nedeniyle daha yüksek enerjiye ihtiyaç gösterir. Bunu sağlamak için daha uzun arkla çalışıldığından dolayı kaynak gerilimi yükselir ve bu sayede daha fazla ısı girdisi sağlanır. Argon gazının düşük iyonizasyon enerjisi nedeniyle daha kısa ark boyuyla çalışılır. Kaynak geriliminin helyuma göre düşük olmasına sebep olur, nüfuziyet azalır.



Şekil 3.2.2.4 Kaynak geriliminin koruyucu gaz ile değişimi (Cary, 1989)

Bilindiği üzere soğuma hızı, ısı girdisiyle doğrudan ilişkili olup kaynaklı bağlantının mekanik ve metalürjik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Cin (1978), bazı araştırmacıların soğuma hızının kaynak akımı, kaynak gerilimi ve kaynak hızına bağlı olarak $(U \cdot I / V_k)$ parametresiyle alakalı olduğunu ifade ettiklerini, ancak bazı araştırmacıların da ısı tesiri altındaki bölgedeki

(ITAB) soğuma hızının ($U \cdot I / V_k$) den çok (I / V_k) yani akım ve hız ile ilgili olduğunu belirtmiştir.

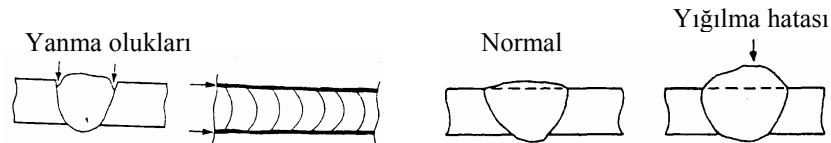
Sonuç olarak ark uzunluğunun artması ile kaynak gerilimi büyümekte, bununla beraber ısı girdisi de artmaktadır. Ancak ark uzunluğunun arttırılması, ark ısısının daha büyük bir kısmının çevreye yayılmasına ve ark veriminin azalmasına yol açmaktadır. Gerilim değerinin yükselmesi ile artan ısı girdisi, bu sefer de ark veriminin düşmesi ile azalmaktadır. Artan gerilim ile beraber ısı girdisi artış göstermekte ancak bu artış kaynak akımının yol açtığı artışa nazaran düşük kalmaktadır.

3.2.3 Kaynak Hızı

Kaynak işleminde ısı girdisini etkileyen bir diğer önemli parametre kaynak hızıdır. (3.2) no'lu ısı girdisi eşitliğinden de görülebileceği üzere, kaynak hızında meydana gelen değişim, ısı girdisine tesir etmektedir. Kaynak hızının değişmesi durumunda birim zamanda ısının transfer edildiği yüzey alanı değişmektedir. Hız azaldığı zaman, birim alana birim zamanda daha fazla ısı girdisi sağlanırken, hızın artması ile daha az ısı girdisi sağlanmaktadır.

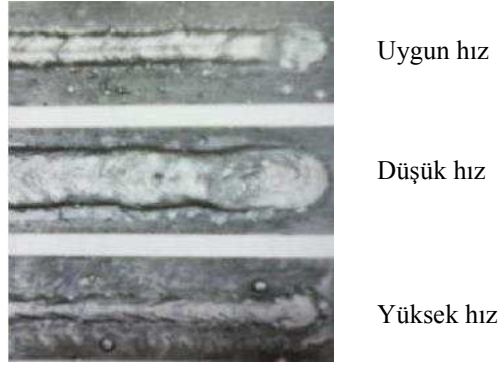
Prodüktivite açısından bakıldığında, (3.2) no'lu formülde akım ve/veya voltaj ile birlikte kaynak hızının da aynı oranda artması, malzemeye sağlanan ısı girişini teorik olarak değiştirmemektedir. Söz gelimi, kaynak akımı ve kaynak hızının 1,5 katına çıkartılması sağlanan ısı girdisini değiştirmez. Bu, kaynak işleminin daha kısa sürede tamamlanması açısından arzu edilen bir durumdur. Ancak teoride gayet olumlu bir düşünce olmasına rağmen bu durum pratiğe dönüştürülemez. Çünkü kaynak hızı tıpkı kaynak geriliminde olduğu gibi belirli sınırlar arasında olmak zorundadır.

Kaynak hızının optimum değerden az veya çok olması durumunda kaynak dikişinde hatalar oluşmaktadır. Bu hatalar, düşük kaynak hızlarında kaynak metali yığılması; yüksek kaynak hızlarında ise yanma olukları oluşumu şeklinde ortaya çıkmaktadır (Tülbentçi vd., 1999 ve Nguyen, 2005).



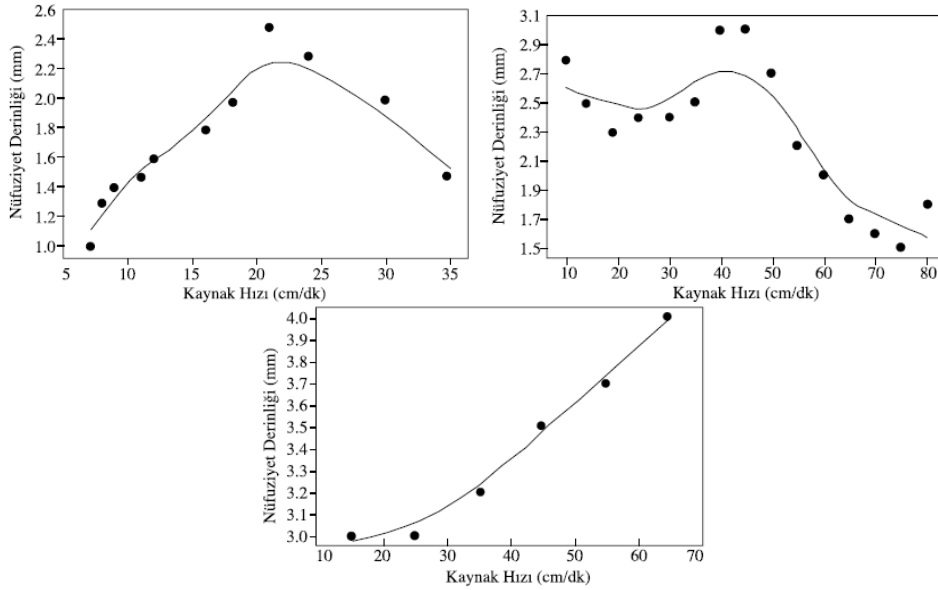
Şekil 3.2.3.1 Kaynak metali yığılması ve yanma oluğu hataları (Anık, 1996)

Optimum kaynak hızı değerinde çalışmak sadece meydana gelebilecek kaynak hatalarının önüne geçme açısından değil, aynı zamanda ergime oranı ve nüfuziyet açısından da önemlidir.



Şekil 3.2.3.2 Kaynak hızının ergime oranına etkisi (Cary, 1989)

Şekil 3.2.3.2’de kaynak hızı ile değişen ergime oranı görülmektedir. Kaynak hızının yüksek olduğu durumda işlem, dar bir alan üzerinde gerçekleşmiş ve daha az miktarda metal ergitilmiştir; hızın düşük olduğu durumda ısının yayıldığı alan artmış, kaynak bölgesi genişlemiş ve ergitilen metal miktarı artmıştır.



a. Elektrik ark kaynağı b. Gaz altı kaynak yöntemi c. Toz altı kaynağı

Şekil 3.2.3.3 Kaynak hızı-nüfuziyet ilişkisi (Tülbentçi vd., 1999)

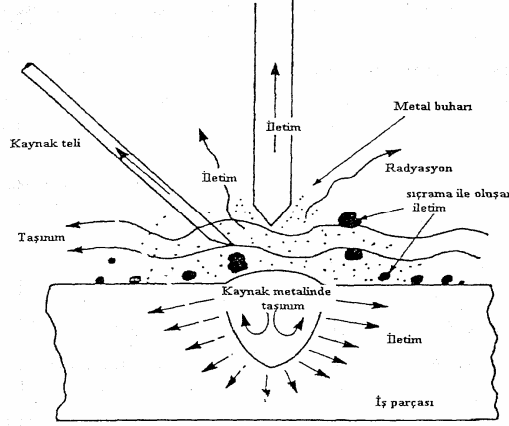
Şekil 3.2.3.3’te elektrik ark, gaz altı ve toz altı kaynak yöntemlerinde kaynak hızı ile nüfuziyet ilişkileri verilmiştir. Tülbentçi vd. (1999), 10 mm kalınlığında düşük karbonlu çelik numuneler kullanarak yaptıkları çalışmalarında, elektrik ark ve gaz altı yöntemlerinde kaynak hızının optimum değerden az veya çok olması durumunda nüfuziyetin azaldığını, toz altı kaynak yönteminde ise artan hızla birlikte nüfuziyetin de arttığını gözlemlemişlerdir. Ancak toz altı kaynağında, yüksek kaynak hızının dikiş kenarlarında yanma oluklarına ve yanma oluklarının da çentik etkisine sebebiyet verdiğini vurgulayarak; en kaliteli dikişlerin,

çalışmada seçilmiş en yüksek hız olan 65 cm/dk'da değil, 45-55 cm/dk hızlarında elde edildiğini belirtmişlerdir.

3.2.4 Verim Katsayısı

Verim katsayısı diye tanımlanan katsayı elde edilen enerjinin ne kadarının ana ve ilave metallerin ergitilmesinde kullanıldığını gösteren katsayıdır. Çünkü kaynak işlemi sırasında elde edilen enerjinin tamamı ergitme işlemi için kullanılamamaktadır. Kaynak işlemi esnasında bir çok kayıplar meydana gelmektedir.

Şekil 3.2.4.1'de kaynak işlemi esnasında meydana gelen kayıplar gösterilmiştir. Teorik olarak kaynak işleminde elde enerji elektrotta, kaynak teline ve iş parçasına gitmektedir. Fakat pratikte çevreye sıçramayla, iletimle, metal buharıyla ve taşınım ile enerji kaybı gerçekleşmektedir. Kayıp enerji miktarı kaynak yöntemine göre değişmektedir.



Şekil 3.2.4.1 Ergimeyen elektrotla kaynak işlemi esnasındaki enerji dağılımı (Kou, 1987)

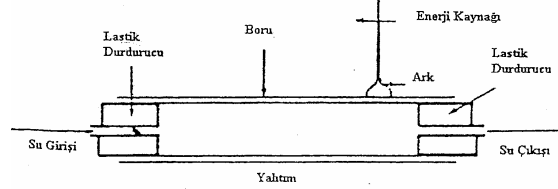
Tablo 3.2 Ark kaynak yöntemlerinin verim katsayıları (Kou, 1987)

Yöntem	Verim Katsayısı
TIG Kaynağı	
Düşük akım doğru kutuplama	0,40-0,60
Yüksek akım doğru kutuplama	0,60-0,80
Ters kutuplama	0,20-0,40
Alternatif akımla	0,20-0,50
Plazma Kaynağı	0,50-0,75
Özlü ve Örtülü Elektrot ile Elektrik Ark Kaynağı	0,65-0,85
MIG/MAG Kaynağı	0,60-0,80
Toz Altı Kaynağı	0,9-0,99

Tablo 3.2'de ark kaynak yöntemlerinin verim katsayıları verilmiştir. Burada en yüksek verim katsayılı yöntem toz altı kaynak yöntemidir. Bunun sebebi işlem esnasında oluşan koruyucu örtü tabakası sayesinde radyasyonla meydana gelen ışınlam ve enerji kayıplarının, direkt olarak

havaya taşınımıyla oluşan enerji kayıplarının, metal buharına ve sıçrama kayıplarına giden enerji kayıplarının minimum olmasıdır.

Verim katsayısı kalorimetrik ölçümlerle hesaplanabilmektedir. Bu amaçla kuru ve ıslak kalorimetrelere kullanılır. Islak kalorimetrelere bir borunun içersinden su geçirilmektedir ve aynı anda kaynak işlemi gerçekleştirilir (Kou,1987).



Şekil 3.2.4.2 Islak kalorimetre (Kou, 1987)

Burada verim katsayısını hesaplarken aşağıdaki (3.3) no'lu eşitlikten yararlanılmaktadır.

$$Q_e = m_s \cdot c_s \cdot \Delta T_s = \eta \cdot U \cdot I \quad (3.3)$$

Q_e : Elde edilen enerji (kj),

m_s : Birim zamanda boru içersinden geçen suyun kütlesi (g),

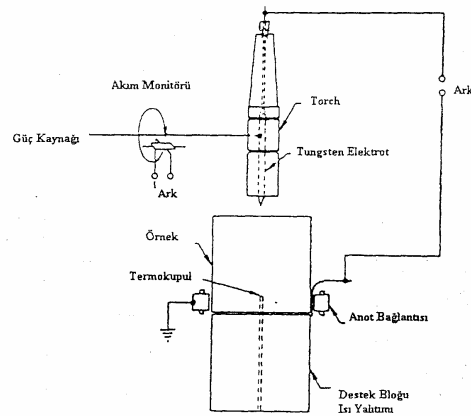
c_s : Suyun özgül ısısı (kj/ g . °C),

ΔT_s : Giriş ve çıkıştaki suyun sıcaklık farkı (°C),

η : Verim katsayısı,

U : Kaynak gerilimi (V) ve I : Kaynak akımı (A).

Kuru kalorimetrede ise anlık ısısal değişimler ölçülmekte ve bu değerler teorik değerle karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmaya göre verim katsayısı hesaplanmaktadır.



Şekil 3.2.4.3 Kuru kalorimetre (Kou, 1987)

3.2.5 Isı Tüketimini Etkileyen Diğer Faktörler

Ark kaynak yöntemlerinde ısı girdisine kaynak akımı, kaynak gerilimi, kaynak hızı ve verim katsayısının dışında başka faktörler de etki etmektedirler. Bunlar :

- Koruyucu gazların, elektrot örtülerinin ve kaynak tozlarının etkileri,
- Kaynak metali transfer tipinin etkisi,
- Kutuplamanın etkisi,
- Elektrot uç açısının etkisi,
- Serbest tel uzunluğunun etkisi,
- Torç açısının etkisidir.

3.2.5.1 Koruyucu Gazların Etkileri

Ark esaslı kaynak yöntemlerinde kaynak bölgesini havanın zararlı etkilerinden korumak, başarılı bir kaynak dikişi elde etmek için önem taşımaktadır. Kaynak işlemi sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonların kaynak bölgesine zarar vermemesi için elektrot ile ark kaynağında elektrot örtü maddesi, toz altı kaynağında koruyucu toz, gaz altı kaynak yöntemlerinde ise koruyucu gazlar kullanılmaktadır. Bu gazlar, metalsel banyoyu koruyan bir atmosfer oluşturmalarının yanı sıra arkın kararlılığı, kaynağın dolgu biçimini, dikişin mekanik özelliklerini, işlemin verimliliğini ve ısı girdisini etkilemektedirler.

Temel olarak koruyucu gazlar, nötr ve aktif gazlar olarak iki gruba ayrılır. Nötr gazlar helyum ve argon, aktif gazlar ise karbondioksit, oksijen ve hidrojenidir. Bu gazlardan oksijen ve hidrojen kaynak metaline kötü etkilerinden dolayı direkt olarak kullanılamamaktadırlar. Sadece diğer gazlarla küçük miktarlarda karıştırılarak kullanılırlar.

3.2.5.1.1 Argon

Argon asal bir gazdır, kokusu ve rengi yoktur. Yoğunluğu, yaklaşık olarak havanın yoğunluğunun 1,4 katıdır. Bu da kaynak bölgesinin iyi korunmasını ve yüksek gaz akış hızlarına gereksinim duyulmamasını sağlar. Argon gazının düşük iyonizasyon potansiyeline (15.7 eV) sahip olması, stabil ve düşük gerilimli ark meydana getirir. Bu durum kaynatılacak malzemeye sağlanan ısı girdisinde azalmaya sebep olur. Argonun düşük ark gerilimi karakteristiği özellikle ince malzemelerin elle kaynağında avantaj sağlar. Argonun bu özelliği, ana metalde kaynak işlemi esnasında oluşacak distorsiyon eğilimini azalttığı için düşey ve tavan kaynak uygulamalarında da olumlu sonuçlar verir (Yalçın, 2005 ve Kongel, 2005).

3.2.5.1.2 Helyum

Helyum da argon gibi asal bir gazdır, kokusu ve rengi yoktur. Yaklaşık olarak havanın 0,14 katıdır. Havadan hafif bir gaz olması gaz sarfiyatını çok arttırmaktadır. Yatay pozisyonda aynı şartlar altında argon gazının yaptığı korumayı sağlamak için üç misli helyuma ihtiyaç vardır. Helyum, neon gazı hariç diğer bütün gazlardan daha iyi elektrik iletkenliğine sahiptir. Bu nedenle yüksek akımların kullanıldığı kaynak uygulamaları için uygun bir gazdır. Helyumun termal iletkenliği, 6000 °C nin üzerindeki sıcaklıklarda diğer gazların termal iletkenliğinden oldukça yüksektir. Helyumun yüksek termal iletkenliği ile argondan daha yüksek ark gerilimi ve ısı girdisi elde edilir. Bu da yüksek termal iletkenliğe veya yüksek ergime sıcaklığına sahip kalın malzemelerin kaynağında avantaj sağlar ve daha geniş kaynak metalleri elde edilir. Argon gazına helyum ilavesi ile daha sıcak ve akıcı kaynak banyosu olduğundan alüminyumun kaynağında meydana gelen porozite oluşumu azalır (Yalçın, 2005 ve Kongel, 2005).

3.2.5.1.3 Karbondioksit

Karbondioksit renksiz, kokusuz ve havadan yaklaşık olarak 1,5 kat daha ağır bir gazdır. Basıncılı tüplerde kullanılır. Karbondioksit tüpleri 15 °C de takriben 65 atmosferde doldurulur. Bu şartlarda tüpün ihtiva ettiği gaz sıvı haldedir. Kullanma sırasında sıvı haldeki karbondioksit gaz haline geçer.

Argon ve helyum bir çok metalin kaynağında koruyucu gaz olarak kullanılmasına rağmen karbondioksit, az alaşımlı ve yalın karbonlu çeliklerin gaz altı kaynağında çok geniş çapta uygulama alanı bulmuştur. Karbondioksitin çeliklerin kaynağında sunduğu avantajlar; derin nüfuziyet, daha yüksek kaynak hızları ve düşük maliyet olarak sıralanabilir.

Karbondioksit gazının en büyük dezavantajı oldukça kaba ark ve aşırı sıçramalı metal transferi oluşturmasıdır. Sıçrama kayıpları çok kısa ve düzgün ark boyu ile azaltılabilir. Eğer iyi bir ark koruması sağlanırsa, sıçrama miktarı belirli tolerans sınırı içinde korunursa ve uygun dezoksidan elementler içeren elektrotlar kullanılırsa kaliteli kaynak metalleri elde edilebilir (Kaluç, 2004 ve Yalçın, 2005).

3.2.5.1.4 Karışım Gazlar

Gaz altı kaynak yöntemlerinde koruyucu gazlardan beklenenler; iyi bir metal transferi, nüfuziyet, erime genişliği, kaynak geometrisi, kaynak hızı ve düşük maliyettir. Ayrıca çatlak ve gözenek oluşturmamasıdır. Asal ve aktif gazlardan birinin tek başına bu özellikleri vermesi zordur. Gaz altı yöntemlerinde ilk önceleri helyum ve argon, daha sonraları ise karbondioksit

kullanılmaya başlanmıştır. Karbondioksit gazının kullanımı esnasında ortaya çıkan problemler ilave tel bileşimi değiştirilerek giderilmeye çalışılmış ancak istenen sonuçlar elde edilememiştir. Son yıllarda birkaç gazın belli oranlarda karıştırılması ile elde edilen karışım gazlar geniş bir uygulama alanı bulmuştur.

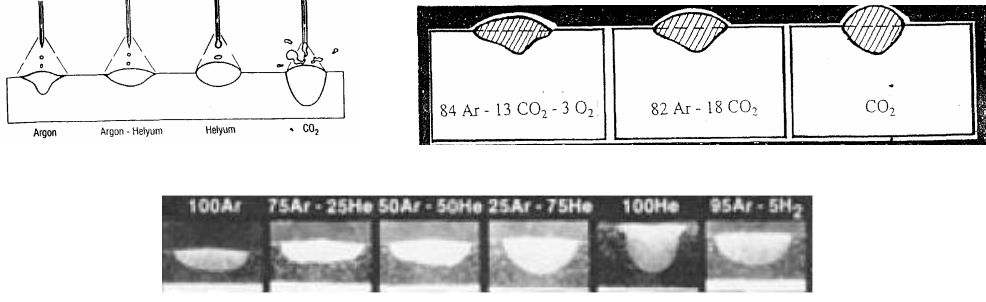
Argona %1-5 O₂ veya %3-25 CO₂ ilavesi ark stabilizesinde ve yanma oluşu oluşumunun önlenmesinde gelişmeler sağlar. Ayrıca paslanmaz çeliklerin darbeli MAG kaynağı için argon-karbondioksit karışımına helyum ilavesi ark geriliminin artmasını sağlar. Örneğin %98 Ar + %2 CO₂ karışım gazı yerine %35 He + %2 CO₂ + %63 Ar karışım gazı kullanıldığında ark geriliminde yaklaşık olarak %10 luk bir artış sağlanmakta, böylece ısı girdisinin artmasının yanında kaynak verimliliği ve kalitesi de artmaktadır.

Yalnız CO₂ ile yapılan dikişe göre argon-karbondioksit-oksijen karışımı ile yapılan kaynak dikişinin estetiğinde ve mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanabilir. %1-8 O₂ ilavesi, kaynak banyosunun akıcılığını, nüfuziyeti ve ark stabilitesini arttırır; %25'e kadar CO₂ ilavesi, sıçrama kaybını arttırır, nüfuziyeti derinleştirir ve ark stabilitesini düşürür. Düşük CO₂ ilavesi (%1-7) ile kadeh veya parmak şeklinde penetrasyon profili elde edilir. Bu karışımlar, ince malzemelerin özellikle sacların kaynağı için uygun olan düşük ısı girdisi oluşturur. Kalın parçaların çok pasolu kaynağında problemler oluşturur. Parmak şeklindeki kaynak metali profili porozite ve ergime hatalarının oluşma ihtimalini arttırır. %8-15 CO₂ ilavesi 12 mm'ye kadar kalınlığa sahip malzemelerin kaynağı için uygundur.

Yüksek CO₂ ilavesi (%16-25) yuvarlak, derin penetrasyonlu kaynak metalleri üretir ve kalın parçaların kaynağı için uygundur. Karışıma CO₂ ilavesi ısı girdisini arttırmaktadır ve böylece ergime alanı daha büyük olur, kaynak banyosunun akıcılığı artar ve kaynak metalinin profili çanak şeklini alır. Kaynak banyosunun akıcılığının artması gaz kaçışına imkan tanır böylece porozite oluşum ihtimalini azaltır. Kalın parçalar için %80 Ar + %20 CO₂ karışımı önerilirken %86 Ar + %12 CO₂ + %2 O₂ karışımı malzeme kalınlıklarının geniş aralığında iyi nüfuziyet ve kuvvetli bir ark özellikleri vermektedir. Koruyucu gazda yüksek miktarda CO₂ mevcudiyeti, düşük CO₂ mevcudiyetinden daha fazla sıçramalı kaynak oluşturur ve ark stabilizesini azaltır.

Argon gazına çok az bir miktardaki hidrojen ilavesi ark gerilimini dolayısı ile ısı girdisini yükseltir. %5 hidrojenli argon + hidrojen karışımı nikel ve alaşımlarında, %25 hidrojenli argon + hidrojen karışımı ise özellikle ısı iletimi yüksek olan kalın bakır parçaların kaynağında kullanılır (Yalçın, 2005 ve Kongel, 2005).

Şekil 3.2.5.1.4.1'de çeşitli gaz ve gaz karışımlarının kaynak dikişine etkileri görülmektedir.



Şekil 3.2.5.1.4.1 Çeşitli koruyucu gazların dikişe etkileri
(Metals Handbook, 1989 ve Yalçın, 2005)

3.2.5.2 Elektrot Örtülerinin Etkileri

Elle elektrik ark kaynağında çıplak, özlü ve örtülü olmak üzere 3 çeşit elektrot kullanılabilir. Kullanılan elektrotun çeşidi, dikişin gerek dış görünümü gerekse kalitesine yansımaktadır.

Düşük kaliteli dikişin yeterli görülmesi durumunda çıplak, yüzeyleri temiz teller kullanılabilir. Bu durumda, göçen malzeme ve kaynak banyosu, atmosferin etkilerinden korunamamakta, C, Mn ve Si oksidasyonu gelişmektedir.

Kaynak süreci içinde, arkı stabilize edecek elemanlar dengesiz olduğundan, elektrik arkında süreksizlikler ya da elektrotun parça üzerine yapışması gibi durumlar ortaya çıkabilmektedir. Dalgalı akım ile kaynak işleminde ise bu tür elektrotlarla kaynak yapmak mümkün değildir.

Esas olarak arkın kararlılığı için en uygun elektrot çeşidi, stabilize edici elemanları çekirdeğinde taşıyan özlü elektrotlardır. Dalgalı akımla da kolaylıkla kaynak yapılabilen bu elektrotların zayıf yönü, kaynak banyosu ile kaynak bölgesini korumadaki yetersizlikleridir.

Kaynak tekniği ile birleştirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan elektrot çeşidi örtülü elektrotlardır. Bu tür elektrotlarla, örtüde uygun elemanların bulunması koşulu ile kararlı bir ark ve yeterli kaynak dikişi kalitesi güvencesi verilebilmektedir (Gültekin, 1991).

Örtülü elektrotlar, örtü türlerine göre asit, rutil, oksit, bazik ve selülozik örtülü elektrotlar şeklinde sınıflandırılırlar:

Asit örtülü elektrotlar fazla miktarda ferromangan, demir oksit, kuartz ve diğer dezoksidan maddeler içermektedir. Ark yüksek sıcaklığa haiz olduğundan büzülme fazla olur. Ana metalin çatlamaya hassas olması halinde bu elektrotların kullanılması tavsiye edilmez. Aynı sebepten sıçrama kayıpları fazlaca olur ve dolayısıyla elektrot verimi nispeten düşüktür. Yatay pozisyonda kaynakta yüksek akım şiddeti ile dolayısıyla büyük ısı girdisi ve ergime

hızı ile çalışılabilir. Normal kaynak akım şiddetinde nüfuziyeti orta derece olur. Yüksek akım şiddeti kullanılarak derin nüfuziyet elde edilebilir. Kullanılan yüksek akım şiddetleri çarpılmaya neden olabileceğinden bu elektrotlar ince malzemelerin kaynağında kullanılmaz. Ayrıca bu tip elektrotlar ile elde edilen dikişin mekanik özellikleri diğer örtülü elektrotlarla elde edilenlere nazaran daha düşüktür.

Rutil örtülü elektrotların örtü ağırlığının %35'inden fazlasını titan oksit oluşturmaktadır. Örtü, titan oksit yanı sıra kuartz, az miktarda selüloz ve ferromangan içermektedir. Bu elektrotların aralık doldurma kabiliyeti ince ve orta örtü kalınlığında çok iyi, kalın örtülüde iyi derecede olup her durumda asit elektrotlarından daha iyidir. Sıcakta çatlama hassasiyeti asit elektrotlardan daha azdır. Rutil elektrotlar ergime hızı oldukça yüksek olup, nüfuziyeti ise orta derecededir. Rutil tip elektrotlarda ark çok kararlı, tutuşması kolay ve dalgalı akımda bile ark gerilimi düşüktür. Rutil elektrotlar bütün kaynak pozisyonlarında kullanılabilmelerine rağmen genellikle düz ve aşağıya meyilli pozisyonlarda kullanılır. Uygulama kolaylığı sağlaması sebebiyle günümüzde bazik tip ile birlikte en çok kullanılan örtülü elektrot tipidir.

Oksit tip elektrotlarda örtünün önemli bir bölümü demir oksittir. Yüksek akım yüklenme özelliğine sahiptirler; kaynak yaparken yüksek sıcaklık nedeni ile cüruf ve metal, çok akıcı konuma geldiğinden ancak yatay ve oluk pozisyonlarda kullanılırlar. Kaynak sırasında şiddetli karbon ve mangan yanması olduğundan yalın karbonlu çeliklerin kaynağı için çok elverişlidirler. Ancak, kaynak metali ve cüruf çok akıcı olduğundan bu tür elektrotların, aralık doldurma yeteneği iyi değildir. Ark sıcaklığı çok yüksek olup, sıcak çatlama eğilimi fazladır.

Bazik tip elektrotlar genellikle kalın örtülü olarak imal edilirler. Örtü, toprak alkali metallerin karbonatlarını ve bir miktar kalsiyum florür içermektedir. Bu tip elektrotlar ile yapılan dikişlerin mekanik özellikleri diğer örtülü elektrotlara göre çok üstündür. Bazik elektrotta gaz örtüsünün hemen hemen tamamı, karbonmonoksit ve az miktarda da karbondioksitten oluşur. Bu gaz örtüsü yüksek ölçüde redükleyici olduğundan ark içerisindeki erimiş metal damlalarına ve kaynak banyosuna oksijenin ve hidrojenin girmesi çok zordur, ayrıca ark içerisinde hidrojenin mevcut olmaması geçiş bölgesinde çatlama ihtimalini yok eder. Bazik elektrotlar ile yapılan kaynaklarda, akım şiddeti olabildiğince yüksek seçilmelidir. Zira, elektrot örtüsü diğer türlere oranla daha yüksek akım şiddeti ile yüklenebilir. Yüksek akım şiddeti kullanarak elektrotun tutuşma kolaylığı sağlandığı gibi verilen ısının yüksekliği nedeni ile kaynak banyosu daha uzun süre sıvı durumda kalır; bu ise gazların kolaylıkla çıkmasını ve dikişin gözeneksiz olmasını sağlar. Bazik elektrotlar ile yapılan kaynak işleminde ark boyunun kısa tutulması gereklidir; tersi durumda, ayrışan kalsiyum karbonatın oluşturduğu

CO₂ atmosferi banyoyu koruyamaz. Ark boyunun çok kısa tutulması ise kaynak bölgesinde gereğinden fazla esas metal ergimesine neden olur. Uygulamada en uygun ark boyu, yaklaşık elektrot tel çapının yarısı kadardır. Bu tip elektrotlar ile yapılan kaynaklarda, kaynak hızı rutil ve asit karakterli elektrotların oranla daha düşük tutulmalıdır, zira hızlı kaynak yapıldığında cüruf kaynak metalini örtemez. Bu tür elektrotlarda kaynak hızı rutil ve asit türlerinin kaynak hızının yaklaşık 2/3'ü kadar alınmalıdır. Yüksek akım şiddeti ve düşük kaynak hızlarından dolayı ısı girdisi yüksek olup kaynak dikişi diğer elektrotlarla yapılanlardan daha geniş olur. Kaynak dikişi genişliğinin sınırlı olduğu durumlarda gerekenden bir kademe daha küçük çaptaki elektrotlar kullanılmalıdır.

Selülozik tip elektrotların örtüsünde, yandığı zaman gaz haline geçen organik maddeler bulunur. Örtü ağırlığının %30'unu selüloz oluşturur. Bazı ülkelerde saf selüloz miktarını azaltmak amacı ile kağıt hamuru, odun tozu da örtüye belirli oranlarda katılmaktadır. Örtüye katılmış olan bu organik bileşenler ark sütununda ayrılarak karbonmonoksit, karbondioksit ve hidrojenin açığa çıkmasını sağlarlar ve bu gazlar yüksek iyonizasyon potansiyellerinden ötürü ark gerilimini yükseltir ve dolayısı ile kaynak arkı daha güçlü ve sert, kaynak metali taşınımı spreylen biçimde olur ve dikişin nüfuziyeti yükselir. Aynı akım şiddeti uygulanarak, selülozik elektrot ile diğer elektrot türlerine nazaran %70 daha derin bir nüfuziyet elde edilir (Kaluç, 2004).

3.2.5.3 Kaynak Tozlarının Etkileri

Toz altı kaynağında kullanılan kaynak tozları arkın kararlılığının sağlanması, metelsel banyoyu havanın zararlı etkilerine karşı korunması, istenilen kimyasal bileşim ve mekanik özelliklere sahip kaynak dikişinin elde edilmesi görevlerini yerine getirirler. Uygulamaya göre değişik kaynak tozları kullanılmakta ve bunun sonucu olarak da ısı girdisinde farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Kaynak tozlarının bileşimleri ve adları Tablo 3.3'te gösterilmiştir:

Tablo 3.3 Kaynak tozlarının adları ve bileşimleri (Gültekin, 1991)

İşaret	Bileşim Ana Elamanları	Toz Tipi / Adlandırma
MS	MnO+SiO ₂ > %50	Mangan-silikat
CS	CaO+MgO+SiO ₂ > %60	Kalsiyum-silikat
AR	Al ₂ O ₃ +TiO ₂ > %45	Alüminat-rutil
AB	Al ₂ O ₃ +CaO+MgO > %45 (Al ₂ O ₃ > %20)	Alüminat-bazik
FB	CaO+MgO+MnO+CaF ₂ > %50 (SiO ₂ <%22,CaF ₂ >%15)	Fluorid-bazik

MS tozu genel olarak dikişte mangan artması ortaya çıkarır. Bu durum uygun bir kaynak teli kullanılması ile telafi edilebilir. CS tozu silisyum artması ortaya çıkarması belirgin özelliğidir. Bu özellik yüksek akım yüklenebilirliği sağlar. Yüksek Si artımlı tozlar çok pasolu işlemlere uygun değildir. AR tozunun belirgin özelliği yüksek kaynak hızlarına uygunluğudur. Art arda karşı pasolu kaynak ve köşe birleştirmelerinde kullanılması uygundur. Çok iyi bir cüruf çözülme özelliğine sahiptir. AB tozları hafif bazik esaslı tozlardır. Genel olarak Mn artması ortaya çıkarır. Dikişlerin çatlama duyarlılığı düşüktür. Çok pasolu kaynağa uygun tozlardır. FB tozları düşük miktarda Si içeren bazik esaslı tozlardır. Oluşturulan dikişlerin tokluk özellikleri yüksek, çatlama duyarlılıkları düşüktür (Gültekin,1991).

Tablo 3.4'te ise kimyasal bileşimlerine göre kaynak tozlarının sınıflandırılması verilmiştir:

Tablo 3.4 Kimyasal bileşimlerine göre kaynak tozlarının sınıflandırılması (Kongel, 2005)

Grubu	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	CaF ₂	Diğerleri
1	50-53	4-15	29-33	9-12	0,6	4	TiO ₂
2	40-46	4	2-10	1	38-40	1	--
3	25-42	21-28	2-13	6	19-30	4	TiO ₂
4	14-15	20-23	11-13	3-10	20-24	8-10	Alkaliler

Grup 1 : Bu tozlar manganezsiz, yüksek miktarda silisyum içeren CS tipi bir toz olup, kalın sacların kaynağında kullanılırlar. Kazan ve ağır makina yapımı gibi işlerde 5000 Amper akım şiddetine kadar yüklenebilir. Dikişte Si artması ortaya çıkarması en belirgin özelliğidir. Bu sayede yüksek akım yüklenebilirler. Yüksek akım şiddetleri ile yüklenebildiklerinden ısı girdisi de yüksektir. Bu tip tozlar, pislik ve pasa karşı hassastır. Az pasoda gerçekleştirilen kaynak işlemleri için uygundur.

Grup 2 : Bu tozlar yüksek miktarda mangan ve silisyum içeren MS tipi toz olup, orta akım şiddeti ile yüklenebilir ve çok pasolu kaynaklarda kullanılır. Dikişte Mn artması ortaya çıkarır. Bu tip tozlar, pislik ve pasa karşı pek hassas değildirler.

Grup 3: Bu gruptaki tozlar grup 2'ye benzer, yalnız fazla miktarda Al₂O₃ içermektedir. Tipi AR'dir. İnce taneli kaynak dikişleri verir.

Grup 4 : Bu tozlar bazik tozlardır. Yüksek mukavemet aranan kaynak bağlantılarında kullanılır. Akım yüklenme kabiliyetleri düşüktür. Mesela doğru akımda 1200 Amper ve

alternatif akımda da 1000 Amperdir. Çok pasolu kaynakta iyi bir çentik darbe tokluğu elde edilir. Özellikle zor kaynak edilebilen çelikler için uygundur ve tipi de FB' dır.

Tablo 3.4 incelendiğinde, genel olarak kaynak tozlarının büyük bir kısmını SiO₂'in teşkil ettiği görülmektedir. SiO₂ toza belirli fiziksel ve kimyasal özellikler kazandırır. Bilhassa tozun yüksek akım şiddetiyle yüklenebilmesini, iyi bir dezoksidasyon ve cüruf akışı sağlar. Tozun terkiibindeki SiO₂ miktarı, yerine getireceği hususlar nazarı itibara alınarak diğer maddelerle ayarlanır. Tozların terkiibinde bulunan diğer bir önemli madde de magnezyum oksittir (MnO). MnO bilhassa erimiş tozlarda, dikişin emniyeti bakımından önemli rol oynar. Tozun içeriğindeki MnO miktarı yükseldikçe, akım yüklenebilme kabiliyeti de azalır. Yüksek akım şiddetiyle yüklenen tozlarda hiç MnO bulunmaz. Manganezsiz fakat silisyum miktarı yüksek tozlar, kirli ve pasa karşı çok hassas olduğundan, kaynak yapılacak parçaların ağızlarının gayet iyi bir şekilde temizlenmesi gerekir.

Kaynak metaline tozdan manganez ve silisyumun geçişine arktaki reaksiyonlar tesir eder. Arktaki reaksiyonlar büyük çapta çalışma tekniğiyle ilgilidir. Akım şiddeti, ark gerilimi, kaynak hızı, tel çapı ve kaynak ağız açısı gibi önemli faktörler, manganez ve silisyumun tozdan kaynak metaline geçişine etki eder.

Akım şiddeti yükseldikçe manganez ve silisyumun yanma miktarı artacağından kaynak metalinde manganez ve silisyumun oranı azalır. Ark gerilimi artınca metalsel banyo büyür ve daha çok toz reaksiyona girer ve bu sayede alaşımlama derecesi artar. Kaynak telinin çapının artmasıyla metalsel banyo büyür, ergiyen toz miktarı artar, manganez ve silisyumun oranı artar.

Kaynak esnasında çıkan gazların, kaynak metali katılaşımadan evvel dikişi terk etmeleri gerekir. Aksi takdirde, dikişte kalan gazlar gözeneklere bazen de çatlaklara sebebiyet verebilir. Gazların kaynak metalinden tamamen çıkmasına tesir eden önemli faktörlerden biri de tozun tane büyüklüğüdür. Tozun taneleri inceldikçe gazların çıkış kabiliyeti de azalır. Diğer taraftan tane büyüklüğü, akım şiddeti ve kaynak hızıyla da sıkı sıkıya ilgilidir. Kaynak hızının yükselmesi halinde orta veya iri taneli bir tozun kullanılması faydalıdır. Zira hızlı yapılan kaynakta eriyen banyo küçük olup, çabuk katılaşıacağından gazların da çok kısa zaman zarfında dikişi terk etmeleri gerekir. Bu da ancak kullanılan tozun tanesi büyüyünce sağlanabilir (Kongel, 2005).

3.2.5.4 Kaynak Metali Transfer Tipinin Etkisi

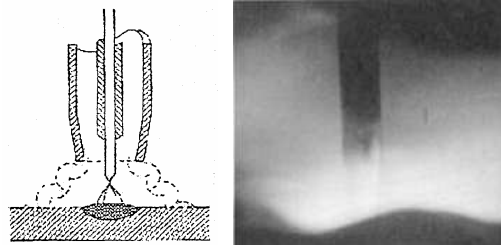
Kaynak arkı içinde metal taşınım türü; akım şiddeti, tel elektrot çapı, elektrotun bileşimi, serbest tel uzunluğu ve koruyucu gazın türü gibi bir dizi faktörlerin etkisi altındadır. Kaynakta, kaynak metalinin ark sütunu içinde damlacıklar halinde taşınımı bu faktörlerin şiddetlerinin değişimine de bağlı olarak çok farklı türlerde gerçekleşmektedir. IIW (International Institute of Welding) ortaya çıkan metal taşınım türlerini 7'ye ayırmıştır.

Bu türlerden bir kısmı uygulamada iyi sonuç vermemektedirler; uygun damla taşınım türleri şu şekilde sırlanabilir:

- Kısa ark (kısa devreli metal taşınımı)
- Küresel metal transferi (globular metal transferi)
- Sprey ark metal transferi
- Darbeli sprej ark metal transferi (Tülbentçi, 1998).

3.2.5.4.1 Kısa Ark Metal Transferi (Kısa Devreli Metal Transferi)

Kısa devre halinde metal transferi ince elektrotlarla (0,6-1,2 mm), düşük ark gerilimi ve düşük akım şiddeti ile kaynak yapıldığında karşılaşılan bir transfer türüdür. Burada ark oluşunca, elektrotun uç kısmı hemen erimeye başlar ve bir damlacık oluşur. Damlacık banyoya doğru inerken elektrot ve iş parçası arasında kısa devre oluşur, gerilim düşer, akım şiddeti yükselir, damla elektrottan kopar ve kısa devre ortadan kalkar ve aynı olay tekrarlanır. Düşük ark gerilimi, düşük akım şiddeti ile çalışıldığından metal transferinin kısa devre esnasında gerçekleşmesi sonucu iş parçasına uygulanan ısı girdisi çok düşüktür. Bu bakımdan ince parçaların kaynağı ve çarpılma tehlikesinin büyük olduğu haller için çok uygun bir ark türüdür. Uygulamada bu tür metal taşınımı için demir esaslı malzemelerde saf CO₂ veya karbondioksitçe zengin karışım gazlar tercih edilir (Tülbentçi, 1998).



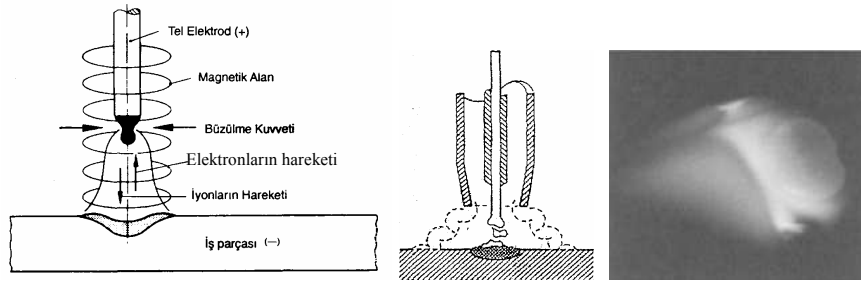
Şekil 3.2.5.4.1.1 Kısa ark metal transferi (Metals Handbook, 1989)

3.2.5.4.2 Küresel Metal Transferi (Globular Metal Transferi)

Küresel metal transferi, akım şiddeti ve ark geriliminin yani ısı girdisinin biraz daha yüksek olduğu şartlarda oluşur. Bu halde ark tutuşur tutuşmaz elektrotun uç kısmında erime başlar ve bir damlacık oluşur. Damlacık irileşir ve elektrot çapını aştıktan sonra elektrottan kopar. Yerçekimi ve büzülme kuvveti etkisi (pinch effect) ile ark sütunu boyunca ilerler ve banyoya düşer.

Arkta akım yoğunluğu yükseldikçe, radyal büzülme kuvvetini oluşturan manyetik alanın şiddeti artar. Özellikle elektrotun uç kısmında akım yoğunluğu fazla olduğundan en şiddetli büzülme burada meydana gelir ve telin ucunda ergimiş olan metalin damla halinde geçişini kolaylaştırır.

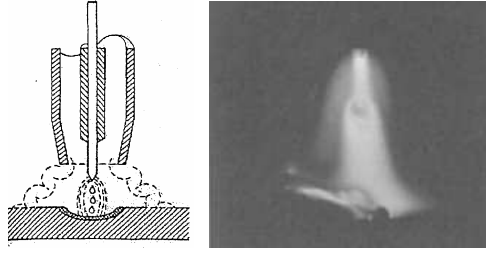
Bu tür metal taşınımı hemen hemen kullanılan tüm koruyucu gazlarla elde edilebilir ve 3 mm'den daha kalın kesite sahip yalın karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin yatay oluk pozisyonunda birleştirilmelerinde tercih edilir (Tülbentçi, 1998).



Şekil 3.2.5.4.2.1 Küresel metal transferi ve büzülme kuvveti etkisi
(Metals Handbook, 1989 ve Tülbentçi, 1998)

3.2.5.4.3 Sprey Ark Metal Transferi

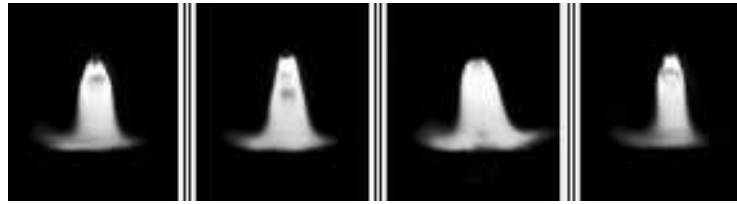
Sprey metal transferi, ergimiş metal damlasının iş parçasına duşlama şeklinde geçişi, sprey ark halinde görülür. Ergimiş metal damlasının iş parçasına bu şekilde taşınımı elektrot ucunun sivrileşmesi sonucu bu sivrilmiş uçların koparak iş parçasına çok küçük damlalar halinde geçişi ile gerçekleşir. Damlacıklar tel çapından çok küçüktür ve damla sayısı saniyede birkaç yüze kadar çıkabilir. Sprey transfer şekli genel olarak argon veya argonca zengin Ar + CO₂ + O₂ karışım gazları ile yüksek akım şiddeti ve ark gerilimi kullanıldığında ortaya çıkar. Sprey transfer şeklinde, yüksek akım şiddetlerinde olduğundan bilhassa kalın parçaların kaynağı için çok uygundur ve bu yöntemde sıçrama çok azdır. Yüksek erime gücü nedeni ile banyo diğer transfer türlerine nazaran daha geniş oluşur. Bu bakımdan yatay ve oluk pozisyonlarda dolgu ve kapak pasolarının çekilmesi için çok uygundur (Tülbentçi, 1998).



Şekil 3.2.5.4.3.1 Sprey ark metal transferi (Metals Handbook, 1989)

3.2.5.4.4 Darbeli Sprey Ark Metal Transferi

Bu yöntemde özel bir kaynak üretici ile kaynak akımının şiddetinin frekansı, ayarlanmış iki değer arasında seçilmiş olan frekansta değişmektedir. Bu yöntem ile arzulanan her çalışma bölgesinde, kısa devre oluşturmadan iş parçasına az bir ısı girdisi uygulanarak çalışmak mümkün olabilmekte ve ayrıca frekansı ayarlayarak istenen sayıda ve irilikte erimiş metal damlacıklarının iş parçasına geçişi sağlanabilmektedir. Damlaların transfer şekilleri sprej transfer yöntemine benzemekte fakat damla büyüklükleri ve frekansı ayarlanabilmektedir. Bu ark türünün çeliklere uygulanmasında koruyucu gaz olarak CO₂ kullanılmaz, zira darbe fazında ark kuvvetleri damla oluşumuna ters yönde etki yaparlar (Tülbentçi, 1998).



Şekil 3.2.5.4.4.1 Darbeli sprej ark oluşum aşamaları

(<http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/nx270.pdf>)

3.2.5.5 Kutuplamanın Etkisi

Ark kaynak yöntemlerinde ısı girdisine etkisi olan, malzeme tipi ve kalınlığına göre seçilerek ergime oranı ve nüfuziyetin kontrol edilebilmesine olanak sağlayan bir diğer faktör kutuplamadır.

Kutuplama türü, doğru akım üreten kaynak makineleri için kullanılan bir özelliktir. Doğru akımda elektron akışı alternatif akımdan farklı şekilde devamlı olarak bir kutuptan diğer kutba doğrudur. Bu özellikten yararlanarak elektron akışı veya diğer bir deyişle ısının en yüksek olduğu bölge tayin edilir.

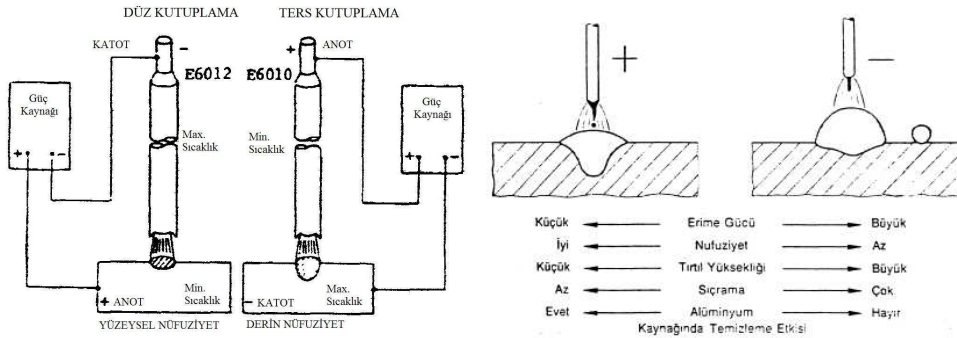
Ark kaynağında elektron akışı katottan (-) anoda (+) doğrudur. Elektronların katottan enerji kazandırılarak anodu bombardıman etmesi sağlanır ve böylece katot 3800 °C sıcaklığa ve

anot 3000 °C sıcaklığa ulaşır. Sıcaklığın daha yüksek olduğu bölgedeki metal daha çok ergir ve kaynak banyosunda daha fazla miktarda bulunur. Kutuplama terimi, iş parçasının ve elektrotun hangisinin katot (-), hangisinin anot (+) olarak tayin edildiğini belirtir. Kutuplama türü değiştirilerek ergime oranı ve nüfuziyet kontrol edilir.

Doğru akımda iki kutuplama türü vardır. Bunlardan ilki, düz kutuplama (doğru akım elektrot negatif = DAEN) diye tabir edilen elektrotun (-) ana malzemenin (+) kutupta bulunduğu kutuplamadır. Diğeri de ters kutuplama (doğru akım elektrot pozitif = DAEP) diye tabir edilen elektrotun (+) ana malzemenin (-) kutupta bulunduğu kutuplamadır.

Kutuplamanın seçimi; arkın kararlılığı, elektrot erime hızı, erimiş metalin elektrottan kaynak banyosuna geçişi ve esas metal yüzeyinden oksitlerin uzaklaştırılması gibi bir dizi faktör göz önüne alınarak gerçekleştirilir (Gourd, 1996).

Genel olarak, örtülü elektrot ile kaynak yöntemi, MIG-MAG yöntemleri ve toz altı yönteminde elektrotun pozitif kutuplandığı (DAEP) ters kutuplama durumunda esas malzemeye verilen ısı miktarı daha fazla olmaktadır. Bunun sonucunda da nüfuziyet artar.



Şekil 3.2.5.5.1 Kutuplamanın örtülü elektrot ve MIG-MAG yöntemlerinde dikişe etkileri (Cary, 1989 ve Tülbentçi, 1998)

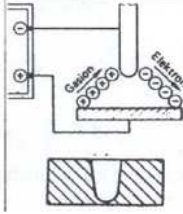
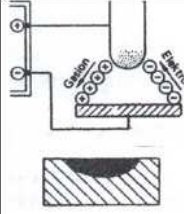
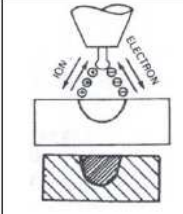
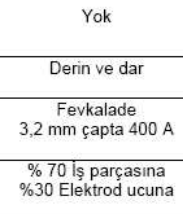

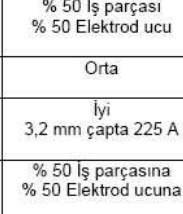
Düz kutuplama, ters kutuplamaya nazaran esas malzemeye daha düşük ısı girdisi sağlar ve yüzey kaplama işlemleri için daha uygun bir kutuplama türüdür. Ters kutuplama ise nüfuziyet istenen kaynak bağlantılarında kullanılmaktadır. Ayrıca alüminyum gibi yüzeyinde ısıya dayanıklı oksit tabakası oluşturan metallerde ters kutuplama sayesinde yüzeydeki oksit tabakası parçalanabilmektedir.

Alüminyum, magnezyum ve ayrıca bazı bronzlar, açık havada çok hızlı bir biçimde, yüksek dayanımlı, kalın ve yüksek sıcaklıklarda ergiyen oksit tabakaları oluştururlar. Örneğin, alüminyumun kendisi 700 °C civarında ergirken, alüminyum oksit 2000 °C civarında ergimektedir. Bu oksit tabakası kaynaktan önce uzaklaştırılmazsa, alüminyum ergir ancak

oksit tabakası kaynak banyosunu kapladığından bu şekilde başka bir parça ile birleştirilmesi mümkün olmaz. Kaynak esnasında bu oksit tabakası sürekli olarak uzaklaştırılmak zorundadır. Ters kutuplama ile bunun yapılması mümkündür. Ters kutuplamada gaz iyonları ark içinde hızlanır ve büyük bir hızla parça yüzeyine çarpar. Bu şekilde oksit tabakasını parçalayan bir temizleme etkisi oluşur. Elektrotun artı kutba bağlanması akım yüklenebilme kabiliyetinin düşük olmasından dolayı uygun değildir. Bu nedenle alternatif akım tercih edilir. Kısa süreli artı kutuplama sacların temizlenmesi için yeterlidir (Cary, 1989 ve Kongel, 2005).

Ark boyunca metal ileilmeyen TIG yönteminde ise kutuplama durumu farklılık arz eder. Bu yöntemde ısının yaklaşık 1/3 ü katotta, 2/3 ü anotta oluşmaktadır. Genellikle elektrot, güç kaynağının negatif kutbuna bağlanarak kullanılmakta olup bunun sonucu olarak da daha nüfuziyetli dikişler düz kutuplama ile elde edilmektedir (Gourd, 1996).

Elektrotun negatif kutuplanmasında oksit temizleme etkisi çıkmadığından Al, Mg ve bunların alaşımlarının kaynağında nüfuziyet derinliklerinin azalmasına karşın pozitif kutuplama veya dalgalı akımla çalışma koşulları seçilmektedir (Gültekin, 1991).

Akım Türü ve Kutuplama	D.A.E.N.	D.A.E.P.	A.A.
Elektronların ve iyonların akış yönü			
Dikişin nüfuziyet biçimi			
Oksit temizleme etkisi	Yok	Var Kuvvetli	% 50 İş parçası % 50 Elektrod ucu
Nüfuziyet	Derin ve dar	Az ve geniş	Orta
Elektrod Akım Kapasitesi	Fevkalade 3,2 mm çapta 400 A	Kötü 6,4 mm çapta 120 A	İyi 3,2 mm çapta 225 A
Isı Dağılımı	% 70 İş parçasına %30 Elektrod ucuna	% 30 İş parçasına % 70 Elektrod ucuna	% 50 İş parçasına % 50 Elektrod ucuna

Şekil 3.2.5.5.2 TIG yönteminde akım ve kutuplama türünün dikişe etkileri (Ertürk, 1987)

TIG yönteminde ince kesitli ve düşük ergime noktasına sahip malzemelerin kaynağında ters kutuplamadan faydalanılmaktadır. Bu şekilde oluşan ısının büyük kısmı tungsten elektrotta olup, doğru akım düz kutuplama kullanılması halinde ortaya çıkabilecek aşırı penetrasyon ve malzemenin yanması gibi problemlerin önüne geçilir (Metals Handbook, 1989).

3.2.5.6 Elektrot Uç Açısının Etkisi

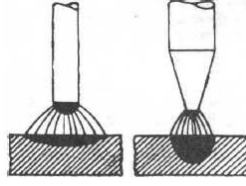
Ergimeyen elektrotla yapılan TIG yönteminde elektrotun uç formu, esas malzemelere sağlanan ısı girdisine önemli etkiler yaparak dikiş formunun değişmesine sebep olmaktadır.

Elektrot uç açısı, erimeyen elektrotun ucunun konik biçimde taşlanması sonucu ortaya çıkan koninin tepe açısıdır. Bu taşlama sonucu arkın tutuşmasını sağlayan yüksek frekans akımı, arkı daha kolay oluşturmakta ve daha stabil bir ark ile çalışma olanağı elde edilmektedir. Doğru akım ve elektrotun negatif kutuplanmasında, elektronların hareket yönü nedeniyle elektrotun uç sıcaklığı pozitif kutuplamaya nazaran 550-650 °C daha düşük seviyeye ulaşmaktadır. Bu nedenle bu tür kutuplama ile konik elektrotlar yeterli bir ömür ile kullanılabilirler. Elektrot uç açısının daralması sonucu kaynak dikişinin genişliği daralmakta, buna karşın nüfuziyeti artmaktadır. Bu açının çok daralması elektrot ucunun aşınmasını arttırmaktadır, uygulamada yaklaşık 22°'lik bir açı tercih edilir.

Akım Türü	Elektrot Türü	Akım Şiddeti		
		Çok Düşük	Normal	Çok Yüksek
D.A.E.N.	WT			
A.A.	W			
A.A.	WT			

Şekil 3.2.5.6.1 Kaynak sırasında akım türü ve şiddetine göre elektrot uç biçiminin görünüşü
(Gültekin, 1991)

TIG kaynak yönteminde kullanılan erimeyen elektrotların uç biçimlerinin oluşan kaynak arkının yoğunluğuna ve dolayısı ile de ısı girdisine etkileri oldukça şiddetlidir. Pinch-Effect diye tanımlanan arkı büzmeye çalışan etki, akım yoğunluğunun karesi ile doğru orantılıdır; elektrot ucu konik olduğu zaman, uçta akım yoğunluğu yükseldiğinden Pinch-Effect'in etkisi şiddetlenir, ark daha büzülerek ark sütununun merkezinin yoğunluğu artar ve bu olay da kaynak dikişinin nüfuziyetini etkiler; aynı akım şiddetinde konik uçlu elektrot ile yapılan kaynak dikişi, düz silindirik elektrot ile yapılan kaynak dikişinden daha derin bir nüfuziyete sahip olur.

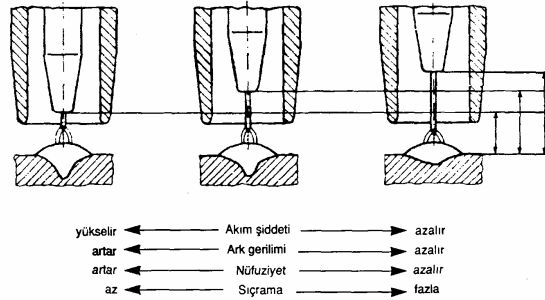


Şekil 3.2.5.6.2 Elektrot uç biçimi - dikiş kesiti ilişkisi (Gültekin, 1991)

Ucu sivriltilmiş elektrot kullanma halinde elektrotun kalan kısmının kalın çaplı olmasının kaynak dikişinin biçimi üzerine hissedilir bir etkisi olmadığından, torcun izin verdiği kalınlıkta bir elektrot kullanarak, elektrot gövdesinde akım yoğunluğu azaltılarak elektrot ısınması önlenmektedir (Ertürk, 1987 ve Gültekin, 1991).

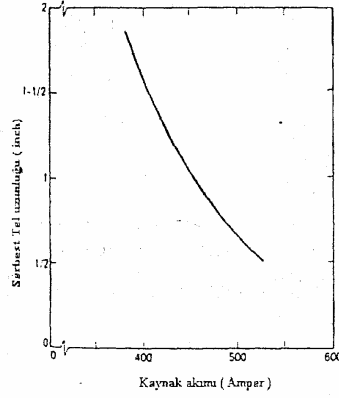
3.2.5.7 Serbest Tel Uzunluğunun Etkisi

Elektrot serbest tel uzunluğu, torç içindeki temas memesinin en uç noktası ile tel elektrotun uç kısmı arasındaki uzaklık olarak tanımlanır. Bu boyun uzaması sonucu elektrotun elektrik direnci artar ve elektrotun ön ısınması diye tanımlanan sıcaklığı yükselir ve dolayısı ile de elektrotun uç noktasını ergitebilmek için gerekli akım şiddetinde azalma ortaya çıkar.

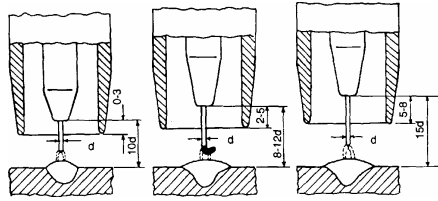


Şekil 3.2.5.7.1 Serbest tel uzunluğunun dikiş formuna etkisi (Tülbentçi, 1998)

Serbest tel uzunluğunun artması sonucu görülen bu durum esas malzemeye sağlanan ısı girdisinin ve nüfuziyetin azalmasına sebep olmaktadır. Nüfuziyetin az olmasının istendiği yerlerde serbest tel uzunluğu arttırılarak akım şiddetinin ve nüfuziyetin azaltılması sağlanmış olur. Ancak serbest tel uzunluğunun aşırı artması, fazla miktarda soğuk kaynak metalinin kaynak dikişine yığılmasına neden olur (Tülbentçi, 1998).



Şekil 3.2.5.7.2 Kaynak akımının serbest tel uzunluğu ile değişimi (Cary, 1989)

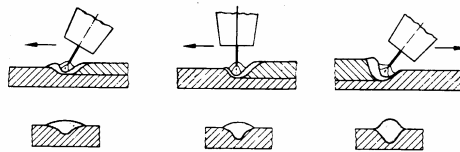


Şekil 3.2.5.7.3 Kısa-globular-sprey arka göre uygun serbest tel uzunlukları (Tülbentçi, 1998)

3.2.5.8 Torç Açısının Etkisi

Kaynak elektrotunun veya torcunun iş parçasına nazaran konumu ve kaynak sırasındaki hareketi, ısı girdisini ve dolayısı ile kaynak dikişinin biçimini etkileyen etmenlerden bir tanesidir.

Torcun kaynak yapılan iş parçasına dik olarak tutulması halinde sağ ve sol kaynak arasında sonuç yönünden bir fark görülmez, buna karşın kaynak torcu 30° 'ye kadar bir açı ile tutulduğu zaman sol ve sağ kaynağın dikiş biçimi üzerine olan etkisi açık bir şekilde görülür. Hareket açısı 30° 'yi aşmadığı sürece, bu açı, kaynağın kaynakçı tarafından kontrolüne yardımcı olur; kaynakçı kaynak banyosunu ve elektrot ucunun ergimesini rahatlıkla görebildiği için dikişin kalitesi yükselir. Buna karşın bu değer aşıldığında nüfuziyet azalır ve dikiş inceler, bu durumda kaynak hızının artırılması gerekir; aksi halde sıvı metal kaynak banyosunun önüne doğru ilerler ve dikişte gözenek ve kalıntı oluşumu olasılığı artar; eğimin fazlaşması diğer yönden koruyucu gaz akımını da etkilediğinden, gazın koruma etkinliği azalır.



Şekil 3.2.5.8.1 Torç açısıyla dikiş formunun değişimi (Tülbentçi, 1998)

Şekil 3.2.5.8.1 de torç açısı ile dikiş formunun değişimi görülmektedir. Burada sırasıyla sola kaynak (torcun ucu kaynak yönüne baktığından açı negatif), dik kaynak ve sağa kaynak (torcun ucu kaynak yönüne bakmadığından açı pozitif) uygulamaları görülmektedir. Sağa kaynakta pozitif hareket açısıyla daha dar, daha yüksek ve daha derin nüfuziyetli dikiş elde edilir, ark daha dengelidir ve sıçrantı daha azdır; sağa kaynak daha ziyade çeliklerin kaynağında tercih edilen bir yöntemdir. Sola kaynak (hareket açısı negatif) ise kirlenmeye engel olmak ve esas metale taşınan ısı miktarını azaltmak amacı ile alüminyumun kaynağında tercih edilen bir yöntemdir (Tülbentçi, 1998 ve Ören, 2002).

4. ISI TÜKETİMİ İLE MALZEME / KALINLIK İLİŞKİSİ

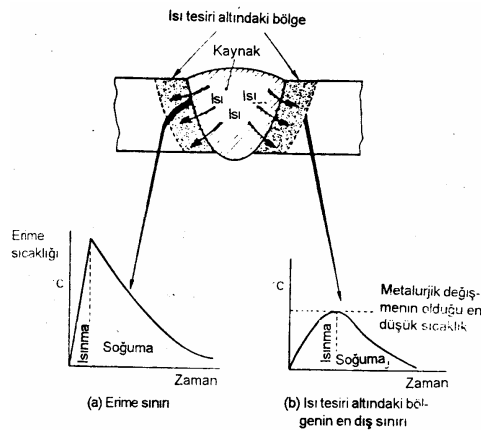
Ark kaynak yöntemleri temel olarak bir döküm işlemini andırır. Kaynak metali, elektrik arkının yüksek sıcaklığı karşısında erir ve daha önceden hazırlanmış olan kaynak ağızı içine dökülür, bu arada kaynak ağızının kenar yüzeyleri de bir miktar erir ve dolayısı ile erimiş kaynak metali ve esas metal karışarak kaynak ağızı içinde katılaşır. İşlem sırasında, kaynak edilen malzemelerin kaynak dikişine bitişik kısımlarında, erime sıcaklığından ortam sıcaklığına kadar, değişik sıcaklık derecelerinde ısınmış bölgeler ortaya çıkar. Böylece malzemeye, sıcaklık derecesi kaynak işlemince belirlenmiş bir ısı çevrim uygulanmış olur.

Isıl çevrimler özellikle çelik malzemeler için çok önemlidir. Bu ısıl çevrimlerin tepe sıcaklıklarına ve soğuma hızlarına göz atarsak, bunlar içinde çeliğin normalizasyon, temperleme, su verme ve yeniden kristalleşme tavlamlarına karşılık gelenlerin bulunduğunu görürüz. Bu olaydan ötürü kaynak bölgesinde, çeşitli ısıl işlemler görmüş ve dolayısı ile mekanik özellikleri ve iç yapısı gerek esas metal ve gerekse kaynak metalinden farklı değişik bölgeler ortaya çıkar (Anık, 1996).

Bu bağlamda malzeme/kalınlık ile ısı girdisi ilişkisine girmeden önce bu bölgeler hakkında bilgi vermeye gerek duyulmuştur.

4.1 Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)

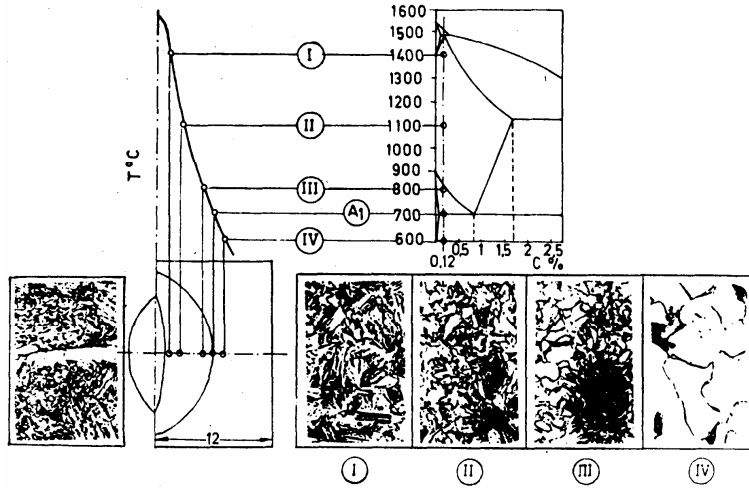
Kaynak banyosu soğumaya başladığında ısının sadece küçük bir miktarı banyo yüzeyinden kaybolur. Isının büyük bir kısmı bağlantının her iki tarafındaki esas metal yoluyla iletilir. Sonuçta esas metal ısınma ve soğuma çevrimine maruz kalır.



Şekil 4.1.1 Isı tesiri altındaki bölgenin sınırları (Gourd, 1996)

Çevrimin iki kritik bileşeni, ulaşılan en yüksek sıcaklık ve bundan sonraki soğuma hızıdır. Bu en yüksek sıcaklık veya tepe sıcaklığı kaynaktan olan uzaklığa bağlıdır. Erime sınırına yakın olan esas metal erime sıcaklığının hemen altına kadar ısıtılır. Erime sınırından uzaklaştıkça, tepe sıcaklığı esas metalin ısınmasının sona erdiği bir noktaya kadar sürekli olarak azalır. Bu noktaya ulaşılmadan evvel sıcaklık, bir metalurjik değişimin meydana geldiği en küçük değerin altına düşecektir. Bu sıcaklığın kesin değeri metalin bileşimine ve gözönüne alınan değişimin tipine bağlıdır. Isıl çevrim sonucu metalurjik değişmeye maruz kalan esas metal bölgesine ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) adı verilir (Gourd, 1996).

Isının tesiri altında kalan bölge, kaynak esnasında 1400 ilâ 700 °C arasında bir sıcaklığa maruz kalmakta ve üst sınırı erimiş haldeki kaynak metali, alt sınırı A₁ noktası yani iç yapı değişmesine uğramayan esas metal tarafından çevrenmektedir.



Şekil 4.1.2 % 0,12 karbon ihtiva eden normal karbonlu bir yapı çeliğindeki ısının tesiri altında kalan bölgenin Fe-Fe₃C diyagramı karşısındaki durumu (Cin, 1978)

Şekil 4.1.2’de Fe-Fe₃C diyagramı ile tek paso halinde elle elektrik ark kaynağındaki ısının tesiri altında kalan bölgesinin durumu karşılıklı olarak verilmiştir. Burada kaynak dikişinden itibaren çeşitli mesafelerde erişilen maksimum sıcaklık eğrisi ve % 0,12 karbon ihtiva eden normal karbonlu bir yapı çeliğindeki ısının tesiri altında kalan bölgenin iç yapıları birlikte görülmektedir. Kaynak işlemi 4 mm çapındaki bazik bir elektrot ile 170 Amper akım şiddetinde, 24 Volt gerilimde, 18 cm/dk kaynak hızında yapılmıştır. Şekilde; I, II, III ve IV rakamları ile gösterilen kısımlar, kaynak dikişinden itibaren ısının tesiri altında kalan bölgeleri ifade etmektedir.

- *İri taneli bölge (I)*

Kaynak metalinin (eriyen bölgenin) hemen altına tesadüf eden ve kaynak esnasında 1400 ilâ 1150°C arasında bir sıcaklığa maruz kalan bölgedir. Çeliğin bileşimine, levha kalınlığına, kaynak geometrisine, kaynak ısısına, dikişin boyuna, ön tavlama ve soğuma şartlarına göre martenzitik veya temperlenmiş martenzitik bir iç yapıya ve en yüksek sertliğe sahiptir.

- *İnce taneli bölge (II)*

Kaynak yapılırken 1150 ilâ 900°C arasındaki bir sıcaklığa erişen bölgesidir. İç yapı bakımından birinciye (I) benzer ve onun bir devamıdır. Fakat daha ince tanelidir.

- *Kısmen dönüşmüş bölge (III)*

İnce taneli bölgenin (II) devamı olup, kaynak sırasında A₃ ilâ A₁ arasındaki bir sıcaklıkla karşılaşan bölgedir.

- *İç yapı bakımından değişmeye uğramayan veya temperlenmiş bölge (IV)*

Bu bölgenin sıcaklığı kaynak esnasında A₁ noktasının altında bulunur ve genel olarak bir iç yapı değişmesine maruz kalmaz. A₁ çizgisinin dışında kalan esas metale ait değişmeye uğramayan bir bölgedir (Cin, 1978 ve Tülbentçi, 1998).

Genel olarak bir ısıl çevriminin malzeme özellikleri üzerine olan etkisinin belirlenebilmesi için bu ısıl çevrim hakkında ısıtma hızı, tepe sıcaklığı, tepe sıcaklığının uygulanma süresi ve soğuma hızının bilinmesi gerekmektedir. Kaynak işlemi süresince uygulanan ısıl çevrim göz önüne alınırsa, ısıtma hızı ve tepe sıcaklığının uygulanma süresine dikkat edilmez. Zira yapılan çalışmalar göstermiştir ki; ısıtma hızı ve tepe sıcaklığının uygulanma süresi, tepe sıcaklık değeri ve soğuma hızının yanında pek etkisizdir. Bu bakımdan kaynak işleminde metalürjik olayların kontrol edilebilmesi için ısı girdisi ile doğrudan ilişkili olan ITAB'daki tepe sıcaklığı derecesi ile birlikte kaynak metali ve ITAB'daki soğuma hızının da bilinmesi gerekmektedir (Tülbentçi, 1998).

4.1.1 Isı Girdisi İle Tepe Sıcaklığı İlişkisi

Kaynak işlemi esnasında ITAB'da erişilen maksimum sıcaklığa (tepe sıcaklığı) bağlı olarak çeşitli iç yapı ve özellik gösteren bölgeler oluşmaktadır. ITAB'da erişilen maksimum sıcaklık derecesi, kaynak dikişi eksenine olan uzaklığın fonksiyonu olarak bilinirse; soğuma hızının da bilinmesi ile birlikte kaynak işlemi sonucunda oluşabilecek iç yapı, esas metalin bileşimi ve özellikleri göz önünde tutularak bir dereceye kadar tahmin edilebilmektedir.

Pratik bir yaklaşım ile tepe sıcaklığı aşağıdaki denklemle verilmektedir:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (4.1)$$

Burada;

T_p : Tepe sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), T_0 : Malzemenin ilk sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), T_m : Malzemenin ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), q : Birim dikiş enerjisi (J/mm), ρ : Malzemenin yoğunluğu (g/mm^3), c_m : Malzemenin özgül ısınma ısısı ($\text{J}/\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}$), [ρc_m : Volumetrik özgül ısı ($\text{J}/\text{mm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)], t : malzeme kalınlığı (mm), Y : Ergime sınırından uzaklık (mm).

Denklem 4.1'den de görülebileceği üzere ısı girdisi, malzeme özellikleri ve kalınlık birbirleriyle yakından ilişkili olup tepe sıcaklığına etki etmektedirler. Isı girdisinin artmasıyla ulaşılan tepe sıcaklık değeri artarken; kalınlığın artmasıyla azalmaktadır. Malzeme tipine göre değişiklik gösteren malzeme özelliklerinden yoğunluk ve özgül ısınma ısısının artması tepe sıcaklık değerini düşürürken, malzemenin ilk sıcaklığı ve ergime sıcaklığının artması ile tepe sıcaklığı artmaktadır.

Bu denklem, ITAB'da özel bir noktanın sıcaklığının bulunmasında, ITAB genişliğinin tahmin edilmesinde ve ön tav sıcaklığının ITAB genişliğine etkisinin bulunmasında kullanılmaktadır.

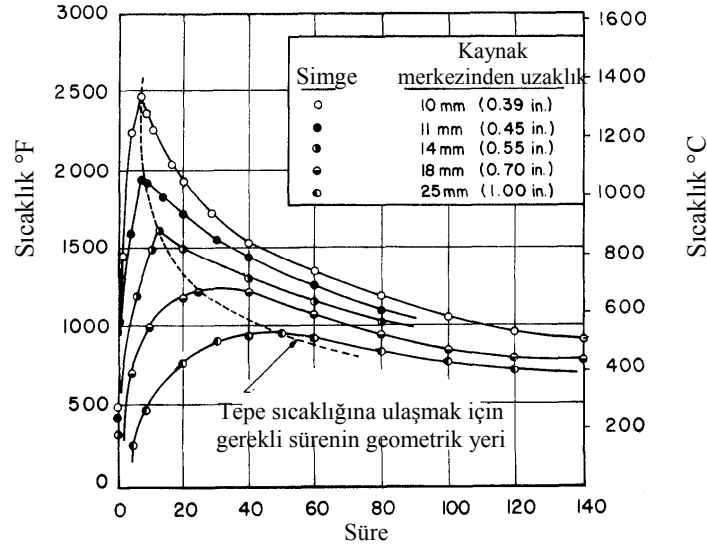
Örnek olarak, $U = 20 \text{ V}$, $I = 200 \text{ A}$, $V_k = 5 \text{ mm/s}$, $T_0 = 25^{\circ}\text{C}$, $T_m = 1510^{\circ}\text{C}$, $t = 5 \text{ mm}$, $\eta = 0.8$ ve $\rho c_m = 0,0044 \text{ J}/\text{mm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$ için,

Ergime çizgisinden 1,5 mm uzaklıktaki noktanın ($Y=1,5 \text{ mm}$) tepe sıcaklığı $T_p = 1153^{\circ}\text{C}$ ve 3 mm uzaklıktaki noktanın ($Y=3\text{mm}$) tepe sıcaklığı $T_p = 935^{\circ}\text{C}$ dir.

Görüldüğü üzere kaynak bölgesinden uzaklaştıkça tepe sıcaklığı azalmaktadır. $Y=0$ olduğu durumda $T_p=T_m$ olur ki, bu durum erime çizgisinde sıcaklığın ergime sıcaklığına eşit olduğunu gösterir.

(4.1) denklemi ITAB genişliğinin tahmin edilmesinde de kullanılmaktadır. Yalın karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerde dağlama sonucunda ITAB sınırı net bir biçimde görülmekte ve bu sınırlar bir metalurjik değişimin meydana geldiği en küçük sıcaklık değerine ($\sim 730^{\circ}\text{C}$) karşılık gelmektedir. Üstteki örnekteki değerleri kullanarak denklemde $T_p = 730^{\circ}\text{C}$ yazılırsa, $Y=5,9 \text{ mm}$ bulunur. Bu, 730°C karakteristik sınırın, erime çizgisinden 5,9 mm uzakta oluşacağını belirtir. Erime çizgisinden 5,9 mm uzaklıktaki bu bölge, kaynak metaline komşu ve yapısal değişime uğramış ITAB'dır.

Bu uygulamaların yanı sıra malzemenin bileşimine göre bir metalürjik değişimin meydana geldiği en küçük sıcaklık değerinin bilinmesi koşulu ile T_0 yerine malzemeye uygulanmış ön tav sıcaklığı yazılıp, denklemden Y değeri çekilerek ITAB genişliği bulunabilir.



Şekil 4.1.1.1 13 mm kalınlığındaki çelik bir levhada ITAB'da sıcaklık dağılımları
(Welding Handbook, 1976)

Şekil 4.1.1.1'de 13 mm kalınlığında ve ilk sıcaklığı 27°C olan çelik bir levhada 3940 J/mm ısı girdisi sonucu ITAB'da oluşan sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Buradan şu sonuçlara ulaşılabilir:

- Tepe sıcaklık değeri, kaynak merkezinden uzaklaştıkça azalmaktadır.
- Kaynak merkezinden uzaklaştıkça tepe sıcaklığına ulaşmak için gerekli süre de artmaktadır.
- Kaynak merkezinden uzaklaştıkça ısınma ve soğuma hızı azalmaktadır (Welding Handbook, 1976).

4.1.2 Isı Girdisi İle Soğuma Hızı İlişkisi

Isı girdisinin kaynak bölgesinde göz önüne alınması gereken bir diğer önemli etkisi de soğuma hızıdır. Kaynak metali veya ITAB'da herhangi bir nokta tepe sıcaklığına ulaştıktan sonra o noktanın soğuma hızı; metalürjik yapı, özellikler ve hatta esas metalin sağlamlılığı üzerine çok ciddi etkiler yapmaktadır.

Kaynak bölgesinde meydana gelen metalürjik dönüşümleri tahmin etmek için, tepe sıcaklığı ile birlikte soğuma hızının da bilinmesi gerekmektedir. Hesaplanacak soğuma hızına göre,

kaynak işleminden sonra ITAB'da meydana gelebilecek iç yapı ve dolayısıyla mekanik özellikler önceden tahmin edilebilir, gerekli tedbirler alınarak kaynak bağlantısını kalitesine ters yönde etki eden faktörlerin tesiri azaltılabilir. Böylece kaliteli ve emniyetli kaynaklı birleştirmeler gerçekleştirilebilir. Bu sebeple kaynak tatbikatı açısından soğuma hızının bilinmesi çok önemli bir husustur (Welding handbook, 1976 ve Kılık, 1983).

Çeliklerde, bir kaynak bağlantısının ITAB'ında ortaya çıkan soğuma hızları genellikle, uygulamada sertleşme elde etmek amacıyla kullanılan ısıtma işlemlerinde karşılaşılan su verme etkisini oluşturacak kadar yüksektir. Sertleşme miktarı soğuma hızına (sertleşme sağlama için yüksek soğuma hızı gereklidir) ve çeliğin kimyasal bileşimine bağlıdır. Gerçekte, bir çeliğin kaynak bağlantısında ITAB'ın sert olması kendi başına bir sorun arz etmez. Burada önemli olan sertleşmenin ITAB'da çatlakların oluşumuna teşvik eden şartları yaratmasıdır.

Aşağıdaki üç hususun mevcudiyeti halinde ITAB'da yüksek bir çatlama tehlikesi ortaya çıkar. Bunlardan birincisi sertliğin kritik bir değerin üzerinde olmasıdır ki, bu değer 350 V olarak verilmektedir. İkincisi çekme gerilmelerinin mevcudiyeti ve üçüncüsü ise, kaynak banyosunda hidrojenin mevcut olmasıdır. Bu üç faktörün aynı anda mevcut olması halinde çatlakların kesinlikle oluşacağını söylemek de yanlış olur. Bu üç faktörün yanında çatlak oluşumunu etkileyen birkaç ilave faktör de mevcuttur. Bunlar sertleşmiş yapının tipi, bağlantı profili ve hidrojenin gerçek seviyesi gibi karmaşık bir şekilde etkileşen faktörlerdir. Bu nedenle uygulamada kesin olarak çatlama değil, bir çatlama tehlikesinden söz edilir (Gourd, 1996).

Bu bakımdan soğuma hızının bilinmesi, kaynak işleminden sonra ITAB'da meydana gelebilecek iç yapı ve dolayısıyla mekanik özellikler önceden belirlenmesi ve gerekli tedbirlerin alınması açısından önemlidir.

Soğuma hızlarının hesaplanmasında en çok yararlanılan metot, kaynak merkezinde kritik bir sıcaklıktaki (T_c) soğuma hızının belirlenmesidir. Isıl çevrimlerin analizinde 300 °C, 540 °C ve 700 °C sıcaklıklardaki soğuma hızları alınmaktadır. Buna da sebep:

300 °C : Bu sıcaklıklardaki soğuma hızıyla, ısının tesiri altında kalan bölgedeki dikiş altı çatlakları arasında sıkı bir bağıntının bulunduğu ortaya çıkarılmıştır.

540 °C : Bu sıcaklık, düşük karbonlu yüksek mukavemetli çeliklerin sürekli soğuma diyagramındaki burun noktasına tekabül etmektedir. Isının tesiri altında kalan bölgedeki maksimum sertlik, genellikle bu sıcaklıktaki soğuma hızıyla tayin edilmektedir.

700 °C : Bu sıcaklık birçok araştırmacı tarafından sık sık kullanılmakta olup, yaklaşık olarak düşük karbonlu çeliklerin kritik soğuma sıcaklığına denk gelmektedir (Cin, 1978).

Pratik yaklaşımla soğuma hızları kalın ve ince parçalarda ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Kalın parçalarda soğuma hızı aşağıdaki formülle verilmektedir:

$$R = \frac{2\pi k(T_c - T_0)^2}{q} \quad (4.2)$$

İnce parçalarda soğuma hızı da aşağıdaki formülle verilmektedir:

$$R = 2\pi k \rho c_m \left(\frac{t}{q}\right)^2 (T_c - T_0)^3 \quad (4.3)$$

Burada;

T_0 : Malzemenin ilk sıcaklığı (°C), T_c : Kritik sıcaklık (°C), q : Birim dikiş enerjisi (J/mm), ρ : Malzemenin yoğunluğu (g/mm^3), c_m : Malzemenin özgül ısınma ısısı (J/g.°C), t : malzeme kalınlığı (mm), k : Malzemenin ısı iletim katsayısı (J/mm.s.°C).

Parçaların ince veya kalın oluşu “kalınlık faktörü” şeklinde ifade edilen bir büyüklükle anlaşılmaktadır.

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c_m (T_c - T_0)}{q}} \quad (4.4)$$

τ : Kalınlık faktörü, T_0 : Malzemenin ilk sıcaklığı (°C), T_c : Kritik sıcaklık (°C), q : Birim dikiş enerjisi (J/mm), ρ : Malzemenin yoğunluğu (g/mm^3), c_m : Malzemenin özgül ısınma ısısı (J/g.°C), t : malzeme kalınlığı (mm).

Burada (τ) değerinin, 0,75’in üzerinde olduğu durumlarda kalın parçalar için soğuma hızı denklemi; 0,75’in altında olduğu durumlarda ise ince parçalar için soğuma hızı denklemi uygulanmaktadır.

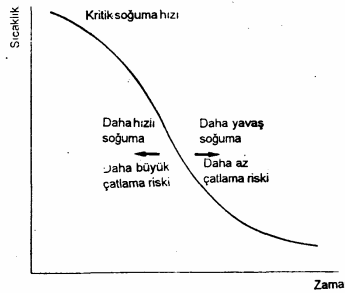
Denklem (4.2) ve (4.3)’ten görüldüğü üzere soğuma hızı; ısı girdisi, malzeme tipi ve kalınlık etkisi altındadır. Isı girdisinin artması ile beraber soğuma hızı düşmektedir. Bunun yanı sıra malzemenin ısı iletim katsayısı ve ilk sıcaklığı da soğuma hızına etkimektedir. Isı iletim katsayısının artması soğuma hızını artırırken, ilk sıcaklığın artması soğuma hızını düşürmektedir.

Soğuma hızı denklemleri (4.2) ve (4.3), kritik soğuma hızının (R_k) ve gerekli ön tav sıcaklığının bulunması olmak üzere iki amaç için kullanılmaktadır.

Kritik soğuma hızının bulunmasında yararlanılan en basit yöntem, malzeme üzerine diğer tüm parametreler sabit tutularak değişik kaynak hızlarında dikişler çekmektir. Çekilen bu dikişlerin ITAB'ları sertlik testlerine tabi tutulmakta ve en uygun kaynak hızı değeri belirlenmektedir. Bu aşamadan sonra da malzeme için kritik soğuma hızı hesaplanmaktadır.

Örnek olarak; $U = 25 \text{ V}$, $I = 300 \text{ A}$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $T_c = 540^\circ\text{C}$, $t = 6 \text{ mm}$, $\eta = 0.8$ ve $\rho c_m = 0,0044 \text{ J/mm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ kaynak parametreleri için malzeme üzerine kaynak hızı 6,7,8,9,10 mm/s olmak üzere 5 dikiş çekildiğini ve bu 5 dikişin ITAB'ında yapılan sertlik ölçümlerinde 9 ve 10 mm/s'lik kaynak hızlarıyla çekilen dikişlerde sertlik değerlerinin kabul edilebilir değerlerden yüksek olduğunu farz edelim. Bu da 8 mm/s'den büyük kaynak hızının, kritik soğuma hızını aştığını göstermektedir. Yani 8 mm/s kaynak hızı, güvenilir maksimum soğuma hızının ortaya çıktığı kaynak hızı değeridir.

Buradan ısı girdisi hesaplanırsa ($V_k = 8 \text{ mm/s}$ için) $q = 750 \text{ J/mm}$ bulunur. Kalınlık faktörü de hesaplanırsa, $\tau = 0,33$ bulunur. $0,33 < 0,75$ olduğundan ince parçalar için soğuma hızı denklemi uygulanır. Buradan da, $R = 6,76^\circ\text{C/s}$ elde edilir. Bu sonuç yaklaşık 7°C/s 'lik bir soğuma hızının bu malzeme tipi için maksimum güvenilir soğuma hızı (kritik soğuma hızı) olduğu anlamına gelmektedir ($R_k = 6,76^\circ\text{C/s}$). Soğuma hızı bu değeri aşmamalıdır. Eğer soğuma hızı kaynak metalinde bu kritik değere ulaşırsa, ITAB'da martenzitik yapıların oluşma ihtimali olur ki, termal gerilmeler ve hidrojenin varlığı ile birlikte büyük bir çatlama riski doğar.



Şekil 4.1.2.1 Kritik soğuma hızı (Gourd, 1996)

Soğuma hızını bu değer altında tutabilmek için bir ön tavlama gerekebilir. Ön tavlama konusu Bölüm 4.2.6'da incelenecektir.

4.2 Isı Tüketimi İle Malzeme Özellikleri İlişkisi

Ark kaynak yöntemlerinde, elektrik arkının sağladığı enerji ile ilave metal ve esas metal ilk önce ısıtılarak ergitilmekte daha sonra da katılarak soğumaktadır. Kaynak için verilen bu ısının büyük bir kısmı bağlantının her iki tarafındaki esas metal yoluyla iletilerek mekanik özellikleri ve iç yapısı gerek esas metal ve gerekse kaynak metalinden farklı olan ITAB'ı oluşturmaktadır. Burada iki kritik bileşen, ulaşılan en yüksek sıcaklık ve bundan sonraki soğuma hızıdır.

Bölüm 4.1.1 ve 4.1.2'de bahsedildiği üzere ısı girdisi, malzeme özellikleri ve kalınlık; tepe sıcaklığı ve soğuma hızına doğrudan tesir etmekte ve kaynak bağlantısının özelliklerini belirlemektedirler.

Bu noktadan itibaren ilk önce ısı girdisi ile malzeme özellikleri ve daha sonra ısı girdisi ile kalınlık arasındaki ilişki irdelenecektir.

4.2.1 Ergime Sıcaklığı (T_m)

Katı bir malzemenin sıvı duruma geçmeye başladığı ve ergime sona erene kadar koruduğu sıcaklık olarak tanımlanan ergime sıcaklığı, ark esaslı yöntemlerde önemli malzeme özelliklerinden birisidir. Zira kaynaklı bir bağlantı elde edebilmek için malzemenin ergime sıcaklığına kadar ısıtılması gerekmektedir.

Malzemelerin değişik ergime sıcaklıklarına sahip olması kaynak için gereken ısı girdisini etkilemektedir. Yüksek bir ergime sıcaklığına sahip malzemenin bu sıcaklığa ulaştırılarak sıvı duruma geçmesi için gereken ısı, şüphesiz ki daha düşük bir ergime sıcaklığına sahip malzemeye nazaran daha fazla olacaktır. Ancak burada önemli olan ergime sıcaklığının tek başına ele alınmaması gereğidir. Çünkü ergime sıcaklığı diğer malzeme özellikleri ile birlikte ısı girdisine etki etmektedir. Örneğin, alüminyum çeliğe göre daha düşük sıcaklıkta ergimesine rağmen ısı iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle gerekli ısı girdisi aynı kalınlıktaki çeliğe göre daha fazla olmaktadır. Ayrıca diğer bir önemli nokta da, ısı mabının kaynak yapılacak metalin ergime sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklara çıkabilmesidir. Eğer sıcaklık farkı az olursa giren ısı aynı hızla bağlantıyı terk edeceğinden bu durumda bağlantıdaki sıcaklık, ergime sıcaklığına çıkamaz.

Tablo 4.1'de çeşitli metal ve alaşımların ergime sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 4.1 Çeşitli metal ve alaşımların ergime sıcaklıkları
(Welding Handbook, 1976 ve Kakaç, 1998)

Element	Ergime Sıcaklığı (°C)	Alaşım	Ergime Sıcaklığı (°C)
Alüminyum	658	Al Alaşımları Dövme alaşımlar Dökme alaşımlar	630-650 500-650
Karbon	3540		
Bakır	1084	Cu Alaşımları Ticari Bronz %10 Al Bronzu	1050 1070
Altın	1063		
Demir	1535	Mg Alaşımları Dövme alaşımlar Dökme alaşımlar	500-650 450-650
Magnezyum	657		
Molibden	2622	Düşük alaşımlı Ç. Martenzitik P.Ç. Östenitik P.Ç.	1430-1500 1480-1540 1370-1450
Nikel	1453		
Titanyum	1727	Ni Alaşımları 99.95 Ni + Co 60 Ni +33 Cu + 6.5 Fe	1455 1300-1350
Tungsten	3387		
Vanadyum	1726	Titanyum alaşımları	1530-1670

4.2.2 Isı İletim Katsayısı (k)

Malzemelerin ısı iletkenlikleri kaynak işlemi üzerine önemli etkiler yapmaktadırlar. Kaynaklanacak alana ısı verilir verilmez, metal en düşük sıcaklıkta olduğu için bu ısı her iki yöne doğru metal yoluyla iletilerek uzaklaşmaya başlar ve sonuçta metalde bir sıcaklık gradyanı oluşur, dolayısıyla, erime elde edebilmek için bağlantıya sağlanan ısı girdisi hızının, esas metalde olan ısı iletimi hızından daha büyük olması gerekir. Bu durumda, esas levhanın ısı iletkenliği kaynak şartlarının seçiminde göz önüne alınması gerekli en önemli faktörlerden birisidir (Gourd, 1996).

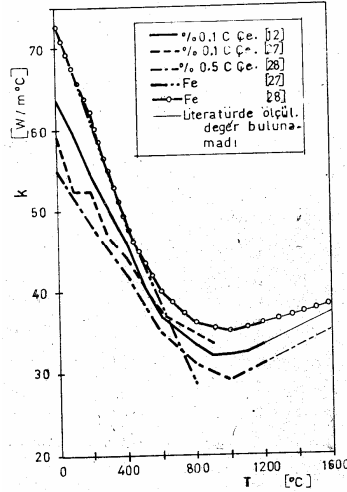
Isı iletim katsayısı (k), malzemenin fiziksel bir özeliği olup, ısı iletim kabiliyetini gösterir. Isı iletim katsayısının değeri; birim zamanda, birim yüzeyden, birim uzunlukta 1°C sıcaklık düşümü halinde, ısı akımı miktarına eşittir. Isı iletim katsayısı, her metal için farklı olup, metalin yapısına ve sıcaklığına bağlıdır. Sözelimi, bir kaynak işlemi sırasında ısı, bakırda çeliğe nazaran çok daha hızlı bir şekilde iletilerek, uzaklaştırılır. Bu ise, erimenin

oluşturulabilmesi için ısının benzer kalınlıktaki bakır bağlantıda çelik bağlantıya göre daha yüksek bir hızda verilmesi gerektiği anlamına gelir.

Malzemelerin ısı iletimleri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Isı iletim katsayısı çalışma sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Bunun yanı sıra malzeme içindeki alaşım elementi miktarı da ısı iletimini etkilemektedir. Saf malzemelerin ısı iletkenlikleri en yüksek seviyede iken malzemeye alaşım elementi katılması ısı iletim kabiliyetini azaltmaktadır.

Çeliklerde ısı iletim katsayısı, bileşimdeki karbon ve alaşım elementlerinin cins ve miktarına bağlı olarak değişmektedir. Çeliklerde karbon miktarı arttıkça ısı iletme kabiliyetinin azaldığı bilinmektedir (Welding Handbook, 1976 ve Kılık, 1983).

Şekil 4.2.2.1'de, saf demir ve çeliklerin ısı iletim katsayılarının değişimi toplu halde gösterilmiştir.



Şekil 4.2.2.1 Isı iletim katsayısının sıcaklık ve C miktarına bağlı olarak değişimi (Kılık, 1983)

Isıl iletkenlikleri, alüminyum ve alaşımlarının kaynağını ve de bakır ve alaşımlarının kaynağını çeliklerin kaynağından farklı kılan özelliklerden birisidir.

Alüminyum alaşımları 550 - 660 °C arasındaki sıcaklık aralığında ergimelerine rağmen ısı iletkenliklerinin çok yüksek olması nedeni ile kaynak için gerekli ısı girdisi eş kalınlıktaki çeliğin kaynağından daha fazla olmak zorundadır. Bu ısı iletkenlik özellikle kalın parçalarda, kaynak bölgesinin şiddetli soğumasına neden olur, bu bakımdan kalın ve bilhassa döküm alüminyum parçalara kaynak öncesi ön tav vermek gereklidir. Genellikle 15 mm'den daha kalın parçalara uygulanan bu ön tav derecesi 200 °C'yi aşmamalıdır. Dövme alüminyum alaşımlarında genel olarak ön ısıtma yerine daha yüksek akım şiddeti ve ark gerilimi ile daha yüksek ısı girdisi sağlayarak çalışma tercih edilir.

Bakır ve alaşımlarının kaynağında yine ısı iletkenliklerinin yüksek olması nedeniyle yoğun bir ark enerjisine gerek vardır, dolayısı ile daha yüksek bir akım şiddeti (alüminyuma nazaran % 50 - 75 daha yüksek) çalışılır. Isıl iletkenlik sebebiyle kalın bakır parçaların kaynağında 250 - 400 °C arasında bir ön tav uygulanmalıdır (Tülbentçi, 1998).

Tablo 4.2’de çeşitli metal ve alaşımların ısı iletim katsayıları verilmiştir.

Tablo 4.2 Çeşitli metal ve alaşımların ısı iletim katsayıları (Metals Handbook, 1989)

Element	Yoğunluk (g/cm ³)	Isı iletim katsayısı (20-100°C) (W/m.K)	Alaşım	Yoğunluk (g/cm ³)	Isı iletim katsayısı (20-100°C) (W/m.K)
Alüminyum	2.699	221	Al Alaşımları 1100 2014 5052 6061 7075	2.71	222
Karbon	2.25	24		2.80	193
Bakır	8.96	394		2.68	138
				2.70	172
				2.80	121
Altın	19.32	297	Cu Alaşımları Ticari Bronz Cartridge Pirinci %9 Al Bronzu	8.80	188
Demir	7.87	75		8.53	121
				7.58	60
Magnezyum	1.74	154	Mg Alaşımları AZ 31 AZ 91 ZW 1 RZ 5	1.78	84
Molibden	10.22	142		1.83	84
				1.8	134
				1.84	113
Nikel	8.902	92	Alaşımsız Ç. Paslanmaz Ç. 301 304 316 410 430 501	7.8	53.7
Titanyum	4.507	22		7.9	16
				7.9	15.1
Tungsten	19.3	166		8	15.5
				7.7	24
				7.7	26
Vanadyum	6.1	31	Titanyum alaşımları Ti-6A 1-4V Ti-5A 1-2.5Sn	7.7	37
				4.43	5.9
				4.46	6.3

4.2.3 Özgül Isınma Isısı (c_m)

Kaynak işlemi üzerine etki eden bir diğer malzeme özelliği de özgül ısınma ısısıdır. Özgül ısınma ısısı, bir birim ağırlıktaki malzemenin sıcaklığını bir derece artırmak için gerekli ısısıdır. Diğer bir deyişle, malzemelerin ısıyı absorbe etme yetileridir.

Malzemeyi ergitmek için gerekli olan ısı miktarı (4.5) no'lu formülle hesaplanır.

$$Q_m = m_m \cdot c_m \cdot \Delta T_m \quad (4.5)$$

Q_m : Malzemeyi ergitmek için gerekli ısı miktarı (kJ), m_m : Ergitilen malzeme kütlesi (g), c_m : Malzemenin özgül ısınma ısısı (kJ/g.°C), ΔT_m : Malzemenin ortam ile ergime sıcaklığı arasındaki fark (°C).

Bu denklemden de görülebileceği üzere sıcaklık farkı eşit kabul edilirse, malzeme tipine göre özgül ısınma ısısının artması ile aynı miktarda malzeme ergitebilmek için daha fazla ısı girdisine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak burada diğer önemli bir değişken de malzemenin ergime sıcaklığıdır. Malzemelerin özgül ısınma ısıları birbirine çok yakın değerlerde olsa dahi ergime sıcaklıklarındaki fark, ısı girdisine etki edecektir.

Tablo 4.3'te çeşitli elementlerin 20°C ve ergime sıcaklıklarındaki özgül ısınma ısıları verilmiştir.

Tablo 4.3 Çeşitli elementlerin özgül ısınma ısıları (Welding Handbook, 1976)

Element	Ergime Sıcaklığı (°C)	20 °C'de Özgül I. ısıları 10 ³ (J/kg.K)	Ergime Sıcaklığında Özgül I. ısıları 10 ³ (J/kg.K)
Alüminyum	658	0,898	1,250
Karbon (Gaz)	3000	1,735	1,822
Kobalt	1494	0,419	0,640
Krom	1860	0,483	0,974
Demir	1535	0,444	0,763
Magnezyum	657	1,019	1,327
Molibden	2622	0,259	0,546
Nikel	1453	0,44	0,616
Titanyum	1727	0,519	0,782
Tungsten	3387	0,426	0,617

4.2.4 Isıl Genleşme Katsayısı (α)

Malzeme sıcaklığının bir derece artması sonucu malzemede meydana gelen genleşmeyi belirten bu katsayı, özellikle distorsiyonlar açısından kritik öneme sahiptir.

Kaynaktan sonra kaynak metalinin sahip olduğu ısı, tüm bağlantı oda sıcaklığına soğuyana dek esas metale doğru akar. Bu soğuma safhası esnasında kaynak metali, hem bağlantının uzunluğu boyunca hem de buna dik açıda büzülür. Kendini çekme olarak tanımlanan bu olay kaynaklı bağlantıda istenmeyen geometrik hatalara sebep olur.

Denklem (4.6)'da ısıl genleşme katsayısı ile boyuna çekme arasındaki ilişki verilmiştir.

$$l_b = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T_m \quad (4.6)$$

l_0 : Başlangıçtaki uzunluk (mm), l_b : Boyuna çekme miktarı (mm), α : Isıl genleşme katsayısı ($1/^\circ\text{C}$), ΔT_m : Malzemenin ortam ile ergime sıcaklığı arasındaki fark ($^\circ\text{C}$).

Görüldüğü gibi sabit sıcaklık farkı ve aynı kaynak uzunluğu için α 'nın artması boyuna çekmeyi artıracaktır.

Genleşme katsayısı sıcaklığa ve malzemenin içerdiği alaşım elementi miktarına göre değişmektedir.

Tablo 4.4 Çeşitli metallerin 20°C 'deki ısıl genleşme katsayıları (Welding Handbook, 1976)

Metal	Isıl Genleşme Katsayısı ($10^{-6}/\text{K}$)
Al	23,1
Al Alaşımları	
Dövme alaşımlar	22-23
Dökme alaşımlar	22-23
Cu	16,5
Cu Alaşımları	
Ticari Bronz	18
%10 Al Bronzu	17
Mg	24,8
Mg Alaşımları	
Dövme alaşımlar	25-28
Dökme alaşımlar	25-28
Fe	11,8
Düşük alaşımlı Ç.	11,4
Martenzitik P.Ç.	9-10
Östenitik P.Ç.	14-15
Ni Alaşımları	
99.95 Ni + Co	13,4
60 Ni +33 Cu + 6.5 Fe	13
Titanyum alaşımları	7-9
Tungsten	4,5
Molibden	4,8

4.2.5 Karbon Eşdeğeri (C_{es})

Çağımız endüstrisinde en yaygın kullanılan metelsel malzeme demir esaslı alaşımlardır ki bunların içinde çelikler çok önemli bir yere sahiptirler. Çelikleri bu kadar önemli kılan özellik, çok çeşitli alaşım yapabilme olanağının yanı sıra ısıl işlemler yardımı ile de farklı özellikler kazanabilmeleridir. Bilindiği gibi bir çelik su verilerek sertleştirildiğinde normal durumunda ve aynı bileşimdeki çeliği rahat bir şekilde işleyecek takım malzemesi olarak kullanılabilir.

Kaynak açısından en önemli nokta bazı tür çeliklerde görülen yüksek sıcaklıktan itibaren hızlı soğuma sonucunda ortaya çıkan sertleşmedir. Çeliğin bileşimine ve soğuma hızına bağlı olarak ortaya çıkan bu çok sert ve kırılgan yapıya martenzit adı verilmektedir. Sertliği ise içerdiği karbon miktarına bağlıdır. Uygulamada en yüksek sertlik % 0,7-0,8 C içeren çeliklerde görülmektedir. Martenzitik yapının gelişmesinde karbonun yanı sıra en önemli bir etken de soğuma hızıdır. % 0,3'den daha fazla karbon içeren çelikler ancak yüksek sıcaklıktan itibaren suyun içine atılarak soğutuldukları zaman sertleşme göstermelerine karşın, alaşım elementi içeren çeliklerde çok daha yavaş soğuma sonucunda da sert ve kırılgan martenzitik yapı elde edilebilmektedir.

Kaynak işleminde genellikle metal önce erime sıcaklığının üstünde bir sıcaklığa kadar ısınmakta sonra da soğumaktadır. Yapılan deneyler ve ölçümler kalın bir çelik parça üzerinde kaynak bölgesinin soğuma hızının, yüksek sıcaklığa kadar ısıtılmış ve suya atılarak soğutulan bir parçanın soğuma hızına eşdeğer olduğunu göstermiştir. Bu bakımdan belli bir miktarın üstünde karbon ve alaşım elementi içeren çeliklerin kaynak bölgesinde böyle bir sert ve gevrek yapının ortaya çıkacağı açıkça görülebilen bir olaydır.

Az alaşımlı çeliklerde çeliğin bileşiminde bulunan krom, molibden, vanadyum, mangan gibi alaşım elementleri, daha az karbon içeriği halinde dahi, ITAB'da sertleşme oluşmasına yardımcı olmaktadır. ITAB'da ortaya çıkan bu sert ve gevrek yapı, hemen kaynak sonrası bir takım çatlakların oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca kaynaklı bağlantının kullanımı sırasında en ufak bir şekil değiştirme zorlamasına maruz kaldığında da aniden gevrek olarak kırılmakta ve büyük hasarlara neden olmaktadır.

Kaynakta çeliğin sertleşme meylini belirten bir değer sayısının bulunması ve bununla çeliğin bileşimine dayanarak, kaynak kabiliyetini belirten bir formülün elde edilebilmesi için birçok çalışmalar yapılmış ve alaşım elementlerinin verdiği sertleşmeye eş değerde sertliği sağlayan karbon miktarı saptanmıştır.

Bu şekilde saptanan ve çeliğin bileşimindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu sertliğe eş sertliği veren karbon miktarına *karbon eşdeğeri* ($C_{eş}$) adı verilmiştir. Birçok ülkede ve çeşitli nizamnamelerde, kaynaklı konstrüksiyonlarda kullanılacak çeliklerin içeriğindeki karbon ve manganez miktarları sınırlandırılmıştır. Bu iki element de çeliğin sertleşme meyli dolayısıyla çatlak oluşumu olasılığı arttırırlar.

Karbon eşdeğerinin hesaplanması konusunda, literatürde çok değişik formüllere rastlanılmaktadır. Bunlar salt bilimsel açıdan düşünüldüğünde, ne çelikleri sınıflandırmak için kriter olabilmekte ve ne kaynak kabiliyetinin bir ölçüsü olarak kullanılabilirler; bunlar ancak uygulamada kullanılabilen ve tatminkâr sonuçlar veren ampirik bağıntılardır (Tülbentçi, 1998). Bugün en çok kullanılan karbon eşdeğeri formülleri şunlardır:

1. Dearden ve H. O'Neil karbon eşdeğeri formülü:

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{5} \quad (4.7)$$

2. Kihara, Suzuki Otani ve Tamura'nın karbon eşdeğeri formülü:

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Si}{25} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} \quad (4.8)$$

3. B.J. Bradstreet'e göre karbon eşdeğeri formülü:

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{2} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{10} + \frac{V}{10} \quad (4.9)$$

4. Societe National de Chemin de Fer (Fransa)'in kullandığı karbon eşdeğeri formülü:

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} \quad (4.10)$$

5. K. Winterton'a göre karbon eşdeğeri formülü:

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{10} + \frac{Cu}{40} + \frac{Ni}{20} + \frac{Mo}{50} + \frac{V}{10} \quad (4.11)$$

6. Milletlerarası Kaynak Enstitüsü'nün (IIW) IX No'lu Komisyonuna (Kaynak Kabiliyeti Komisyonu) göre karbon eşdeğeri formülü:

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15} \quad (4.12)$$

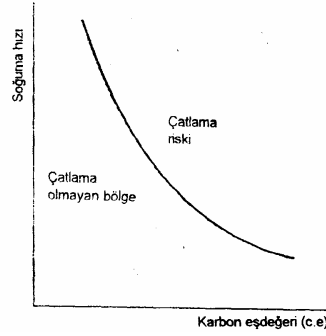
Bu formüllerin geçerli olabilmesi için çelikteki alaşım elementlerinin sınırları şu şekilde olmalıdır: $C \leq \% 0,5$; $Mn \leq \% 1$; $Cr \leq \% 1$; $Ni \leq \% 3,5$; $Mo \leq \% 0,6$

Görüldüğü gibi, bütün formüllerde karbon ve kısmen mangan haricindeki bütün elementlerin etkinlikleri farklı mütalaa edilmektedir. Çeliklerdeki alaşım elemanları ve etkileri Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5 Çeliklerdeki alaşım elemanları ve etkileri
(<http://www.makinamuhendisi.com/idx/8/110/Makina-Magazin-Makale/article/Alam-elementlerinin-elik-yapsna-etkisi.html>)

Alaşım elemanı	Etkileri
Karbon (C)	Çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır, yüzde uzamayı, şekillenebilirliği ve kaynak kabiliyetini azaltır.
Mangan (Mn)	Çeliğin dayanımını arttıran etki gösterir. Bunun yanında sertleşebilme ve kaynak kabiliyetini de artırır.
Silisyum (Si)	Çeliğin akma, çekme dayanımını ve elastikiyetini artırır.
Fosfor (P)	Çeliğin akma ve çekme dayanımını arttırır, yüzde uzamayı ve eğme özelliklerini çok fazla kötüleştirir, soğuk kırılmalık yaratır, talaşlı şekillendirme kabiliyetini arttırır.
Kükürt (S)	Malzemenin tokluğunu ve sünekliğini önemli ölçüde azaltır. Ayrıca kaynaklanabilirliği kötü yönde etkiler.
Krom (Cr)	Korozyon ve oksidasyon direnci sağlar. Sertleşebilme kabiliyetini artırır.
Nikel (Ni)	Özellikle kromla birlikte bulunduğu zaman, sertliğin derinliklere inmesini sağlar.
Molibden (Mo)	Tane büyümesini önler, sertleşebilme kabiliyetini artırır.
Kobalt (Co)	Alaşımli takım çeliklerinde kullanılan bir alaşım elementidir. Takım çeliklerinin sıcakta sertliğini muhafaza etmesi için kullanılır.
Tungsten (W)	Aşınma direncini artıran, sıcakta sertliğin muhafazasını sağlayan bir alaşım elementidir.
Vanadyum (V)	Tane küçültme etkisi yaparak çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını oldukça artırır. Ayrıca sertleşebilme kabiliyetini artırır.
Titanyum (Ti)	Tane küçültücü etkisi vardır. Ayrıca paslanmaz çeliklerde krom karbürün olumsuz etkisini giderebilmek için karbür oluşturuç alaşım elementi olarak kullanılır.
Niyobyum (Nb)	Mikro alaşımli çeliklerde tane küçültme etkisi en yüksek olan mikro alaşım elementidir. Paslanmaz çeliklerde titanyumla birlikte veya tek başına kullanılır.
Alüminyum (Al)	Oksijen gidermek için kullanılır. Akma dayanımını ve darbe tokluğunu arttırıcı etki gösterir.
Kalay (Sn)	Akma ve çekme dayanımlarını pek etkilemez, fakat sıcak haddelemelerde sorunlar yaratır. Kalay düşük ergime sıcaklığına sahip bileşikler yaparak haddeleme sırasında kopmalara neden olur.
Bakır (Cu)	Akma ve çekme dayanımını arttırır, yüzde uzamayı ve şekillenebilirliği azaltır. Soğuk çekilebilirliği kötü yönde etkiler. Korozyon direncini yükselten etki gösterir.
Kurşun (Pb)	Haddelenebilirliği azaltır, yüzey kalitesini olumsuz yönde etkiler. Kurşun çeliklerin talaşlı şekillendirme kabiliyetine artırır.
Azot (N)	İstenmeyen bir elementtir. Azot kırılmalığına neden olur, eğme özelliklerini çok kötüleştirir.
Hidrojen (H)	Hidrojen gevrekliğine neden olur.

Yapı çeliklerinde $C_{eş}$ değerleri % 0,1 ile % 0,5 arasında değişmektedir. Soğuma hızı ile $C_{eş}$ arasındaki etkileşim Şekil 4.2.5.1’de verilmiştir.



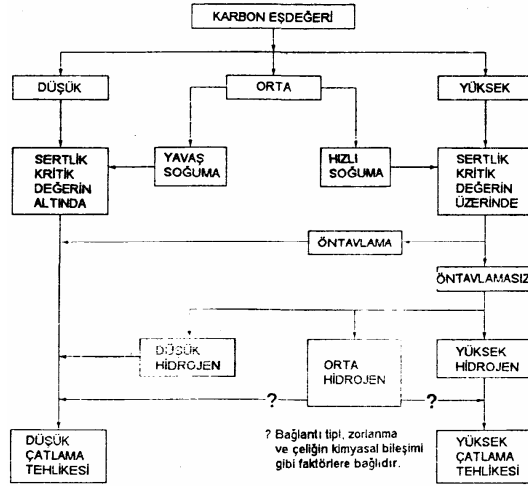
Şekil 4.2.5.1 Soğuma hızı ile $C_{eş}$ arasındaki etkileşim (Gourd, 1996)

Düşük $C_{eş}$ değerlerinde çatlama tehlikesi oluşmadan yüksek soğuma hızlarına izin verilebilir. Kalın kesitler dışında % 0,45’in altındaki $C_{eş}$ değerlerinde ITAB’da nadiren çatlama oluşur. Karbon eşdeğeri büyüdükçe kaynaktan sonra soğumanın yavaşlatılması gerekmektedir. Bunun için de tek çözüm parçaya kaynaktan önce bir ön tavlama uygulayarak soğuma hızını yavaşlatmaktır (Tülbentçi, 1998).

Görüldüğü üzere karbon eşdeğeri sadece çeliğin bileşimiyle ilgili olup, buna karşın soğuma hızını birinci derecede etkileyen ısı girdisi, kalınlık, parça geometrisi ve ağız formu ile ilgili faktörleri içermemektedir. Ancak çeliklerde ITAB’daki çatlama tehlikesine sadece $C_{eş}$ değil, $C_{eş}$ ile birlikte bir dizi faktör de etkilemektedir. Bu faktörler şunlardır:

- Kimyasal bileşim (Karbon eşdeğeri),
- Soğuma hızı (ısı girdisi, bağlantı tipi ve kalınlık),
- Hidrojen içeriği,
- Ön tavlama.

Bu faktörler arasındaki ilişki karmaşıktır. Bu ilişkiler basitleştirilmiş bir diyagram halinde aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.2.5.2 Çelikte ITAB çatlaklarının oluşumunda etkili temel faktörler (Gourd, 1996)

4.2.6 Ön Tavlama

Ön tavlama işlemi, esas metalin kaynak bölgesinin kaynak işleminden önce belirli bir sıcaklığa (ön tav sıcaklığı) kadar ısıtılmasıdır. Esas metali kaynaktan önce ısıtmak yani ön tavlama yapmak, esas metalin ilk sıcaklığını yükseltmekte; böylece ergime sıcaklığı ile esas metalin ilk sıcaklığı arasındaki fark azaltılarak ergime sıcaklığına daha kolay ulaşılması sağlanmaktadır.

Malzemelere ön tavlama uygulanmasının çeşitli amaçları bulunmaktadır. Bunlar;

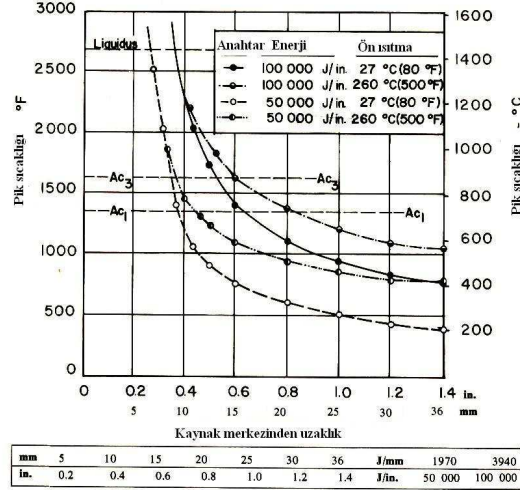
- Soğuma hızını düşürerek daha sünek yapılar elde etmek ve çatlama riskini azaltmak,
- Soğuma hızını düşürerek hidrojenin kaynak metalini terketmesine olanak sağlamak ve çatlama riskini azaltmak,
- Kendini çekme gerilmelerini azaltmak şeklinde sayılabilir (Funderburk, 1997).

Ön tavlama uygulayarak soğuma hızı düşürülmektedir. Bu açıdan soğuma hızı ve ön tavlama arasında ters orantı vardır. Isı girdisi ile soğuma hızı arasında da ters orantı olduğu düşünülürse basit bir yaklaşımla şu yazılabilir:

$$R \propto \frac{1}{T_0 \cdot q} \quad (4.13)$$

Burada; R : Soğuma hızı (°C), T₀ : Ön tav sıcaklığı (°C), q : Birim dikiş enerjisi (kJ/cm).

Diğer yandan ön tav sıcaklığı, soğuma hızının yanı sıra tepe sıcaklıklarına da etki etmektedir.



Şekil 4.2.6.1 Isı girdisi ve ön tav sıcaklığının tepe sıcaklığının dağılımına etkisi
(Welding Handbook, 1976)

Şekil 4.2.6.1’de 13 mm kalınlığındaki çelik malzemeye farklı ısı girdisi ve ön tav sıcaklıkları sonucu elde edilmiş tepe sıcaklıklarının dağılımı gösterilmiştir. Buradan;

- Isı girdisinin veya ön tav sıcaklığının azalması tepe sıcaklıklarının dağılımını dikleştirir.
- Tepe sıcaklık değeri, artan ısı girdisi veya ön tav sıcaklığı ile artmaktadır (Welding Handbook, 1976).

Ön tav sıcaklığının belirlenmesinde Bölüm 4.1.2’de bahsedilen (4.2) ve (4.3) no’lu soğuma hızı denklemleri kullanılabilir.

Bölüm 4.1.2’deki örnekte kritik soğuma hızı 6,76 °C/s bulunmuştu. Bu değer, bu örnekteki malzeme tipi için aşılmaması gereken soğuma hızı değeri olup, eğer gerekiyorsa soğuma hızını bu değer veya altında bir değere indirmek için ön tav uygulanabilir.

Sözgelimi, $R_k = 6,76 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ olduğunu bildiğimize göre, kaynak şartları $U = 25 \text{ V}$, $I = 250 \text{ A}$, $V_k = 7 \text{ mm/s}$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $T_c = 540 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = 9 \text{ mm}$, $k = 0,028 \text{ J/mm.s.}^\circ\text{C}$, $\eta = 0.8$ ve $\rho c_m = 0,0044 \text{ J/mm}^3.^\circ\text{C}$ olması durumunda, ısı girdisi $q = 714,28 \text{ J/mm}$ olur. Buradan kalınlık faktörü $\tau = 0,50 < 0,75$ olduğundan denklem (4.3) uygulanır ve $R = 16,78 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ bulunur ki bu değer $R_k = 6,76 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ ’den büyüktür. Bu bakımdan ön tavlama uygulanması gerekmektedir.

Denklem (4.3)’te $R = R_k = 6,76 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ yazılır ve T_0 değeri çekilirse, $T_0 = 159,69 \text{ } ^\circ\text{C}$ bulunur. Bu değer malzemenin ilk sıcaklığı olmalıdır yani malzeme ön tavlama işlemine tabi tutulmalıdır.

Metal malzemelerin ısı iletkenlikleri artan sıcaklıkla beraber azaldığından, ön tavlama işlemi kaynak yapılacak malzemenin ısı iletkenliğini azaltmaktadır. Bu durum özellikle alüminyum ve bakır gibi ısı iletkenliği yüksek olan malzemelerin kaynağında kolaylıklar sağlamaktadır. Bu tip malzemelere, hem ısı iletkenliğin düşürülmesi hem de kaynak bölgesinin şiddetli soğumasına engel olmak açısından ön tav vermek gereklidir. Genellikle kalın alüminyum parçalarda 200 °C'yi aşmayan ve kalın bakır parçalarda da 250 - 400 °C arasında değişen bir ön tav uygulanmalıdır. Öte yandan çelikler için uygulanması önerilen ön tav sıcaklıklarının karbon eşdeğeri ile belirten bir takım formüller varsa da, formül kullanmadan aşağıdaki değerler uygulanabilir.

Tablo 4.6 C_{es}'e göre ön tav sıcaklıklarının belirlenmesi (Tülbentçi, 1998)

Karbon eşdeğeri (%)	Ön tavlama sıcaklığı (°C)
0,45'ten küçük	Normal şartlarda gerek yok
0,45-0,60	100-200
0,60'tan büyük	200-350

4.2.7 Oksit Oluşturma Eğilimi

Kaynak işlemi esnasında karşılaşılan bir diğer önemli sorun da malzemelerin oksit oluşturmalarıdır. Oluşan oksit tabakası esas malzemenin ergime sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta ergimesinin yanında kaynak banyosunu kapladığından malzemelerin birleştirilmesinde olumsuz etkiler göstermektedir.

Kaynak esnasında oksit oluşumunun görüldüğü malzemelere verilebilecek en güzel örnekler alüminyum ve magnezyumdur. Bu malzemeler açık havada çok hızlı bir biçimde, yüksek dayanımlı, kalın ve yüksek sıcaklıklarda ergiyen oksit tabakaları oluştururlar. Bu oksit tabakası kaynaktan önce uzaklaştırılmazsa, malzeme ergir ancak oksit tabakası kaynak banyosunu kapladığından, bu şekilde başka bir parça ile birleştirilmesi mümkün olmaz. Kaynak esnasında bu oksit tabakası sürekli olarak uzaklaştırılmak zorundadır. Ters kutuplama ile bunun yapılması mümkündür. Ters kutuplamada gaz iyonları ark içinde hızlanır ve büyük bir hızla parça yüzeyine çarpar. Bu şekilde oksit tabakasını parçalayan bir temizleme etkisi oluşur. Elektrotun artı kutba bağlanması akım yüklenebilme kabiliyetinin düşük olmasından

dolayı uygun değildir. Bu nedenle alternatif akım tercih edilir. Kısa süreli artı kutuplama sacların temizlenmesi için yeterlidir (Cary, 1989 ve Kongel, 2005).

Tablo 4.7’de çeşitli malzemeler ve oksitlerinin ergime sıcaklıkları ile göreceli oksit oluşturma eğilimleri verilmiştir.

Tablo 4.7 Bazı metal ve oksitlerinin ergime sıcaklıkları ile göreceli oksit oluşturma eğilimleri (Welding Handbook, 1976 ve Gültekin, 1991)

Metal	Ergime noktası (°C)	Oksit	Ergime noktası (°C)
Fe	1528	FeO	1360
		Fe ₃ O ₄	1530
		Fe ₂ O ₃	1565
Al	659	Al ₂ O ₃	2045
Mg	657	MgO	2800
Cr	1800	Cr ₂ O ₃	1990
Ni	1455	NiO	1990
Mn	1220	MnO	1785
Si	1414	SiO ₂	1710
Cu	1083	Cu ₂ O	1232
		CuO	1336
Co	1490	CoO	1810
Ti	1727	TiO ₂	1775
V	1750	V ₂ O ₃	1970
		V ₂ O ₄	1637
		V ₂ O ₅	658
W	3370	WO ₂	1277
		WO ₃	1473

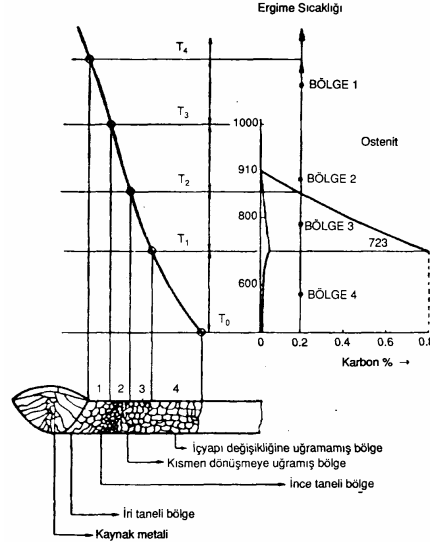
Göreceli oksit oluşturma eğilimleri

(1. en yüksek, 8. en düşük)

1. Al
2. Mg
3. Co ve Ti
4. W
5. Mn
6. V
7. Fe
8. Cr

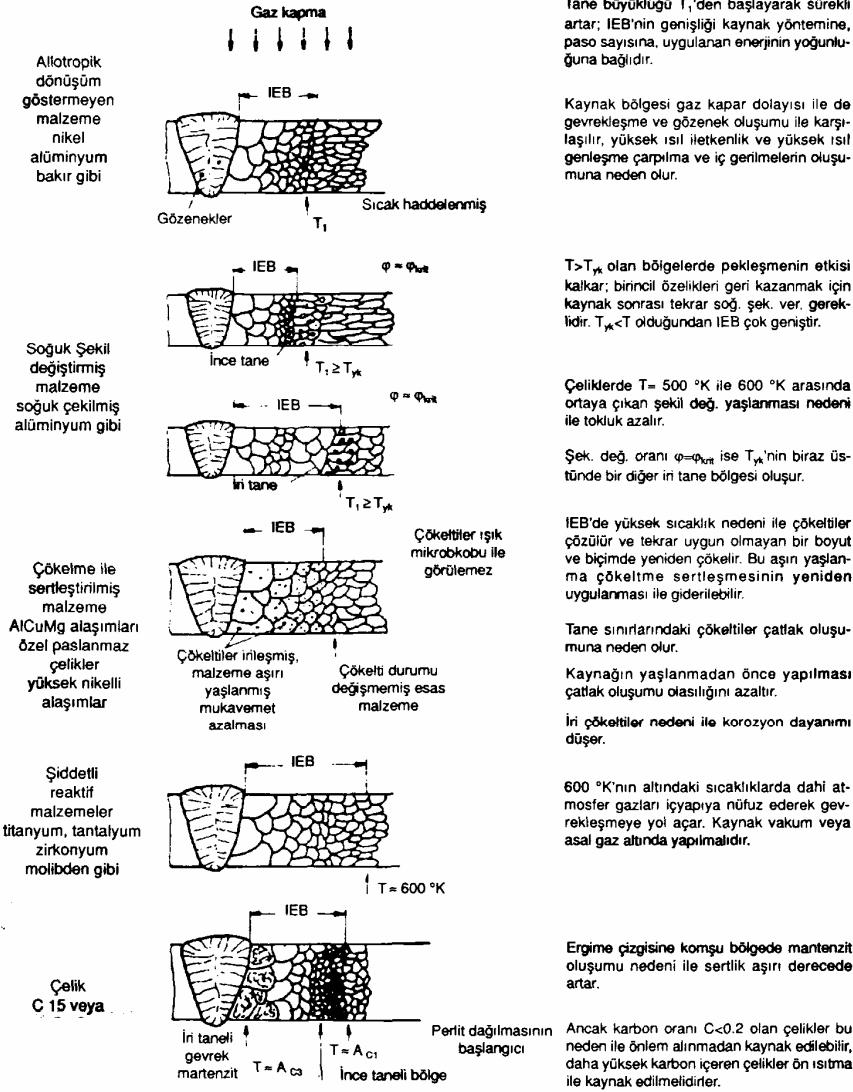
4.3 Isı Girdisinin Kaynak Bölgesi Mikroyapısına Etkisi

Kaynak bölgesi; kaynak metali ve ITAB'dan meydana gelmektedir. Kaynak bölgesinin mekanik özellikleri kaynak metali ve ITAB'da oluşan mikroyapılara bağlı kalmaktadır. Oluşan bu mikroyapılar ise, kaynak edilen parçanın kalınlığı, kimyasal bileşimi ve enerji girişine bağlı olarak değişim göstermektedir (Eroğlu ve Aksoy, 1999).



Şekil 4.3.1 Çeliklerin kaynağında sıcaklığın ITAB mikroyapısına etkisi (Tülbentçi, 1998)

ITAB'da ortaya çıkan iç yapısal değişiklikler erişilen sıcaklığın fonksiyonu olarak esas metalin türüne, bileşimine, ısıl işlem ve üretim durumuna bağlı olarak çok çeşitlidir. Bu iç yapısal değişiklikler, o bölgede erişilen azami sıcaklık derecesi ve etkime süresi bilinirse esas metalin türü, bileşimi ve üretim durumu göz önünde bulundurularak önceden tahmin edilebilir ve buna bağlı olarak da bölgenin fiziksel ve kimyasal özellikleri saptanabilir. Çeşitli türlerdeki metal ve alaşımlarının kaynağında ITAB'da karşılaşılabilecek iç yapılar Şekil 4.3.2'de verilmiştir.



Tane büyüklüğü T_1 'den başlayarak sürekli artar; IEB'nin genişliği kaynak yöntemine, paso sayısına, uygulanan enerjinin yoğunluğuna bağlıdır.

Kaynak bölgesi gaz kaplar dolayısı ile de gevrekleşme ve gözenek oluşumu ile karşılaşılar, yüksek ısı iletkenlik ve yüksek ısıl genişleme çarpılma ve iç gerilmelerin oluşumuna neden olur.

$T > T_{yk}$ olan bölgelerde pekleşmenin etkisi kalkar; birincil özellikleri geri kazanmak için kaynak sonrası tekrar soğ. şek. ver. gereklidir. $T_{yk} < T$ olduğundan IEB çok genişir.

Çeliklerde $T = 500 \text{ }^\circ\text{K}$ ile $600 \text{ }^\circ\text{K}$ arasında ortaya çıkan şekil değ. yaşlanması nedeni ile tokluk azalır.

Şek. değ. oranı $\varphi = \varphi_{soğ}$ ise T_{yk} 'nin biraz üstünde bir diğer iri tane bölgesi oluşur.

IEB'de yüksek sıcaklık nedeni ile çökelti çözülür ve tekrar uygun olmayan bir boyut ve biçimde yeniden çöker. Bu aşırı yaşlanma çökelti sertleşmesinin yeniden uygulanması ile giderilebilir.

Tane sınırlarındaki çökelti çatlak oluşumuna neden olur.

Kaynağın yaşlanmadan önce yapılması çatlak oluşumu olasılığını azaltır.

İri çökelti nedeni ile korozyon dayanımı düşer.

$600 \text{ }^\circ\text{K}$ 'nin altındaki sıcaklıklarda dahi atmosfer gazları içyapıya nüfuz ederek gevrekleşmeye yol açar. Kaynak vakum veya asal gaz altında yapılmalıdır.

Ergime çizgisine komşu bölgede mantenzit oluşumu nedeni ile sertlik aşırı derecede artar.

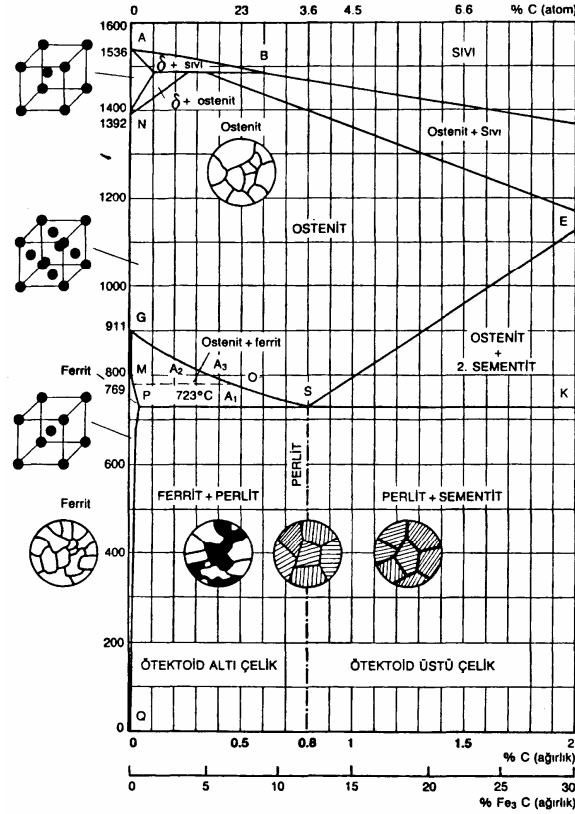
Ancak karbon oranı $C < 0.2$ olan çelikler bu neden ile önlem alınmadan kaynak edilebilir, daha yüksek karbon içeren çelikler ön ısıtma ile kaynak edilmelidir.

Şekil 4.3.2 Çeşitli metal ve alaşımlarının kaynağında ITAB'da oluşabilecek iç yapılar (Tülbentçi, 1998)

Saf metallerin çoğu katı halde iken, yalnız bir tek kristal yapıya sahiptirler; bazı metaller ise, katı halde, değişik sıcaklıklarda farklı kristal yapı gösterirler. Allotropi adı verilen bu özelliğe demirde de rastlanır; saf demir $910 \text{ }^\circ\text{C}$ nin altında sıcaklıklarda α fazında hacim merkezli kübik (HMK) kristal kafese, $910-1392 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkları arasında γ fazında yüzey merkezli kübik (YMK) kristal kafese, $1392-1536 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında da δ fazında, gene HMK kristal kafese sahiptir. Saf demir halinde bu dönüşümler sabit sıcaklıklarda oluşur, çeliklerde yani alaşım elementi içeren demir halinde ise, bu dönüşümler bir sıcaklık aralığında oluşmaktadır.

Kaynak işleminde, genellikle metal önce likidüsün üstünde bir sıcaklığa kadar ısıtılmakta ve sonra da soğutulmaktadır. Dolayısı ile çeliklerin kaynağında, kaynak bölgesinde, yukarıda belirtilmiş olan dönüşümler sıra ile oluşacaktır. Isıtıldıktan sonra soğuma yavaş bir şekilde

gerçekleştiğinde, elde edilen yapı tane büyüklüğünün dışında, ilk yapının aynıdır; ancak, soğumanın hızlı olması hallerinde, çeliğin kaynağını etkileyen çok önemli durumlar ortaya çıkar. Şekil 4.3.3'te demir - karbon diyagramı üzerinde değişik oranlarda karbon içeren çeliklerin, ısıtılma ve dengeli bir şekilde yavaş soğutulmalarında oluşan dönüşümleri ve bunun sonucunda ortaya çıkan yapılar görülmektedir.



Şekil 4.3.3 Fe – Fe₃C denge diyagramı (Tülbentçi, 1998)

Ostenitizasyon sıcaklığına kadar ısıtılmış, ötektoid bileşimde (% 0.8 C) bir çelikte, ostenit denge koşullarını her an koruyabilecek bir yöntemle soğutulduğunda, tamamen perlit tanelerinden oluşan bir iç yapı elde edilecektir. Dönüşüm, 723 °C'de gerçekleşecek ve ısıtma halinde ise, bu olayın tam tersi cereyan edecektir. Ötektoid altı bir çelikte ($C < \%0.8$) ostenitizasyon sıcaklığından itibaren A₃ çizgisine erişildiği anda, ostenitin tane sınırlarında ferrit çekirdekleşmeye başlayacaktır. Sıcaklık azaldıkça bu çekirdekler irileşecek ve ferrit taneleri oluşturacaktır. Çeliğin bileşimine göre ferritin oluşma hızı ve miktarı soğuma hızı ile ilgilidir. Sıcaklığın A₁'e yani 723 °C'ye düştüğü zaman, kalan ostenit % 0.8 C içerir ve tamamı perlite dönüşür. Sonuçta ferrit ve perlit tanelerinden oluşan bir iç yapı elde edilir. Isıtma halinde ise bu olayın tamamen tersi görülür ve perlit taneleri sıcaklık 723 °C'ye erişince tamamen ostenite dönüşür. Sıcaklık arttıkça ferrit taneleri ufalır; yani, ferrit ostenit

içinde çözülür, A_3 çizgisine kadar yükselince hiçbir ferrit tanesi kalmaz ve yapı tamamen ostenite dönüşmüş olur.

Otektoid üstü çeliklerde ise, ostenitizasyon sıcaklığından başlayıp soğutulduğunda, sıcaklık SE'ye düştüğü zaman, ostenitten, sementit ayrışmaya başlar ve ostenit tane sınırlarına çökeler. Bu olay, A_1 sıcaklığına düşünceye kadar devam eder. Ayrışma hızı, çeliğin karbon miktarına ve soğuma hızına bağlıdır. Şöyle ki sıcaklık $723\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düştüğünde kalan ostenit % 0.8 C içerir ve bu sıcaklıkta tamamen perlitte dönüşür. Sonuçta sementit ağı ile çevrilmiş perlit tanelerinin oluşturduğu bir iç yapı elde edilir.

Otektoid bileşimindeki çelik A_1 'den yani $723\text{ }^\circ\text{C}$ 'den daha aşağı bir sıcaklığa kadar aniden soğutulsa ve o sıcaklıkta tutulsa, denge koşullarından uzaklaşıldığından; önce, bir müddet hiçbir dönüşüm oluşmaz; bir süre sonra dönüşüm başlar ve bir zaman aralığı içinde gerçekleşir. Daha düşük bir sıcaklıkta dönüşüm gerçekleştirildiğinde perlit yerine, beynit adı verilen farklı görünüş ve özelliklere sahip bir yapı elde edilir.

Oluşumun mekanizması açısından da beynit, perlitten farklıdır. Perlit, sementitin ostenit taneleri içinde, tane sınırlarına dik lameller halinde çökmesi ile oluşur. Sementit lamelleri oluşabilmek için gerekli karbonu difüzyonla ostenitten aldığından, lamelle bitişik ostenit karbonca fakirleşerek ferrite dönüşür. Böylece sementit lamellerin her iki yüzünde bir ferrit tabakası oluşur ve ferrit tabakalarının öteki yüzleri karbonca zenginleşerek orada birer sementit lameli daha oluştururlar; bu mekanizma, perlit taneleri meydana gelinceye kadar devam eder. Görüldüğü gibi perlit önce sementit çekirdeklenmesi ile başlamaktadır; oysa beynitte durum tamamen tersidir. Beynite dönüşüm önce karbonu atan ostenitin ferrit halinde çekirdeklenmesi ile başlar.

Ostenitin beynite dönüşümünün sona erdiği sıcaklıktan daha aşağı bir sıcaklığa kadar aşırı bir soğutma yapıldığında, ostenit başka bir tarzda dönüşür. Bu dönüşüm difüzyonsuz ve pratik olarak da zamana bağlı değildir; yeni fazın kristal kafesi eskisinden farklıdır fakat bileşimi aynıdır.

Ostenit içinde karbonun çözülme miktarı ferritten çok fazladır. Ostenit soğutulurken, ostenitin beynite dönüşümünün sona erdiği sıcaklığa geldiğinde, kübik yüzey merkezli kafes halinden hacim merkezli kübik kafesi olan ferrite dönüşür. Ostenit içinde çözeltili halde bulunan karbon atomları yayınıp ayrışamadıklarından ferrit kafesi içinde sıkışıp kalırlar ve sonuçta distorsiyona uğramış kristal kafese sahip, karbona aşırı doymuş ferrit elde edilir ve bu yapıya

da martenzit adı verilir. Martenzit çok sert ve kırılğan bir yapıya sahiptir; sertliği, çeliğin iğerdiği karbon miktarına bağlıdır (Tülbentçi, 1998).

Kaynak esnasında oluşabilecek bir diğer yapı da çeliklerin bir kırılğan yapısı olarak ortaya çıkan Widmanstätten yapısıdır. Bunu etkileyen faktörler; çeliğin kimyasal bileşimi, γ fazında fazla ısıtma sıcaklığı ve bu fazdan itibaren soğuma hızıdır. Bu fazın oluşma alanı sınırlıdır (% 0,2-0,4 C).

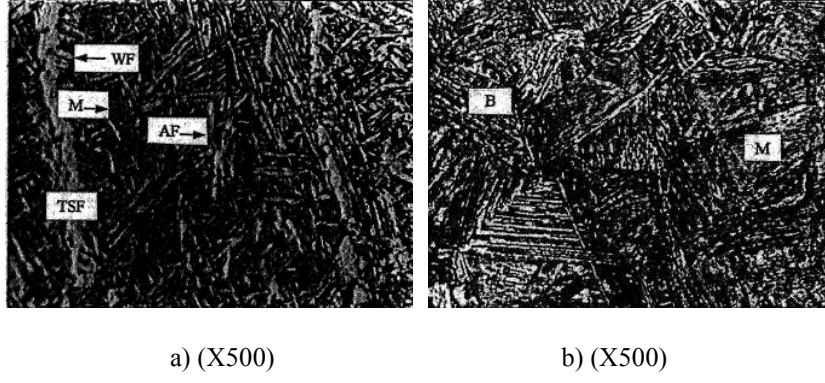
Kaynaklı birleşmelerde Widmanstätten dokusu ergimiş metalde, fazla ısıtılmış ana metalde ve bazen de oksijenle kesilmiş büyük kütlede parçalarda teşekkül edebilir. Bu dokunun belirmesi kimyasal bileşimin dışında, kaynak işleminin zorunlu kıldığı ısı devre ile ilgilidir. Bu ısı devre dahi kaynak yöntemine, parçaların ölçü ve şekillerine bağlıdır. Ayrıca manganez, krom, molibden gibi özel elementler Widmanstätten dokusunun teşekkülüne yardımcı olmaktadır (Oğuz, 1985).

Görüldüğü üzere kaynak işlemi esnasında uygulanan ısı neticesinde kaynak bölgesinde çeşitli dönüşümler meydana gelmekte ve bunun sonucunda da değişik iç yapılar oluşmaktadır.

Eroğlu ve Aksoy (1999), 15Mo3 çeliğinin kaynağında enerji girişinin ısıdan etkilenen bölge (ITAB) ve kaynak metalinin mikroyapısı ile mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Bunun için 10 mm kalınlığındaki kaynak numunelerine elektrik ark kaynağı ile üç farklı enerji girişinde (0,5 kJ/mm, 1 kJ/mm ve 2 kJ/mm) dikişler çekerek; kaynak bölgesinden çıkartılan numuneler üzerinde ITAB ve kaynak metalinde mikroyapı incelemeleri gerçekleştirmişlerdir. Deney sonucunda enerji girişindeki artışla beraber, kaynak metali ve ITAB'ın mikroyapısında fazların cinsi ve miktarı açısından değişmenin olduğunu gözlemişlerdir.

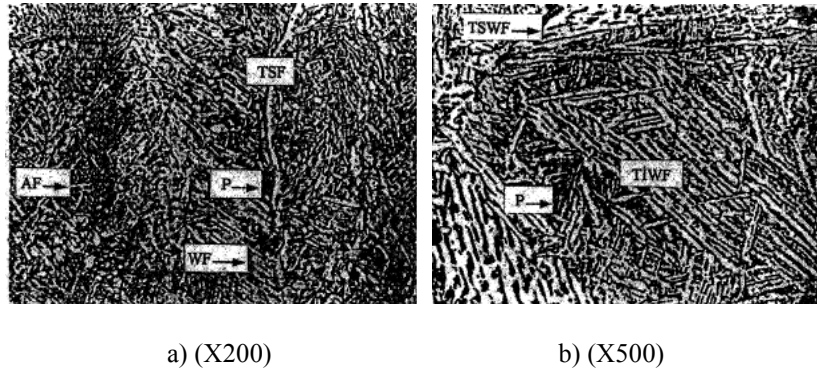
Sonuçları şu şekilde özetlemişlerdir:

- 0,5 kJ/mm enerji girişinde kaynak metali mikroyapısının; tane sınırı ferrit (TSF), çok az Widmanstätten ferrit (WF), asiküler (iğnesel) ferrit (AF) ve martenzit (M) fazlarından oluşmaktadır. Düşük enerji girişinin sebep olduğu yüksek soğuma oranı hızlı katılaşmaya sebep olmakta, bu yüzden de mikroyapıda martenzit gibi sert fazlar oluşmaktadır. 0,5 kJ/mm enerji girişinde ITAB'ın tane irileşen kısmı martenzit ve beynit fazlarından oluşmaktadır.



Şekil 4.3.4 0,5 kJ/mm enerji girişi için a) kaynak metalinde ve b) ITAB'ın tane irileşen kısmında oluşan mikro yapılar (Eroğlu ve Aksoy, 1999)

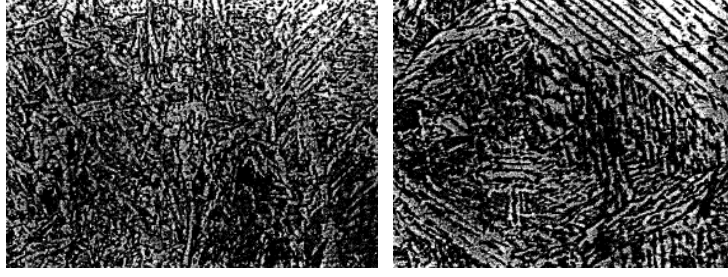
- 1 kJ/mm enerji girişinde kaynak metali mikroyapısı; tane sınırı ferrit, Widmanstätten ferrit, asiküler ferrit ve perlitten teşekkül etmektedir. Enerji girişindeki artışla beraber meydana gelen yavaş soğuma ve katılaşma, mikroyapıda martenzit fazının oluşumuna engel olarak daha yumuşak fazların oluşumunu desteklemektedir. 1 kJ/mm enerji girişinde ITAB'ın tane irileşen kısmında mikroyapı; tane içi ve tane sınırı Widmanstätten ferrit ve perlit karışımından teşekkül etmektedir. 1 kJ/mm enerji girişindeki soğuma süresinin 0,5 kJ/mm enerji girişindeki soğuma süresine göre daha uzun olması, mikroyapıda ferrit ve perlit oluşumunu artırırken, martenzit oluşumunu engellemektedir. Ancak, 1 kJ/mm enerji girişinde kısmen de olsa meydana gelebilen hızlı soğuma ferritik yapının Widmanstätten ferrit şeklinde oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.3.5 1 kJ/mm enerji girişi için a) kaynak metalinde ve b) ITAB'ın tane irileşen kısmında oluşan mikro yapılar (Eroğlu ve Aksoy, 1999)

- 2 kJ/mm enerji girişinde kaynak metalinde ve ITAB'ın tane irileşen bölgesinde oluşan mikroyapılar 1 kJ/mm enerji girişindeki oluşan mikroyapılar ile benzerlik göstermektedir. Ancak, yüksek enerji girişinin sebep olduğu yavaş katılaşma ve yavaş

soğuma, kaynak metalinde asiküler ferritin azalmasına neden olmuştur. Ayrıca, hem kaynak metalinde hem de ITAB'da oluşan yapılar kabalaşmıştır.



a) (X200)

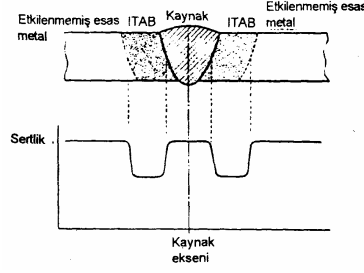
b) (X500)

Şekil 4.3.6 2 kJ/mm enerji girişi için a) kaynak metalinde ve b) ITAB'ın tane irileşen kısmında oluşan mikro yapılar (Eroğlu ve Aksoy, 1999)

4.3.1 Isı Girdisi-Sertlik İlişkisi

Kaynak işlemi için tüketilen ısının değişimi, mikroyapıyı ve dolayısı ile mekanik özellikleri de değiştirmektedir. Kaynak sırasında uygulanan ısı girdisi sonucu oluşan ısıtma ve soğuma çevrimi, özellikle bağlantının kritik bölgesi olan ITAB'da malzeme tipine göre sertlik değişimlerine yol açmaktadır. Soğuk şekillendirilmiş malzemelerde ve çökelme yoluyla sertleştirilmiş alaşımlarda yumuşama, çeliklerde ise sertleşme şeklinde ortaya çıkan bu durum, kaynaklı bağlantının kabul edilebilirliği açısından önemlidir.

Soğuk şekil verilmiş metaller oda sıcaklığında maruz kaldıkları deformasyon sonucu çekme dayanımlarında ve sertliklerinde artma olmuş metallerdir. Kaynaklı imalatta kullanılan soğuk şekil değiştirmiş malzemelere ait tipik örnekler şunlardır: Alüminyum ve manganez ve magnezyum içeren alüminyum alaşımları ve buzdolabı gibi ev eşyalarının imalatında kullanılan 0,7 mm veya 0,9 mm kalınlığa sahip çelik saclar. Sacın sertliğindeki artma (pekleşme) metalin kalınlığını azaltmak için kullanılan haddeleme işleminden kaynaklanmaktadır. Soğuk şekil vermenin etkileri -metal bileşimine bağlı olarak- metal bir kritik sıcaklığa kadar ısıtılacak olursa ortadan kalkar ve yumuşama meydana gelir. Bu olay yeniden kristalleşme olarak bilinir. Kaynak sırasında bu sıcaklığa kadar yükselmiş metal yeniden kristalleşir ve sonuçta ITAB, etkilenmemiş esas metalden daha düşük çekme dayanımına sahip yumuşamış metal içerir. Bu şekilde kaybedilmiş özellikler yeniden kazanılamaz.



Şekil 4.3.1.1 Soğuk şekillendirilmiş malzemenin kaynağındaki sertlik değişimi (Gourd, 1996)

Çökeltme yoluyla sertleştirilmiş metaller, mukavemetlerini genellikle "yaşlanma sertleşmesi" adı verilen kontrollü bir ısıtma işleminden sonra kazanırlar. Çökeltme işlemiyle sertleşebilen metallere örnek olarak alüminyum alaşımları, bazı tip paslanmaz çelikler ve nikel alaşımları verilebilir. Isıtma işlemi sacı veya profili alaşımın bileşimine bağlı yüksek bir sıcaklığa ısıtmak ve daha sonra hızla soğutmaktan ibarettir. Parça bundan sonra aradaki bir sıcaklığa yeniden ısıtılır ve burada zaman geçtikçe çökeltmeler oluşup metalin sertliği artmaya başlar. Bir süre sonra çökeltmelerin boyutları kritik bir değere ve metalin sertliği bir maksimum değere ulaşır. Bu andan sonra metal hızla soğutulur. Bir kaynak bağlantısının ITAB'ında ortaya çıkan ısıtma çevrimleri malzemeyi ısıtma işlemi sıcaklığındaki optimum zamandan daha uzun zaman ısıtma işlemine maruz bırakarak metali yumuşatan ve sonuçta da mukavemet kaybına yol açan, aşırı yaşlanmaya neden olur. Soğuk şekil verilmiş metallerdeki ITAB yumuşamasının aksine, çökeltme yoluyla sertleştirilmiş alaşımlarda tamamlanmış kaynağa ısıtma işlemi uygulayarak özellikleri yeniden iyileştirmek mümkündür. Özel bir alaşımı bu açıdan belirtmekte yarar vardır. % 4,5 çinko ve % 1 magnezyum içeren alüminyum alaşımları (7020) kaynaktan sonra herhangi bir ısıtma işlemi gerek kalmaksızın sertliklerini yeniden kazanırlar. Bunlar oda sıcaklığında bırakılacak olursa sertlikleri 14 günlük bir zaman aralığı içinde artar. Bu davranış doğal yaşlanma olarak bilinir (Gourd, 1996).

Çeliklerde üzerinde önemle durulması gereken faktör soğuma hızıdır. Soğuma hızına ve çeliğin kimyasal bileşimine bağlı olarak bir kaynak bağlantısının ITAB'ında ortaya çıkan sertlik değeri, bağlantının çatlama riskini doğrudan etkiler. Gerçekte, bir çeliğin kaynak bağlantısında ITAB'ın sert olması kendi başına bir sorun arz etmez. Ancak sertliğin kritik bir değer üzerinde olması (350 V), çekme gerilmelerinin mevcudiyeti ve kaynak banyosunda hidrojenin mevcut olması durumunda yüksek bir çatlama riski söz konusudur. ITAB'da karşılaşılan sertlik seviyeleri 450 V gibi yüksek değerlere ulaşabilir. Ulaşılan sertlik değerini ITAB'daki soğuma hızının belirlediğini ve soğuma hızına da etki eden en önemli faktörlerden

birinin kaynak için verilen ısı olduğu göz önüne alınırsa, ulaşılan sertlik değeri ile ısı girdisi arasında bir ilişki olduğu aşıkardır.

ITAB'da sertlik değerini kritik değerın altında tutmak için ihtiyaç duyulan soğuma oranı kaynak edilen çeliğın bileşimine bağılı olmaktadır. Karbon eşdeğeri sertleşebilirliğin belirleyicisi olarak kullanılmaktadır. Şayet $C_{eş}$ biliniyorsa, çatlama riskinden kaçınmak için gerekli soğuma oranı seçilmelidir. Karbon eşdeğeri 0,4'den küçük çelikler bir ön tedbir alınmadan kaynak edilebilmektedir (Eroğlu ve Aksoy, 1999).

Eroğlu ve Aksoy (1999), enerji girdisindeki değışimin sertlik üzerindeki etkilerini belirtmişlerdir. Burada kaynak metalinde en yüksek sertlik değeri 0.5 kJ/mm enerji girişinde elde edilmiştir. Kaynak metalinde en düşük enerji girişinde meydana gelen bu sertlik artışı, yüksek soğuma hızı sonucunda oluşan martenzit fazına bağlanmaktadır. 1 ve 2 kJ/mm enerji girişinde kaynak metalinde benzer yapıların oluşması, sertliğin yaklaşık aynı çıkmasına neden olmuştur.

Juan vd. (2003), 12 mm kalınlığında ve çekme dayanımı 1370 MPa olan HQ130 çeliğinin ITAB'ında enerji girdisindeki artış ile birlikte sertlik değeri azaldığını gözlemlemişlerdir.

Tablo 4.8 Enerji girişinin HQ130 çeliğinin ITAB sertliğine etkisi (Juan vd. 2003)

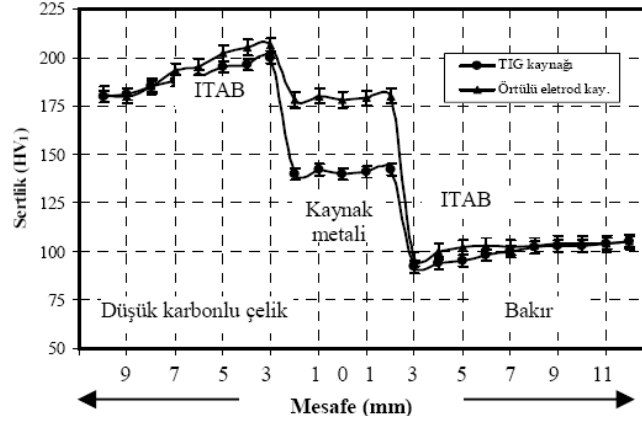
Enerji girdisi (kJ)	Soğuma Süresi $t_{8/5}$ (s)	Sertlik değeri (V)
9,2	5	372
13,1	10	365
18,6	20	318
26,4	40	255

Günümüz endüstrisinde kullanılan malzeme çeşitlerinin artması farklı özellikler gerektiren yerlerde farklı metal bağlantılarının gerekliliğı ve özellikle son yıllarda ekonomik faktörlerin giderek önem kazanması farklı özelliklere sahip malzemelerin birbirleriyle birleştirilmesi zorunluluğunu doğurmaktadır.

Kahraman vd. (2005), 4 mm kalınlığındaki düşük karbonlu çelik ile bakır levhaları örtülü elektrot ark ve TIG kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve kaynak bağlantılarının mekanik ve mikroyapı özelliklerini araştırmışlardır.

Araştırmada kullanılan kaynak parametreleri ve kaynak bölgelerinden elde edilen sertlik değerleri Şekil 4.3.1.2’de görülmektedir.

Kaynak yöntemi	Kaynak akımı Amper	Kaynak hızı cm/dk	Gaz basıncı (Argon) lt/dk	Alım tipi
Örtülü elektrod	120	10	-	DC (+)
TIG kaynağı	120	6	12	DC (-)



Şekil 4.3.1.2 Ölçülen sertlik bölgeleri ve değerleri (Kahraman vd. 2005)

Şekil incelendiğinde, örtülü elektrot ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak metalinden elde edilen sertlik değerlerinin TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Elektrik ark uygulamasında bronz bir elektrot kullanılmıştır (Elektrot bileşimi: %0,5 Mn, %0,15 P, %7 Sn, kalan Cu ve sertlik 95 HB).

Bilindiği üzere elektrot örtüsünün görevlerinden biri de gerektiği hallerde kaynak dikişini alaşımlandırmaktır. Bronz elektrotun örtüsünde var olan manganez ve fosfor elektrik ark kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak metallerini alaşımlandırmış ve kaynak metalinin sertliğinin yükselmesine neden olmuştur. TIG kaynağında ilave metal olarak kullanılan elektrot, örtüsünden arındırıldığı için bu etkisini gösterememiştir.

Kaynaklı numunelerin ısının tesiri altında kalan bölgelerinden ölçülen sertlik değerleri incelendiğinde, yine örtülü elektrot ile birleştirilmiş numunelerin daha sert olduğu dikkat çekmektedir. Bunun sebebi, örtülü elektrot ark kaynağında kaynak hızına bağlı olarak kullanılan daha düşük ısı girdisi nedeniyle meydana gelen daha yüksek soğuma hızına bağlanmaktadır. Kaynak esnasında her iki kaynak yönteminde de bakır malzeme tarafında (ITAB) bir yumuşama meydana gelirken, düşük karbonlu çelik malzeme tarafında (ITAB) sertleşmenin meydana geldiği görülmüştür. Bakır tarafında meydana gelen yumuşama hadde

bakır mamulün kaynak esnasında yeniden kristalleşmesinden kaynaklanmakta olup, bu durum TIG kaynağında ısı girdisinin fazla oluşundan dolayı daha da belirgin olarak görülmektedir.

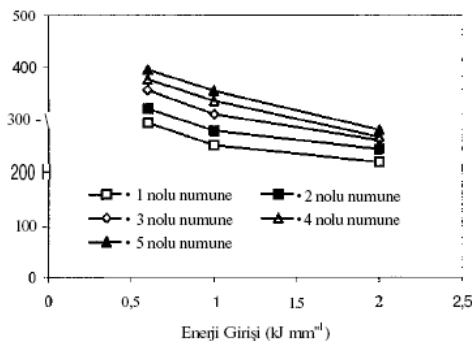
Kaynaklı numunelerin düşük karbonlu çelik tarafında ise yüksek sıcaklık sonucu meydana gelen iri taneli bölgenin devamında sertlikte giderek bir azalma tespit edilmiştir. ITAB’da iri taneli bölgedeki bu sertlik artışı yüksek sıcaklık ile oluşan iri taneli ostenit yapının soğumayla birlikte düşük sıcaklık dönüşüm ürünlerinin oluşumunu desteklemesi ile izah edilebilir olduğu bildirilmektedir. Numuneler üzerinde yapılan ölçümlerde ITAB’ın dışına çıkıldığında elde edilen sertlik değerlerinin orijinal malzemelerden ölçülen sertlik değerleri ile yaklaşık aynı olduğu görülmüştür.

Bölüm 4.2.5’te de değinildiği üzere çeliklerin içerdiği alaşım elementlerinin sertlik üzerine etkisi bulunmaktadır. Aslan ve Eroğlu (2001), molibden elementinin düşük karbonlu bir çeliğin kaynağında ITAB’ın mikroyapısı, sertliği ve tokluğu üzerindeki etkilerini 0,6 - 1 - 2 kJ/mm enerji girdilerinde araştırmışlardır. Tablo 4.9’da deneylerde kullanılan 12,5 mm kalınlığındaki çelik numunelerin bileşimi verilmiştir.

Tablo 4.9 Numunelerin kimyasal bileşimi (Aslan ve Eroğlu, 2001)

Numune numarası	Element						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	0.131	0.251	0.492	0.023	0.025	0.92	0.418
2	0.132	0.252	0.491	0.020	0.024	0.90	0.854
3	0.130	0.241	0.489	0.022	0.022	0.91	1.412
4	0.131	0.250	0.494	0.024	0.021	0.92	1.832
5	0.133	0.242	0.492	0.021	0.029	0.90	2.213

Elde ettikleri sertlik sonuçları da (HV) cinsinden aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.3.1.3 ITAB’ın tane irileşen kısmındaki sertlik değerleri (Aslan ve Eroğlu, 2001)

Şekilden de görüleceği gibi, en yüksek sertlikler 0,6 kJ/mm enerji girişinde elde edilmiştir. Bu enerji girişindeki sertlik artışı mikroyapıdaki sert fazların varlığına bağlanmaktadır. Yine, 0,6 kJ/mm enerji girişi için 5 no’lu numunede rastlanan en yüksek sertlik ise, mikroyapıdaki martenzit fazının miktarındaki yüksekliğe bağlanmıştır.

Enerji girişinin 0,6 kJ/mm'den 1 kJ/mm'e yükselmesiyle beraber, sertlikte düşüş başlamıştır. Enerji girişindeki artışla beraber sertlikteki bu azalmalar direkt olarak mikroyapıda yumuşak fazların oluşumuyla ilişkilendirilmektedir. Enerji girişi 1 kJ/mm'den 2 kJ/mm'e çıkartıldığında; sertlikteki azalmalar devam etmiştir. Bu enerji girişinde sertlik düşüşünün devam etmesi, yine sünek fazların oluşumuna bağlanmaktadır.

4.3.2 Isı Girdisi-Tokluk İlişkisi

Bir malzemenin kırılmadan bir darbeye dayanması gerekliliği söz konusu olduğunda önem kazanan bir özellik de tokluktur. Tokluk, bir malzemenin birim hacmi başına düşen plastik şekil değiştirme enerjisi olarak tanımlanır ve malzemenin kırılıncaya kadar enerji depolama yeteneğini gösterir.

Kaynak işleminde ITAB'ın ve kaynak metalinin tokluğunu mikroyapıları belirlemektedir. Mikroyapıyı kontrol eden en önemli faktörler ise kaynak şartları ile ilgili işlem parametreleri, kaynakta kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri ve alaşım elementleridir.

Kayalı (1984), kaynak metali tokluğuna etki eden faktörleri şöyle sıralamıştır:

Malzeme Parametreleri: Kaynak metali bileşimini ve tokluğunu etkileyen malzeme parametreleri; kaynak yapılan metalin, kaynak telinin ve kaynak tozunun kimyasal bileşimleridir. Kaynak metali ve kaynak teli işlem sırasında eriyerek kaynak metaline karışır ve bileşimi etkiler. Kaynak tozu ise metal/metal oksit reaksiyonları ile veya bileşimindeki alaşım elementleri ile kaynak metalindeki alaşım elementlerini ve kimyasal yönden inklüzyonları kontrol eder.

İşlem Parametreleri: Gerilim, akım şiddeti, elektrot hareket hızı gibi parametrelerle belirlenen kaynak ısı girdisi üretimin verimliliğini sağlayan işlem parametreleridir. Bu parametrelere bağlı olarak belirlenen soğuma hızı da optimum kaynak metali mikroyapısının sağlanmasında kritik bir faktördür. Kaynak ark genişliği arttıkça atmosferden kaynak metaline geçen elementlerin miktarı ile cüruf metal ara yüzey alanı artar. Kaynaktaki ısı girdisi arttıkça kaynak banyosundaki kaynak teli ile kaynak yapılan metal karışımının miktarları değişir.

Soğuma Hızı: Kaynak metali sürekli soğuma durumunda katılaştığından, mikroyapı soğuma hızına bağlıdır. Soğuma hızına bağlı olarak kaynak metalindeki ostenit fazının katı halde faz dönüşüm ürünleri değişir. Genelde soğuma hızı arttıkça sertlik ve mukavemet artar.

Katılaşma Yapısı: Kaynak metalinin katılaşması sırasında oluşan özellikle kükürt segregasyonu ve büyük ostenit taneleri halinde yönlenmiş katılaşma genelde kaynak metali

tokluğunu olumsuz yönde etkiler. Kaynak metalinin katılma sırasındaki ostenit tane boyutu küçüldükçe kırılma tokluğu artar, sünek-gevrek geçiş sıcaklığı düşer.

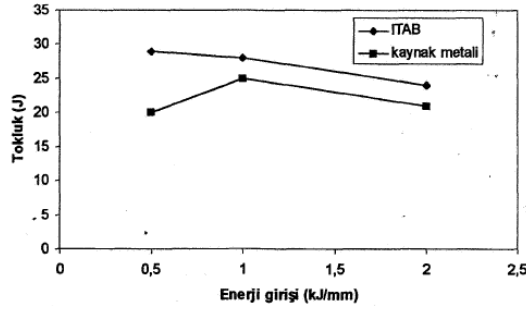
Alaşım Elementleri: Alaşım elementleri ostenitin faz dönüşüm kinetiğini etkileyerek mikroyapıyı değiştirirler.

Kayalı (1984), petrol boru hatlarında kullanılan az alaşımlı yüksek mukavemetli bir çeliğin tozaltı kaynağında kaynak metalinin mikroyapısı ve tokluğuna Mo, Ti ve Zr alaşım elementlerinin etkisini şu şekilde özetlemiştir:

Genelde kaynak metalinin tokluğu Mo ilavesi ile artmış, fakat Zr ilavesi ile azalmıştır. Az miktarlarda Ti ilavesi düşük sıcaklıklarda maksimum tokluğu sağlamış, fakat Ti ile Mo birlikte ilave edildiğinde maksimum tokluğun sağlandığı optimum Ti miktarı artan Mo miktarı ile azalmıştır.

Mo ilavesi ile tokluğa olumlu etkiler yapan iğnesel ferrit oranının mikroyapıda artmasına sebep olmuştur. Zr ilavesi ile mikroyapıda iğnesel ferrit oranının azalıp, beynit oranının artması sebebiyle tokluk azalmıştır. Ti'nin az miktarlarda ilavesi, mikroyapıda iğnesel ferrit oranını çoğaltıp düşük sıcaklıklarda tokluğu arttırmıştır.

Eroğlu ve Aksoy (1999), 15Mo3 çeliğinin kaynağında enerji girişinin ITAB ve kaynak metalinin tokluğu üzerindeki etkilerini de incelemiştir.



Şekil 4.3.2.1 Enerji girişine bağlı olarak ITAB ve kaynak metalindeki tokluk değerleri (Eroğlu ve Aksoy, 1999)

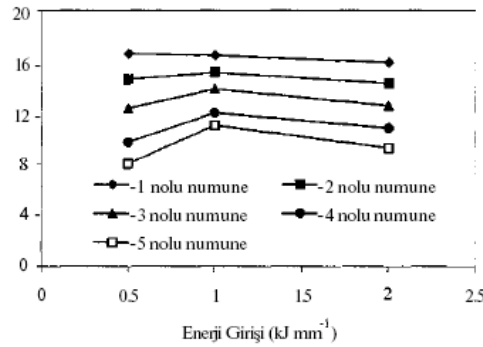
ITAB'da elde edilen tokluk değerlerine bakıldığında, en düşük tokluk değerinin 2 kJ/mm enerji girişinde ve en yüksek tokluğun 0,5 kJ/mm enerji girişinde elde edildiği görülmektedir. Ancak, 0,5 kJ/mm ile 1 kJ/mm enerji girişlerinde elde edilen toklukların biri birlerine çok yakın oldukları da görülmektedir. 0,5 kJ/mm enerji girişinde oluşan martenzitin düşük karbonlu olması tokluk açısından olumlu sonuç vermiştir. 1 kJ/mm enerji girişinde mikroyapıda sert fazların bulunmamasına rağmen, özellikle tane sınırı Widmanstätten ferritin

oluşumu tokluğu olumsuz yönde etkilemiştir. 2 kJ/mm enerji girişindeki tokluk düşüşü ise, irileşen Widmanstätten ferrit ve iri östenit tanesine bağlanmaktadır.

Kaynak metallерinde elde edilen tokluk değerlerine bakıldığında, en düşük tokluk 0,5 kJ/mm enerji girişinde görülürken, en yüksek tokluk 1 kJ/mm enerji girişinde elde edilmiştir. 0,5 kJ/mm enerji girişinde mikroyapıda bulunan martenzit fazı tokluk düşüşüne neden olurken, 1 kJ/mm enerji girişinde mikroyapıya asiküler ferrit fazının hakim olması tokluk artışına neden olmaktadır. 2 kJ/mm enerji girişinde ise, mikroyapıda bulunan asiküler ferritin azalması ve oluşan diğer fazların (tane sınırı ferrit ve Widmanstätten ferrit) kabalaşması tokluktaki düşüşün nedeni olarak düşünülmektedir.

Aslan ve Eroğlu (2001), molibden elementinin düşük karbonlu bir çeliğın kaynağında ITAB'ın tokluğu üzerindeki etkilerini 0,6 - 1 - 2 kJ/mm enerji girdilerinde araştırmışlardır. Tablo 4.9'da deneylerde kullanılan 12,5 mm kalınlığındaki çelik numunelerin bileşimi verilmiştir (Bölüm 4.3.1).

Elde edilen tokluk (J) değerleri aşağıda belirtilmiştir.



Şekil 4.3.2.2 Enerji girişine göre ITAB'ın tane irileşen kısmından elde edilen tokluk değerleri (Aslan ve Eroğlu, 2001)

Şekilden 4.3.2.2.'den de görüleceği gibi, 1 ve 2 no'lu numune hariç, diğer numunelerde en düşük tokluk değerleri 0,6 kJ/mm enerji girişinde görülmüştür. Düşük enerji girişindeki bu tokluk düşüşü, mikroyapıdaki sert fazların varlığına bağlanmaktadır. Ancak, 0,6 kJ/mm enerji girişinde 1 ve 2 no'lu numunenin tokluğu diğer numunelerin tokluğuna göre daha yüksek ve 5 no'lu numunenin tokluğu oldukça düşüktür. Bu durum ise, 5 no'lu numunede fazla miktarda martenzit fazının bulunmasıyla ilişkilendirilmektedir. Enerji girişindeki artışla beraber 1 ve 2 no'lu numunelerin tokluklarında fazla bir değişme olmazken, 3, 4 ve 5 no'lu numunelerin tokluk değerlerinde belirgin bir artış görülmüştür. Enerji girişindeki artışla beraber 3, 4 ve 5 no'lu numunelerde meydana gelen tokluk artışına mikroyapının martenzit ve beynitten daha

yumuşak fazlara doğru kayması neden olmaktadır. Enerji girişinin 2 kJ/mm'e çıkmasıyla bütün numunelerin tokluk değerleri düşüş göstermişlerdir. Bu enerji girişindeki tokluk düşüşleri mikroyapıdaki fazların kabalaşması ve ayrıca irileşmiş östenit tane boyutuna bağlanmaktadır.

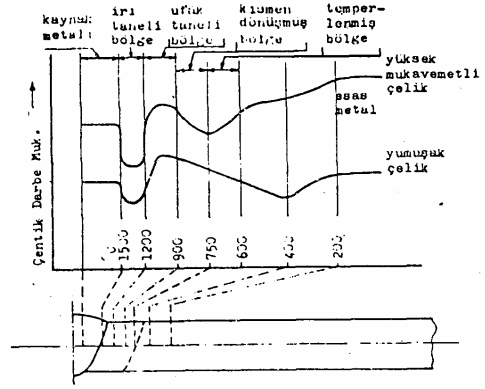
4.3.3 Isı Girdisi-Tane Büyüklüğü İlişkisi

Bölüm 4.1'de de belirtildiği üzere ITAB, farklı iç yapı ve özelliklere sahip iri taneli bölge, ince taneli bölge, kısmen dönüşmüş bölge ve değişime uğramamış bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgelerde tane büyüklüğü kaynak şartlarına bağlı olarak değişim göstermekte ve kaynaklı bağlantının mukavemetine etki etmektedir.

Kaynaklı bağlantılarda ortaya çıkan önemli bir hata türü, kaynaklı bağlantıda esas metale ait ITAB'da ortaya çıkan çatlaklardır. Çatlakların oluşumuna kimyasal bileşim, ısı işlem durumu, malzemenin tokluğu ve gerilme durumu gibi etkenler etki etmektedir. Malzemenin tokluğu ve bunun ifadesi olan çentik darbe mukavemeti yeterli derecede büyük olursa; çatlak oluşsa bile, yayılması için gerekli şartlar yeterli değilse bir yerde durabilir. Çelik malzemenin tok halden gevrek hale geçişi "geçiş sıcaklığı" adı verilen ortalama bir sıcaklık değeri ile belirtilmekte ve malzemenin gevrek kırılmaya karşı davranışı hakkında bir ölçü olarak ele alınmaktadır. Geçiş sıcaklıkları çentik darbe deneyleri ile belirtilmektedir. Çelik malzemenin geçiş sıcaklığına kimyasal bileşim, uygulanan mekanik ve ısı işlemler, tane büyüklüğü ve iç yapı gibi faktörler etki etmektedir.

Tane büyüklüğü birçok mekanik özellik üzerinde ölçülebilir bir etkiye sahiptir. Örneğin; oda sıcaklığında sertlik, akma, kopma, yorulma ve çentik darbe mukavemeti gibi özellikler tane büyüklüğünün azalmasıyla artarlar.

Çeliklerin üzerinde yapılan bazı çalışmalarda kaynaklı bağlantının ITAB'ında ortaya çıkan dikiş altı çatlakları, ısı işlem çatlakları ve düşük sıcaklık gevrek kırılmaları bu bölgenin kırılma tokluğuna atfedilmiştir. Şekil 4.3.3.1'de bir alın kaynağında ITAB'da kırılma tokluğu değişimi görülmektedir.

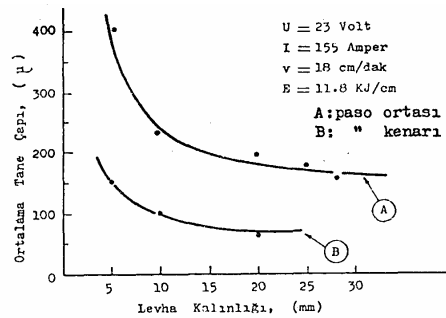


Şekil 4.3.3.1 Çeliklerin ITAB'ında kırılma tokluğu dağılımı (İnce, 1982)

Burada görüldüğü gibi, ITAB'ın kaynak metaline komşu iri taneli kısmında tokluk (ya da bunun ölçüsü olan çentik darbe mukavemeti) önemli miktarda düşmektedir. Kaynaktan sonra ITAB'da meydana gelen mikroyapı ve tane büyüklüğü, kaynak nedeniyle oluşan ısıl çevrim tarafından direkt olarak etkilenmektedir.

Kaynak ısıl çevriminin tane büyümesi üzerindeki etkisi, erişilen tepe sıcaklığı ve bu sıcaklık üzerinde kalma süresi ile ortaya çıkmaktadır. Çeliklerin ısıl işleminde işlem sıcaklığı ile belirlenen bu değer, kaynak işleminde yaklaşık olarak malzemenin erime sıcaklığıdır. Belirli bileşimde bir malzemede bu sıcaklık değişmemektedir. Tane büyümesinin başladığı bu sıcaklık, malzemenin kimyasal bileşimi ve mikroyapısına göre değişmektedir. Bu sıcaklığın üzerinde kalma süresi; kaynak enerji girdisi, levha kalınlığı, parçaların birleştirme şekli ve ağız formu gibi etkenlere bağlıdır. Bu etkenler kaynaklı bağlantının soğuma hızına önemli şekilde etki etmektedir (İnce, 1982).

İnce (1982), Ç1020 çeliğinden malzeme üzerinde $U=23$ V, $I=155$ A ve $V_k=18$ cm/dak'lık kaynak enerji girişi şartlarında tane dağılımı üzerinde levha kalınlığı, birleştirme biçimi, paso uzunluğu, ön tavlama sıcaklığı ve kaynak ağız biçimlerinin etkilerini ele almıştır.



Şekil 4.3.3.2 Levha kalınlığına göre ITAB'da maksimum tane çapı değişimi (İnce,1982)

Sonuçları da şu şekilde özetlemiştir:

Levha kalınlığının etkisi: Levha kalınlığındaki değişimin soğuma süresini değiştirmesiyle tane büyüklüğünde ortaya çıkan değişimi incelemek üzere yapılan incelemenin neticeleri Şekil 4.3.3.2'de görülmektedir. Görüldüğü gibi; pasonun ortası ve kenarındaki tane büyüklükleri arasında 100 μ civarında fark vardır ve ince levhalarda aşırı tane irileşmesi görülmektedir.

Birleştirme biçiminin etkisi: Küt alın, içi köşe, T ve istavroz birleştirme biçimleri üzerinde yapılan incelemede; alın birleştirmede en iri, istavrozda en ufak taneler bulunmuştur.

Paso uzunluğunun etkisi: Diğer şartlar sabit tutularak paso uzunluğunun 100 mm'den 300 mm'ye değiştirilmesiyle, tane çapı 115 μ 'dan 190 μ 'a çıkmaktadır.

Ön tavlama sıcaklığının etkisi: Ön tavlama sıcaklığının 100°C'ye çıkarılmasıyla tane çapı 240 μ 'dan 300 μ 'a yükselmektedir.

Kaynak ağzı biçimine göre değişim: U ve V kaynak ağzı biçimleri üzerinde yapılan çalışmalarda, U kaynak ağzında daha iri taneler elde edilmiştir.

Ayrıca yine aynı çalışmada, kaynaklı bağlantıların mukavemet davranışları üzerinde tane büyüklüğünün de önemli etkisinin olduğu ve tanelerin mümkün olduğu kadar ufaltılması gerektiğinin yanı sıra; tanelerin ufaltılması için bilhassa tane irileşmesinin meydana geldiği sıcaklık bölgesinde kalma sürelerinin azaltılmasının lazım geldiği belirtilmektedir. Bunun için de levha kalınlıkları inceldikçe, bağlantı yerinde birleşen levha sayısı azaldıkça, paso uzunluğu ve ön tavlama sıcaklığı arttıkça enerji girişinin azaltılmasının gerekliliği vurgulanmaktadır.

Literatürde ısı girdisiyle tane büyüklüğünün ilişkisine değinen başka kaynaklar da mevcuttur.

Kahraman vd. (2005), 4 mm kalınlığındaki düşük karbonlu çelik ile bakır levhaları örtülü elektrot ark ve TIG kaynak yöntemi ile birleştirip kaynak bağlantılarının mekanik ve mikro yapı özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında, TIG kaynak yönteminden elde edilen tane yapısının ısı girdisinin fazlalığı (kaynak hızı örtülü elektrot ile kaynağa göre düşük) sebebi ile örtülü elektrot kaynağı ile elde tane yapısından daha iri olduğu belirtmişlerdir.

Shome (2006), aşağıda bileşimi verilen 50 mm kalınlığındaki HSLA 100 çeliğinin ITAB'ındaki östenit tane büyüklüğünü gaz altı ve toz altı yöntemleri ile sırasıyla 10 kJ/cm ve 40 kJ/cm ısı girdileri ile araştırmıştır.

Tablo 4.10 HSLA 100 çeliğinin bileşimi (Shome, 2006)

C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Nb	N (ppm)
0.04	0.84	0.26	0.006	0.007	1.58	3.55	0.55	0.59	0.03	0.029	128

10 kJ/cm ısı girişinde ITAB'ın tane irileşen kısmının 0,5 mm genişliğinde iken, 40 kJ/cm ısı girişinde ITAB'ın tane irileşen kısmının 1,1 mm genişliğinde oluştuğunu gözlemlemiştir. 10 kJ/cm ısı girişinde tane büyüklüğü 80 µm ve tepe sıcaklığı 1450 °C'dir. 40 kJ/cm ısı girişinde tane büyüklüğü aynı tepe sıcaklığı için 130 µm ölçmüştür.

4.4 Isı Girdisi-Kalınlık İlişkisi

Günümüz endüstrisinde kullanılan çeşitli alaşımların cazip mekanik özelliklerinin büyük bir kısmı, elde edilmeleri esnasında uygulanan ısı işlemlerden ve kimyasal yapılarından kaynaklanmaktadır. Kaynak işleminin gerçekleştirilmesinde malzemelerin ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa kadar, bölgesel olarak hızla ısınması ve soğuması (ısı çevrim), bu şekilde elde edilmiş özelliklerin büyük bir kısmının kaynak bölgesinde kaybolmasının yanında, tane büyümesine ve bilhassa allotropik özelliğe sahip malzemelerde katı hal faz dönüşümlerine sebep olur. Bu iç yapıdaki dönüşümler de, malzemenin mekanik özelliklerini büyük ölçüde değiştirir (Kılık, 1984).

Önceki bölümlerde de değinildiği üzere, ITAB'da meydana gelen değişimler kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri üzerine önemli etkiler yapmaktadır. Özellikle çeliklerde ITAB'ın 900 °C üzerine tavlanan bölgesi bir nevi su verme işlemine tabi tutulmuş olmakta ve çeliğin bileşimine göre bu kısım çok yüksek bir sertliğe ulaşabilmektedir.

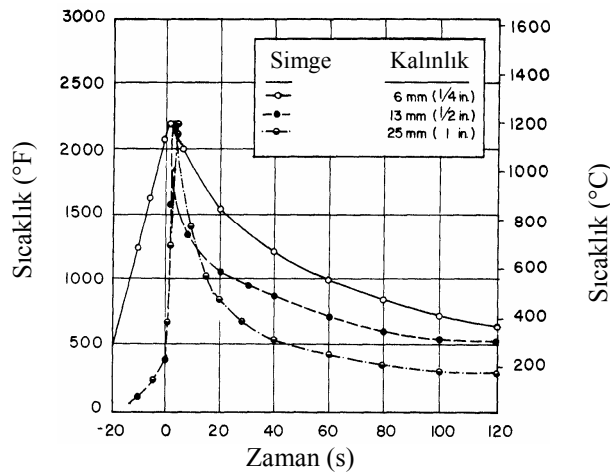
Bileşimindeki karbon miktarı takriben % 0,25 in üzerinde bulunan normal karbonlu yapı çelikleri ile hafif alaşımlı yüksek mukavemetli yapı çeliklerinin sertleşme kabiliyetleri, düşük karbonlu ve alaşımsız yumuşak çeliklere nazaran daha fazla olduğundan ITAB sertleşerek gevrekleşir ve soğuk çatlama hassasiyeti de artar (Cin, 1978).

Kalınlığın artması, kaynak için gereken ısıyı artırmasının yanında kaynak edilecek parçalara kaynak ağzı açılması ve çok pasolu bir kaynak uygulaması gerektirebilir. Ancak malzeme özellikleri, ısı girdisi ve bağlantı tipinin yanı sıra kalınlık, soğuma hızına etki eden bir diğer önemli faktördür.

4.4.1 Kalınlık-Soğuma Hızı İlişkisi

Parça kalınlığı, kaynak esnasında soğuma hızına tesir eder. Soğuk olarak veya hafif ön ısıtma tatbik edilerek kaynak edilen kalın bir malzeme, ince bir malzemeden daha hızlı soğur. Bu hızlı soğuma bir nevi su verme işlemidir. Bunun sonucu olarak, kalın malzemelerdeki ITAB ve kaynak metali, ince malzemelere nazaran daha serttir. Artan parça kalınlığı, normal olarak rijiditeyi arttırır ve geniş kaynak ağzı daha çok paso çekilmesini icap ettirir. Bu çok sayıda pasonun çekilmesi esnasında ortaya çıkan ısınma ve soğuma sayısına bağlı olarak çekme gerilmeleri artar.

Şekil 4.4.1.1'de kalınlığın ısıl çevrime etkileri görülmektedir.



Şekil 4.4.1.1 Kalınlığın ısıl çevrime etkileri (Welding Handbook, 1976)

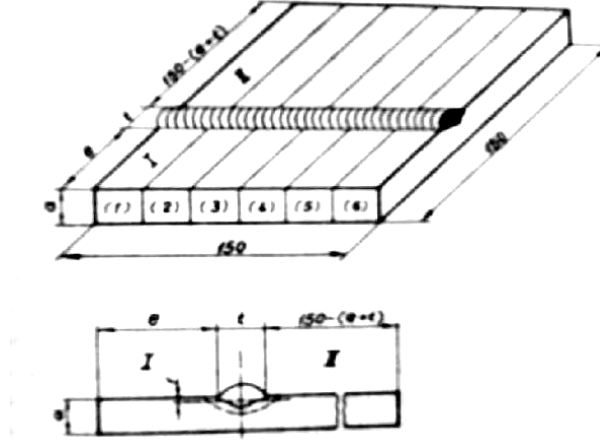
6-13-25 mm kalınlığındaki çelik malzemelere 1850 J/mm ısı girdisi uygulanmış ve ITAB'larındaki ısıl çevrim grafik halinde sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği üzere kalınlık arttıkça soğuma hızı artmaktadır ve ulaşılan tepe sıcaklığı azalma eğilimindedir.

Genelde kaynaklı bağlantı her biri ısı kaçışı için bir yol oluşturan iki veya daha fazla elemandan meydana gelmektedir. Örneğin, bir T bağlantısı bir düşey ve iki yatay doğrultuda olmak üzere üç ısı akış yoluna sahiptir ve bu nedenle iki ısı kaçış yoluna sahip bir alın kaynağına göre daha hızlı soğur. Bu durum kalınlığın yanı sıra bağlantı tipinin de soğuma hızına etki ettiğini göstermektedir. (Kou, 1987 ve Gour, 1996).

İnce (1982), kaynaklı bağlantıların mukavemet davranışları üzerinde tane büyüklüğünün önemli etkisinin olduğunu ve tanelerin mümkün olduğu kadar ufaltılması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca artan kalınlık ile beraber tanelerin küçüldüğünü vurgulamıştır (Şekil 4.3.3.2). Ancak kalınlığın artması kaynak bölgesi iç yapısında sert fazların oluşumuna davetiye çıkarmaktadır. Bu açıdan İnce (1982), tanelerin ufaltılması için kalınlığın

artırılmasını değil, bilhassa tane irileşmesinin meydana geldiği sıcaklıklar bölgesinde kalma sürelerinin azaltılmasının lazım geldiğini belirtmektedir. Bunun için de levha kalınlıkları inceldikçe, bağlantı yerinde birleşen levha sayısı azaldıkça, paso uzunluğu ve ön tavlama sıcaklığı arttıkça enerji girişinin azaltılmasının gerekliliği vurgulamaktadır.

Cin (1978), 8-16-24 mm kalınlıklarındaki %0,4-0,5 C içeren çelik numuneler üzerinde dikişler çekerek kalınlık-sertlik ilişkisini incelemiştir.



Şekil 4.4.1.2 Deney numunelerinin şematik gösterimi (Cin, 1978)

Çalışmada numune üzerine şekilde görüldüğü gibi hem parça kenar kısmına yakın bölgelere hem de parçanın orta kısmına dikişler çekilmiştir. Sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir:

- Kenar tarafına yakın bölgede (I) soğumanın, diğer taraftaki (II) soğumadan daha yavaş olduğu görülmüştür. Buna sebep, (I) bölgesinde bir ısı birikiminin meydana gelmesine karşılık, (II) bölgesinde ısının parça üzerinden iletim yoluyla uzaklaşmasıdır.
- Artan kalınlık ile beraber soğuma hızının artması, sertliğin artmasına sebep olmuştur. Bu durumu, dikişin kenara yakın bir bölgeye veya numunenin ortasına çekilmesi etkilememiştir.

5. ARK ESASLI YÖNTEMLERDE ISI TÜKETİMİ - MALZEME - KALINLIK İLİŞKİSİ İLE İLGİLİ TEORİK YAKLAŞIMLAR VE BU YAKLAŞIMLARIN ÖRNEKLENDİRİLMESİ

Günümüz kaynak uygulamalarında, ihtiyaç duyulan konstrüsiyona göre, kullanılan malzemeler ve kalınlıkları değişiklik göstermektedir. Yüksek yoğunluklu enerji girdisi sağlayan ark esaslı yöntemler ile hemen her kalınlıktaki demir esaslı veya demir dışı metal ve alaşımlarının kaynağı yapılabilmektedir.

Tablo 5.1 Malzeme-kalınlık açısından ark kaynak yöntemlerinin tercihi (Kou, 1987)

Malzeme	Kalınlık (mm)	Yöntem				
		Elektrik ark	MIG/MAG	TIG (WIG)	Plazma	Toz altı
Alaşımsız elik	<3		X	X		
	3-6	X	X	X		X
	6-19	X	X			X
	>19	X	X			X
Düşük alaşımlı elik	<3		X	X		
	3-6	X	X	X		X
	6-19	X	X			X
	>19	X	X			X
Paslanmaz elik	<3		X	X	X	
	3-6	X	X	X	X	X
	6-19	X	X		X	X
	>19	X	X			X
Dökme demir	3-6	X	X			
	6-19	X	X			X
	>19	X	X			X
Ni ve alaşımları	<3		X	X	X	
	3-6	X	X	X	X	X
	6-19	X	X		X	X
	>19	X	X			
Al ve alaşımları	<3		X	X	X	
	3-6		X	X		
	6-19		X	X		
	>19		X			

Tablo 5.1’de malzeme ve kalınlığa bağılı olarak hangi tip bir ark yönteminin seçilmesi gerektiği genel bir yaklaşım ile belirtilmektedir. Söz gelimi, Al ve alaşımlarının kaynağı için önerilen örtülü elektrotlar mevcuttur. Ancak esas metalin bileşimine ve ısıl işlem durumuna göre üreticisi tarafından önerilen bu elektrotlar, tehlikeli olmayan tamir işlerinde doyurucu sonuç verirler; üretimde gaz altı yöntemleri tercih edilmektedir (Kaluç, 2004).

Tablo 5.1’den de görülebileceği üzere benzer kalınlığa sahip aynı tip malzemeler farklı ark yöntemleri ile kaynak edilebilmektedirler. Bu noktada uygun yöntemin seçimini teknik açıdan malzeme tipi, bağlantı tipi, kalınlık, üretim ihtiyaçları, işçilik giderleri, sarf malzeme giderleri, tesis ve bakım giderleri gibi faktörler etkilemektedir (Gourd, 1996).

Kaynak işleminde metalürjik olayların kontrol edilebilmesi için ısı girdisi, malzeme ve kalınlık ile doğrudan ilişkili olan ITAB’daki tepe sıcaklığı derecesinin yanı sıra soğuma hızının da bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla çeşitli ampirik formüller ortaya atılmıştır.

Bu aşamadan itibaren ark esaslı yöntemlerde ısı tüketimi, malzeme ve kalınlık değişken olarak ele alınacak ve bu ampirik formüllerden yararlanılarak değerlendirmeler yapılacaktır.

5.1 Isı Tüketiminin Hesaplanması

Ark esaslı yöntemlerde kaynak pasosunun birim uzunluğu başına düşen ısı miktarı (birim dikiş enerjisi) şu şekilde verilmektedir:

$$q = \frac{\eta * 60 * U * I}{V_K} \quad (3.2)$$

q : Birim dikiş enerjisi (J/mm), U: Kaynak gerilimi (V), I : Kaynak akımı (A), V_K : Kaynak hızı (mm/dk), η : Verim katsayısı.

5.2 ITAB'da Tepe Sıcaklık Dağılımının Hesaplanması İle ITAB'ın Ve ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Bulunması

ITAB'da erişilen tepe sıcaklığına bağlı olarak çeşitli iç yapı ve özellik gösteren bölgeler oluşmaktadır. ITAB'da erişilen maksimum sıcaklık derecesi, kaynak dikişi eksenine olan uzaklığın fonksiyonu olarak bilinirse; soğuma hızının da bilinmesi ile birlikte kaynak işlemi sonucunda oluşabilecek iç yapı, esas metalin bileşimi ve özellikleri göz önünde tutularak bir dereceye kadar tahmin edilebilmektedir.

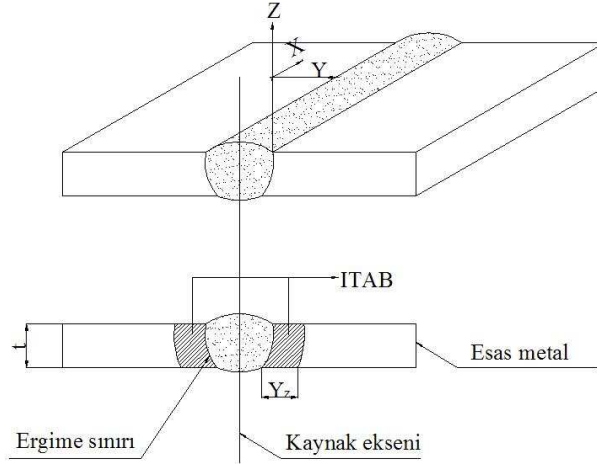
Pratik bir yaklaşım ile tepe sıcaklığı Denklem (4.1) ile verilmektedir:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (4.1)$$

T_p : Tepe sıcaklığı (°C), T_0 : Malzemenin ilk sıcaklığı (°C), T_m : Malzemenin ergime sıcaklığı (°C), q : Birim dikiş enerjisi (J/mm), ρ : Malzemenin yoğunluğu (g/mm^3), c_m : Malzemenin özgül ısınma ısısı (J/g.°C), t : malzeme kalınlığı (mm), Y : Ergime sınırından uzaklık (mm).

Denklem (4.1), elektrik ark kaynağı için geliştirilmiş olmasına rağmen diğer ark yöntemleri için de kullanılabilir. Ancak formül çok pratik olmasına karşın, bazı kısıtlamaları mevcuttur. Bunlardan en önemlisi; denklemin, ısı iletiminin parça yüzeyine paralel olduğu durumlar için türetilmiş olmasıdır. Bu durum, denklemin parça kalınlığından bağımsız olarak herhangi tek pasolu ve tam nüfuziyetli kaynak dikişleri için elverişli olmasını beraberinde getirmektedir. Ayrıca denkleminde, malzemenin ısı özelliklerinin sıcaklık ile değişmediği kabul edilmektedir. Yani sıcaklık arttıkça artan malzemenin özgül ısınma ısısı ve yine genellikle sıcaklıkla arttıkça azalan malzeme yoğunluğu sabit alınmaktadır (Welding Handbook, 1976).

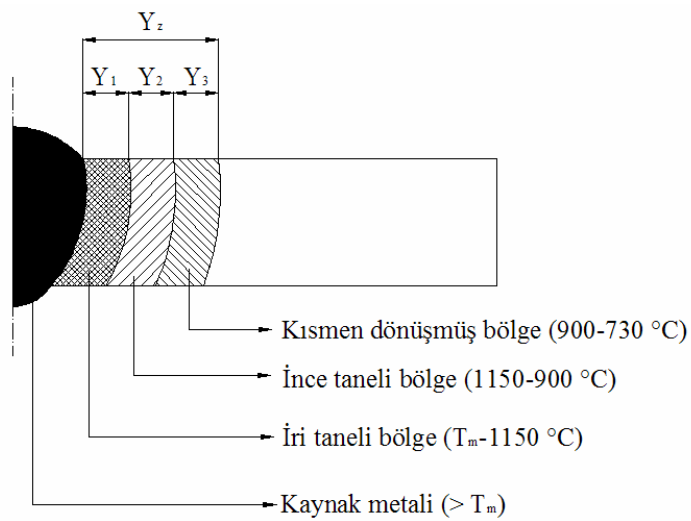
Denklem (4.1) yardımıyla ergime sınırından bir Y mesafesi kadar uzaklıktaki bir noktada ulaşılan tepe sıcaklık değerinin yanı sıra, teorik ITAB genişliği Y_z de hesaplanabilmektedir.



Şekil 5.2.1 Bir alın bağlantısında kaynak bölgesinin şematik gösterimi

ITAB genişliğinin doğru bir biçimde hesaplanabilmesi için, ITAB sınırlarının malzeme tipine göre bir metalürjik değişimin oluşmadığı en yüksek sıcaklık değeri ile veya diğer bir deyişle, “özel” bir tepe sıcaklık değeri ile net bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Sözgelimi, yalnız karbonlu veya düşük alaşımlı çelikler için dağlama sonucunda ITAB sınırları net bir şekilde görülebilmekte ve bu sınır kısmın sıcaklığı bir metalürjik değişimin oluşmadığı en yüksek sıcaklık olan yaklaşık $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye tekabül etmektedir. Bu tip malzemeler için, $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik sınır değeri, Denklem (4.1)'de tepe sıcaklığı (T_p) yerine yazılır ve Y değeri çekilirse; ITAB genişliği belirlenebilir (Welding Handbook, 1976).

Denklem (4.1) yardımıyla ITAB'ın yanı sıra ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri de teorik olarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 5.2.2 ITAB'ı oluşturan bölgelerin şematik gösterimi

Kaynak metalinin (eriyen bölgenin) hemen altına tesadüf eden, kaynak esnasında malzemenin ergime sıcaklığı (çelikler için ~ 1450 °C) ilâ 1150°C arasında bir sıcaklığa ısıtılan ve tane büyümesinin görüldüğü bölge, iri taneli bölge şeklinde ifade edilmektedir. İnce taneli bölge, sıcaklığın 1150 ilâ 900°C arasında olduğu, iç yapı bakımından iri taneli bölgeye benzeyen ve onun devamı olan fakat daha ince tanelerden oluşan bir bölgedir. Kısmen dönüşmüş bölge ise, ince taneli bölgenin devamı olup, kaynak sırasında 900 ilâ 730 °C arasındaki bir sıcaklıkla karşılaşan bölgedir. 730 °C'nin altına kadar ısıtılan bölge genel olarak bir iç yapı değişmesine maruz kalmamaktadır (Cin, 1978 ve Tülbentçi 1998).

Bu bilgilerden hareketle, Denklem (4.1)'de tepe sıcaklığı (T_p) yerine yukarıda verilen sınır sıcaklık değerleri yazılır ve Y değerleri çekilirse; ITAB'ı oluşturan bölgelerin sınırları belirlenebilir.

5.3 Çeliklerde Kimyasal Bileşim-Soğuma Hızı İlişkisi

Çeliğin ark kaynağında sıcaklık değişimleri genellikle çok çabuk oluşur ve bu kadar hızda artık normal denge şartları gerçekleşmez. Bu sebepten ötürü de çabuk soğumanın ITAB'a etkisini etüt etmek önemlidir. Eğer hesap yoluyla ITAB'ın çeşitli noktalar için zamanın fonksiyonu olarak sıcaklık değişimi belirtilebilir ve ayrıca çeşitli östenitleşme sıcaklıklarında sürekli soğuma diyagramı bilinirse, meydana gelecek yapılar büyük bir olasılıkla tahmin edilebilir.

Erime bölgesinin çabuk soğutulması halinde, östenit daha yüksek sıcaklık aralığında martenzite dönüşür. Birçok yapı çeliklerinin kaynağında, çok daha az karbon ihtiva eden kaynak metali kullanıldığından, normal yapı çeliklerindeki erime bölgesinde martenzit tehlikesi o kadar büyük değildir.

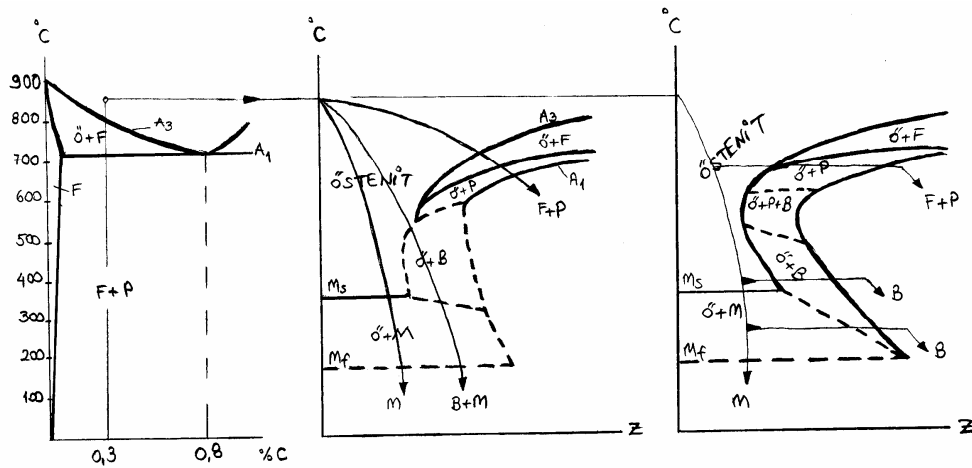
Kaynak esnasında iri taneli bölge tamamen östenitleşmiştir. Bu bölgedeki soğuma hızı, kritik soğuma hızını geçerse tamamen martenzitik bir iç yapı meydana gelir. Bazı çeliklerde daha yavaş soğuma halinde beynitik yapı meydana gelebilir. Çok defa iri taneli bölgede yalnız kaynak çizgisi boyunca martenzitik yapıya rastlanmaktadır. Bunun sebebi, östenitleşme sıcaklığının en yüksek ve östenit tanelerinin büyük olmasıdır. Bu iki unsurun da kritik soğuma hızını düşürme etkisi vardır. Bu da, martenzitin meydana gelme olasılığını artırmaktadır.

ITAB'daki sertleşme tehlikesi büyük çapta çeliğin bileşimine ve soğuma hızına bağlıdır. Kaynak ısıl çevrimi nedeniyle ısınma sırasında, ITAB östenit hale geçer ve soğuma esnasında da bir takım dönüşümlere maruz kalır. Kaynak dikişinin kenarında, soğuma hızı öyle bir

değerdedir ki, östenit, ferrit ve perlite dönüşecek vakit bulamaz, bunun yerine çok daha sert ve sünekliği çok daha az olan martenzit veya temperlenmiş martenzit meydana gelir. Böyle sert bir bölgenin meydana gelmesi, sertleşme kabiliyetini artıran karbon ve alaşım elemanlarının miktarına bağlıdır. Alaşım elemanlarının miktarı arttıkça martenzit oluşma ihtimali de artar. Karbon miktarının yükselmesi, meydana gelen martenzitin sertliğinin yükselmesine ve sünekliğinin azalmasına sebep olur (Çavuşoğlu, 1997).

Hafif alaşımlı ve yüksek mukavemetli çeliklerde, karbon ve manganezden başka diğer alaşım elemanlarının da, bu sertleşme ve çatlak teşekkülü üzerine tesirleri vardır. Bu alaşım elemanları belirli bir nispet dahilinde, bileşimdeki karbon miktarına ilave edilerek, neticede karbonun etkisi gibi mütalaa edilir. Elde edilen bu yeni değere “Karbon Eşdeğeri” denilmektedir (Bölüm 4.2.5).

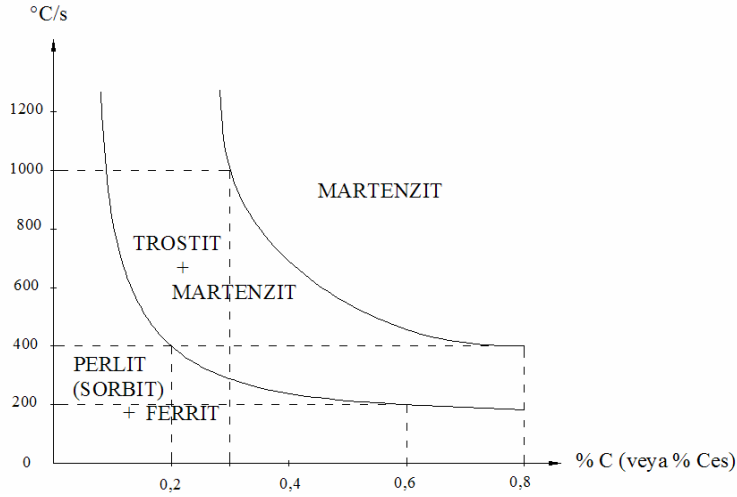
Şekil 5.3.1’de 0,3 C’lu bir çelikte Fe-Fe₃C diyagramı karşısında sürekli soğuma ve kademeli soğuma sonucunda elde edilecek iç yapıların değişimi verilmiştir.



Şekil 5.3.1 0,3 C’lu bir çelikte Fe-Fe₃C diyagramı ile sürekli soğuma ve kademeli soğuma diyagramları (Gültekin, 2006)

Görüldüğü üzere soğuma hızının değişmesi ile birlikte elde edilecek iç yapılar da değişmektedir. Bu bakımdan, arzu edilen iç yapıya göre, soğuma hızının belirlenerek kontrol altında tutulması gerekmektedir.

Genel bir yaklaşımla soğuma hızı ile malzeme bileşimine göre ITAB’da (özellikle iri taneli bölgede) elde edilecek iç yapılar Şekil 5.3.2’de verilmektedir.



Şekil 5.3.2 Soğuma hızı – malzeme bileşimi ilişkisi (Gültekin, 2006)

Sorbit ve trostit yapı, ince veya çok ince taneli perlitik yapı olarak isimlendirilmektedir. Perlit oluşum kademesinde soğuma hızının artması yayınma süresini sınırlamakta, yani atomların gidecekleri yol kısalmaktadır. Böylece lamel genişliği azalarak, ince veya çok ince lamelli perlitik bir iç yapı ortaya çıkmaktadır. Lameller arasındaki uzaklık ne kadar küçük ise, iç yapıda karbonun dağılımı o kadar homojen olmakta ve bu nedenle de sertlik değerleri artmaktadır. Perlit, sorbit ve trostit yapılar için sertlik değerleri sırasıyla 180 HV, 250 HV ve 400 HV olarak verilmektedir (Gültekin, 2006).

Soğuma hızının belirlenmesinde en çok kullanılan yöntem, ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta kaynak eksenindeki soğuma hızının belirlenmesidir. Literatürde “kritik sıcaklık (T_c)” olarak isimlendirilen ve bu tezde de aynı şekilde adlandırılan bu sıcaklık değeri için değişik yaklaşımlar mevcuttur. Ancak bu tezde, kritik sıcaklık (T_c) değeri olarak çelikler için dönüşümlerin başladığı sıcaklık olan 830 °C alınmıştır.

5.4 Kalınlık Faktörü Ve Soğuma Hızının Hesaplanması

Aşağıdaki soğuma hızı denklemleri ile kaynak eksenindeki soğuma hızı hesaplanabilmektedir. Soğuma hızları, kalın ve ince parçalar için ayrı olarak verilmektedir.

Kalın parçalar için soğuma hızı;

$$R = \frac{2\pi k(T_c - T_0)^2}{q} \quad (4.2)$$

İnce parçalar için soğuma hızı;

$$R = 2\pi k \rho c_m \left(\frac{t}{q} \right)^2 (T_c - T_0)^3 \quad (4.3)$$

T_0 : Malzemenin ilk sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), T_c : Kritik sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), q : Birim dikiş enerjisi (J/mm),
 ρ : Malzemenin yoğunluğu (g/mm^3), c_m : Malzemenin özgül ısınma ısısı (J/g. $^{\circ}\text{C}$), t : malzeme kalınlığı (mm), k : Malzemenin ısı iletim katsayısı (J/mm.s. $^{\circ}\text{C}$).

Kalın parçalar için önerilen Denklem (4.2), kaynak banyosundan ısı akışının üç boyutlu (iki yan ve bir düşey doğrultuda) olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Bu duruma örnek olarak levha üzerine kaynak (bead-on-plate) uygulamaları verilmektedir. İnce parçalar için önerilen Denklem (4.3) ise, kalınlıktan bağımsız olarak tam nüfuziyetli ve tek pasolu bütün kaynak uygulamalarında kullanılabilir (Welding Handbook, 1976).

Pratik uygulamalarda, parçaların kalın veya ince oluşu “kalınlık faktörü” ile belirtilmektedir.

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c_m (T_c - T_0)}{q}} \quad (4.4)$$

τ : Kalınlık faktörü, T_0 : Malzemenin ilk sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), T_c : Kritik sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), q : Birim dikiş enerjisi (J/mm), ρ : Malzemenin yoğunluğu (g/mm^3), c_m : Malzemenin özgül ısınma ısısı (J/g. $^{\circ}\text{C}$), t : malzeme kalınlığı (mm).

Burada (τ) değerinin, 0,75’in üzerinde olduğu durumlarda kalın parçalar için soğuma hızı denklemi; 0,75’in altında olduğu durumlarda ise ince parçalar için soğuma hızı denklemi uygulanmaktadır.

5.5 Örnek 1 : Üç mm Kalınlığındaki Fe 37 Çeliklerin Farklı Ark Yöntemleri İle Kaynağında Isı Tüketimlerinin, Tepe Sıcaklıklarının, Soğuma Hızlarının Karşılaştırılması Ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Üç mm kalınlığındaki Fe 37 çelik malzemeler, Örtülü Elektrot ve MAG yöntemleri ile tek pasoda alın alına kaynatılabilmektedir.

Bu tip bir uygulama için yöntemlere göre uygun kaynak parametreleri literatürden alınarak; teorik ısı tüketimi (Denklem 3.2), tepe sıcaklığı ve soğuma hızı (Denklem 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4) hesaplanmak suretiyle yöntemler karşılaştırılabilir.

Malzeme özellikleri ve kaynak işlemleri için yöntemlere göre uygun kaynak parametreleri sırasıyla Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.2 Fe 37 malzeme özellikleri (Tablo 4.1-4.2-4.3 ve T.&Manu. Eng. Handbook, 1976)

Malzeme	Ergime sıcaklığı (T _m) (°C)	Isı iletim katsayısı (k) (J/mm.s. °C)	Özgül ısınma ısısı (c _m) (J/g.°C)	Yoğunluk (ρ) (g/mm ³)	İlk sıcaklık (T ₀) (°C)	Kritik sıcaklık (T _c) (°C)
Fe 37 (t=3 mm)	1450	0,05	0,44	0,0078	20	830
Malzeme Bileşimi*						
%C	%Mn	%P	%S	%N	%Si	$C_{eş} = \left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right)$
0,15	0,3	0,04	0,05	0,007	0,40	0,2
*Literatürden alınmış ortalama değerlerdir.						

Tablo 5.3 Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG alın kaynağında yöntemlere göre uygun kaynak parametreleri

Yöntem	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (mm/dk)	Verim katsayısı
Örtülü Elektrot	115 ¹⁾	25 ¹⁾	400 ¹⁾	0,65 ³⁾
MAG	130 ²⁾	19 ²⁾	400 ²⁾	0,8 ³⁾
1)Eryürek, 2004 2)Tülbentçi, 1998 3)Tablo 3.2				

5.5.1 Yöntemlere Göre Isı Tüketimlerinin Hesabı

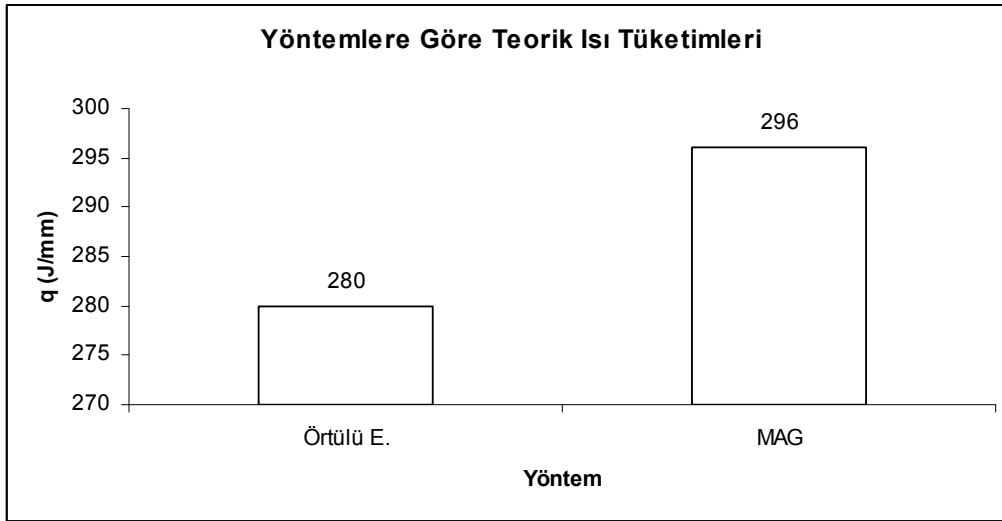
Tablo 5.3'teki veriler yardımıyla yöntemlere göre teorik ısı tüketimleri Denklem (3.2) ile hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.5.1.1'de gösterilmiştir.

Örtülü Elektrot ile kaynak yöntemi için birim dikiş başına tüketilen ısı miktarı;

$$q = \frac{\eta * U * I * 60}{V_k} = \frac{0,65 * 25 * 115 * 60}{400} = 280 \text{ J/mm}$$

MAG yöntemi için birim dikiş başına tüketilen ısı miktarı;

$$q = \frac{\eta * U * I * 60}{V_k} = \frac{0,8 * 19 * 130 * 60}{400} = 296 \text{ J/mm}$$



Şekil 5.5.1.1 Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG alın kaynağındaki teorik ısı tüketimleri

5.5.2 Yöntemlere Göre ITAB Genişliklerinin Hesabı

Tablo 5.2'deki veriler ve üstte elde edilen teorik ısı tüketim değerleri yardımıyla yöntemlere göre teorik ITAB genişlikleri belirlenebilir. Bunun için (4.1) denkleminde tepe sıcaklığı değeri (T_p) yerine yalın karbonlu ve düşük alaşımli çelikler için bir metalürjik değişimin oluşmadığı 730 °C yazılır ve Y değeri çekilirse, ITAB genişliği (Y_z) belirlenebilir.

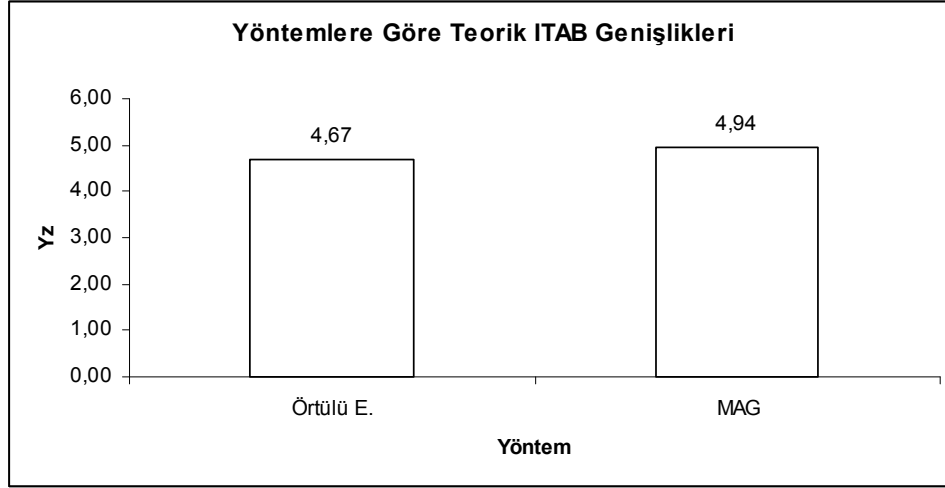
Tablo 5.2'deki veriler ve Şekil 5.5.1.1'de gösterilen teorik ısı tüketim değerleri kullanılarak yöntemlere göre teorik ITAB genişlikleri Denklem (4.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.5.2.1'de gösterilmiştir.

Örtülü Elektrotla kaynak için teorik ITAB genişliği;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 3 \cdot Y_z}{280} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y_z = 4,67 \text{ mm}$$

MAG yöntemi için teorik ITAB genişliği;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 3 \cdot Y_z}{296} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y_z = 4,94 \text{ mm}$$



Şekil 5.5.2.1 Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG yöntemleri ile alın kaynağındaki teorik ITAB genişlikleri

5.5.3 Yöntemlere Göre ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

Denklem (4.1) yardımıyla ITAB'ın yanı sıra ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri de teorik olarak hesaplanabilmektedir. Bunun için Denklem (4.1)'de, tepe sıcaklık değeri (T_p) yerine

İri taneli bölge : 1450 (Ergime sıcaklığı) – 1150 °C,

İnce taneli bölge : 1150 – 900 °C,

Kısmen dönüşmüş bölge : 900 – 730 °C sınır değerleri yazılarak Y değerleri çekilirse, adı geçen bölgelerin teorik genişlikleri bulunabilir.

Tablo 5.2'deki veriler, Şekil 5.5.1.1'de gösterilen teorik ısı tüketim değerleriyle yukarıda belirtilen sınır değerleri kullanılarak yöntemlere göre ITAB'ı oluşturan bölgelerin teorik genişlikleri Denklem (4.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar her yöntem için ayrı ayrı şekil üzerinde mm cinsinden gösterilmiştir.

5.5.3.1 Örtülü Elektrotla Kaynakta ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

Örtülü E. ile kaynak yöntemi için teorik iri taneli bölge (Y_1) genişliği;

$T_p = 1450$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1450 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 3 \cdot Y}{280} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 0 \text{ mm}$$

(Ergime sınırı)

$T_p = 1150$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1150 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 3 \cdot Y}{280} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 1,22 \text{ mm}$$

$Y_1 = 1,22 \text{ mm}$

Örtülü E. ile kaynak yöntemi için teorik ince taneli bölge (Y_2) genişliği;

$T_p = 1150$ °C için $Y = 1,22 \text{ mm}$ bulunmuştur.

$T_p = 900$ °C için;

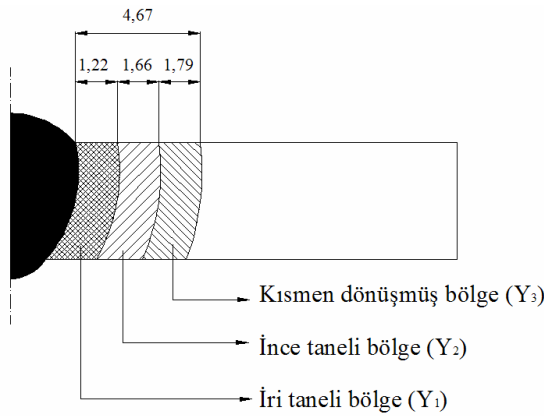
$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{900 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 3 \cdot Y}{280} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 2,88 \text{ mm}$$

$Y_2 = 2,88 - 1,22 = 1,66 \text{ mm}$

Örtülü E. ile kaynak yöntemi için teorik kısmen dönüştürmüş bölge (Y_3) genişliği;

$T_p = 900$ °C için $Y = 2,88 \text{ mm}$ ve $T_p = 730$ °C için $Y = 4,67 \text{ mm}$ bulunmuştur.

$Y_3 = 4,67 - 2,88 = 1,79 \text{ mm}$



Şekil 5.5.3.1.1 Örtülü E. ile kaynakta ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri

5.5.3.2 MAG Kaynağında ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

MAG kaynak yöntemi için teorik iri taneli bölge (Y_1) genişliği;

$T_p = 1450$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1450 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 3 \cdot Y}{296} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 0 \text{ mm}$$

(Ergime sınırı)

$T_p = 1150$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1150 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 3 \cdot Y}{296} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 1,29 \text{ mm}$$

$Y_1 = 1,29$ mm

MAG kaynak yöntemi için teorik ince taneli bölge (Y_2) genişliği;

$T_p = 1150$ °C için $Y = 1,29$ mm bulunmuştur.

$T_p = 900$ °C için;

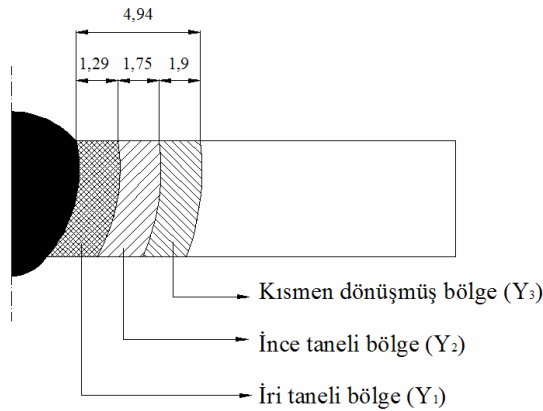
$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{900 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 3 \cdot Y}{296} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 3,04 \text{ mm}$$

$Y_2 = 3,04 - 1,29 = 1,75$ mm

MAG kaynak yöntemi için teorik kısmen dönüşmüş bölge (Y_3) genişliği;

$T_p = 900$ °C için $Y = 3,04$ mm ve $T_p = 730$ °C için $Y = 4,94$ mm bulunmuştur.

$Y_3 = 4,94 - 3,04 = 1,9$ mm



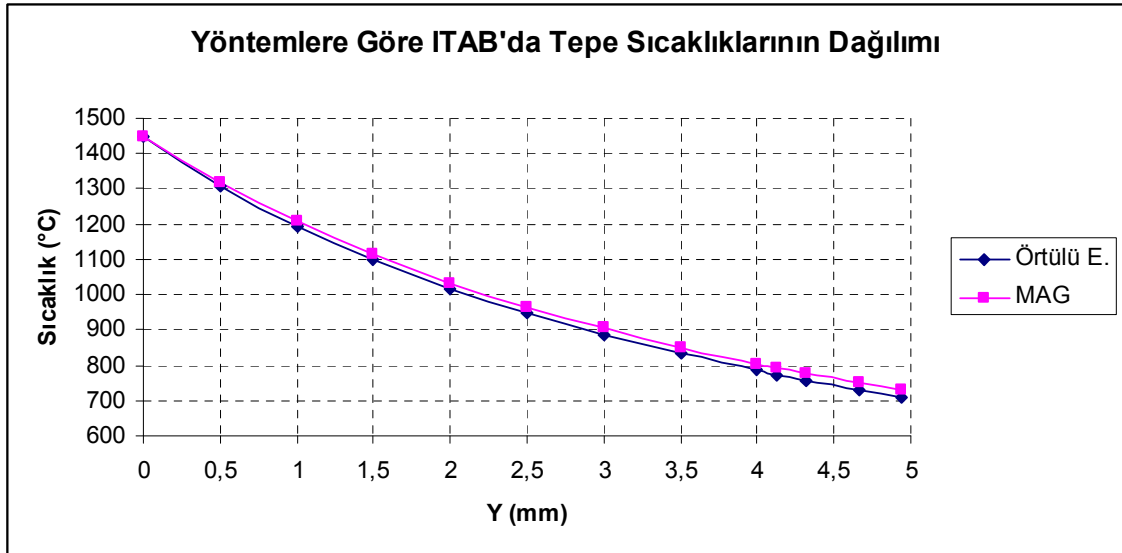
Şekil 5.5.3.2.1 MAG kaynağında ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri

5.5.4 Yöntemlere Göre ITAB'da Tepe Sıcaklıklarının Dağılımı

Denklem (4.1) yardımıyla ITAB'daki sıcaklık dağılımı da görülebilmektedir. Bunun için ergime sınırından ($Y=0$ mm), en büyük ITAB'ın elde edildiği MAG yöntemindeki $Y=4,94$ mm'ye kadar, Y değeri 0,5 mm artırırlarak elde edilmiş T_p değerleri Tablo 5.4'te gösterilmiştir. ITAB'lardaki sıcaklık dağılım eğrileri de Şekil 5.5.4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.4 Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG yöntemleri ile alın kaynağında ITAB'lardaki sıcaklık dağılımı (Hesaplanmıştır)

ITAB'da sıcaklık dağılımı (°C)													
Yöntem	Y (mm)												
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,13	4,32	4,67	4,94
Örtülü Elek.	1450	1310	1195	1099	1017	947	886	833	786	774	758	730	710
MAG	1450	1317	1207	1113	1034	965	905	852	805	794	778	750	730



Şekil 5.5.4.1 Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG yöntemleri ile alın kaynağında ITAB'lardaki sıcaklık dağılım eğrileri

5.5.5 Yöntemlere Göre Kalınlık Faktörlerinin Hesaplanması

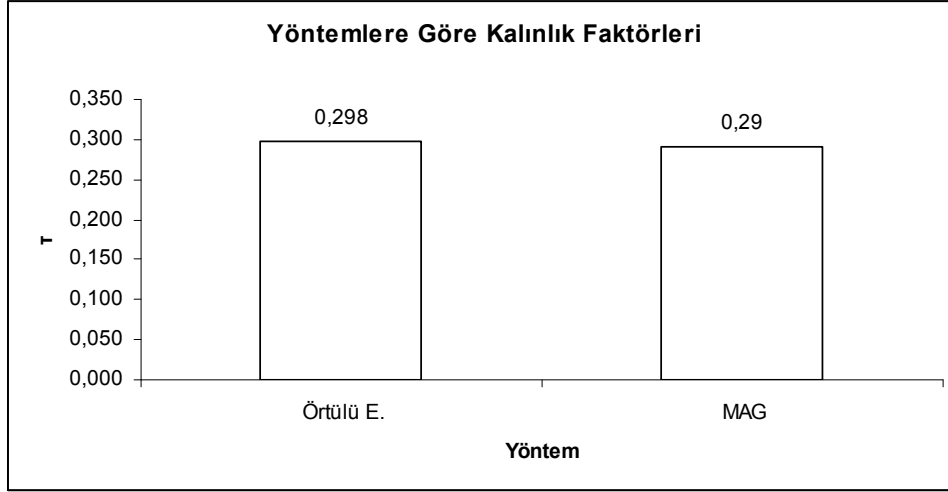
Soğuma hızının belirlenmesi için önce kalınlık faktörünün (τ) tespit edilmesi gerekmektedir. Kalınlık faktörlerinin tespiti için gereken veriler, Tablo 5.2'den ve Şekil 5.5.1.1'den alınmış olup; Denklem (4.4) yardımıyla yöntemlere göre kalınlık faktörleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.5.5.1'de verilmiştir.

Örtülü E. ile kaynak yöntemi için kalınlık faktörü;

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c_m (T_c - T_0)}{q}} = 3 \cdot \sqrt{\frac{0,0078 \cdot 0,44 (830 - 20)}{280}} = 0,298$$

MAG yöntemi için kalınlık faktörü;

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c_m (T_c - T_0)}{q}} = 3 \cdot \sqrt{\frac{0,0078 \cdot 0,44 (830 - 20)}{296}} = 0,29$$



Şekil 5.5.5.1 Yöntemlere göre kalınlık faktörleri

5.5.6 Yöntemlere Göre Kaynak Eksenlerindeki Soğuma Hızlarının Hesaplanması

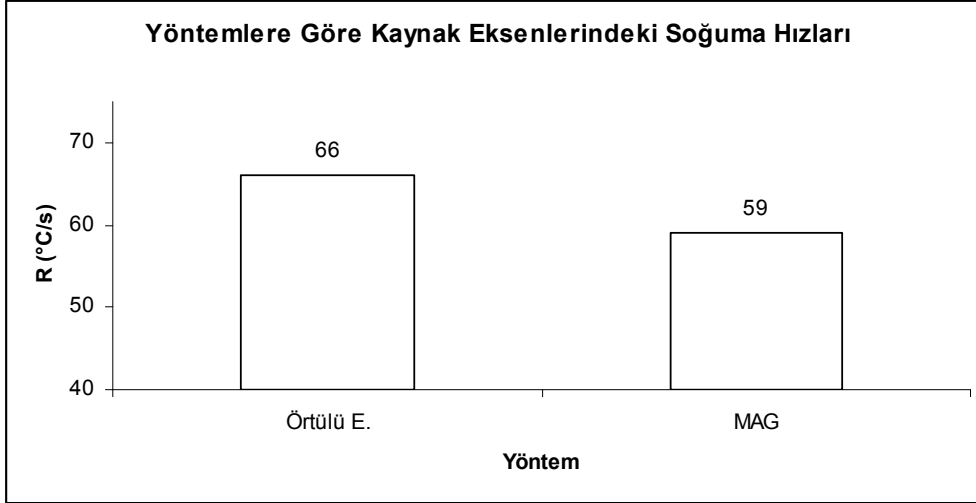
Bütün yöntemler için $\tau < 0,75$ olduğundan ince parçalar için önerilen soğuma hızı formülü (Denklem 4.3) uygulanacaktır. Denklem (4.3)'ten faydalanarak yöntemlere göre kaynak eksenindeki soğuma hızları hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.5.6.1'de verilmiştir.

Örtülü E. ile kaynak yöntemi için kaynak eksenindeki soğuma hızı;

$$R = 2\pi k \rho c_m \left(\frac{t}{q}\right)^2 (T_c - T_0)^3 = 2\pi \cdot 0,05 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot \left(\frac{3}{280}\right)^2 \cdot (830 - 20)^3 = 66 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

MAG yöntemi için kaynak eksenindeki soğuma hızı;

$$R = 2\pi k \rho c_m \left(\frac{t}{q}\right)^2 (T_c - T_0)^3 = 2\pi \cdot 0,05 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot \left(\frac{3}{296}\right)^2 \cdot (830 - 20)^3 = 59 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$



Şekil 5.5.6.1 Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin Örtülü E. ve MAG yöntemleri ile alın kaynağında kaynak eksenlerindeki soğuma hızları

5.5.7 Örnek 1 İçin Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu örnek için şu ana kadar hesaplama yoluyla elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'te özetlenmiştir.

Tablo 5.5 Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelerin alın kaynağında yöneme göre elde edilen sonuçlar

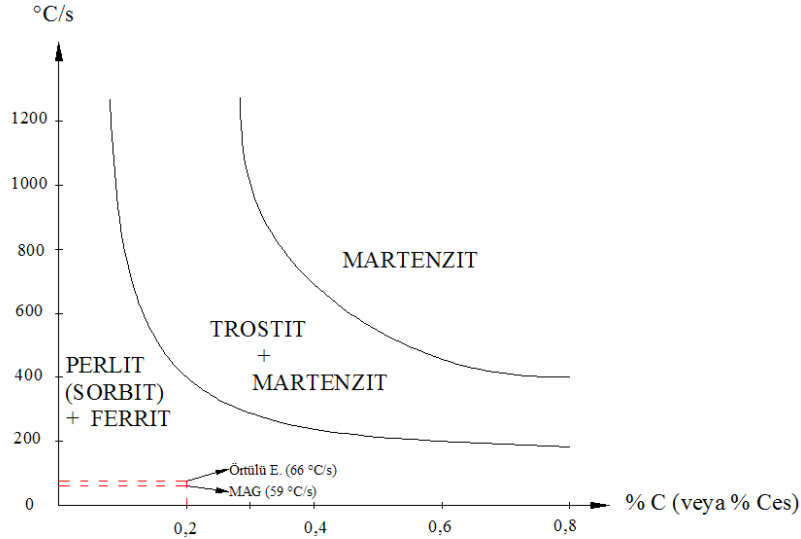
Yöntem	Isı girdisi (J/mm)	Y ₁ (İri taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₂ (İnce taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₃ (Kısmen d. bölge genişliği) (mm)	Y _Z (Teorik ITAB genişliği) (mm)	τ (Kalınlık faktörü)	R (Kaynak eksenindeki soğuma hızı) (°C/s)
Örtülü E.	280	1,22	1,66	1,79	4,67	0,298	66
MAG	296	1,29	1,75	1,9	4,94	0,29	59

Tablo 5.5'ten, aynı kalınlıktaki aynı tip malzemelerin aynı bağlantı tipi ile birleştirilmesinde her ark yönteminde farklı ısı tüketimleri, farklı ITAB genişlikleri ve farklı soğuma hızları elde edildiği görülmektedir.

Isı tüketimleri açısından bakıldığında, birim dikiş uzunluğu için en düşük ısı tüketiminin Örtülü E. ile kaynağa, en yüksek ısı tüketiminin ise MAG kaynağında olduğu görülmektedir. ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri ve dolayısı ile ITAB genişlikleri de artan ısı girdisiyle beraber artış göstermektedir. En düşük ısının tüketildiği Örtülü E. ile kaynağa ITAB ve ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri en küçük iken, en yüksek ısının tüketildiği MAG kaynağında ITAB ve ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliklerinin en büyük olduğu

Tablo 5.5'te belirtilmektedir. Bununla beraber soğuma hızının da artan ısı girdisiyle azaldığı sonuçlardan görülebilir. En yüksek ısı girişinin sağlandığı MAG kaynağında soğuma hızı 59 °C/s iken, en düşük ısı girişinin sağlandığı Örtülü E. ile kaynakta ise soğuma hızı yaklaşık 66 °C/s'dir.

Şekil 5.5.7.1'de, bu örnek için soğuma hızlarına göre ITAB'da tahminen elde edilecek iç yapılar gösterilmiştir.



Şekil 5.5.7.1 Soğuma hızlarına göre ITAB'da tahminen elde edilecek iç yapılar

Fe 37 için $C_{eş} = 0,2$ bulunmuştu (Tablo 5.2). Hesaplanan soğuma hızları ve $C_{eş}$ değerine göre, yöntemler için ITAB'da elde edilecek iç yapıların P (S) + F olacağı öngörülebilir.

Öte yandan Tablo 5.4 ve Şekil 5.5.4.1 incelendiğinde, ergime sınırından esas metal tarafına doğru ilerledikçe, ulaşılan tepe sıcaklık değerlerinin azalmakta olduğu ve bu değerlerin yonteme göre tüketilen ısı miktarı ile değiştiği görülmektedir. Sözgelimi, MAG yönteminde ergime sınırından 1 mm uzakta sıcaklık 1207 °C iken, Örtülü E. ile kaynakta bu mesafe için sıcaklık 1195 °C'dir.

5.6 Örnek 2 : Üç mm Kalınlığındaki AISI 304 Paslanmaz Çeliklerin Farklı Ark Yöntemleri İle Kaynağında Isı Tüketimlerinin, Tepe Sıcaklıklarının, Soğuma Hızlarının Karşılaştırılması Ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemeler TIG ve Plazma kaynak yöntemleri ile tek pasoda alın alına kaynatılabilmektedir.

Bu tip bir uygulama için yöntemlere göre uygun kaynak parametreleri literatürden alınarak; teorik ısı tüketimi (Denklem 3.2), tepe sıcaklığı ve soğuma hızı (Denklem 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4) hesaplanmak suretiyle yöntemler karşılaştırılabilir.

Malzeme özellikleri ve kaynak işlemi için yönteme göre uygun kaynak parametreleri sırasıyla Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.6 AISI 304 malzeme özellikleri (Tablo 4.1-4.2-4.3 ve T.&Manu. Eng. Handbook, 1976)

Malzeme	Ergime sıcaklığı (T _m) (°C)	Isı iletim katsayısı (k) (J/mm.s. °C)	Özgül ısınma ısısı (c _m) (J/g.°C)	Yoğunluk (ρ) (g/mm ³)	İlk sıcaklık (T ₀) (°C)	Kritik sıcaklık (T _c) (°C)
AISI 304 (t=3 mm)	1420	0,015	0,46	0,0079	20	830
Malzeme Bileşimi*						
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni
0,08	2	0,045	0,03	1	18	8
$C_{eş} = \left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right)$						
Bileşimdeki Mn ≥ %1, Cr ≥ %1 ve Ni ≥ % 3,5 olduğundan C _{eş} formülleri geçerli değildir.						
*Literatürden alınmış ortalama değerlerdir.						

Tablo 5.7 Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin TIG ve Plazma alın kaynağında yöntemlere göre uygun kaynak parametreleri

Yöntem	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (mm/dk)	Verim katsayısı
Plazma	160 ¹⁾	15 ¹⁾	500 ¹⁾	0,7 ²⁾
TIG	120 ¹⁾	15 ¹⁾	180 ¹⁾	0,45 ²⁾
1) T.&Manu. Eng. Handbook, 1976 2)Tablo 3.2				

5.6.1 Yöntemlere Göre Isı Tüketimlerinin Hesabı

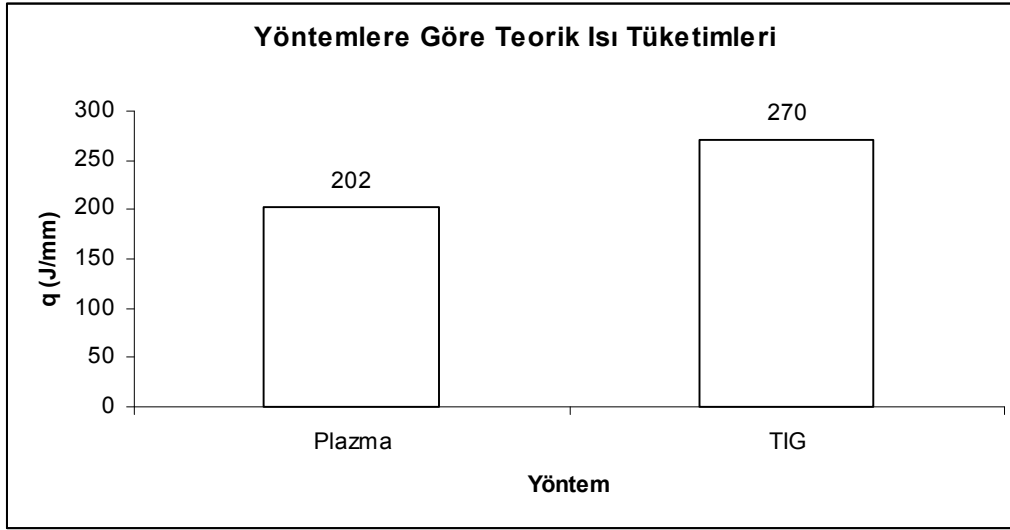
Tablo 5.7'deki veriler yardımıyla yöntemlere göre teorik ısı tüketimleri Denklem (3.2) ile hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.6.1.1'de gösterilmiştir.

Plazma yöntemi için birim dikiş başına tüketilen ısı miktarı;

$$q = \frac{\eta * U * I * 60}{V_k} = \frac{0,7 * 15 * 160 * 60}{500} = 202 \text{ J/mm}$$

TIG yöntemi için birim dikiş başına tüketilen ısı miktarı;

$$q = \frac{\eta * U * I * 60}{V_k} = \frac{0,45 * 15 * 120 * 60}{180} = 270 \text{ J/mm}$$



Şekil 5.6.1.1 Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin TIG ve Plazma alın kaynağındaki teorik ısı tüketimleri

5.6.2 Yöntemlere Göre ITAB Genişliklerinin Hesabı

Yalın karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için, bir metalürjik değişimin oluşmadığı en yüksek sıcaklık değeri 730 °C olarak verilmekte ve bu değer bu malzemelerde ITAB genişliğinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu örnekte de, AISI 304 için ITAB genişliğinin hesaplanmasında 730 °C lik bu sınır değer kullanılacak ve böyle bir yaklaşımın bu tip malzeme için doğru sonuç verip vermeyeceği deneysel uygulamalar sonucunda görülecektir.

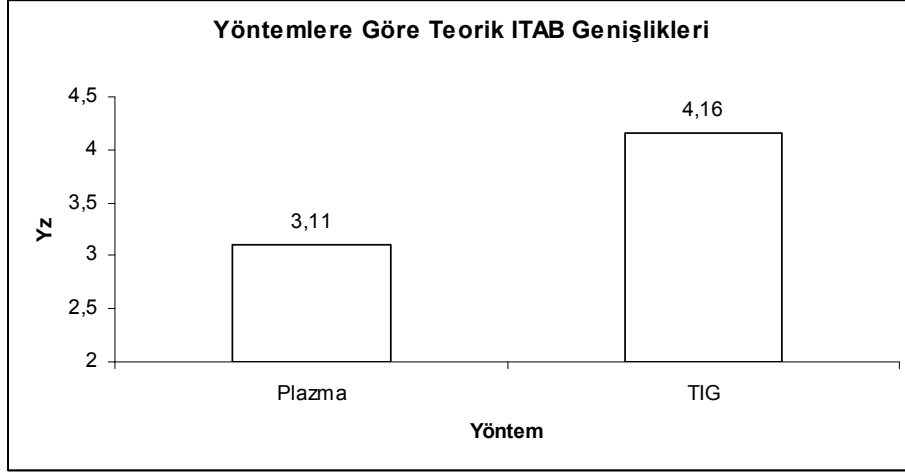
Tablo 5.6'daki veriler ve Şekil 5.6.1.1'de gösterilen teorik ısı tüketim değerleri kullanılarak yöntemlere göre teorik ITAB genişlikleri Denklem (4.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.6.2.1'de gösterilmiştir.

Plazma yöntemi için teorik ITAB genişliği;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 3 \cdot Y_z}{202} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y_z = 3,11 \text{ mm}$$

TIG yöntemi için teorik ITAB genişliği;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 3 \cdot Y_z}{270} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y_z = 4,16 \text{ mm}$$



Şekil 5.6.2.1 Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin TIG ve Plazma alın kaynağındaki teorik ITAB genişlikleri

5.6.3 Yöntemlere Göre ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

Denklem (4.1) yardımıyla ITAB'ın yanı sıra ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri de teorik olarak hesaplanabilmektedir. Bunun için Denklem (4.1)'de, tepe sıcaklık değeri (T_p) yerine

İri taneli bölge : 1420 (Ergime sıcaklığı) – 1150 °C,

İnce taneli bölge : 1150 – 900 °C,

Kısmen dönüşmüş bölge : 900 – 730 °C sınır değerleri yazılarak Y değerleri çekilirse, adı geçen bölgelerin teorik genişlikleri bulunabilir.

Tablo 5.6'daki veriler, Şekil 5.6.1.1'de gösterilen teorik ısı tüketim değerleriyle yukarıda belirtilen sınır değerleri kullanılarak yöntemlere göre ITAB'ı oluşturan bölgelerin teorik genişlikleri Denklem (4.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar her yöntem için ayrı ayrı şekil üzerinde mm cinsinden gösterilmiştir.

5.6.3.1 Plazma Yöntemi İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

Plazma yöntemi için teorik iri taneli bölge (Y_1) genişliği;

$T_p = 1420$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1420 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 3 \cdot Y}{202} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y = 0 \text{ mm (Ergime sınırı)}$$

$T_p = 1150$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1150 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 3 \cdot Y}{202} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y = 0,76 \text{ mm}$$

$$Y_1 = 0,76 \text{ mm}$$

Plazma yöntemi için teorik ince taneli bölge (Y_2) genişliği;

$T_p = 1150$ °C için $Y = 0,76$ mm bulunmuştu.

$T_p = 900$ °C için;

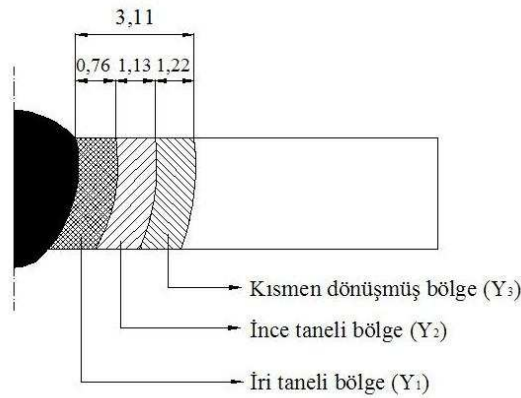
$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{900 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 3 \cdot Y}{202} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y = 1,89 \text{ mm}$$

$$Y_2 = 1,89 - 0,76 = 1,13 \text{ mm}$$

Plazma yöntemi için teorik kısmen dönüştürmüş bölge (Y_3) genişliği;

$T_p = 900$ °C için $Y = 1,89$ mm ve $T_p = 730$ °C için $Y = 3,11$ mm bulunmuştu.

$$Y_3 = 3,11 - 1,89 = 1,22 \text{ mm}$$



Şekil 5.6.3.1.1 Plazma yöntemi için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri

5.6.3.2 TIG Yöntemi İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

TIG yöntemi için teorik iri taneli bölge (Y_1) genişliği;

$T_p = 1420$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1420 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 3 \cdot Y}{270} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y = 0 \text{ mm}$$

(Ergime sınırı)

$T_p = 1150$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1150 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 3 \cdot Y}{270} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y = 1,02 \text{ mm}$$

$Y_1 = 1,02 \text{ mm}$

TIG yöntemi için teorik ince taneli bölge (Y_2) genişliği;

$T_p = 1150$ °C için $Y = 1,02 \text{ mm}$ bulunmuştur.

$T_p = 900$ °C için;

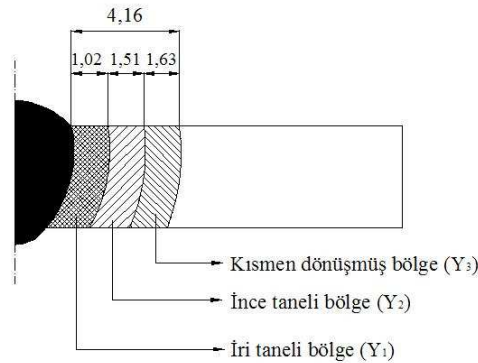
$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{900 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 3 \cdot Y}{270} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y = 2,53 \text{ mm}$$

$Y_2 = 2,53 - 1,02 = 1,51 \text{ mm}$

TIG yöntemi için teorik kısmen dönüşmüş bölge (Y_3) genişliği;

$T_p = 900$ °C için $Y = 2,53 \text{ mm}$ ve $T_p = 730$ °C için $Y = 4,16 \text{ mm}$ bulunmuştur.

$Y_3 = 4,16 - 2,53 = 1,63 \text{ mm}$



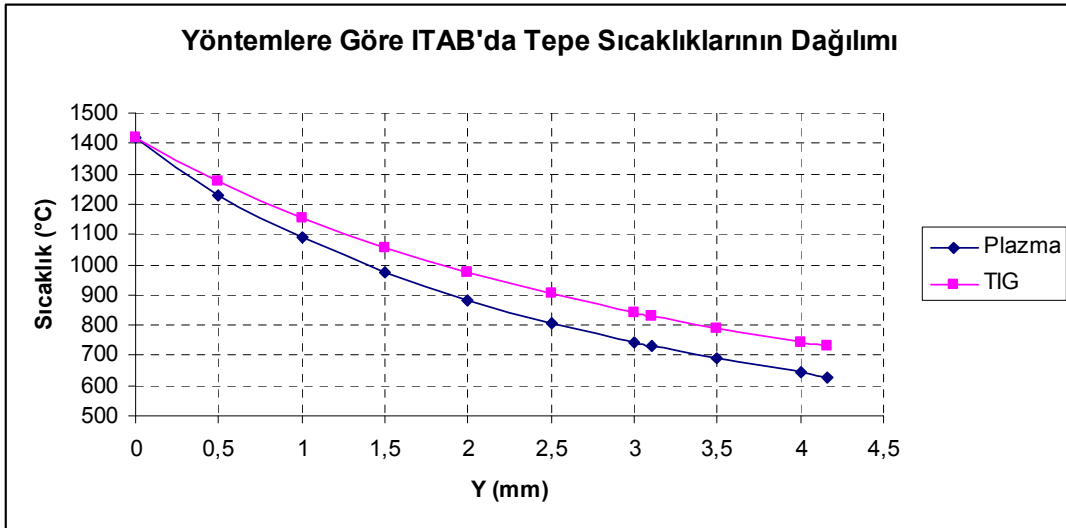
Şekil 5.6.3.2.1 TIG yöntemi için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri

5.6.4 Yöntemlere Göre ITAB'da Tepe Sıcaklıklarının Dağılımı

Denklem (4.1) yardımıyla ITAB'daki sıcaklık dağılımı da görülebilmektedir. Bunun için ergime sınırından ($Y=0$ mm), en büyük ITAB'ın elde edildiği TIG yöntemindeki $Y=4,16$ mm'ye kadar, Y değeri 0,5 mm artırılarak elde edilmiş T_p değerleri Tablo 5.8'de gösterilmiştir. ITAB'lardaki sıcaklık dağılım eğrileri de Şekil 5.6.4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.8 Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin Plazma ve TIG yöntemleri ile alın kaynağında ITAB'lardaki sıcaklık dağılımı (Hesaplanmıştır)

ITAB'da sıcaklık dağılımı (°C)											
Yöntem	Y (mm)										
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,11	3,5	4	4,16
Plazma	1420	1231	1087	973	881	806	742	730	688	642	629
TIG	1420	1274	1155	1057	974	904	843	831	790	744	730



Şekil 5.6.4.1 Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin Plazma ve TIG yöntemleri ile alın kaynağında ITAB'lardaki sıcaklık dağılım eğrileri

5.6.5 Yöntemlere Göre Kalınlık Faktörlerinin Hesaplanması

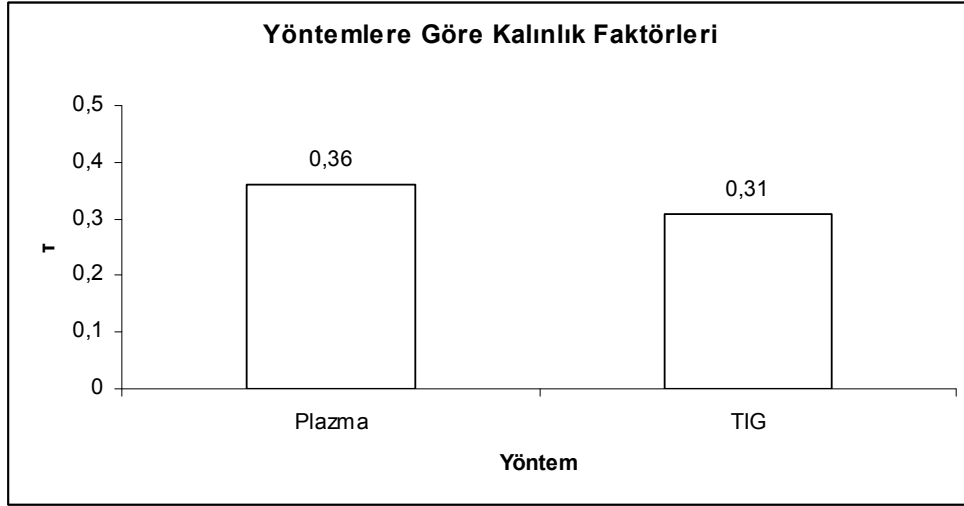
Soğuma hızının belirlenmesi için önce kalınlık faktörünün (τ) tespit edilmesi gerekmektedir. Kalınlık faktörlerinin tespiti için gereken veriler, Tablo 5.6'dan ve Şekil 5.6.1.1'den alınmış olup; Denklem (4.4) yardımıyla yöntemlere göre kalınlık faktörleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.6.5.1'de verilmiştir.

Plazma yöntemi için kalınlık faktörü;

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c_m (T_c - T_0)}{q}} = 3 \sqrt{\frac{0,0079 \cdot 0,46 (830 - 20)}{202}} = 0,36$$

TIG yöntemi için kalınlık faktörü;

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c_m (T_c - T_0)}{q}} = 3 \sqrt{\frac{0,0079 \cdot 0,46 (830 - 20)}{270}} = 0,31$$



Şekil 5.6.5.1 Yöntemlere göre kalınlık faktörleri

5.6.6 Yöntemlere Göre Kaynak Eksenlerindeki Soğuma Hızlarının Hesaplanması

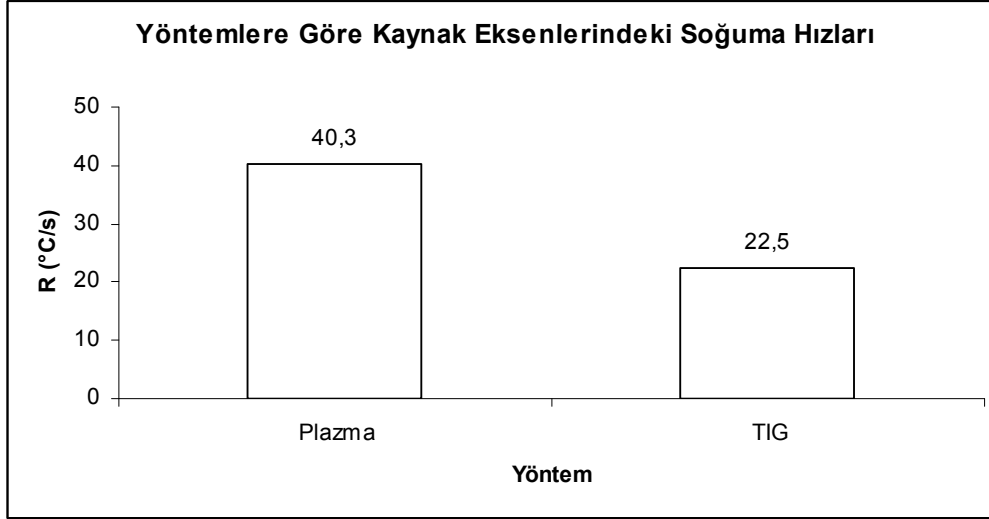
Bütün yöntemler için $\tau < 0,75$ olduğundan ince parçalar için önerilen soğuma hızı formülü (Denklem 4.3) uygulanacaktır. Denklem (4.3)'ten faydalanarak yöntemlere göre kaynak eksenindeki soğuma hızları hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.6.6.1'de verilmiştir.

Plazma yöntemi için kaynak eksenindeki soğuma hızı;

$$R = 2\pi k \rho c_m \left(\frac{t}{q}\right)^2 (T_c - T_0)^3 = 2\pi \cdot 0,015 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot \left(\frac{3}{202}\right)^2 \cdot (830 - 20)^3 = 40,3 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

TIG yöntemi için kaynak eksenindeki soğuma hızı;

$$R = 2\pi k \rho c_m \left(\frac{t}{q}\right)^2 (T_c - T_0)^3 = 2\pi \cdot 0,015 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot \left(\frac{3}{270}\right)^2 \cdot (830 - 20)^3 = 22,5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$



Şekil 5.6.6.1 Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin Plazma ve TIG yöntemleri ile alın kaynağında kaynak eksenlerindeki soğuma hızları

5.6.7 Örnek 2 İçin Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu örnek için şu ana kadar hesaplama yoluyla elde edilen sonuçlar Tablo 5.9’da özetlenmiştir.

Tablo 5.9 Üç mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik alın kaynağında yönleme göre elde edilen sonuçlar

Yöntem	Isı girdisi (J/mm)	Y ₁ (İri taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₂ (İnce taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₃ (Kısmen d. bölge genişliği) (mm)	Y _z (Teorik ITAB genişliği) (mm)	τ (Kalınlık faktörü)	R (Kaynak eksenindeki soğuma hızı) (°C/s)
Plazma	202	0,76	1,13	1,22	3,11	0,36	40,3
TIG	270	1,02	1,51	1,63	4,16	0,31	22,5

Tablo 5.9’den, aynı kalınlıktaki aynı tip malzemelerin aynı bağlantı tipi ile birleştirilmesinde her ark yönteminde farklı ısı tüketimleri, farklı ITAB genişlikleri ve farklı soğuma hızları elde edildiği görülmektedir.

Isı tüketimleri açısından bakıldığında, birim dikiş uzunluğu için en düşük ısı tüketiminin Plazma yönteminde, en yüksek ısı tüketiminin ise TIG kaynağında olduğu görülmektedir. ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişlikleri ve dolayısı ile ITAB genişlikleri de artan ısı girdisiyle beraber artış göstermektedir. En düşük ısının tüketildiği Plazma yönteminde ITAB ve ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişlikleri en küçük iken, en yüksek ısının tüketildiği TIG

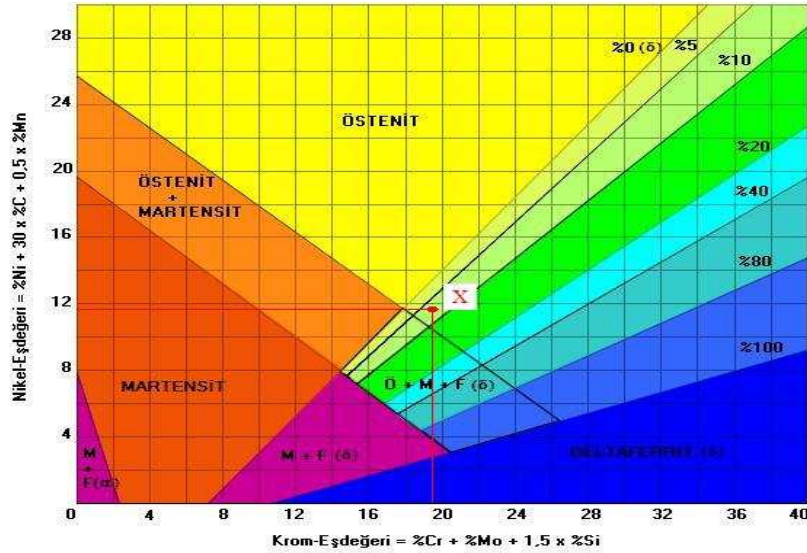
kaynağında ITAB ve ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliklerinin en büyük olduğu Tablo 5.9'da belirtilmektedir. Bununla beraber soğuma hızının da artan ısı girdisiyle azaldığı sonuçlardan görülebilir. En yüksek ısı girişinin sağlandığı TIG kaynağında soğuma hızı 22,5 °C/s iken, en düşük ısı girişinin sağlandığı Plazma yönteminde ise soğuma hızı yaklaşık 40 °C/s'dir.

Tablo 5.6'da da belirtildiği üzere paslanmaz çeliğin bileşimdeki $Mn \geq \%1$, $Cr \geq \%1$ ve $Ni \geq \%3,5$ olduğundan $C_{eş}$ formülleri geçerli değildir. Bu bakımdan, bu malzeme için Schaeffler diyagramından faydalanılarak *kaynak metalinin* iç yapısı tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Schaeffler Diyagramı'na göre; söz konusu çeliğe ait "X" noktası, $(Ni)_{eş}$ ve $(Cr)_{eş}$ değerleri hesaplandıktan sonra Şekil 5.6.7.1'de belirtilmiştir.

$$(Cr)_{eş} = \%Cr + \% Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb = 18 + (1,5*1) = 19,5$$

$$(Ni)_{eş} = \%Ni + 30 \% C + 0,5 \%Mn = 8 + (30*0,08) + (0,5*2) = 11,4$$



Şekil 5.6.7.1 AISI 304 bileşiminin Schaeffler Diyagramında gösterilmesi

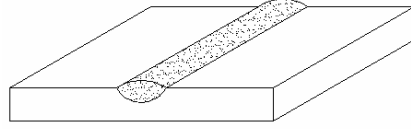
Şekil 5.6.7.1'den de görülebileceği üzere, Plazma ve TIG yöntemleri için, benzer bileşimde kaynak teli kullanılması durumunda, kaynak dikişinin iç yapısının Ö+δF olacağı öngörülebilir.

Öte yandan Tablo 5.8 ve Şekil 5.6.4.1 incelendiğinde, ergime sınırından esas metal tarafına doğru ilerledikçe, ulaşılan tepe sıcaklık değerlerinin azalmakta olduğu ve bu değerlerin yöntemine göre tüketilen ısı miktarı ile değiştiği görülmektedir. Sözelimi, TIG yönteminde ergime sınırından 2 mm uzakta sıcaklık 974 °C iken, Plazma yönteminde bu mesafe için sıcaklık 881 °C'dir.

5.7 Örnek 3 : Altı mm Kalınlığındaki Fe 37 Çelik ve AISI 304 Paslanmaz Çeliklerin Aynı Ark Yöntemi İle Yapılan Kaynaklarında Isı Tüketimlerinin, Tepe Sıcaklıklarının, Soğuma Hızlarının Karşılaştırılması Ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Önceki iki örnekte malzeme tipi ve kalınlık sabit kabul edilerek, farklı ark yöntemlerinin (farklı ısı tüketimlerinin) uygulanması neticesinde tepe sıcaklıklarının dağılımlarında ve soğuma hızlarında ortaya çıkan farklılıklar irdelenmeye çalışılmıştı. Bu örnekte ise ısı tüketimi ve kalınlık sabit kabul edilerek, malzeme tipinin etkisi irdelenmeye çalışılacaktır.

Bu bağlamda, bu örnek uygulamada altı mm kalınlıklı Fe 37 çelik parçalar ve AISI 304 tip paslanmaz çelik parçalar üzerine, toz altı yöntemiyle dikişler çekildiği varsayılacak (bead-on-plate); bu doğrultuda hesaplamalar ve değerlendirmeler yapılacaktır.



Şekil 5.7.1 Örnek uygulamanın şematik gösterimi

Malzeme özellikleri ve seçilmiş kaynak parametreleri sırasıyla Tablo 5.10 ve Tablo 5.11’de verilmiştir.

Tablo 5.10 Fe 37 ve AISI 304 malzemelerin özellikleri (Kakaç, 1998 ve T.&M. Eng. Handbook, 1976)

Malzeme	Ergime sıcaklığı (T _m) (°C)	Isı iletim katsayısı (k) (J/mm.s. °C)	Özgül ısınma ısı (c _m) (J/g.°C)	Yoğunluk (ρ) (g/mm ³)	İlk sıcaklık (T ₀) (°C)	Kritik sıcaklık (T _c) (°C)		
Fe 37 (t=6 mm)	1450	0,05	0,44	0,0078	20	830		
AISI 304 (t=6 mm)	1420	0,015	0,46	0,0079	20	830		
Malzeme Bileşimi*								
	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni	C _{eş} $\left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right)$
Fe 37	0,15	0,3	0,04	0,05	0,40	-	-	0,2
AISI 304	0,08	2	0,045	0,03	1	18	8	Bileşimdeki Mn ≥ %1, Cr ≥ %1 ve Ni ≥ % 3,5 olduğundan C _{eş} formülleri geçerli değildir.
*Literatürden alınmış ortalama değerlerdir.								

Tablo 5.11 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 eliklerin tozaltı kaynağı için seçilmiş kaynak parametreleri

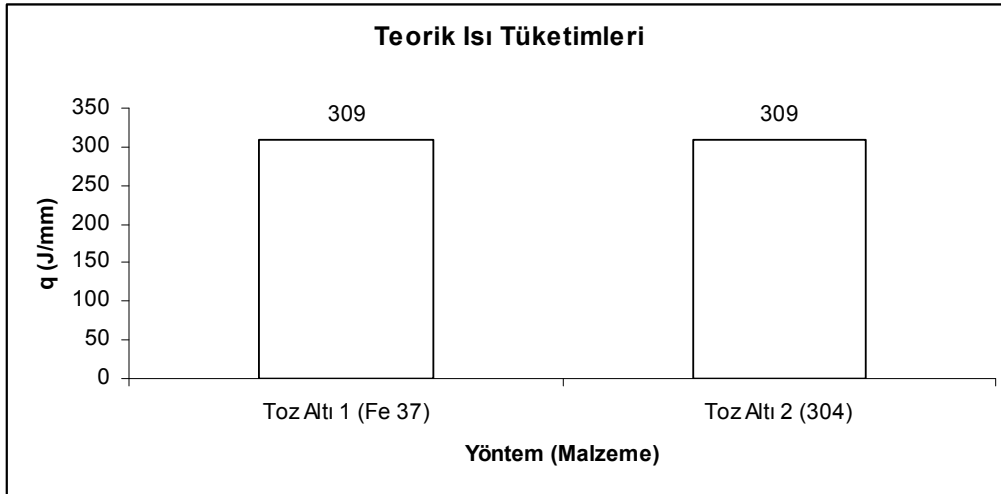
Yöntem/ Malzeme	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (mm/dk)	Verim katsayısı
Tozaltı 1 (Fe 37)	250	26	1200	0,95 ¹⁾
Tozaltı 2 (304)	250	26	1200	0,95 ¹⁾
1) Tablo 3.2				

5.7.1 Yöntemlere Göre Isı Tüketimlerinin Hesabı

Tablo 5.11'deki veriler yardımıyla teorik ısı tüketimleri Denklem (3.2) ile hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.7.1.1'de gösterilmiştir.

Tozaltı 1 (Fe 37) yöntemi ve Tozaltı 2 (304) yöntemi için birim dikiş başına tüketilen ısı miktarı;

$$q = \frac{\eta * U * I * 60}{V_K} = \frac{0,95 * 26 * 250 * 60}{1200} = 309 \text{ J/mm}$$



Şekil 5.7.1.1 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 eliklerin tozaltı kaynağındaki teorik ısı tüketimleri

5.7.2 Yöntemlere Göre ITAB Genişliklerinin Hesabı

Bu örnekte de, her iki malzeme tipi için ITAB genişliğinin hesaplanmasında 730 °C lik sınır değeri kullanılacak ve böyle bir yaklaşımın doğru sonuç verip vermeyeceği deneysel uygulamalar sonucunda görülecektir.

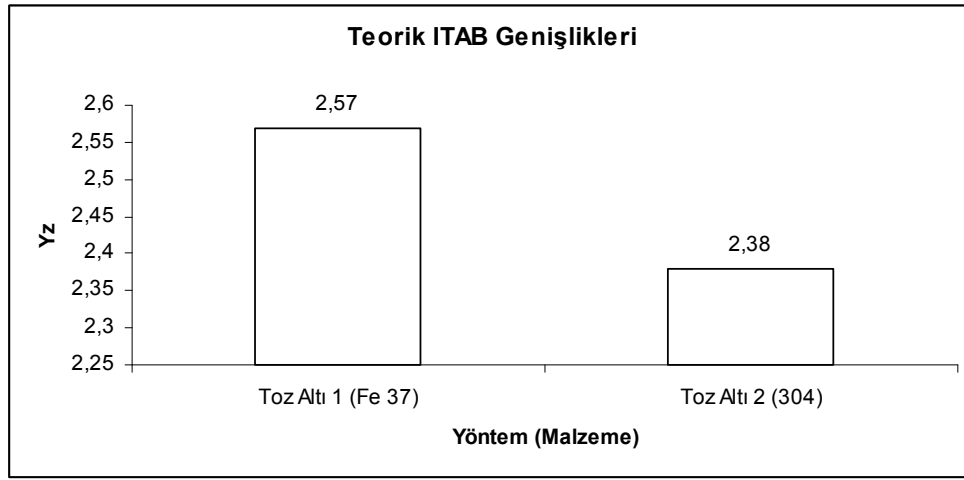
Tablo 5.10'daki veriler ve Şekil 5.7.1.1'de gösterilen teorik ısı tüketim değerleri kullanılarak teorik ITAB genişlikleri Denklem (4.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.7.2.1'de gösterilmiştir.

Tozaltı 1 (Fe 37) yöntemi için teorik ITAB genişliği;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 6 \cdot Y_z}{309} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y_z = 2,57 \text{ mm}$$

Tozaltı 2 (304) yöntemi için teorik ITAB genişliği;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 6 \cdot Y_z}{309} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y_z = 2,38 \text{ mm}$$



Şekil 5.7.2.1 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında teorik ITAB genişlikleri

5.7.3 Yöntemlere Göre ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

Denklem (4.1) yardımıyla ITAB'ın yanı sıra ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri de teorik olarak hesaplanabilmektedir. Bunun için Denklem (4.1)'de, tepe sıcaklık değeri (T_p) yerine

İri taneli bölge : Malzeme ergime sıcaklığı – 1150 °C,

İnce taneli bölge : 1150 – 900 °C,

Kısmen dönüşmüş bölge : 900 – 730 °C sınır değerleri yazılarak Y değerleri çekilirse, adı geçen bölgelerin teorik genişlikleri bulunabilir.

Tablo 5.10'daki veriler, Şekil 5.7.1.1'de gösterilen teorik ısı tüketim değerleriyle yukarıda belirtilen sınır değerleri kullanılarak yöntemlere göre ITAB'ı oluşturan bölgelerin teorik

genişlikleri Denklem (4.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar her yöntem için ayrı ayrı şekil üzerinde mm cinsinden gösterilmiştir.

5.7.3.1 Tozaltı (Fe 37) Yöntemi İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

Toz altı (Fe 37) yöntemi için teorik iri taneli bölge (Y₁) genişliği;

T_p = 1450 °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1450 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 6 \cdot Y}{309} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 0 \text{ mm (Ergime}$$

sınırı)

T_p = 1150 °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1150 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 6 \cdot Y}{309} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 0,67 \text{ mm}$$

$$Y_1 = 0,67 \text{ mm}$$

Toz altı (Fe 37) yöntemi için teorik ince taneli bölge (Y₂) genişliği;

T_p = 1150 °C için Y = 0,67 mm bulunmuştur.

T_p = 900 °C için;

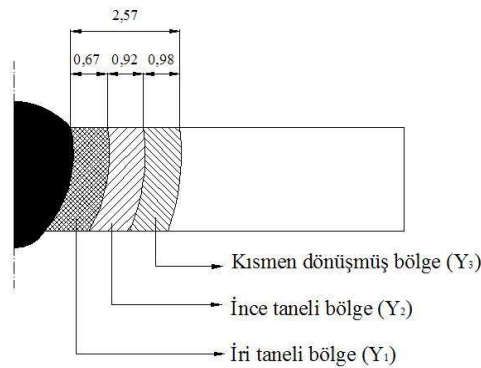
$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{900 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 6 \cdot Y}{309} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 1,59 \text{ mm}$$

$$Y_2 = 1,59 - 0,67 = 0,92 \text{ mm}$$

Toz altı (Fe 37) yöntemi için teorik kısmen dönüşmüş bölge (Y₃) genişliği;

T_p = 900 °C için Y = 1,59 mm ve T_p = 730 °C için Y = 2,57 bulunmuştur.

$$Y_3 = 2,57 - 1,59 = 0,98 \text{ mm}$$



Şekil 5.7.3.1.1 Tozaltı (Fe 37) kaynağında ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri

5.7.3.2 Tozaltı (304) Yöntemi İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

Toz altı (304) yöntemi için teorik iri taneli bölge (Y_1) genişliği;

$T_p = 1420$ °C için (ergime sıcaklığı);

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1420 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 6 \cdot Y}{309} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y = 0 \text{ mm}$$

(Ergime sınırı)

$T_p = 1150$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1150 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 6 \cdot Y}{309} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y = 0,585 \text{ mm}$$

$$Y_1 = 0,585 \text{ mm}$$

Toz altı (304) yöntemi için teorik ince taneli bölge (Y_2) genişliği;

$T_p = 1150$ °C için $Y = 0,585$ mm bulunmuştur.

$T_p = 900$ °C için;

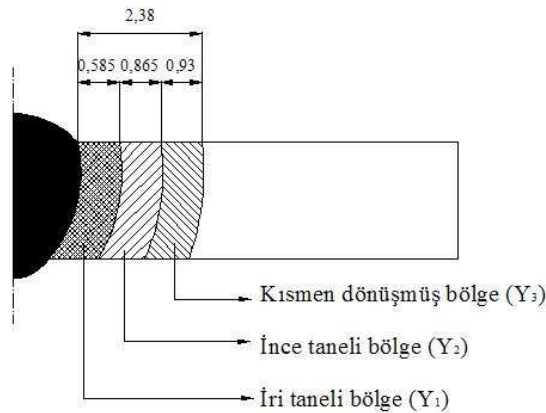
$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{900 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot 6 \cdot Y}{309} + \frac{1}{1420 - 20} \rightarrow Y = 1,45 \text{ mm}$$

$$Y_2 = 1,45 - 0,585 = 0,865 \text{ mm}$$

Toz altı (304) yöntemi için teorik kısmen dönüşmüş bölge (Y_3) genişliği;

$T_p = 900$ °C için $Y = 1,45$ mm ve $T_p = 730$ °C için $Y = 2,38$ bulunmuştur.

$$Y_3 = 2,38 - 1,45 = 0,93 \text{ mm}$$



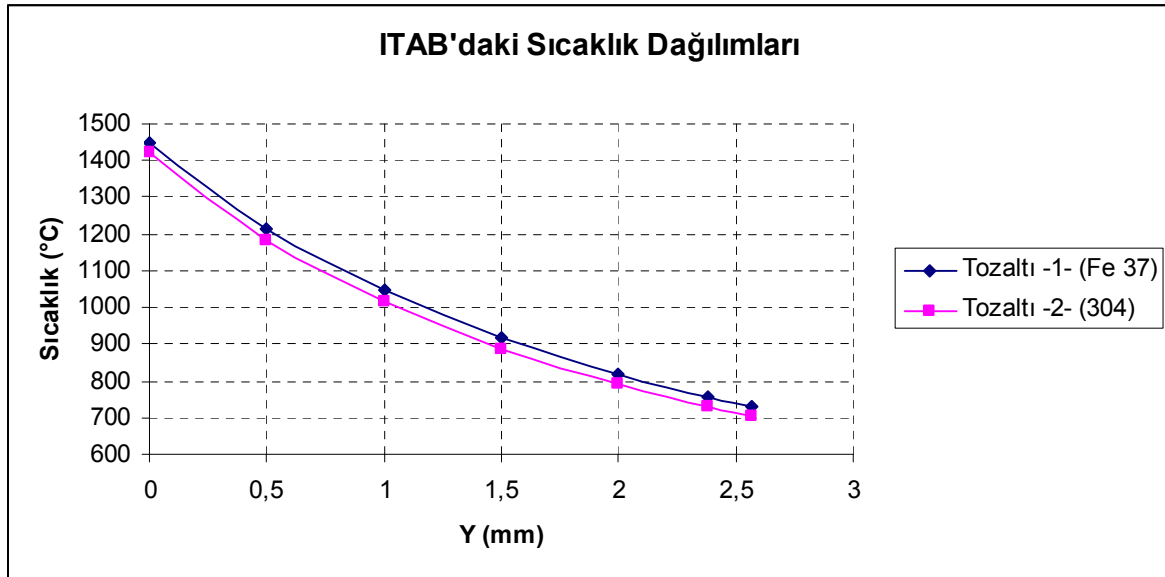
Şekil 5.7.3.2.1 Tozaltı (304) kaynağında ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri

5.7.4 Yöntemlere Göre ITAB'da Tepe Sıcaklıklarının Dağılımı

Denklem (4.1) yardımıyla ITAB'daki sıcaklık dağılımı da görülebilmektedir. Bunun için ergime sınırından ($Y=0$ mm), en büyük ITAB'ın elde edildiği Tozaltı (Fe 37) yöntemindeki 2,57 mm'ye kadar, Y değeri 0,5 mm artırılarak elde edilmiş T_p değerleri Tablo 5.12'de gösterilmiştir. ITAB'lardaki sıcaklık dağılım eğrileri de Şekil 5.7.4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.12 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında ITAB'lardaki sıcaklık dağılımları (Hesaplanmıştır)

ITAB'da sıcaklık dağılımı (°C)							
Yöntem	Y (mm)						
	0	0,5	1	1,5	2	2,38	2,57
Tozaltı -1- (Fe 37)	1450	1215	1046	919	820	758	730
Tozaltı -2- (304)	1420	1183	1014	888	791	730	703



Şekil 5.7.4.1 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında ITAB'lardaki sıcaklık dağılım eğrileri

5.7.5 Yöntemlere Göre Kalınlık Faktörlerinin Hesaplanması

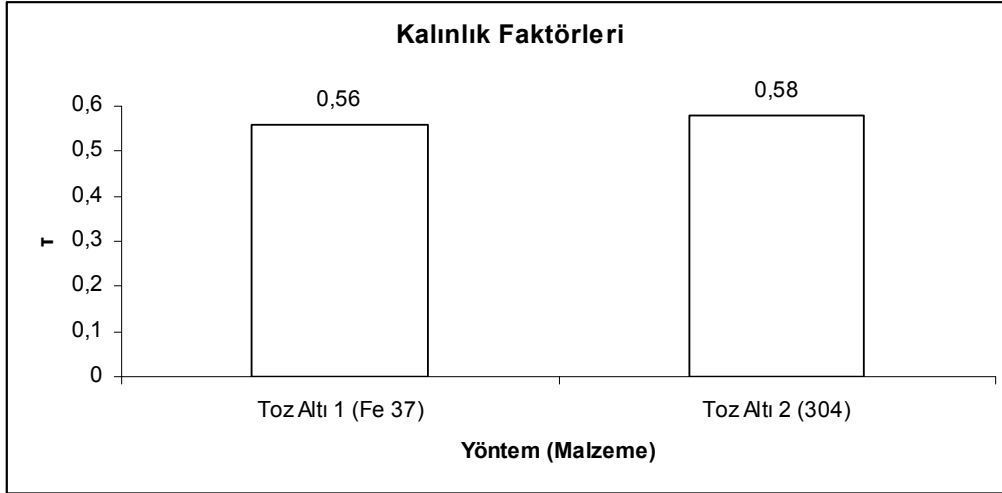
Soğuma hızının belirlenmesi için önce kalınlık faktörünün (τ) tespit edilmesi gerekmektedir. Kalınlık faktörlerinin tespiti için gereken veriler, Tablo 5.10'dan ve Şekil 5.7.1.1'den alınmış olup; Denklem (4.4) yardımıyla yöntemlere göre kalınlık faktörleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.7.5.1'de verilmiştir.

Tozaltı (Fe 37) yöntemi için kalınlık faktörü;

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c_m (T_c - T_0)}{q}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{0,0078 \cdot 0,44 (830 - 20)}{309}} = 0,56$$

Tozaltı (304) yöntemi için kalınlık faktörü;

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c_m (T_c - T_0)}{q}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{0,0079 \cdot 0,46 (830 - 20)}{309}} = 0,58$$



Şekil 5.7.5.1 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında hesaplanmış kalınlık faktörleri

5.7.6 Yöntemlere Göre Kaynak Eksenlerindeki Soğuma Hızlarının Hesaplanması

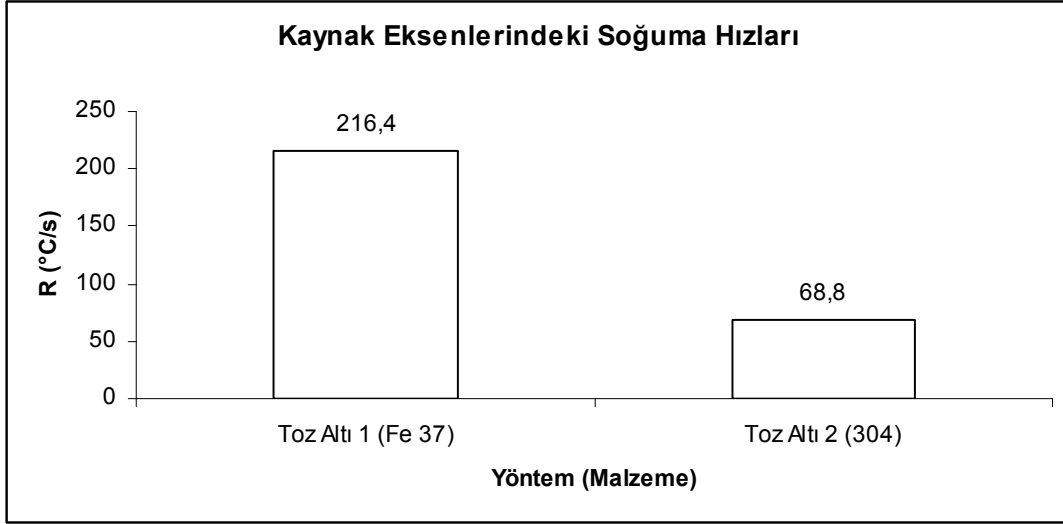
Bütün yöntemler için $\tau < 0,75$ olduğundan ince parçalar için önerilen soğuma hızı formülü (Denklem 4.3) uygulanacaktır. Denklem (4.3)'ten faydalanarak yöntemlere göre kaynak eksenindeki soğuma hızları hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.7.6.1'de verilmiştir.

Tozaltı -1- (Fe 37) yöntemi için kaynak eksenindeki soğuma hızı;

$$R = 2\pi k \rho c_m \left(\frac{t}{q}\right)^2 (T_c - T_0)^3 = 2\pi \cdot 0,05 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot \left(\frac{6}{309}\right)^2 \cdot (830 - 20)^3 = 216,4 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

Tozaltı -2- (304) yöntemi için kaynak eksenindeki soğuma hızı;

$$R = 2\pi k \rho c_m \left(\frac{t}{q}\right)^2 (T_c - T_0)^3 = 2\pi \cdot 0,015 \cdot 0,0079 \cdot 0,46 \cdot \left(\frac{6}{309}\right)^2 \cdot (830 - 20)^3 = 68,8 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$



Şekil 5.7.6.1 Altı mm kalınlığında Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında kaynak eksenlerindeki soğuma hızları

5.7.7 Örnek 3 İçin Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu örnek için şu ana kadar hesaplama yoluyla elde edilen sonuçlar Tablo 5.13'te özetlenmiştir.

Tablo 5.13 Altı mm kalınlığındaki Fe 37 ve AISI 304 çeliklerin tozaltı kaynağında elde edilen sonuçlar

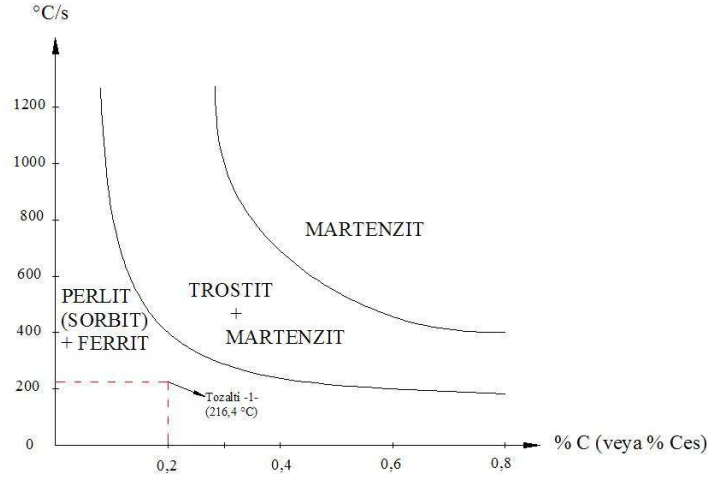
Yöntem	Isı girdisi (J/mm)	Y ₁ (İri taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₂ (İnce taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₃ (Kısmen d. bölge genişliği) (mm)	Y _z (Teorik ITAB genişliği) (mm)	τ (Kalınlık faktörü)	R (Kaynak eksenindeki soğuma hızı) (°C/s)
Tozaltı -1- (Fe 37)	309	0,67	0,92	0,98	2,57	0,56	216,4
Tozaltı -2- (304)	309	0,585	0,865	0,93	2,38	0,58	68,8

Tablo 5.13'ten, aynı kalınlıktaki farklı tip malzemelere aynı ısı girdisi uygulansa dahi, farklı ITAB genişlikleri ve farklı soğuma hızları elde edildiği görülmektedir.

Fe 37'nin ısı iletim katsayısının paslanmaz çeliğe göre büyük olması sebebiyle, kaynak için verilen ısının Fe 37'de paslanmaza göre çok daha hızlı bir biçimde kaynak bölgesinden uzaklaştığı düşünülmektedir. Bu durumun sonucu olarak kaynak için gereken ısının ve ITAB genişliğinin arttığı söylenebilir.

Soğuma hızları açısından ise, Fe 37'nin daha hızlı soğuduğu görülmektedir. Diğer malzeme özelliklerinin birbirine çok yakın olmalarına rağmen, paslanmaz çelikteki ısı iletim

katsayısının küçük olmasının, bu malzemede soğuma hızını düşürdüğü kanısına varılabilir. Diğer bir ifadeyle, Fe 37'nin ısı iletim katsayısının büyük olması, ısının kaynak bölgesinden daha hızlı uzaklaşmasına ve soğuma hızının artmasına sebep olduğu söylenebilir.



Şekil 5.7.7.1 Tozaltı (Fe 37) için soğuma hızına göre ITAB'da tahminen elde edilecek iç yapı

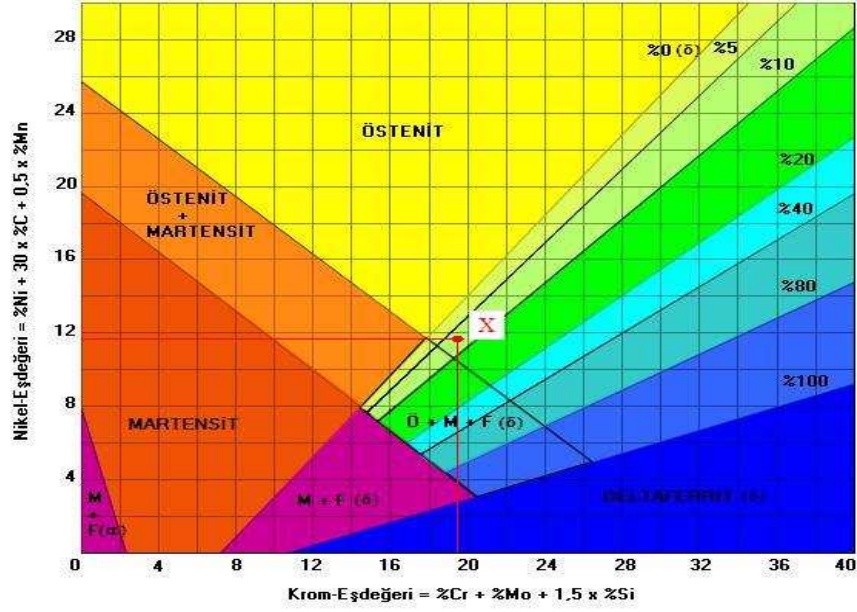
Şekil 5.7.7.1'de, Tozaltı (Fe 37) için soğuma hızına göre ITAB'da tahminen elde edilecek iç yapı gösterilmiştir. Fe 37 malzeme için $C_{eş} = 0,2$ bulunmuştu (Tablo 5.10). Hesaplanan soğuma hızı ve $C_{eş}$ değerlerine göre, yöntemler için elde edilecek iç yapıların P (S) + F olacağı öngörülebilir.

Tablo 5.10'da da belirtildiği üzere paslanmaz çeliğin bileşimdeki $Mn \geq \%1$, $Cr \geq \%1$ ve $Ni \geq \% 3,5$ olduğundan $C_{eş}$ formülleri geçerli değildir. Bu bakımdan, bu malzeme için Schaeffler diyagramından faydalanılarak *kaynak metalinin* iç yapısı tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Schaeffler Diyagramı'na göre; sözkonusu çeliğe ait "X" noktası, $(Ni)_{eş}$ ve $(Cr)_{eş}$ değerleri hesaplandıktan sonra Şekil 5.7.7.2'de belirtilmiştir.

$$(Cr)_{eş} = \%Cr + \% Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb = 18 + (1,5*1) = 19,5$$

$$(Ni)_{eş} = \%Ni + 30 \% C + 0,5 \%Mn = 8 + (30*0,08) + (0,5*2) = 11,4$$



Şekil 5.7.7.2 AISI 304 bileşiminin Schaeffler Diyagramında gösterilmesi

Şekil 5.7.7.2'den de görülebileceği üzere, Tozaltı (304) yöntemi için, benzer bileşimde kaynak teli kullanılması durumunda, elde edilecek iç yapının $\ddot{O} + \delta F$ olacağı öngörülebilir.

Öte yandan Tablo 5.12 ve Şekil 5.7.4.1 incelendiğinde, ergime sınırından esas metal tarafına doğru ilerledikçe, ulaşılan tepe sıcaklık değerleri azalmakta ve bu değerler yöntemle tüketilen ısı ile değişim göstermektedir. Sözelimi, Tozaltı (Fe 37) yönteminde ergime sınırından 1,5 mm uzakta sıcaklık $919\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken, Tozaltı (304) kaynağında bu mesafe için sıcaklık $888\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir.

5.8 Örnek 4 : Malzeme Kalınlığının Ve Ön Tavlamanın Isı Tüketimlerine, Tepe Sıcaklıklarına, Soğuma Hızlarına Etkisi Ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu örnekte malzeme kalınlığının ve ön tavlamanın etkilerinin incelenmesi için, on mm kalınlıklı Fe 37 çelik parçalar üzerine, örtülü elektrot yöntemiyle dört mm kalınlık için yeterli olan ısı girdisi ile ön tavlama ve ön tavlama yapılmış dikişler çekildiği varsayılacak (bead-on-plate); bu doğrultuda hesaplamalar ve değerlendirmeler yapılacaktır.

Bu tip bir uygulama için gereken malzeme özellikleri Tablo 5.14'te, dört mm kalınlık için literatürden alınmış kaynak parametreleri Tablo 5.15'te verilmiştir. Ön tav sıcaklığı 200 °C olarak alınmıştır.

Tablo 5.14 Fe 37 malzeme özellikleri (Kakaç, 1998 ve T.&M. Eng. Handbook, 1976)

Malzeme	Ergime sıcaklığı (T _m) (°C)	Isı iletim katsayısı (k) (J/mm.s. °C)	Özgül ısınma ısısı (c _m) (J/g.°C)	Yoğunluk (ρ) (g/mm ³)	İlk sıcaklık (T ₀) (°C)	Kritik sıcaklık (T _c) (°C)		
Fe 37 (t=10 mm)	1450	0,05	0,44	0,0078	20	830		
*Fe 37 (t=10 mm ve ön tavlı)	1450	0,05	0,44	0,0078	200	830		
Malzeme Bileşimi*								
	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni	C _{eş} $\left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right)$
Fe 37	0,15	0,3	0,04	0,05	0,40	-	-	0,2
*Literatürden alınmış ortalama değerlerdir.								

Tablo 5.15 Uygulama için seçilmiş kaynak parametreleri

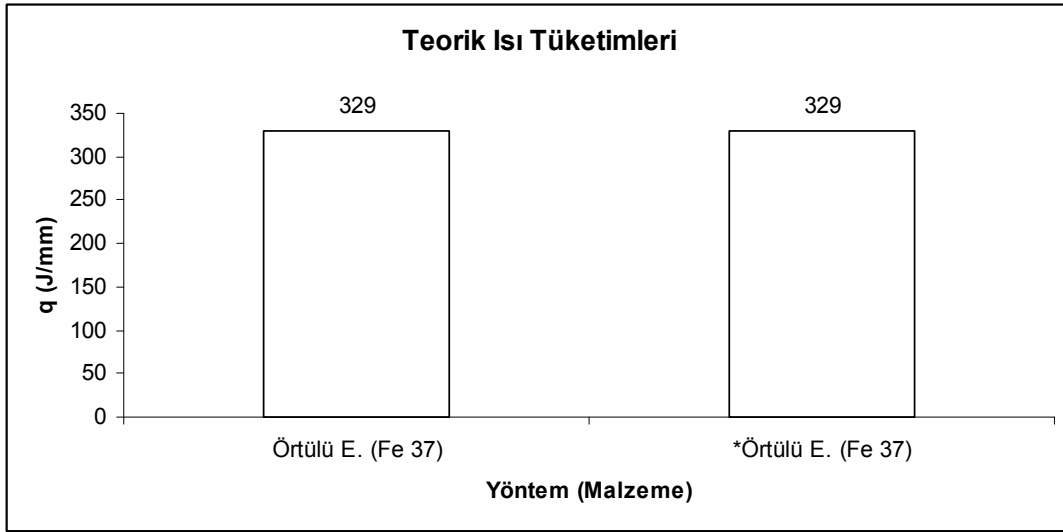
Yöntem/ Malzeme	**Kaynak akımı (A)	**Kaynak gerilimi (V)	**Kaynak hızı (mm/dk)	Verim katsayısı
Örtülü El. (Fe 37) t : 10 mm	135 ¹⁾	25 ¹⁾	400 ¹⁾	0,65 ²⁾
*Örtülü El. (Fe 37) t : 10 mm	135 ¹⁾	25 ¹⁾	400 ¹⁾	0,65 ²⁾
1) Tülbentçi, 1998 2) Tablo 3.2 * 200 °C Ön tavlama uygulanmış ** Bu değerler 4 mm kalınlıklı alaşımsız çeliklerin kaynağı için geçerlidir.				

5.8.1 Yöntemlere Göre Isı Tüketimlerinin Hesabı

Tablo 5.15'teki veriler yardımıyla yöntemlere göre teorik ısı tüketimleri Denklem (3.2) ile hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.8.1.1'de gösterilmiştir.

Tüm yöntemler için parametreler eşit alındığından, birim dikiş başına tüketilen ısı miktarları eşittir :

$$q = \frac{\eta * U * I * 60}{V_K} = \frac{0,65 * 25 * 135 * 60}{400} = 329 \text{ J/mm}$$



Şekil 5.8.1.1 On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çelikler için teorik ısı tüketimleri

5.8.2 Yöntemlere Göre ITAB Genişliklerinin Hesabı

Bölüm 5.2'de, teorik ITAB genişliklerinin hesaplanmasında kullanılan Denklem (4.1)'in, ısı iletiminin parça yüzeyine paralel olduğu durumlar (yani yanal doğrultuda iletim) için türetildiği vurgulanmıştı. Bu örnekte ise, ısı iletimi hem yanal doğrultuda (parça yüzeyine paralel) hem de kalınlık doğrultusunda olacaktır. Bu bakımdan gerek ITAB genişlikleri gerekse ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliklerinin hesabı ile elde edilecek sonuçlar, gerçeği yansıtmayabilir. Sonuçların doğruluğu deneysel uygulama sonucunda anlaşılacaktır.

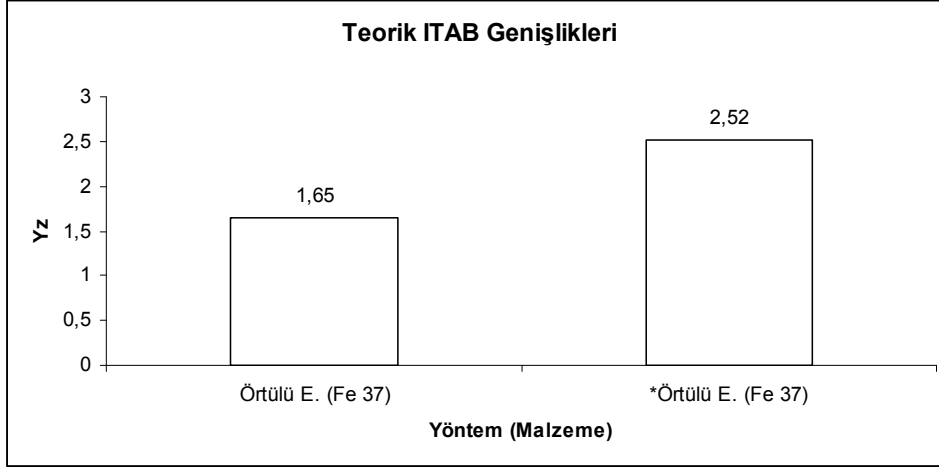
Tablo 5.14'daki veriler ve Şekil 5.8.1.1'de gösterilen teorik ısı tüketim değerleri kullanılarak teorik ITAB genişlikleri Denklem (4.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.8.2.1'de gösterilmiştir.

Örtülü elek. (Fe 37) yöntemi için teorik ITAB genişliği;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 10 \cdot Y_z}{329} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y_z = 1,65 \text{ mm}$$

*Örtülü elek. (Fe 37) yöntemi için teorik ITAB genişliği;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{730 - 200} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 10 \cdot Y_z}{329} + \frac{1}{1450 - 200} \rightarrow Y_z = 2,52 \text{ mm}$$



Şekil 5.8.2.1 On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çelikler için teorik ITAB genişlikleri

5.8.3 Yöntemlere Göre ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

Denklem (4.1) yardımıyla ITAB'ın yanı sıra ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri de teorik olarak hesaplanabilmektedir. Bunun için Denklem (4.1)'de, tepe sıcaklık değeri (T_p) yerine

İri taneli bölge : Malzeme ergime sıcaklığı – 1150 °C,

İnce taneli bölge : 1150 – 900 °C,

Kısmen dönüşmüş bölge : 900 – 730 °C sınır değerleri yazılarak Y değerleri çekilirse, adı geçen bölgelerin teorik genişlikleri bulunabilir.

Tablo 5.14'teki veriler, Şekil 5.8.1.1'de gösterilen teorik ısı tüketim değerleriyle yukarıda belirtilen sınır değerleri kullanılarak yöntemlere göre ITAB'ı oluşturan bölgelerin teorik genişlikleri Denklem (4.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar her yöntem için ayrı ayrı şekil üzerinde mm cinsinden gösterilmiştir.

5.8.3.1 Örtülü E. (Fe 37) İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

Örtülü elek. (Fe 37) yöntemi için teorik iri taneli bölge (Y_1) genişliği;

$T_p = 1450$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1450 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 10 \cdot Y}{329} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 0 \text{ mm (E.S.)}$$

$T_p = 1150$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1150 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 10 \cdot Y}{329} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 0,43 \text{ mm}$$

$Y_1 = 0,43 \text{ mm}$

Örtülü elek. (Fe 37) yöntemi için teorik ince taneli bölge (Y_2) genişliği;

$T_p = 1150$ °C için $Y = 0,43 \text{ mm}$ bulunmuştur.

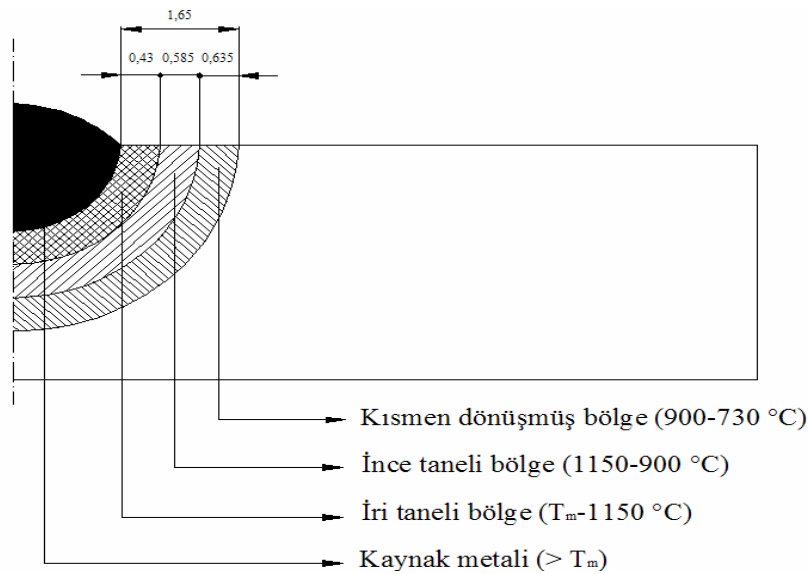
$T_p = 900$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{900 - 20} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 10 \cdot Y}{329} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 1,015 \text{ mm}$$

$Y_2 = 1,015 - 0,43 = 0,585 \text{ mm}$

Örtülü elek. (Fe 37) yöntemi için teorik kısmen dönüştürmüş bölge (Y_3) genişliği;

$T_p = 900$ °C için $Y = 1,015 \text{ mm}$ ve $T_p = 730$ °C için $Y = 1,65 \text{ mm}$ bulunmuştur. $Y_3 = 1,65 - 1,015 = 0,635 \text{ mm}$



Şekil 5.8.3.1.1 Örtülü elek. (Fe 37) için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri

5.8.3.2 *Örtülü E. (Fe 37) İçin ITAB'ı Oluşturan Bölgelerin Genişliklerinin Hesabı

*Örtülü elek. (Fe 37) yöntemi için teorik iri taneli bölge (Y_1) genişliği;

$T_p = 1450$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1450 - 200} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 10 \cdot Y}{329} + \frac{1}{1450 - 200} \rightarrow Y = 0 \text{ mm (E.S.)}$$

$T_p = 1150$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{1150 - 200} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 10 \cdot Y}{329} + \frac{1}{1450 - 200} \rightarrow Y = 0,59 \text{ mm}$$

$Y_1 = 0,59 \text{ mm}$

*Örtülü elek. (Fe 37) yöntemi için teorik ince taneli bölge (Y_2) genişliği;

$T_p = 1150$ °C için $Y = 0,59 \text{ mm}$ bulunmuştur.

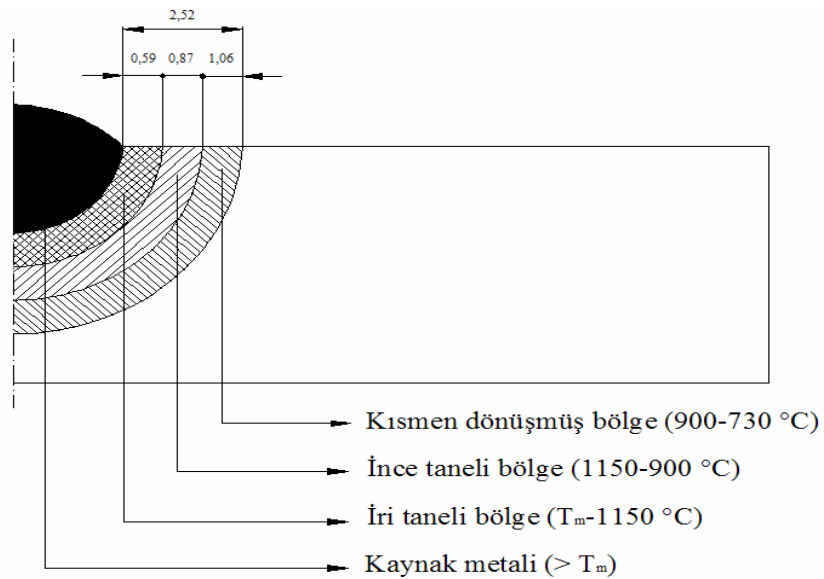
$T_p = 900$ °C için;

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c_m \cdot t \cdot Y_z}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \rightarrow \frac{1}{900 - 200} = \frac{4.13 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot 10 \cdot Y}{329} + \frac{1}{1450 - 200} \rightarrow Y = 1,46 \text{ mm}$$

$Y_2 = 1,46 - 0,59 = 0,87 \text{ mm}$

*Örtülü elek. (Fe 37) yöntemi için teorik kısmen dönüşmüş bölge (Y_3) genişliği;

$T_p = 900$ °C için $Y = 1,46 \text{ mm}$ ve $T_p = 730$ °C için $Y = 2,52 \text{ mm}$ bulunmuştur. $Y_3 = 2,52 - 1,46 = 1,06 \text{ mm}$



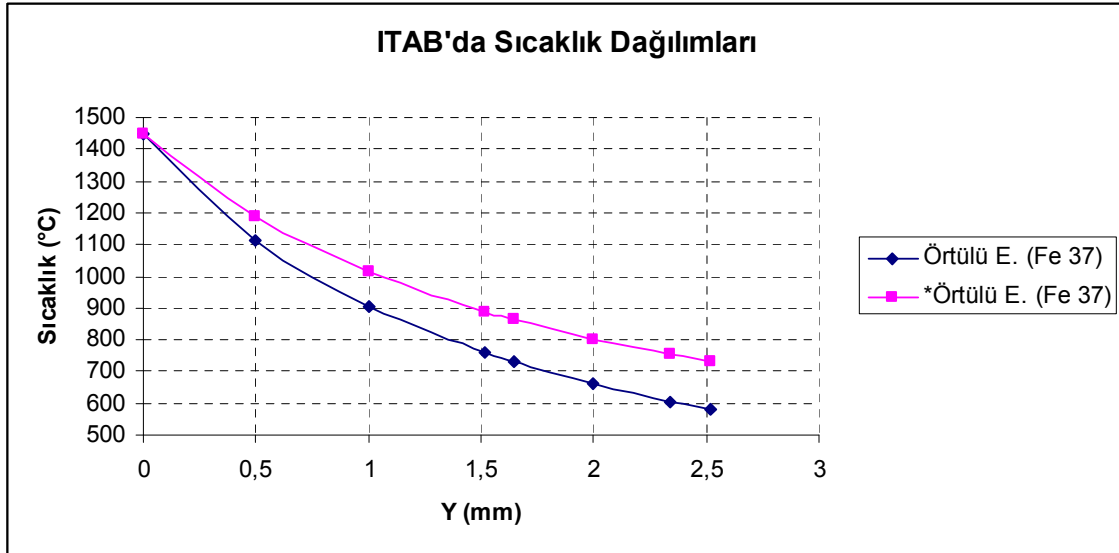
Şekil 5.8.3.2.1 *Örtülü elek. (Fe 37) için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri

5.8.4 Yöntemlere Göre ITAB'da Tepe Sıcaklıklarının Dağılımı

Denklem (4.1) yardımıyla ITAB'daki sıcaklık dağılımı da görülebilmektedir. Bunun için ergime sınırından ($Y=0$ mm), en büyük ITAB'ın elde edildiği *Örtülü E. (Fe 37) yöntemindeki 2,52 mm'ye kadar, Y değeri 0,5 mm artırılarak elde edilmiş T_p değerleri Tablo 5.16'da gösterilmiştir. ITAB'lardaki sıcaklık dağılım eğrileri de Şekil 5.8.4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.16 Yöntemlere göre ITAB'da sıcaklık dağılımı (Hesaplanmıştır)

ITAB'da sıcaklık dağılımı (°C)								
Yöntem	Y (mm)							
	0	0,5	1	1,52	1,65	2	2,34	2,52
Örtülü E. (Fe 37)	1450	1113	905	759	730	661	606	580
*Örtülü E. (Fe 37)	1450	1185	1013	887	862	802	753	730



Şekil 5.8.4.1 On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çeliklerde ITAB'da sıcaklık dağılımları

5.8.5 Yöntemlere Göre Kalınlık Faktörlerinin Hesaplanması

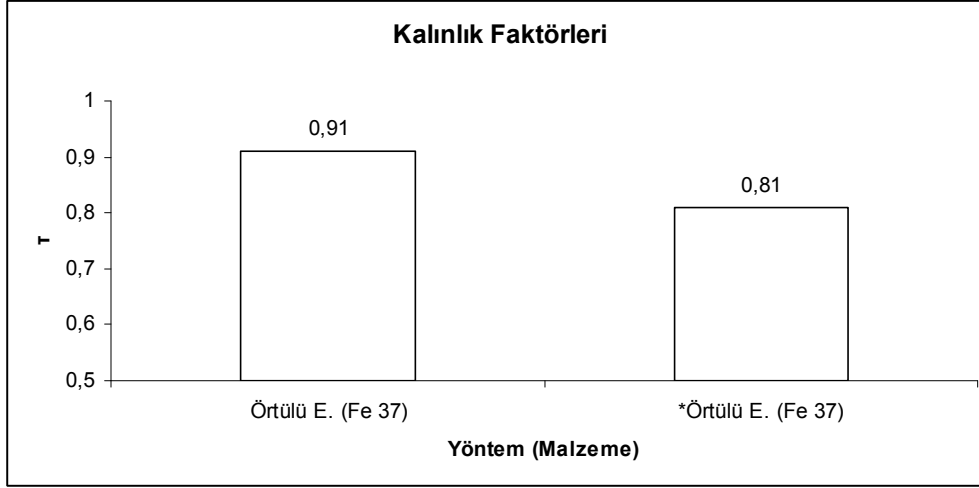
Soğuma hızının belirlenmesi için önce kalınlık faktörünün (τ) tespit edilmesi gerekmektedir. Kalınlık faktörlerinin tespiti için gereken veriler, Tablo 5.14'ten ve Şekil 5.8.1.1'den alınmış olup; Denklem (4.4) yardımıyla yöntemlere göre kalınlık faktörleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.8.5.1'de verilmiştir.

Örtülü el. (Fe 37) yöntemi için kalınlık faktörü;

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c_m (T_c - T_0)}{q}} = 10 \cdot \sqrt{\frac{0,0078 \cdot 0,44 (830 - 20)}{329}} = 0,91$$

*Örtülü el. (Fe 37) yöntemi için kalınlık faktörü;

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c_m (T_c - T_0)}{q}} = 10 \cdot \sqrt{\frac{0,0078 \cdot 0,44 (830 - 200)}{329}} = 0,81$$



Şekil 5.8.5.1 On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çeliklerde kalınlık faktörleri

5.8.6 Yöntemlere Göre Kaynak Eksenlerindeki Soğuma Hızlarının Hesaplanması

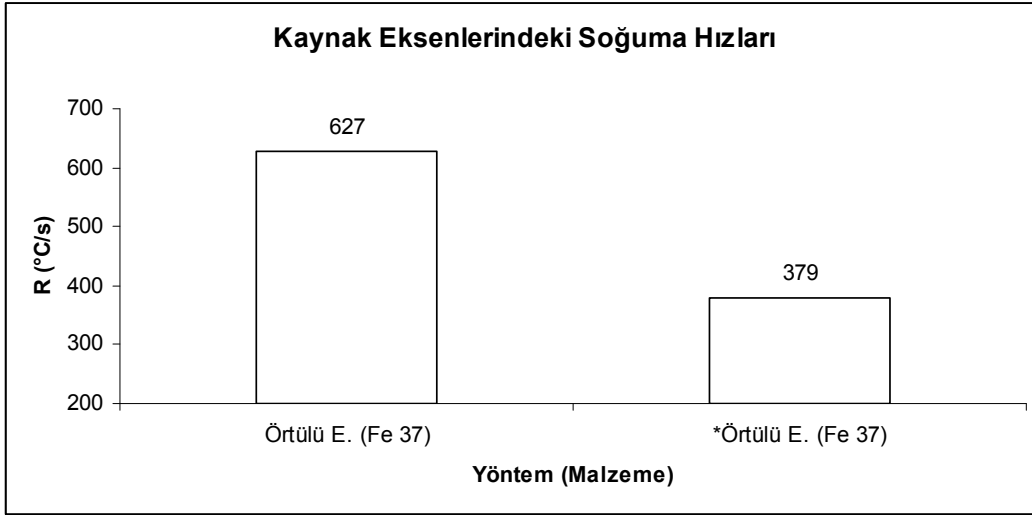
Bütün yöntemler için $\tau > 0,75$ olduğundan kalın parçalar için önerilen soğuma hızı formülü (Denklem 4.2) uygulanacaktır. Denklem (4.2)'den faydalanarak yöntemlere göre kaynak eksenindeki soğuma hızları hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.8.6.1'de verilmiştir.

Örtülü el. (Fe 37) yöntemi için kaynak eksenindeki soğuma hızı;

$$R = \frac{2\pi k (T_c - T_0)^2}{q} = \frac{2\pi \cdot 0,05 \cdot (830 - 20)^2}{329} = 627 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

*Örtülü el. (Fe 37) yöntemi için kaynak eksenindeki soğuma hızı;

$$R = \frac{2\pi k (T_c - T_0)^2}{q} = \frac{2\pi \cdot 0,05 \cdot (830 - 200)^2}{329} = 379 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$



Şekil 5.8.6.1 On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çeliklerde kaynak eksenlerindeki soğuma hızları

5.8.7 Örnek 4 İçin Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu örnek için şu ana kadar hesaplama ile elde edilen sonuçlar Tablo 5.17’de özetlenmiştir.

Tablo 5.17 On mm kalınlıklı ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çelikler üzerine dikiş çekilmesiyle elde edilen sonuçlar

Yöntem	Isı girdisi (J/mm)	Y ₁ (İri taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₂ (İnce taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₃ (Kısmen d. bölge genişliği) (mm)	Y _Z (Teorik ITAB genişliği) (mm)	τ (Kalınlık faktörü)	R (Kaynak eksenindeki soğuma hızı) (°C/s)
Örtülü E. (Fe 37)	329	0,43	0,585	0,635	1,65	0,91	627
*Örtülü E. (Fe 37)	329	0,59	0,87	1,06	2,52	0,81	379

Tablo 5.17’de, kalınlığın ve ön tavlamanın kaynak işlemine önemli etkileri olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir.

Kalınlığın artması neticesinde, bağlantı oluşturmak için daha fazla ısının tüketilmesi gerekmektedir. Bunun yanında, kalınlık ile birlikte soğuma hızının da artış gösterdiği görülmektedir. Bu örnekte kaynak parametreleri dört mm kalınlık için uygun seçilmiş idi. Dört mm kalınlık için soğuma hızını hesaplırsak (Fe 37 için);

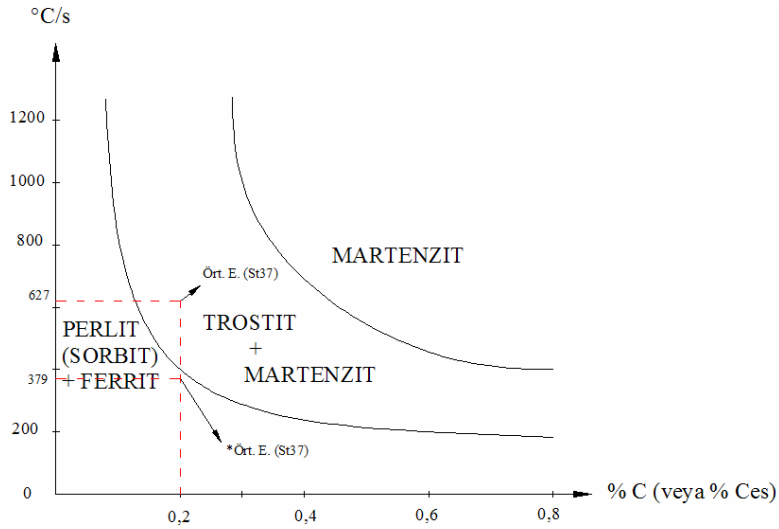
$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c_m (T_c - T_0)}{q}} = 4 \cdot \sqrt{\frac{0,0078 \cdot 0,44 (830 - 20)}{329}} = 0,36 \text{ bulunacak ve dolayısı ile ince parçalar}$$

için soğuma hızı denklemi ile;

$$R = 2\pi k \rho c_m \left(\frac{t}{q}\right)^2 (T_c - T_0)^3 = 2\pi \cdot 0,05 \cdot 0,0078 \cdot 0,44 \cdot \left(\frac{4}{329}\right)^2 \cdot (830 - 20)^3 = 85 \text{ }^\circ\text{C/s elde edilecek idi.}$$

Halbuki kalınlığın dört mm'den on mm'ye çıkması ile soğuma hızı yaklaşık 7,5 kat artarak; 627 °C/s'ye çıkmıştır. Yani diğer tüm parametreler sabit tutulmak koşuluyla, sadece malzeme kalınlığının artması soğuma hızını artırmaktadır denebilir.

Malzemeye ön tavlama uygulanması ile ITAB'ın daha geniş bir bölgede ortaya çıktığı ve soğuma hızının da azaldığı sonuçlardan okunabilir. Örnekte, ön tav uygulanmamış Fe 37 çelik malzemedeki soğuma hızının, ön tav uygulanmış olana nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Ön tavlama sonucu soğuma hızında meydana gelen bu azalma ile ön tav uygulanmış malzemenin kaynak bölgesinde, ön tav uygulanmamış malzemenin kaynak bölgesine nazaran, daha yumuşak fazların oluşacağı kanısına varılabilir. Bu durum Şekil 5.8.7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8.7.1 Ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 çelikler için soğuma hızlarına göre ITAB'da tahminen elde edilecek iç yapılar

Şekil 5.8.7.1'de, ön tavlama uygulanmamış ve ön tavlama uygulanmış Fe 37 çelikler için soğuma hızlarına göre ITAB'da tahminen elde edilecek iç yapılar gösterilmiştir. Fe 37 malzeme için $C_{es}=0,2$ bulunmuştu (Tablo 5.14). Ön tavlama uygulanmamış Fe 37 için hesaplanan soğuma hızı ve C_{es} değerlerine göre, elde edilecek iç yapının trostit + martenzit

olacağı; ancak ön tavlama uygulanmış Fe 37 için hesaplanan soğuma hızı ve C_{es} değerlerine göre elde edilecek iç yapının P (S) +F olacağı öngörülebilir.

Ön tavlama neticesinde ITAB'da erişilen tepe sıcaklık değerlerinde bir artış olduğu Tablo 5.16 ve Şekil 5.8.4.1'de görülmektedir. Bu durum, malzemelere ön tavlama uygulanmasının soğuma hızını azaltmasına karşın, tepe sıcaklıklarını yükselttiğini göstermektedir.

6. ISI TÜKETİMİ - MALZEME - KALINLIK İLİŞKİSİ İLE İLGİLİ TEORİK YAKLAŞIMLARDAN YARARLANILARAK YAPILMIŞ ÖRNEK TASARIM VE HESAPLAMALARDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Önceki bölümde, literatür taramasında ulaşılan ve kaynak işleminde ısı tüketimi - malzeme - kalınlık ilişkisine atıfta bulunan formüller ve çizelgelere yer verilmişti. Ayrıca bu teorik yaklaşımlar, yine literatürde verilen ve pratik uygulamalarda kullanılması önerilen parametrelerden faydalanmak suretiyle, örneklendirilmeye çalışılmıştı. Örneklerden elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Aynı kalınlıktaki aynı tip malzemelerin farklı ark yöntemleri ile kaynağında, ısı tüketimlerinin yönetime göre farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu durumun sebebi olarak, yönetime göre kaynak akımı, kaynak gerilimi ve kaynak hızının yanı sıra verim katsayısının değişimi gösterilebilir. Aynı zamanda yöntemin mekanize veya manuel uygulanmasının da, kaynak parametrelerine (akım, gerilim ve hız) doğrudan tesir ederek ısı tüketimini etkilediği düşünülmektedir.
2. Literatürde yalın karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için ITAB genişliğinin bulunmasına yönelik çeşitli örnekler mevcut olmasına karşın, ITAB'ı oluşturan iri taneli, ince taneli ve kısmen dönüşmüş bölge genişliklerinin bulunmasına yönelik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Literatürde, yalın karbonlu veya düşük alaşımlı çelikler için bir metalürjik değişimin oluşmadığı maksimum sıcaklığın yaklaşık 730 °C olduğu ve ergime sınırından 730 °C'lik bu sınır noktaya kadar olan kısmın ITAB genişliğini vereceği belirtilmektedir. Bu yaklaşımdan hareketle ve literatürde verilen iri taneli bölge sınır sıcaklıkları ($T_m - 1150$ °C), ince taneli bölge sınır sıcaklıkları (1150 - 900 °C) ve kısmen dönüşmüş bölge sınır sıcaklıkları (900 - 730 °C) kullanılarak, adı geçen bölgelerin genişliklerinin hesabı yapılmaya çalışılmıştır. Artan ısı girdisi ile ITAB'ı oluşturan bölge genişliklerinin ve dolayısı ile ITAB genişliğinin arttığı hesaplamalar sonrası ortaya çıkmıştır. Ayrıca aynı hesaplamalar paslanmaz çelikler için de yapılmış olup, böyle bir yaklaşımın paslanmaz çelikler için uygun olup olmadığı deneysel uygulamalar sonucunda görülecektir.
3. Teorik yaklaşımların örneklendirmelerinde, Bölüm 4.1.1'de tanımlanan, ITAB'da tepe sıcaklıklarının dağılımı da incelenmeye çalışılmıştır. Tepe sıcaklıklarının, ergime sınırından esas metal tarafına doğru gidildikçe azaldığı ve ulaşılan tepe sıcaklık değerlerinin yönetime göre tüketilen ısı miktarı ile doğru orantılı olarak değiştiği

görülmüştür. Diğer bir deyişle, artan ısı girdisiyle birlikte tepe sıcaklıklarının da artış gösterdiği söylenebilir.

4. Literatürde, ısı girdisinin artmasıyla soğuma hızının azalacağı belirtilmektedir. Bu durumu, örneklerde elde edilen soğuma hızı sonuçlarının da desteklediği görülmüştür.
5. Aynı kalınlıktaki farklı tip malzemelere aynı ısı girdisi uygulansa dahi, ITAB'ı oluşturan bölgelerin ve dolayısı ile ITAB genişliklerinin, tepe sıcaklık dağılımlarının ve soğuma hızlarının farklı olduğu hesaplamalar sonucunda görülmüştür. Bu farklılığa malzemelerin ısı iletkenliklerinin yol açtığı düşünülmektedir. Zira, yapılan örneklendirme sonuçlarında, literatür araştırması sonuçlarına paralel olarak, ısı iletkenliği yüksek olan malzemede ısı tüketiminin, ITAB genişliğinin, soğuma hızının yüksek olduğu görülmüştür. Tepe sıcaklıkları dağılımı da daha geniş bir bölgede oluşmuş olup, ITAB genişliğinin artmasını desteklemektedir. Isıl iletkenliği yüksek olan malzemede ısının, ısı iletkenliği düşük olan malzemeye nazaran çok daha hızlı iletilmesi bu durumun sebebi olarak verilebilir.
6. Kalınlığın da kaynak işlemi üzerine önemli etkiler yaptığı yapılan örneklendirmede görülmüştür. Literatürde, kalınlık ile birlikte ısı tüketiminin ve soğuma hızının artacağı; tepe sıcaklıklarının ise azalacağı belirtilmektedir. Yapılan örneklendirme sonuçlarında, ısı tüketiminin ve soğuma hızının kalınlıkla arttığı; tepe sıcaklıklarının ise azaldığı fark edilmiştir. Bu duruma sebep olarak, kalınlığın artmasının ısının kaynak bölgesinden uzaklaşmasına yardımcı bir faktör olması düşünülebilir.
7. Ön tavlamanın kaynak bölgesi özelliklerine etki ettiği, örnek uygulamadan ulaşılabilecek bir diğer önemli sonuç olarak verilebilir. Literatürde, ön tavlamanın ITAB genişliğini ve tepe sıcaklık değerlerini artırmasına rağmen, soğuma hızını düşürerek ITAB'da daha yumuşak iç yapıların oluşumunu teşvik ettiği belirtilmektedir. Elde edilen sonuçlar, bu durumu doğrularcasına, ön tavlama ile birlikte ITAB genişliğinin ve tepe sıcaklık değerlerinin arttığını, soğuma hızının ise düştüğünü göstermektedir. Ön tavlamanın kaynak bölgesi iç yapısına olan etkisi ise deneysel çalışma sonucunda irdelenecektir.
8. Literatürde, malzeme bileşimi ve soğuma hızına bağlı olarak kaynak sonrası elde edilecek iç yapının tahmininde kullanılan çeşitli diyagramlar mevcuttur. Elde edilen sonuçlar ile bu diyagramlardan faydalanılarak her örnek için bir tahminde bulunulmuş olup, sonuçların doğruluğu yapılan deneysel çalışma neticesinde ortaya çıkacaktır.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

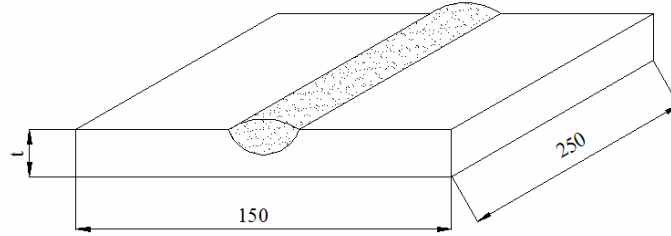
Bölüm 5'te ark esaslı yöntemlerde ısı tüketimi-malzeme-kalınlık ilişkisi, literatürden bulunan formüller ve çizelgelerle açıklanmaya çalışılmıştı. Ayrıca bu teorik yaklaşımlar örneklendirilerek elde edilen sonuçlar Bölüm 6'da verilmişti.

DeneySEL çalışmalarla Bölüm 5'te verilen örneklerin pratiğe dönüştürülmesi ve elde edilen sonuçların Bölüm 6'da verilen sonuçlar ile karşılaştırılarak doğruluklarının gösterilmesi amaçlanmıştır.

7.1 DeneySEL Metot Ve Numunelerin Hazırlanması

DeneySEL çalışmalarda, Bölüm 5'teki örneklemelerde belirtilen kalınlık ve tipteki malzemeler üzerine yine örneklemelerde belirtilen kaynak parametreleri ile dikişler çekilmiş, ITAB ve ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri ölçülmüş, ITAB ve kaynak metalinin mikroyapıları mikroskopta incelenmiş, kaynak bölgesinde sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Kaynak deney numuneleri 3, 6 ve 10 mm kalınlığında ve 150 x 250 mm ebatlarında giyotin makas ile kesilerek hazırlanmıştır. Kaynak dikişleri, yüzeye tek paso halinde çekilmiştir. Uygulamaların şematik gösterimi Şekil 7.1.1'de gösterilmiştir.



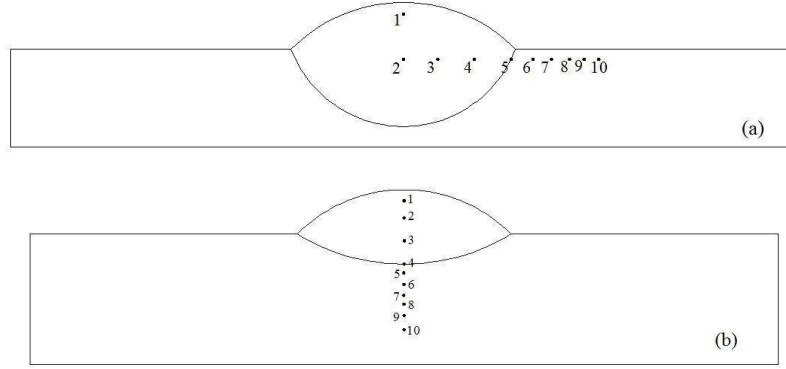
Şekil 7.1.1 Uygulamaların şematik gösterimi

Tüm deneySEL çalışmalarda kullanılan yöntemler, kaynak parametreleri, malzeme tipleri ve bileşimleri, elektrot tipleri ve bileşimleri her bir çalışma için ayrı başlık altında verilecektir.

Deney numuneleri dikiş çekildikten sonra atmosfer şartlarında soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra kaynak bölgesinden mikroskopta incelemek ve sertlik ölçmek üzere yine giyotin makasla numuneler kesilmiştir.

Sertlik ölçmek üzere çıkartılan numuneler sırasıyla 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800 ve 1000 mesh'lik zımparalar ile sulu döner disk yardımıyla zımparalanmıştır. Kaba parlatma işlemi Al_2O_3 , ince parlatma işlemi ise 6 μm ve 1 μm 'lik elmas parlatıcılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler HVS-1000 Vickers sertlik ölçüm cihazıyla 1 kg yük altında

yapılmıştır. Sertlik ölçümleri kaynak metali merkezinden başlayarak ana metale doğru ve iki şekilde gerçekleştirilmiştir. Tam nüfuziyetli uygulamalarda yüzeye paralel, tam nüfuziyetin olmadığı uygulamalarda ise yüzeye dik şekilde yapılmıştır. Ölçümlerin şematik gösterimi Şekil 7.1.2’de verilmiştir.



(a-tam nüfuziyetli, b-tam nüfuziyetin olmadığı durum)

Şekil 7.1.2 Sertlik ölçümlerinin şematik gösterimi

Mikroskopta incelemek üzere çıkartılan numuneler sırasıyla 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800 ve 1000 mesh’lik zımparalar ile sulu döner disk yardımıyla zımparalanmıştır. Kaba parlatma işlemi Al_2O_3 , ince parlatma işlemi ise $6 \mu m$ ve $1 \mu m$ ’lik elmas parlatıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fe 37 malzemeler %4 nital çözeltisi ile AISI 304 tip paslanmaz numuneler ise gliserin (45ml), nitrik asit (15 ml) ve hidroklorik asit (30 ml) karışımı ile dağlanmıştır. Mikroyapıların görüntülenmesinde XJP-6A Işık Metal Mikroskobu kullanılmıştır.

ITAB ve ITAB’ı oluşturan bölgeler, uygulamaya göre mikroskop altında veya kumpas ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmada kullanılan mikroskopta en küçük 100X büyütme mevcut olduğundan, bu büyütmenin yeterli olduğu uygulamalarda mikroskop kullanılmıştır. Yeterli olmadığı durumlarda (daha küçük büyütmenin gerekli olduğu durumlarda) dağlama sonucu gözle görülebilen ITAB’ın genişliği kumpas ile ölçülmeye çalışılmıştır. Her iki durumda da 5’er ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır.

Bölüm 5’te dört adet örnek uygulama yapılmıştı. Bu bakımdan deneysel çalışmalar da dört başlık altında toplanmıştır.

7.2 Deneysel Çalışma 1

Bu çalışmada Örtülü Elektrot ve MAG yöntemleri ile üç mm kalınlığındaki Fe 37 kaynak numuneleri üzerine dikişler çekilerek; ITAB genişlikleri ölçülmüş, kaynak bölgesinden mikroyapı resimleri alınmış ve yine kaynak bölgesinde sertlik ölçümü yapılmıştır.

Örtülü Elektrot ile uygulamada Φ 4mm Rutil tip TS 563 EN 499: E 42 0 RR 12 elektrot, MAG uygulamasında ise Φ 1,2 mm TS 5618 EN 440 : G3 Si1 elektrot kullanılmıştır.

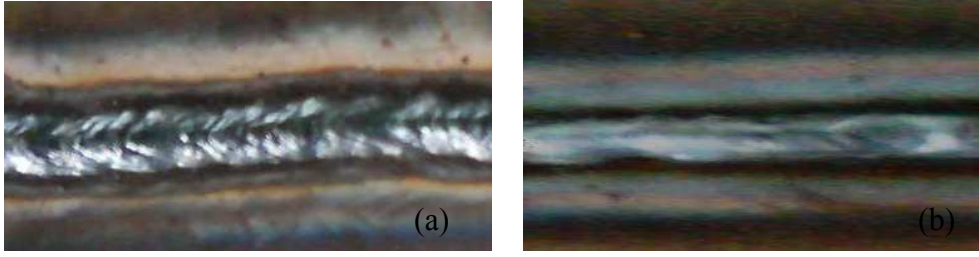
Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri, malzeme tipleri ve bileşimleri, elektrot tipleri ve bileşimleri, elektrot ve esas malzeme için karbon eşdeğerleri Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1 Deneysel çalışma 1 için malzeme ve elektrot bileşimleri ile kaynak parametreleri

Yöntem	Esas Malzeme (Kalınlık)	Akım Şiddeti (A)	Kaynak Gerilimi (V)	Kaynak Hızı (mm/dk)
Örtülü Elektrot	Fe 37 (3mm)	115	25	400
MAG	Fe 37 (3mm)	130	19	400

Fe 37 Malzeme Bileşimi*							
%C	%Mn	%P	%S	%N	%Si	$C_{eş}$ $\left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right)$	
0,15	0,3	0,04	0,05	0,007	0,40	0,2	
*Literatürden alınmış ortalama değerlerdir.							
Örtülü Elektrot ve MAG Yöntemlerinde Kullanılan Elektrotlar ve Bileşimleri							
Yöntem	%C	%Mn	%P	%S	%Cu	%Si	$C_{eş}$ $\left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right)$
Örtülü Elektrot	0,08	0,5	-	-	-	0,4	0,163
MAG	0,07-0,1	1,4-1,6	0,025	0,025	0,3	0,7-1	Bileşimdeki Mn \leq %1 olmadığından $C_{eş}$ formülleri geçerli değildir.

Örtülü elektrot ve MAG yöntemleri ile çekilmiş dikişler Şekil 7.2.1’de verilmiştir.



Şekil 7.2.1 Örtülü elektrot (a) ve MAG (b) yöntemleri ile çekilen dikişler

7.2.1 Deneysel Çalışma 1 İçin ITAB Genişlikleri Ölçüm Sonuçları

Bu çalışma için ITAB ve ITAB’ı oluşturan bölgeler, mikroskop altında ölçülememiştir. Çünkü deneysel çalışmada kullanılan mikroskopta en küçük büyütme olan 100X, bu uygulama için büyük gelmiştir. Bu nedenle, dağlama sonucu gözle görülebilen ITAB’ın genişliği kumpas ile ölçülmeye çalışılmıştır. 5’er adet ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Şekil 7.2.1.1’de Örtülü Elektrot ve MAG yöntemleri için ITAB genişlikleri, Tablo 7.2’de de her iki yöntem için ölçülen ve teorik ITAB genişlikleri toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.2.1.1 Örtülü Elektrot (a) ve MAG (b) yöntemleri için ITAB genişlikleri

Tablo 7.2 Deneysel çalışma 1 için teorik ve ölçülen ITAB genişlikleri

Yöntem	Teorik ITAB genişliği (mm)	Ölçülen ITAB genişliği (mm)
Örtülü Elektrot	4,67	4,4
MAG	4,94	4,7

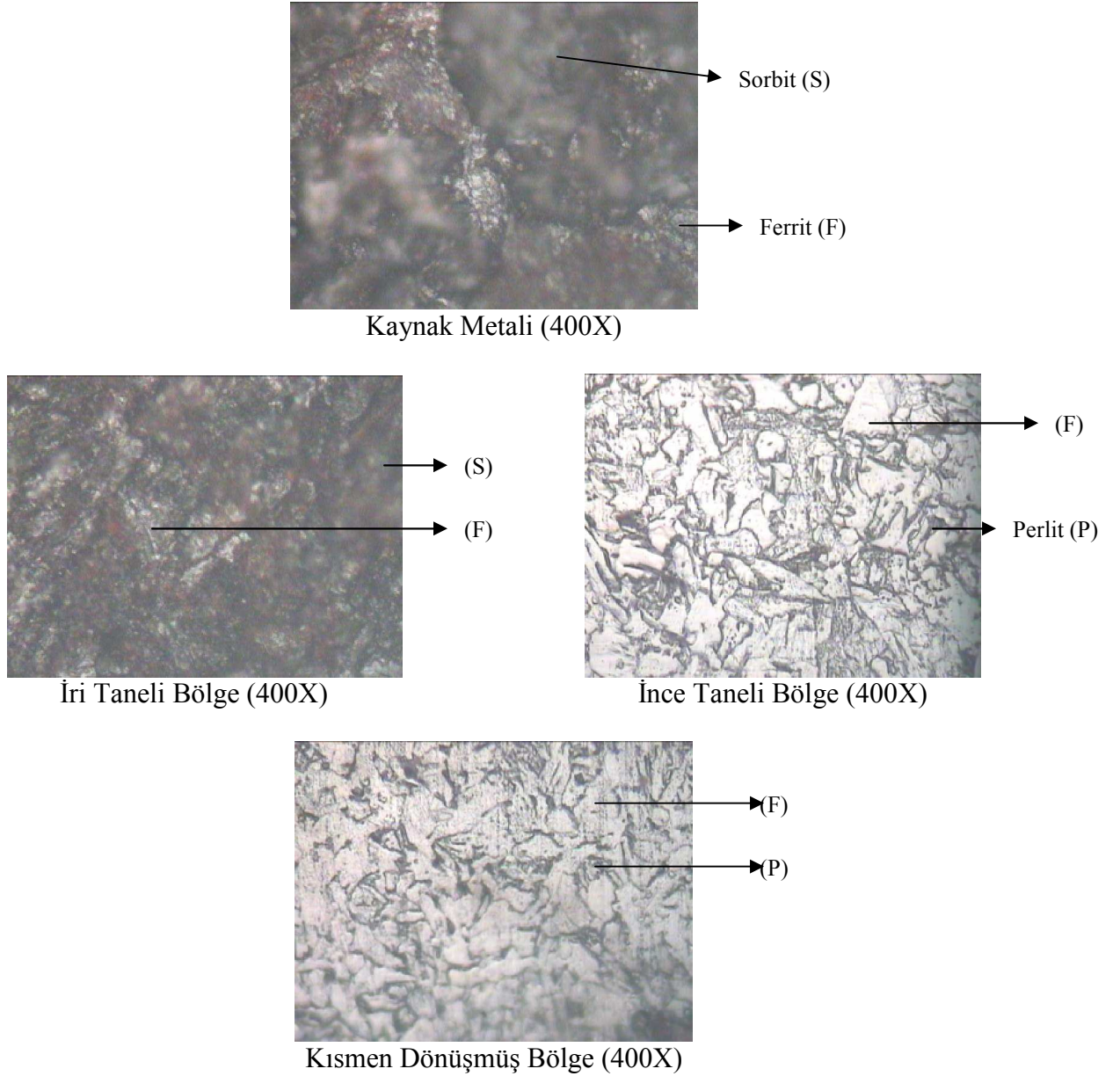
Görüldüğü üzere Bölüm 5’te Örnek 1 için hesaplanan teorik ITAB genişlikleri ile deneysel uygulama sonuçları birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.

7.2.2 Deneysel Çalışma 1 İçin Mikroyapı İncelemesi Ve Sertlik Ölçümleri Sonuçları

Mikroyapı ve sertlik ölçüm sonuçları her bir uygulama için ayrı başlık altında verilmiştir.

7.2.2.1 Örtülü Elektrot Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

Şekil 7.2.2.1.1'de örtülü elektrot uygulamasının kaynak bölgesi resimleri, Tablo 7.3'te de teorik ve deneysel uygulama sonucu elde edilen mikroyapılar toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.2.2.1.1 Örtülü El. uygulaması için kaynak bölgesinden alınan mikroyapı resimleri

Tablo 7.3 Örtülü E. uygulaması için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar

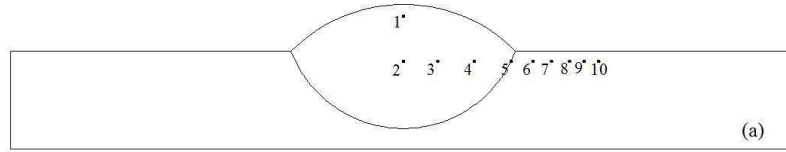
Örtülü Elektrot Uygulaması İçin Elde Edilen Mikroyapılar			
Teorik Kaynak Metali Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen Kaynak Metali Mikroyapısı	Teorik ITAB Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen ITAB Mikroyapısı
--	Sorbit+Ferrit	Perlit (Sorbit)+Ferrit	Sorbit+Ferrit

Mikroyapı resimlerinden Bölüm 5'te Örnek 1'de belirtilen ve ITAB'da oluşacağı öngörülen Perlit (Sorbit) + Ferrit yapıların, deney sonucunda elde edildiği görülmektedir.

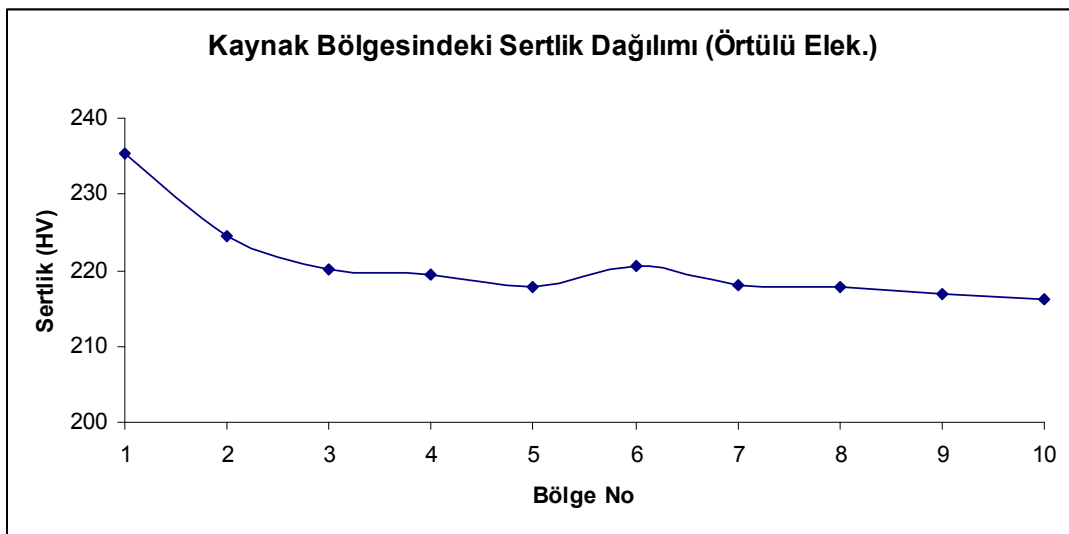
7.2.2.2 Örtülü Elektrot Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sertlik ölçümleri kaynak metali merkezinden başlayarak ana metale doğru 1 kg yük altında yapılmış ve sonuçlar Tablo 7.4'te ve Şekil 7.2.2.2.1'de verilmiştir.

Tablo 7.4 Örtülü El. uygulaması için yapılan sertlik ölçümü sonuçları



Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sertlik	235,4	224,4	220,1	219,4	217,8	220,5	218,1	217,8	216,9	216,3

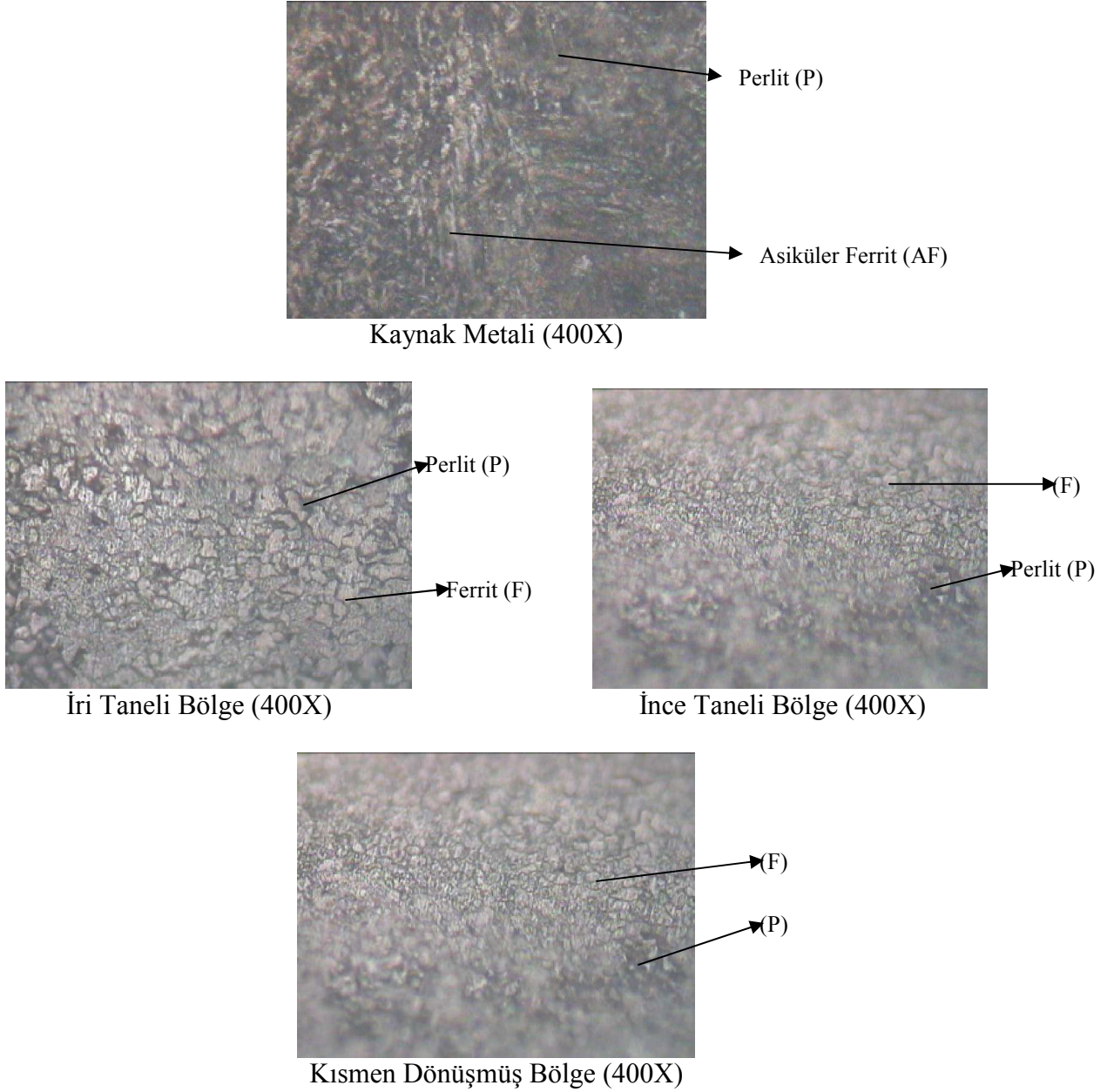


Şekil 7.2.2.2.1 Örtülü Elektrot uygulaması için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı

Şekil 7.2.2.2.1 ve Tablo 7.4'ten de görüldüğü üzere kaynak metalinin sertliği ITAB'dan daha fazla çıkmıştır. Bunun sebebi olarak kaynak metalinin ITAB'dan daha hızlı soğuması sonucu elde edilen yapıların, ITAB'da elde edilen yapılardan daha sert olması düşünülmektedir.

7.2.2.3 MAG Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

Şekil 7.2.2.3.1'de MAG uygulamasının kaynak bölgesi resimleri, Tablo 7.5'te de teorik ve deneysel uygulama sonucu elde edilen mikroyapılar toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.2.2.3.1 MAG uygulaması için kaynak bölgesinden alınan mikroyapı resimleri

Tablo 7.5 MAG uygulaması için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar

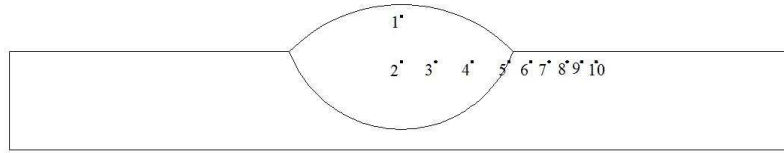
MAG Uygulaması İçin Elde Edilen Mikroyapılar			
Teorik Kaynak Metali Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen Kaynak Metali Mikroyapısı	Teorik ITAB Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen ITAB Mikroyapısı
--	P+AF	P (S) + F	P + F

Mikroyapı resimlerinden Bölüm 5'te Örnek 1'de belirtilen ve ITAB'da oluşacağı öngörülen Perlit (Sorbit) + Ferrit yapıların, deney sonucunda elde edildiği görülmektedir.

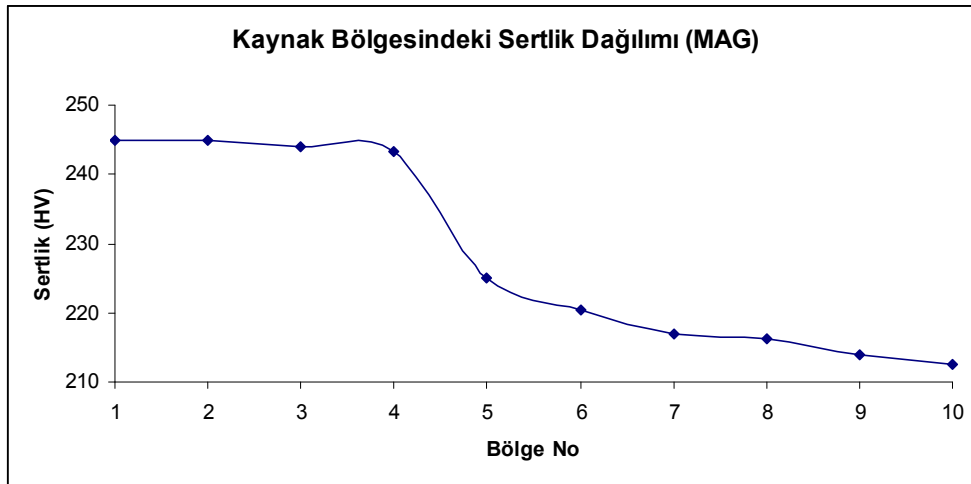
7.2.2.4 MAG Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sertlik ölçümleri kaynak metali merkezinden başlayarak ana metale doğru 1 kg yük altında yapılmış ve sonuçlar Tablo 7.6'te ve Şekil 7.2.2.4.1'de verilmiştir.

Tablo 7.6 MAG uygulaması için yapılan sertlik ölçümü sonuçları



Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sertlik	245	244,8	243,9	243,4	225,1	220,3	217	216,2	214	213



Şekil 7.2.2.4.1 MAG uygulaması için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı

Şekil 7.2.2.4.1 ve Tablo 7.6'dan da görüldüğü üzere kaynak metalinin sertliği ITAB'dan daha fazla çıkmıştır. Bunun sebebi olarak kullanılan elektrottaki alaşım elementleri miktarının, esas metaldekilerden daha fazla olması verilebilir. Böylece kaynak metalinin sertleştiği düşünülmektedir.

7.3 Deneysel Çalışma 2

Bu çalışmada TIG ve Plazma yöntemleri ile üç mm kalınlıklı AISI 304 tip paslanmaz kaynak numuneleri üzerine dikişler çekilerek; ITAB genişlikleri ölçülmüş, kaynak bölgesinden mikroyapı resimleri alınmış ve yine kaynak bölgesinde sertlik ölçümü yapılmıştır.

TIG uygulamasında Φ 1,2mm ER 316 LSi tip kaynak teli kullanılmış, plazma uygulamasında ise kaynak teli kullanılmamıştır.

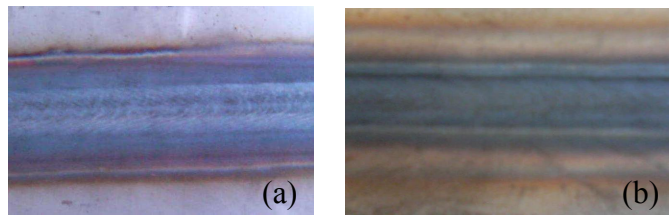
Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri, malzeme tipleri ve bileşimleri, elektrot tipleri ve bileşimleri, elektrot ve esas malzeme için krom ve nikel eşdeğerleri Tablo 7.7’de verilmiştir.

Tablo 7.7 Deneysel çalışma 2 için malzeme ve elektrot bileşimleri ile kaynak parametreleri

Yöntem	Esas Malzeme (Kalınlık)	Akım Şiddeti (A)	Kaynak Gerilimi (V)	Kaynak Hızı (mm/dk)
TIG	AISI 304 (3mm)	160	15	500
Plazma	AISI 304 (3mm)	120	15	180

AISI 304 Malzeme Bileşimi*								
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni	Cr _{eş}	Ni _{eş}
0,08	2	0,045	0,03	1	18	8	19,5	11,4
*Literatürden alınmış ortalama değerlerdir.								
TIG ve Plazma Yöntemlerinde Kullanılan Elektrotlar ve Bileşimleri								
Yöntem	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	Cr _{eş}	Ni _{eş}
TIG	<0,03	1-2,5	0,65-1	18-20	11-14	2-3	22,7	14,2
Plazma	Ek kaynak teli kullanılmamıştır.							

TIG ve Plazma yöntemleri ile çekilmiş dikişler Şekil 7.3.1’de verilmiştir.



Şekil 7.3.1 TIG (a) ve Plazma (b) yöntemleri ile çekilen dikişler

7.3.1 Deneysel Çalışma 2 İçin ITAB Genişlikleri Ölçüm Sonuçları

Bu çalışma için ITAB ve ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri mikroskop altında veya kumpas ile ölçülemedi. Çünkü ITAB'da, Deneysel Çalışma 1'de olduğu gibi, faz dönüşümleri veya tane irileşmesi ve küçülmesi gibi değişimler görülmemiştir. Ayrıca dağlama neticesinde ITAB sınırları da gözlenemedi. Bu nedenle Deneysel Çalışma 2 için ITAB veya ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri sadece teorik olarak Tablo 7.8'de gösterilmiştir.

Tablo 7.8 Deneysel çalışma 2 için teorik ITAB genişlikleri

Yöntem	Teorik ITAB genişliği (mm)	Ölçülen ITAB genişliği (mm)
TIG	4,16	--
Plazma	3,11	--

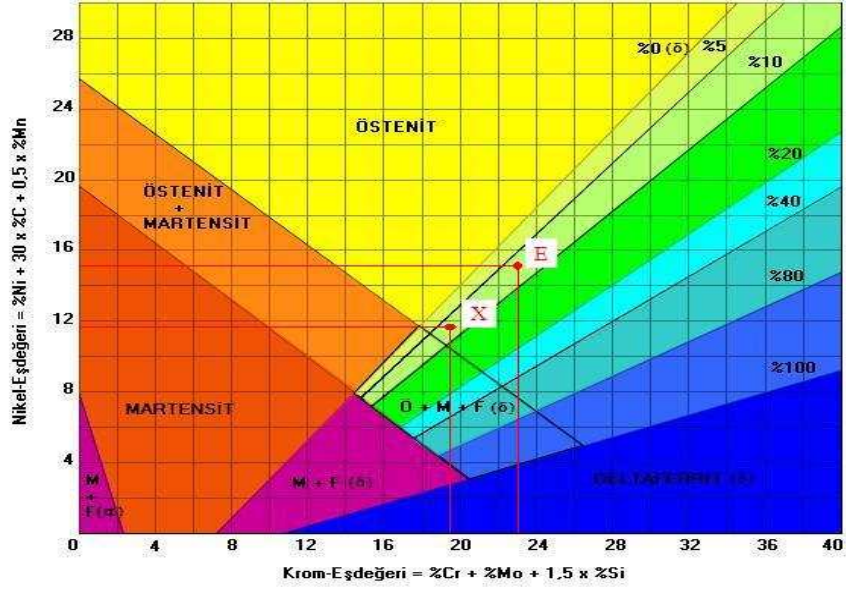
7.3.2 Deneysel Çalışma 2 İçin Mikroyapı İncelemesi Ve Sertlik Ölçümleri Sonuçları

Mikroyapı ve sertlik ölçüm sonuçları her bir uygulama için ayrı başlık altında verilmiştir.

7.3.2.1 TIG Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

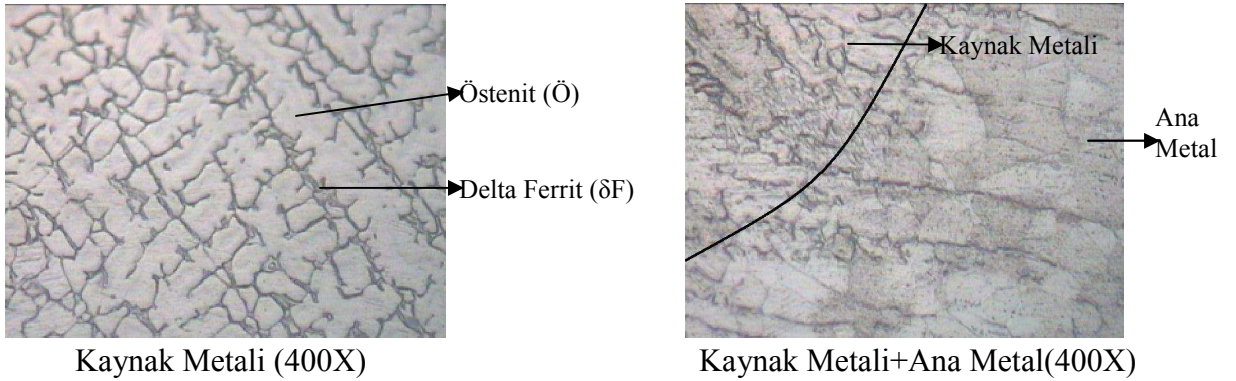
Bölüm 5, Örnek Uygulama 2'nin Sonuçlar kısmında TIG uygulaması için benzer bileşimde kaynak teli kullanılması durumunda kaynak metalinin mikroyapısının esas metalle aynı olacağı belirtilmişti.

Esas metal (AISI 304) ve kaynak telinin (ER 316 LSi) krom ve nikel eşdeğerleri hesaplanarak, Şekil 7.3.2.1.1'deki Schaeffler Diyagramı üzerinde kaynak metalinin tahmin edilen iç yapısı gösterilmiştir. Burada kaynak metalinin $\text{Ö}+\delta\text{F}$ içereceği görülmektedir.



Şekil 7.3.2.1.1 TIG yöntemi için kaynak metalinin iç yapısı (X-Ana metal, E-Elektrot)

Şekil 7.3.2.1.2'de TIG yönteminde mikroskop ile alınan kaynak bölgesi resimleri, Tablo 7.9'da da teorik ve deneysel uygulama sonucu elde edilen mikroyapılar toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.3.2.1.2 TIG yöntemi için kaynak metalinin mikroyapı resimleri

Östenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin üretimlerinde, sıvı halden itibaren katılaşma başlayınca, östenit ve δ -ferrit taneleri oluşmaya başlar. Bu ferrit, östenitin dönüşümü sonucunda ortaya çıkan ferritten farklıdır. Katılaşma sonunda çeliklerin yapısı östenit taneleri arasında serpilmiş δ -ferrit tanelerinden oluşur. Bu faz, krom ve ferriti dengeleyen elementler yönünden zengin, nikel ve östeniti dengeleyen elementler yönünden fakirdir. Bu fazın sürekli olarak tane sınırlarında bulunması korozyon direncini azaltır (Tülbentçi, 1998).

Tablo 7.9 TIG uygulaması için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar

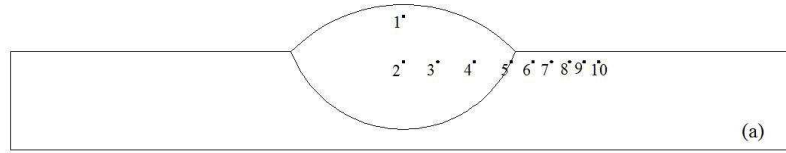
TIG Uygulaması İçin Elde Edilen Mikroyapılar			
Teorik Kaynak Metali Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen Kaynak Metali Mikroyapısı	Teorik ITAB Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen ITAB Mikroyapısı
Ö+δF	Ö+δF	--	--

Mikroyapı resimlerinden, kaynak metalinde mikroyapının Ö+δF olarak ortaya çıktığı görülmektedir.

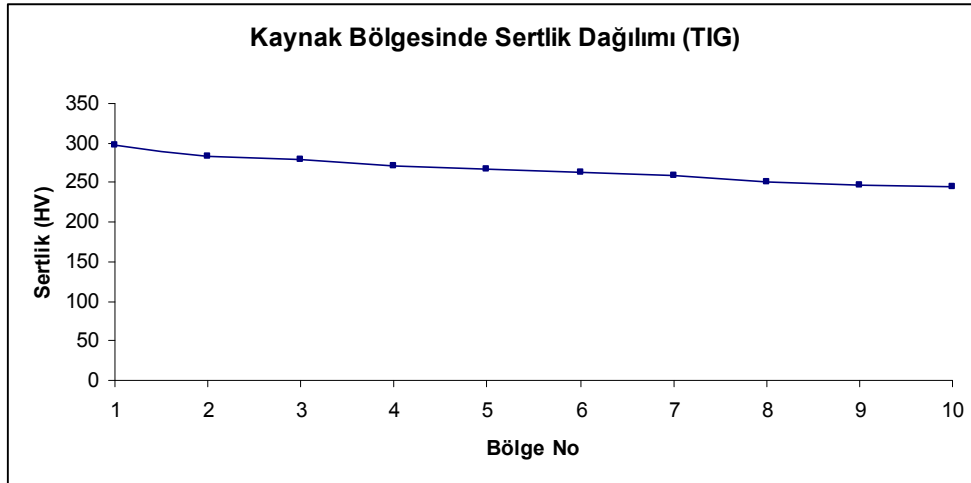
7.3.2.2 TIG Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sertlik ölçümleri kaynak metali merkezinden başlayarak ana metale doğru 1 kg yük altında yapılmış ve sonuçlar Tablo 7.10'da ve Şekil 7.3.2.2.1'de verilmiştir.

Tablo 7.10 TIG uygulaması için yapılan sertlik ölçümü sonuçları



Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sertlik	298	284	279	272	267	262,5	258,7	250,2	246,5	244,1



Şekil 7.3.2.2.1 TIG uygulaması için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı

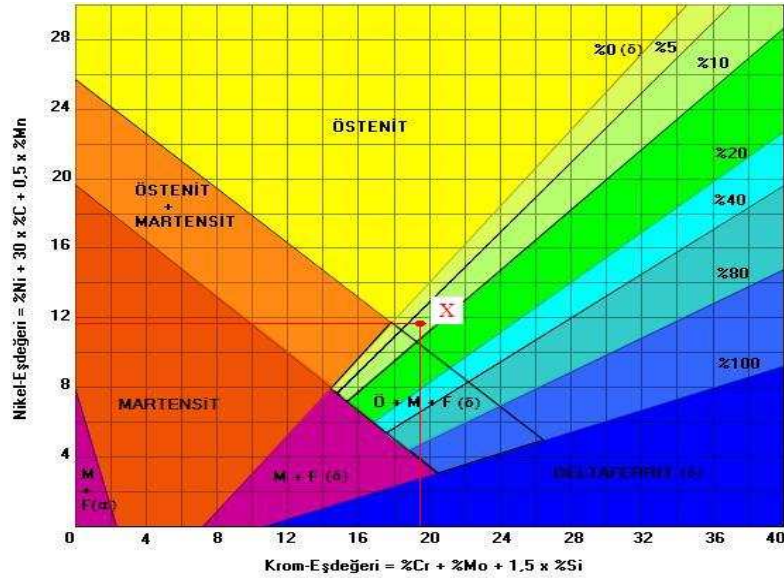
Şekil 7.3.2.2.1 ve Tablo 7.10'dan de görüldüğü üzere kaynak metalinin sertliği ITAB'dan daha fazla çıkmıştır. Bu duruma sebep olarak kaynak metalinde oluşan delta ferrit fazı

gösterilebilir. Literatürde de delta ferritin paslanmaz çelik kaynaklarında mekanik özellikleri olumsuz etkilediği ve sertleşmeye sebep olduğu belirtilmektedir (Kaluç ve Taban, 2004).

7.3.2.3 Plazma Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

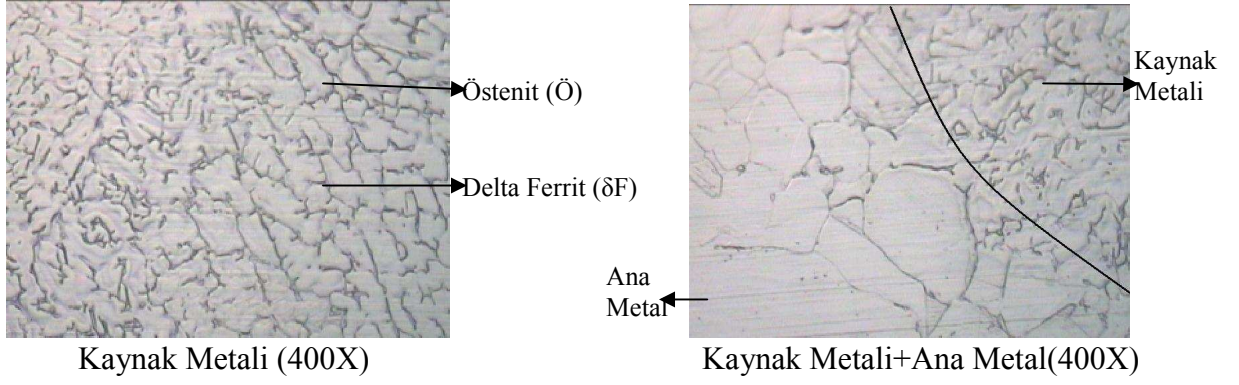
Bölüm 5, Örnek Uygulama 2'nin Sonuçlar kısmında Plazma uygulaması için benzer bileşimde kaynak teli kullanılması durumunda kaynak metalinin mikroyapısının esas metalle aynı olacağı belirtilmiştir.

Deneyisel uygulamada kaynak teli kullanılmadığından, kaynak metalinin esas metal (AISI 304) ile aynı iç yapıya sahip olması gerektiği düşünülebilir. Buradan hareketle esas metal (AISI 304) krom ve nikel eşdeğerleri hesaplanarak, Şekil 7.3.2.3.1'deki Schaeffler Diyagramı üzerinde kaynak metalinin tahmin edilen iç yapısı gösterilmiştir. Burada kaynak metalinin esas metal ile aynı bileşimde olacağı ve Ö+δF içereceği görülmektedir.



Şekil 7.3.2.3.1 Plazma yöntemi için kaynak metalinin iç yapısı (X-Ana metal)

Şekil 7.3.2.3.2'de plazma yönteminde deneysel olarak elde edilmiş kaynak bölgesi resimleri, Tablo 7.11'de de teorik ve deneysel uygulama sonucu elde edilen mikroyapılar toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.3.2.3.2 Plazma yöntemi için kaynak metalinin mikroyapı resimleri

Tablo 7.11 Plazma uygulaması için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar

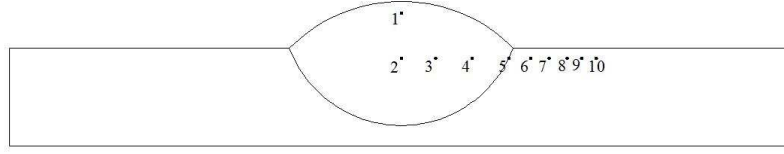
Plazma Uygulaması İçin Elde Edilen Mikroyapılar			
Teorik Kaynak Metali Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen Kaynak Metali Mikroyapısı	Teorik ITAB Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen ITAB Mikroyapısı
Ö+δF	Ö+δF	--	--

Mikroyapı resimlerinden, kaynak metalinde mikroyapının Ö+δF olarak ortaya çıktığı görülmektedir.

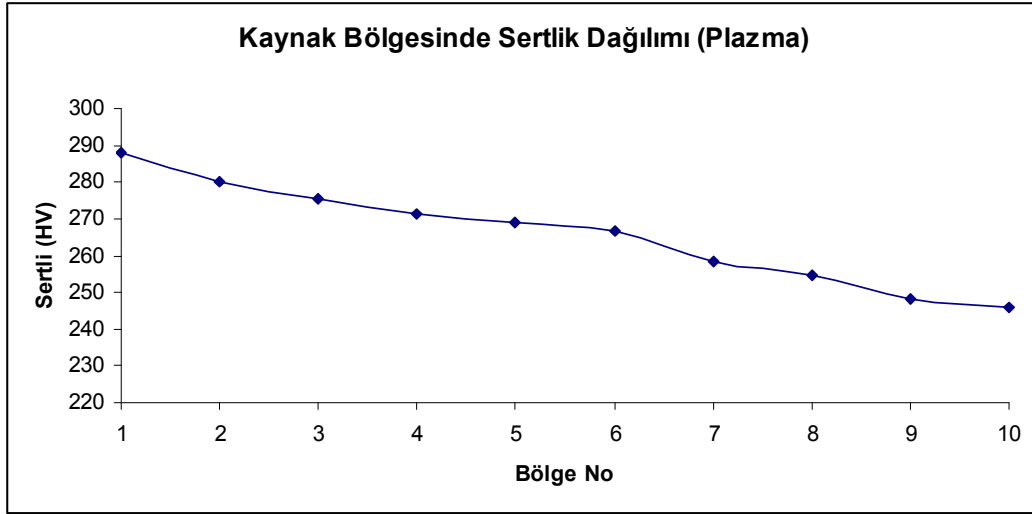
7.3.2.4 Plazma Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sertlik ölçümleri kaynak metali merkezinden başlayarak ana metale doğru 1 kg yük altında yapılmış ve sonuçlar Tablo 7.12'de ve Şekil 7.3.2.4.1'de verilmiştir.

Tablo 7.12 Plazma uygulaması için yapılan sertlik ölçümü sonuçları



Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sertlik	288	280,3	275,6	271,1	269	266,5	258,2	254,7	248,4	246,1



Şekil 7.3.2.4.1 Plazma uygulaması için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı

Şekil 7.3.2.4.1 ve Tablo 7.12'den de görüldüğü üzere kaynak metalinin sertliği ITAB'dan daha fazla çıkmıştır. Bu duruma sebep olarak kaynak metalinde oluşan delta ferrit fazı gösterilebilir.

7.4 Deneysel Çalışma 3

Bu çalışmada Toz Altı yöntemiyle altı mm kalınlıklı Fe 37 çelik ve AISI 304 paslanmaz çelik kaynak numuneleri üzerine dikişler çekilerek; ITAB genişlikleri ölçülmüş, kaynak bölgesinden mikroyapı resimleri alınmış ve yine kaynak bölgesinde sertlik ölçümü yapılmıştır.

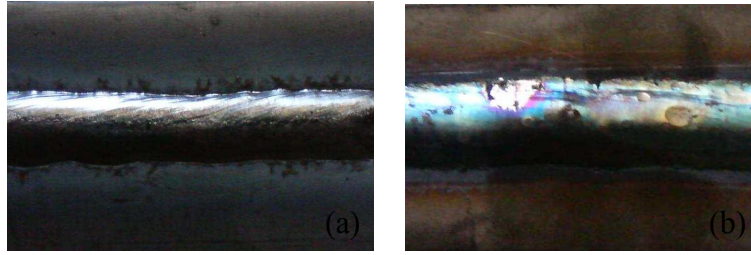
Uygulamalarda Φ 2mm TS 5387: S2 elektrot ve TS 5387 EN 756: S 38 3 AB S2 tip kaynak tozu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri, malzeme tipleri ve bileşimleri, elektrot tipi ve bileşimi, kaynak tozu ve bileşimi, elektrot ve esas malzeme için karbon eşdeğerleri, krom ve nikel eşdeğerleri Tablo 7.13'te verilmiştir.

Tablo 7.13 Deneysel çalışma 3 için malzeme ve elektrot bileşimleri ile kaynak parametreleri

Yöntem	Esas Malzeme (Kalınlık)	Akım Şiddeti (A)	Kaynak Gerilimi (V)	Kaynak Hızı (mm/dk)
Toz Altı (Fe 37)	Fe 37 (6mm)	250	26	1200
Toz Altı (304)	AISI 304 (6mm)	250	26	1200

Fe 37 ve AISI 304 Malzeme Bileşimi*										
	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	% Ni	C _{eş}	Cr _{eş}	Ni _{eş}
Fe 37	0,15	0,3	0,04	0,05	0,40	-	-	0,2	0,6	4,65
AISI 304	0,08	2	0,045	0,03	1	18	8	Mn \geq %1, Cr \geq %1 ve Ni \geq % 3,5 olduğundan C _{eş} formülleri geçerli değildir.	19,5	11,4
*Literatürden alınmış ortalama değerlerdir.										
Toz Altı (Fe 37) ve Toz Altı (304) Yöntemlerinde Kullanılan Elektrot, Kaynak Tozu ve Bileşimleri										
Yöntem	%C	%Mn	%P	%S	%Si	C _{eş}	Cr _{eş}	Ni _{eş}		
Elektrot	0,1	1,1	<0,025	<0,025	0,1	Mn \leq %1 olmadığından C _{eş} formülleri geçerli değildir.	0,15	3,55		
Kaynak Tozu	0,06-0,07	1,2-1,5	--	--	0,25-0,35	Mn \leq %1 olmadığından C _{eş} formülleri geçerli değildir.	0,45	2,625		

Toz Altı (Fe 37) ve Toz Altı (304) yöntemleri ile çekilmiş dikişler Şekil 7.4.1’de verilmiştir.

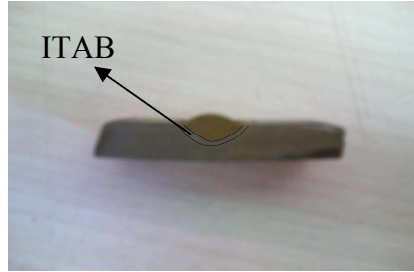


Şekil 7.4.1 Toz Altı (Fe 37) (a) ve Toz Altı (304) (b) yöntemleri ile çekilen dikişler

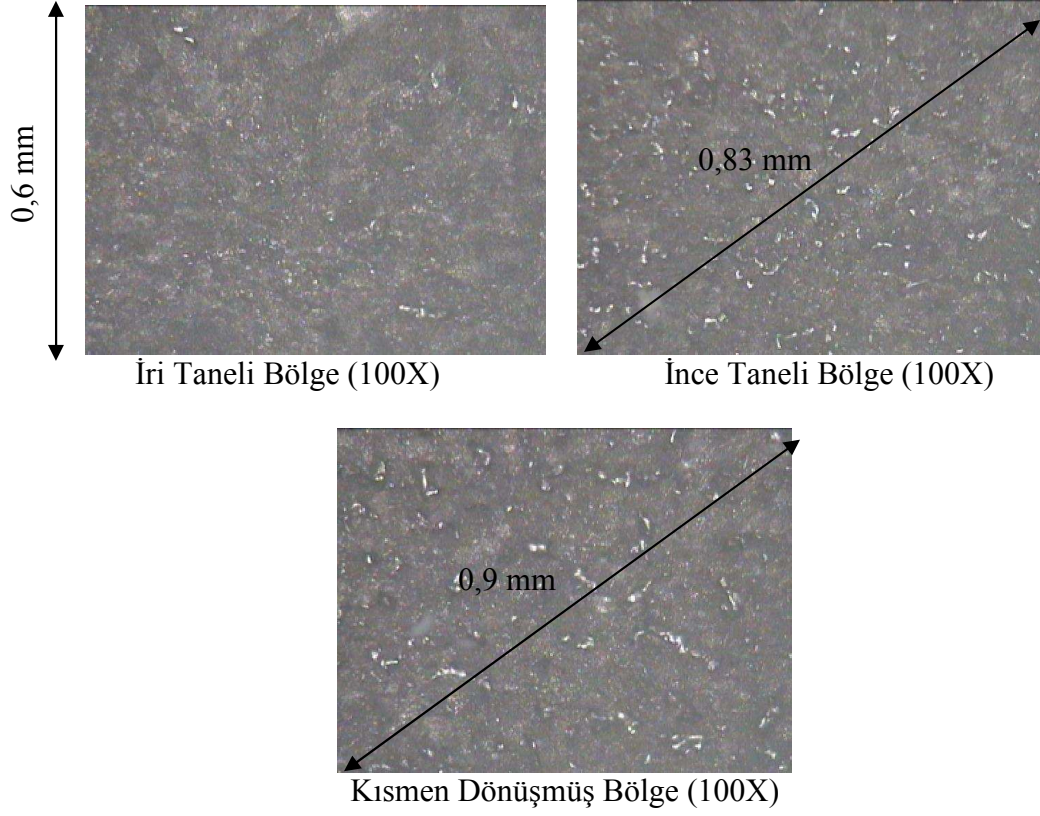
7.4.1 Deneysel Çalışma 3 İçin ITAB Genişlikleri Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada Fe 37 için ITAB ve ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişliklerine mikroskop altında bakılmış; fakat AISI 304 için ölçüm gerçekleştirilememiştir. Çünkü AISI 304 malzemenin ITAB’ında, faz dönüşümleri veya tane irileşmesi ve küçülmesi gibi değişimler görülmemiştir. Ayrıca dağlama neticesinde ITAB sınırları da gözlenememiştir. Bu nedenle AISI 304 için ITAB veya ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişlikleri sadece teorik olarak Tablo 7.14’te gösterilmiştir.

Şekil 7.4.1.1’de ve Şekil 7.4.1.2’de Toz Altı (Fe 37) için ITAB’ı oluşturan bölge resimleri, Tablo 7.14’te de her iki yöntem için ölçülen ve teorik ITAB genişlikleri toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.4.1.1 Toz Altı (Fe 37) için ITAB genişliği



Şekil 7.4.1.2 Toz Altı (Fe 37) için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliği

Tablo 7.14 Deneysel çalışma 3 için teorik ve ölçülen ITAB genişlikleri

Yöntem		Y ₁ (İri taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₂ (İnce taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₃ (Kısmen d. bölge genişliği) (mm)	Y _Z (ITAB genişliği) (mm)
Teorik	Toz Altı (Fe 37)	0,67	0,92	0,98	2,57
	Toz Altı (304)	0,585	0,865	0,93	2,38
Ölçülen	Toz Altı (Fe 37)	0,6	0,83	0,9	2,33
	Toz Altı (304)	--	--	--	--

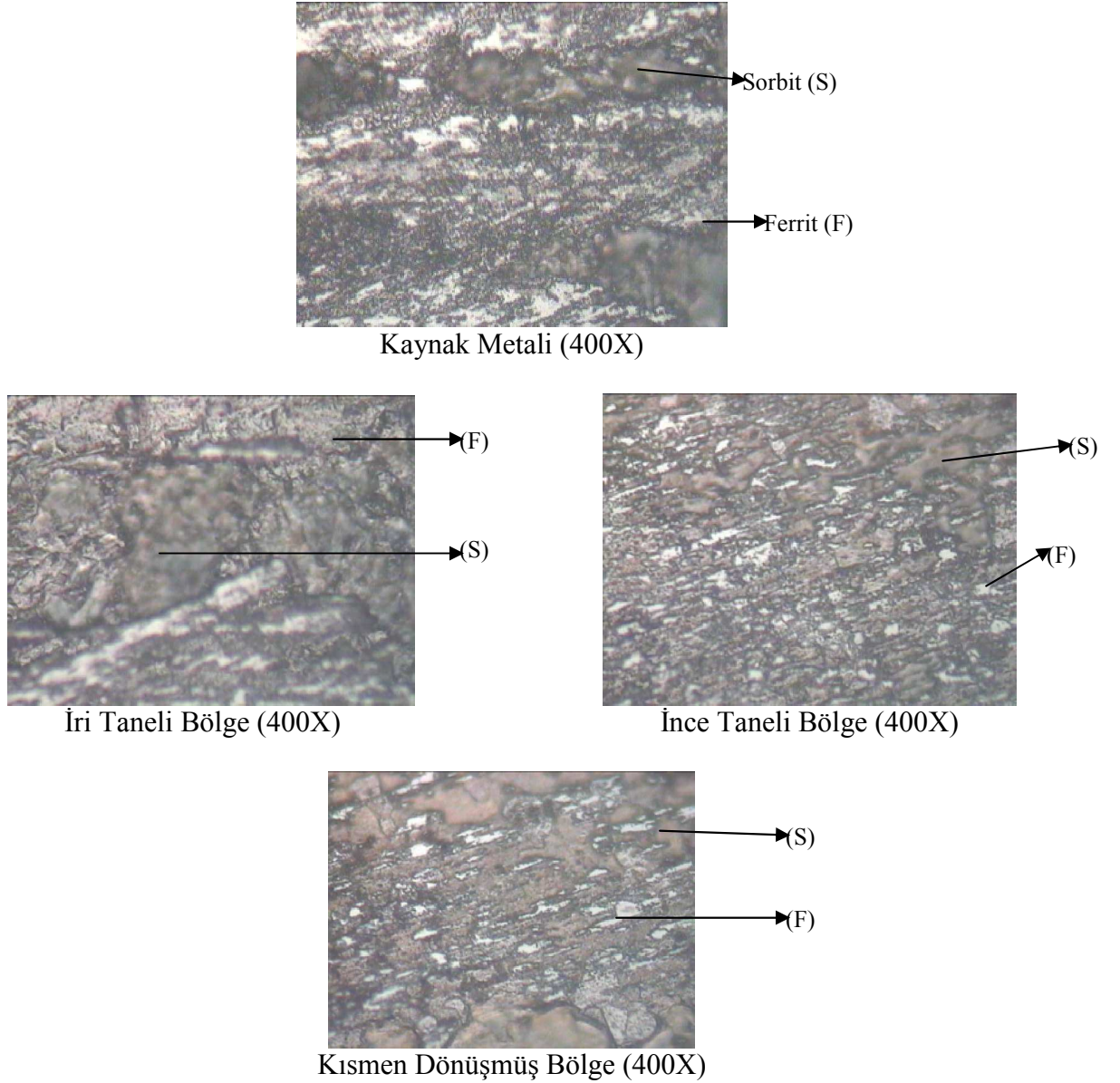
Görüldüğü üzere Toz Altı (Fe37) için Bölüm 5'te Örnek 3 için hesaplanan teorik ITAB genişlikleri ile deneysel uygulama sonuçları birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.

7.4.2 Deneysel Çalışma 3 İçin Mikroyapı İncelemesi Ve Sertlik Ölçümleri Sonuçları

Mikroyapı ve sertlik ölçüm sonuçları her bir uygulama için ayrı başlık altında verilmiştir.

7.4.2.1 Toz Altı (Fe 37) Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

Şekil 7.4.2.1.1'de Toz Altı (Fe 37) uygulamasının kaynak bölgesi resimleri, Tablo 7.15'te de teorik ve deneysel uygulama sonucu elde edilen mikroyapılar toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.4.2.1.1 Toz Altı (Fe 37) için kaynak bölgesinden alınan mikroyapı resimleri

Tablo 7.15 Toz Altı (Fe 37) için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar

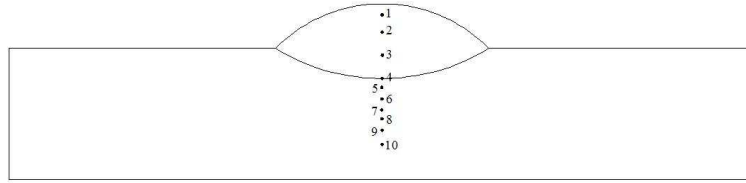
Toz Altı (Fe 37) İçin Elde Edilen Mikroyapılar			
Teorik Kaynak Metali Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen Kaynak Metali Mikroyapısı	Teorik ITAB Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen ITAB Mikroyapısı
--	Sorbit+Ferrit	Perlit (Sorbit) +Ferrit	Sorbit+Ferrit

Mikroyapı resimlerinden Bölüm 5'te Örnek 3'de belirtilen ve ITAB'da oluşacağı öngörülen Perlit (Sorbit) + Ferrit yapıların, deney sonucunda elde edildiği görülmektedir.

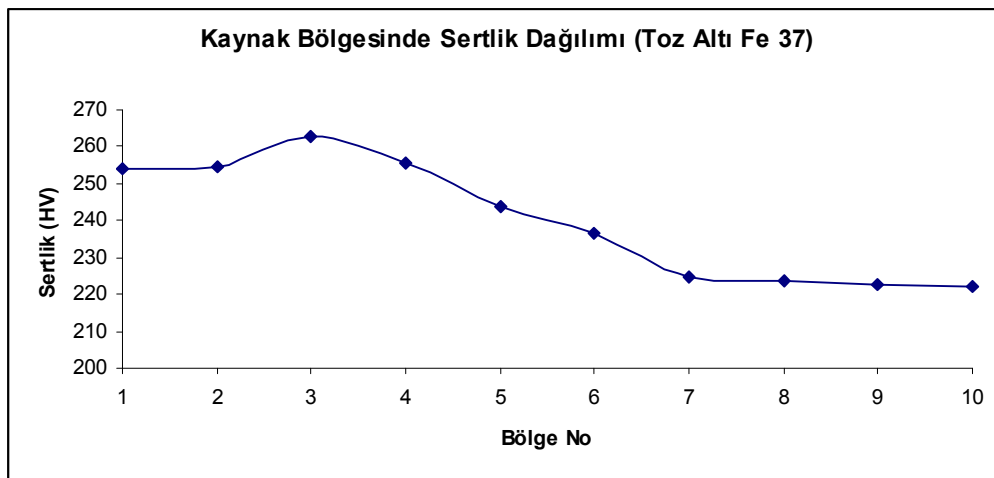
7.4.2.2 Toz Altı (Fe 37) Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sertlik ölçümleri kaynak metali merkezinden başlayarak ana metale doğru 1 kg yük altında yapılmış ve sonuçlar Tablo 7.16'da ve Şekil 7.4.2.2.1'de verilmiştir.

Tablo 7.16 Toz Altı (Fe 37) için yapılan sertlik ölçümü sonuçları



Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sertlik	254	254,4	262,7	255,4	244	236,4	224,5	223,6	222,9	222,2



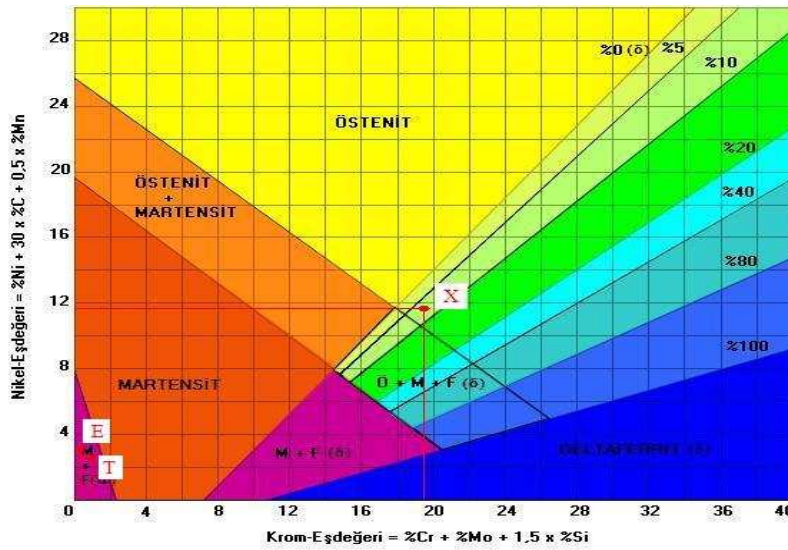
Şekil 7.4.2.2.1 Toz Altı (Fe 37) için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı

Şekil 7.4.2.2.1 ve Tablo 7.16'dan da görüldüğü üzere kaynak metalinin sertliği ITAB'dan daha fazla çıkmıştır. Bunun sebebi olarak elektrotun karbon eşdeğerinin ana malzemenin karbon eşdeğerinden daha yüksek olması verilebilir.

7.4.2.3 Toz Altı (304) Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

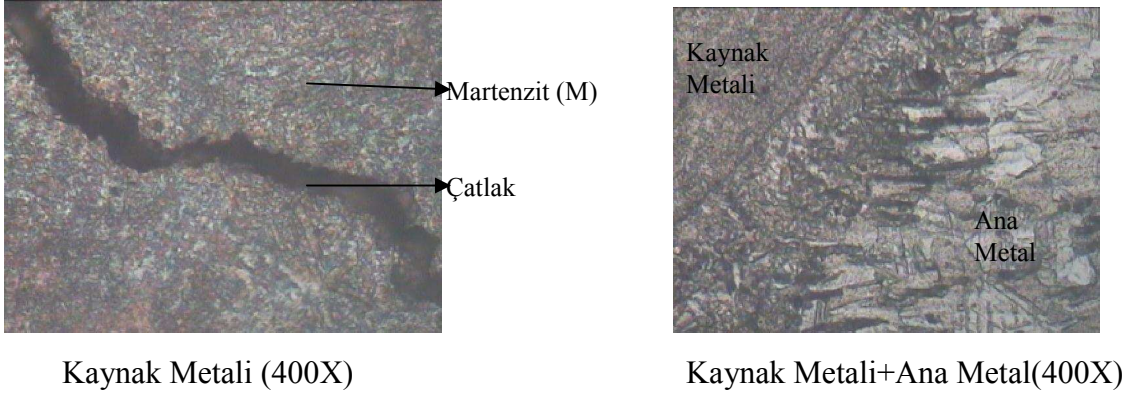
Bölüm 5, Örnek Uygulama 3'ün Sonuçlar kısmında Toz Altı (304) uygulaması için benzer bileşimde kaynak teli kullanılması durumunda kaynak metalinin mikroyapısının esas metalle aynı olacağı belirtilmişti. Ancak pratik uygulamada elektrot, ana malzemeye uygun olarak seçilmediğinden, kaynak metalinin iç yapısının esas metalinkinden farklılık göstermesi beklenmektedir.

Buradan hareketle esas metal (AISI 304), elektrot ve kaynak tozunun krom ve nikel eşdeğerleri hesaplanarak, Şekil 7.4.2.3.1'deki Schaeffler Diyagramı üzerinde kaynak metalinin tahmin edilen iç yapısı gösterilmiştir. Kaynak metalinde elektrot ile esas metal karışımı sonucu Martenzitik bir iç yapının oluşması beklenmektedir.



Şekil 7.4.2.3.1 Toz Altı (304) için kaynak metalinin iç yapısı (X-Ana metal, E-Elektrot, T-Kaynak Tozu)

Şekil 7.4.2.3.2'de Toz Altı (304) yönteminde deneysel olarak elde edilmiş kaynak bölgesi resimleri, Tablo 7.17'de de teorik ve deneysel uygulama sonucu elde edilen mikroyapılar toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.4.2.3.2 Toz Altı (304) için kaynak metalinin mikroyapı resimleri

Tablo 7.17 Toz Altı (304) için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar

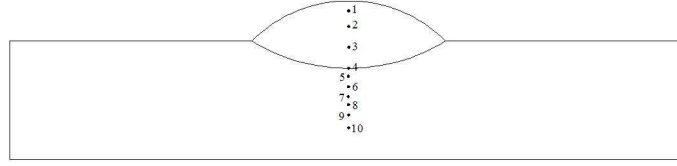
Toz Altı (304) Uygulaması İçin Elde Edilen Mikroyapılar			
Teorik Kaynak Metali Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen Kaynak Metali Mikroyapısı	Teorik ITAB Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen ITAB Mikroyapısı
M	M	--	--

Mikroyapı resimlerinden kaynak metalinde oluşacağı öngörülen martenzitik yapının, deney sonucunda elde edildiği görülmektedir. Ayrıca kaynak metalinde çatlakların oluştuğu görülmektedir. Bu çatlakların, kaynak metalinin soğuması esnasında oluştuğu düşünülmekte ve bu durumun sebebi olarak, ana metale uygun olmayan elektrotun kullanılması sonucu ergimiş bölgede kırılğan bir yapı olan martenzitin oluşması verilebilir.

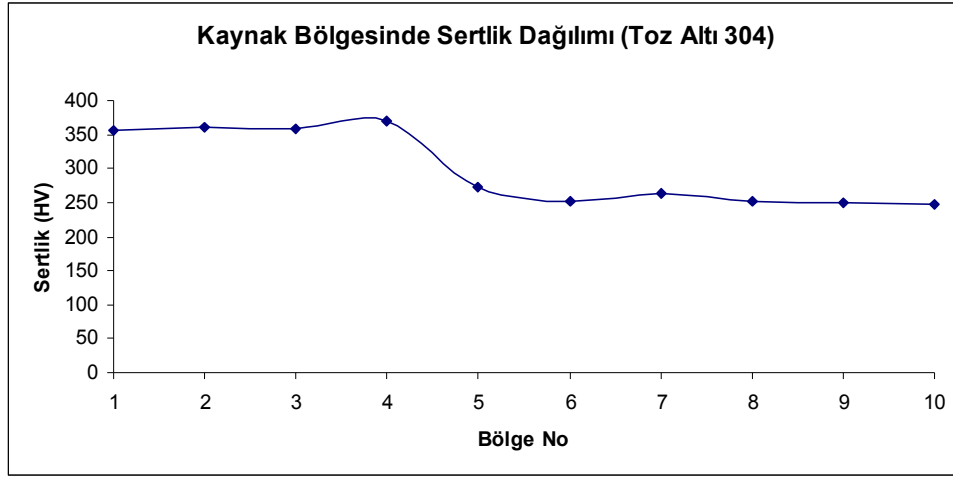
7.4.2.4 Toz Altı (304) Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sertlik ölçümleri kaynak metali merkezinden başlayarak ana metale doğru 1 kg yük altında yapılmış ve sonuçlar Tablo 7.18'de ve Şekil 7.4.2.4.1'de verilmiştir.

Tablo 7.18 Toz Altı (304) için yapılan sertlik ölçümü sonuçları



Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sertlik	355,9	360,4	358	369,5	272,3	252,8	262,7	251,1	248,8	248,4



Şekil 7.4.2.4.1 Toz Altı (304) için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı

Şekil 7.4.2.4.1 ve Tablo 7.18'den de görüldüğü üzere kaynak metalinin sertliği ITAB'dan daha fazla çıkmıştır. Bunun sebebi olarak kaynak metalinde elde edilen yapıların, ITAB'da elde edilen yapılardan daha sert olması verilebilir.

7.5 Deneysel Çalışma 4

Bu çalışmada ön tavlama ve kalınlığın etkisini görmek amacıyla Örtülü Elektrot ile kaynak yöntemiyle on mm kalınlığındaki ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 kaynak numuneleri üzerine yeter olmayan bir ısı girdisi ile dikişler çekilerek; ITAB genişlikleri ölçülmüş, kaynak bölgesinden mikroyapı resimleri alınmış ve yine kaynak bölgesinde sertlik ölçümü yapılmıştır.

Uygulamada Φ 4mm Rutil tip TS 563 EN 499: E 42 0 RR 12 elektrot kullanılmıştır. Ön tavsız malzemeler ortam sıcaklığında kaynak edilirken, ön tavlı malzemeler fırında yaklaşık 200 °C'ye ısıtıldıktan sonra kaynak edilmişlerdir.

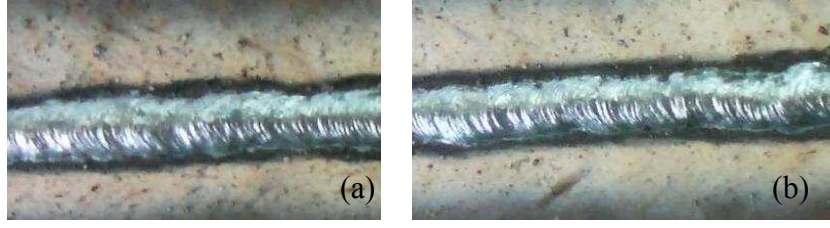
Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri, malzeme tipleri ve bileşimleri, elektrot tipi ve bileşimi, elektrot ve esas malzeme için karbon eşdeğerleri Tablo 7.19'da verilmiştir.

Tablo 7.19 Deneysel çalışma 4 için malzeme ve elektrot bileşimleri ile kaynak parametreleri

Yöntem	Esas Malzeme (Kalınlık)	Akım Şiddeti (A)	Kaynak Gerilimi (V)	Kaynak Hızı (mm/dk)
Örtülü E. (Ön Tavsız)	Fe 37 (10mm)	135	25	400
Örtülü E. (Ön tavlı)	200 °C'ye tavllanmış Fe 37 (10mm)	135	25	400

Fe 37 Malzeme Bileşimi*							
%C	%Mn	%P	%S	%N	%Si	C_{es} $\left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right)$	
0,15	0,3	0,04	0,05	0,007	0,40	0,2	
*Literatürden alınmış ortalama değerlerdir.							
Örtülü E. (Ön Tavlı) ve Örtülü E. (Ön Tavsız) Yöntemlerinde Kullanılan Elektrot ve Bileşimi							
Yöntem	%C	%Mn	%P	%S	%Cu	%Si	C_{es} $\left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right)$
Örtülü E. (Ön Tavlı)	0,08	0,5	-	-	-	0,4	0,163
Örtülü E. (Ön Tavsız)	0,08	0,5	-	-	-	0,4	0,163

Örtülü E. (Ön Tavsız) ve Örtülü E. (Ön Tavlı) yöntemleri ile çekilmiş dikişler Şekil 7.5.1’de verilmiştir.



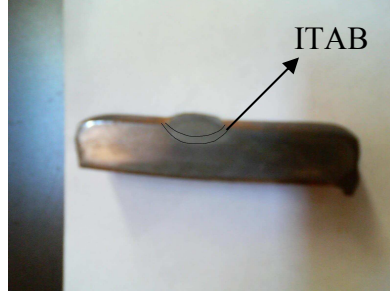
Şekil 7.5.1 Örtülü E. (Ön Tavsız) (a) -- Örtülü E. (Ön Tavlı) (b) yöntemleri ile çekilen dikişler

7.5.1 Deneysel Çalışma 4 İçin ITAB Genişlikleri Ölçüm Sonuçları

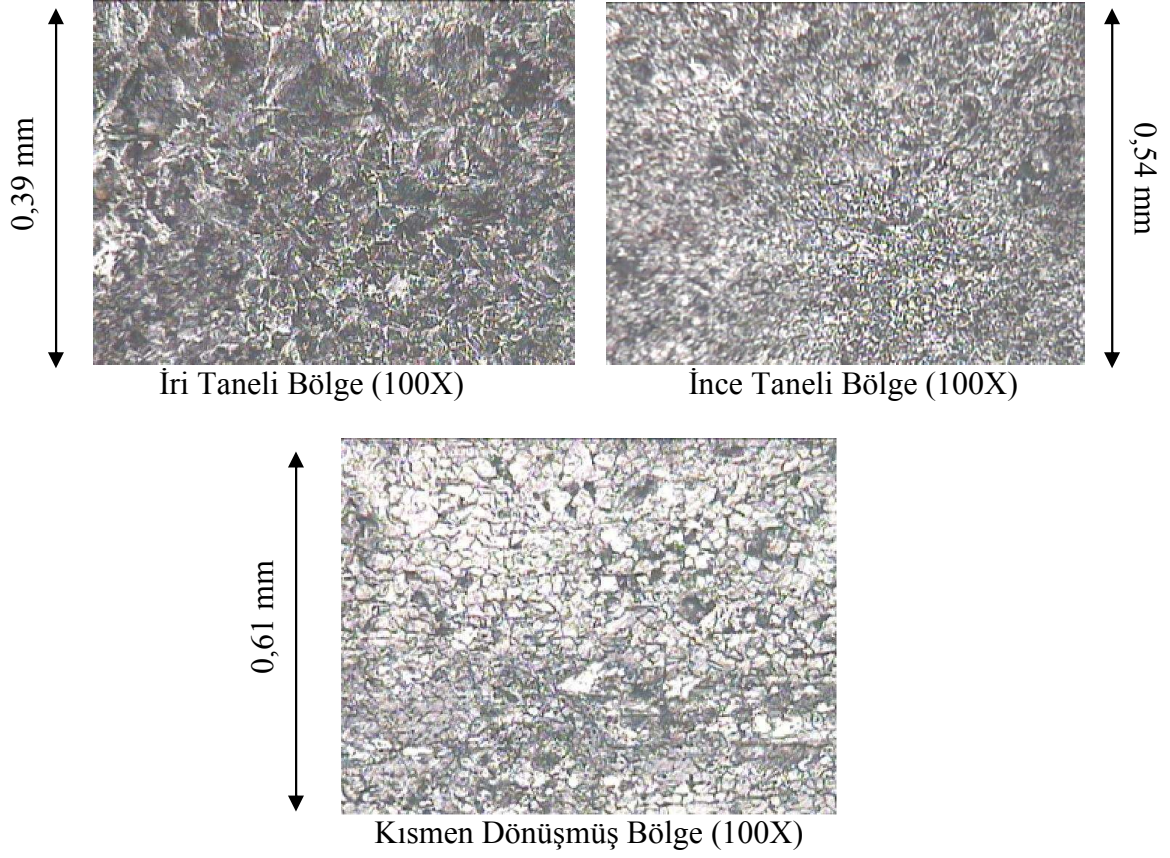
Bu çalışmada ITAB ve ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişliklerine mikroskop altında bakılmış ve sonuçlar ayrı başlıklar altında verilmiştir.

7.5.1.1 Örtülü E. (Ön Tavsız) Uygulaması İçin ITAB Genişlikleri Ölçüm Sonuçları

Şekil 7.5.1.1.1’de ve Şekil 7.5.1.1.2’de Örtülü E. (Ön Tavsız) uygulaması için ITAB’ı oluşturan bölge resimleri, Tablo 7.20’de de ölçülen ve teorik ITAB genişlikleri toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.5.1.1.1 Örtülü E. (Ön Tavsız) uygulaması için ITAB genişliği



Şekil 7.5.1.1.2 Örtülü E. (Ön Tavatsız) uygulaması için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliği

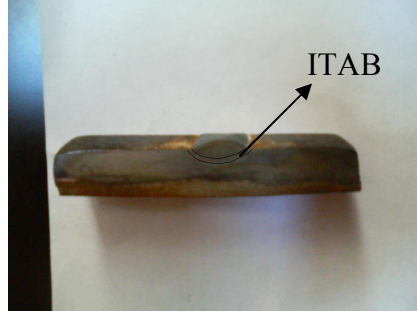
Tablo 7.20 Örtülü E. (Ön Tavatsız) uygulaması için teorik ve ölçülen ITAB genişlikleri

Yöntem		Y ₁ (İri taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₂ (İnce taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₃ (Kısmen d. bölge genişliği) (mm)	Y _Z (ITAB genişliği) (mm)
Teorik	Örtülü E. (Ön Tavatsız)	0,43	0,585	0,635	1,65
Ölçülen	Örtülü E. (Ön Tavatsız)	0,39	0,54	0,61	1,54

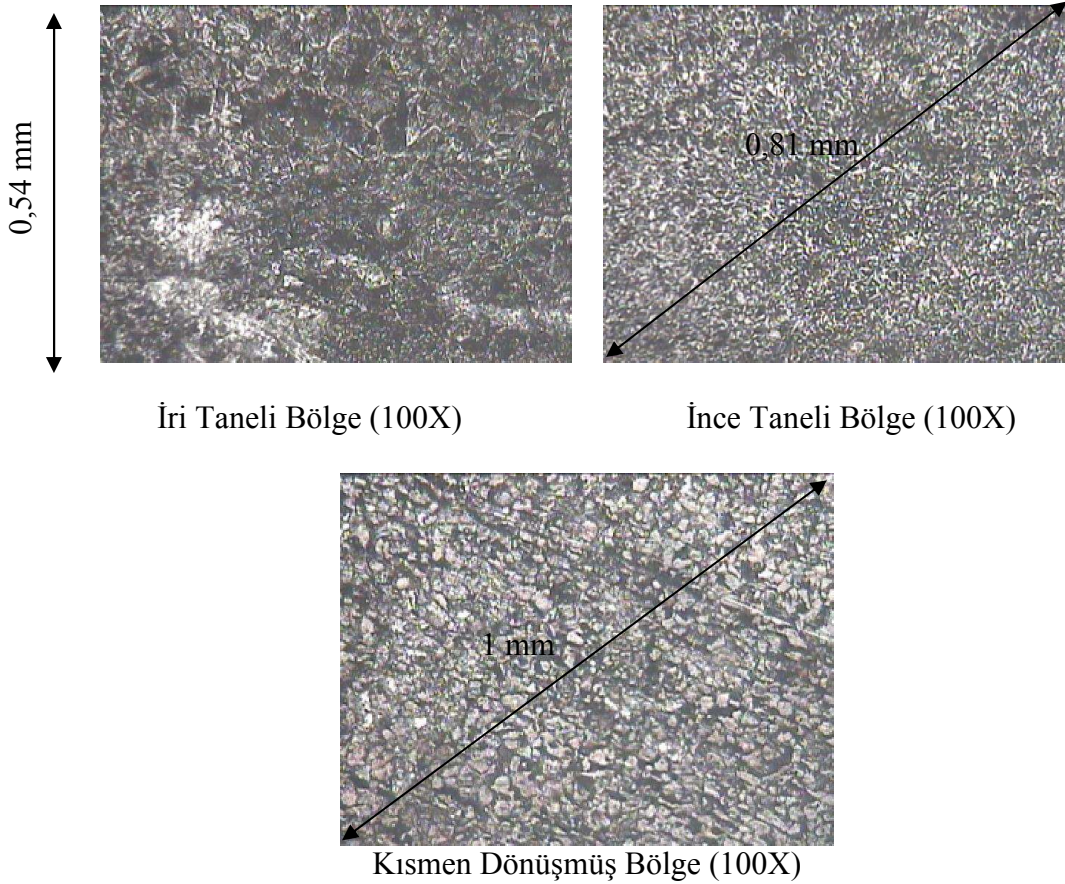
Görüldüğü üzere Örtülü E. (Ön Tavatsız) uygulaması için Bölüm 5 Örnek 4'te hesaplanan teorik ITAB ve ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri ile deneysel uygulama sonuçları birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.

7.5.1.2 Örtülü E. (Ön Tavlı) Uygulaması İçin ITAB Genişliklerinin Ölçüm Sonuçları

Şekil 7.5.1.2.1'de ve Şekil 7.5.1.2.2'de Örtülü E. (Ön Tavlı) uygulaması için ITAB'ı oluşturan bölge resimleri, Tablo 7.21'de de ölçülen ve teorik ITAB genişlikleri toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.5.1.2.1 Örtülü E. (Ön Tavlı) uygulaması için ITAB genişliği



Şekil 7.5.1.2.2 Örtülü E. (Ön Tavlı) uygulaması için ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliği

Tablo 7.21 Örtülü E. (Ön Tavlı) uygulaması için teorik ve ölçülen ITAB genişlikleri

Yöntem		Y ₁ (İri taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₂ (İnce taneli bölge genişliği) (mm)	Y ₃ (Kısmen d. bölge genişliği) (mm)	Y _z (ITAB genişliği) (mm)
Teorik	Örtülü E. (Ön Tavlı)	0,59	0,87	1,06	2,52
Ölçülen	Örtülü E. (Ön Tavlı)	0,54	0,81	1	2,35

Görüldüğü üzere Örtülü E. (Ön Tavlı) uygulaması için Bölüm 5 Örnek 4’te hesaplanan teorik ITAB ve ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişlikleri ile deneysel uygulama sonuçları birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.

7.5.2 Deneysel Çalışma 4 İçin Mikroyapı İncelemesi ve Sertlik Ölçümleri Sonuçları

Mikroyapı ve sertlik ölçüm sonuçları her bir uygulama için ayrı başlık altında verilmiştir.

7.5.2.1 Örtülü E. (Ön Tavsız) Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

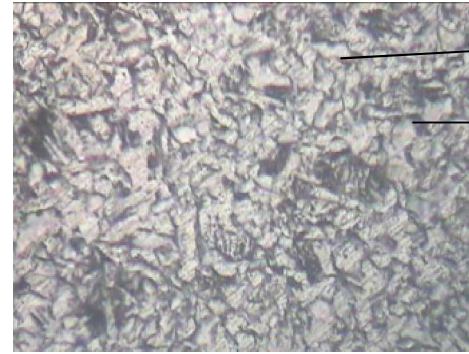
Şekil 7.5.2.1.1’de Örtülü E. (Ön Tavsız) uygulamasının kaynak bölgesi resimleri, Tablo 7.22’de teorik ve deneysel uygulama sonucu elde edilen mikroyapılar toplu halde verilmiştir.



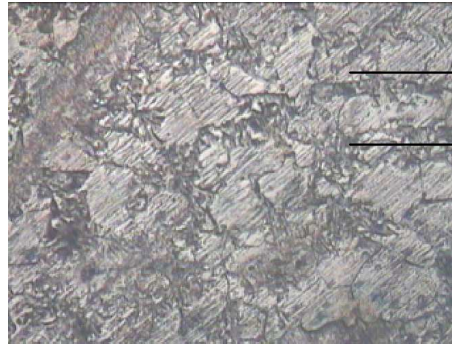
Kaynak Metali (400X)



İri Taneli Bölge (400X)



İnce Taneli Bölge (400X)



Kısmen Dönüşmüş Bölge (400X)

Şekil 7.5.2.1.1 Örtülü E. (Ön Tavsız) için kaynak bölgesinden alınan mikroyapı resimleri

Tablo 7.22 Örtülü E. (Ön Tavsız) için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar

Örtülü E. (Ön Tavsız) Uygulaması İçin Elde Edilen Mikroyapılar			
Teorik Kaynak Metali Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen Kaynak Metali Mikroyapısı	Teorik ITAB Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen ITAB Mikroyapısı
--	Martenzit+ Widmanstätten Yapısı	Trostit+Martenzit	Martenzit+ Widmanstätten Yapısı

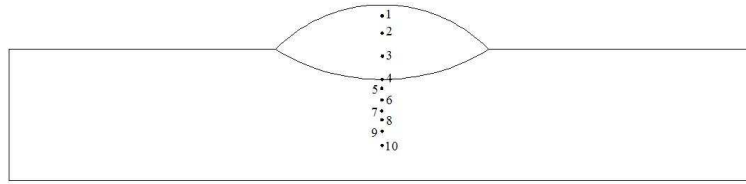
Mikroyapı resimlerinden Bölüm 5'te Örnek 4'de belirtilen ve ITAB'da oluşacağı öngörülen martenzitik yapının, deney sonucunda hem kaynak metali hem de ITAB'da oluştuğu

görülmektedir. Aynı zamanda hem kaynak metali hem de iri taneli bölgede Widmanstätten yapısının (taraksı yapı) oluştuğu görülmektedir.

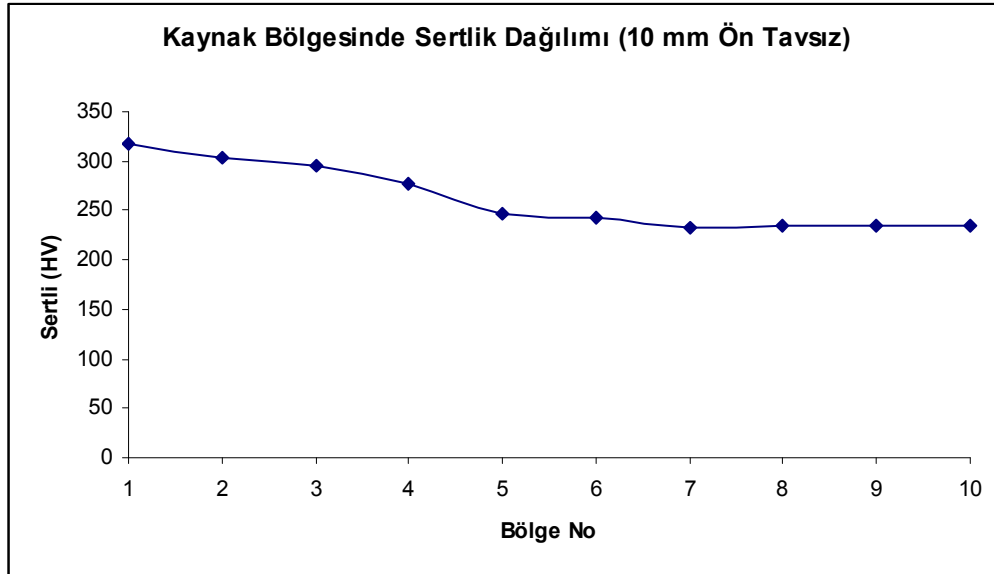
7.5.2.2 Örtülü E. (Ön Tavsız) Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sertlik ölçümleri kaynak metali merkezinden başlayarak ana metale doğru 1 kg yük altında yapılmış ve sonuçlar Tablo 7.23'te ve Şekil 7.5.2.2.1'de verilmiştir.

Tablo 7.23 Örtülü E. (Ön Tavsız) için yapılan sertlik ölçümü sonuçları



Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sertlik	317	303	296	276,8	246,7	242,7	232,5	235	235,6	234,8

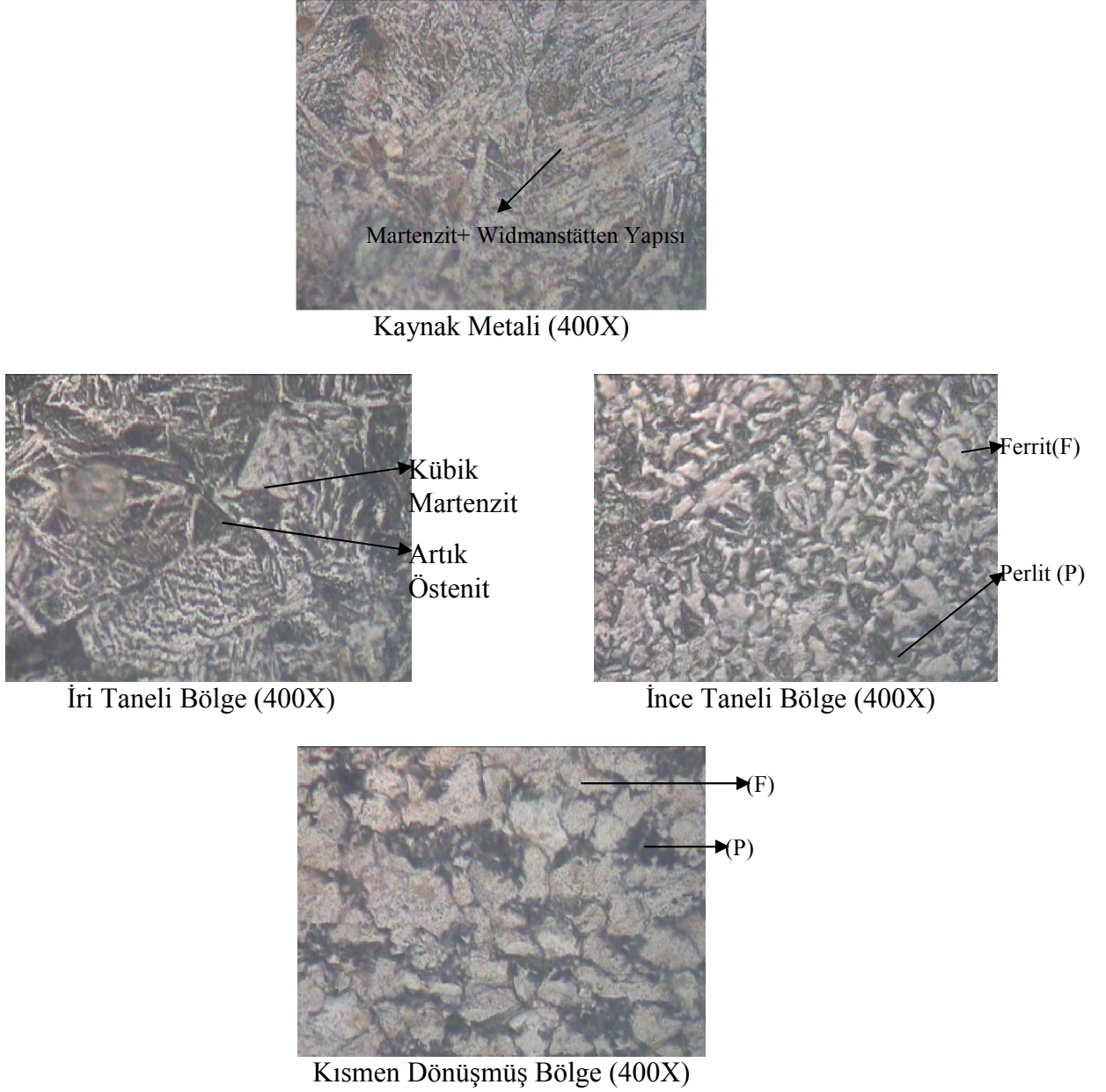


Şekil 7.5.2.2.1 Örtülü E. (Ön Tavsız) için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı

Şekil 7.5.2.2.1 ve Tablo 7.23'ten de görüldüğü üzere kaynak metalinin sertliği ITAB'dan daha fazla çıkmıştır. Bunun sebebi olarak kaynak metalinde elde edilen iç yapının martenzit olması verilebilir.

7.5.2.3 Örtülü E. (Ön Tavlı) Uygulaması İçin Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

Şekil 7.5.2.3.1’de Örtülü E. (Ön Tavlı) uygulamasının kaynak bölgesi resimleri, Tablo 7.24’te teorik ve deneysel uygulama sonucu elde edilen mikroyapılar toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.5.2.3.1 Örtülü E. (Ön Tavlı) için kaynak bölgesinden alınan mikroyapı resimleri

Tablo 7.24 Örtülü E. (Ön Tavlı) için teorik ve deney sonucu elde edilen mikroyapılar

Örtülü E. (Ön Tavlı) Uygulaması İçin Elde Edilen Mikroyapılar			
Teorik Kaynak Metali Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen Kaynak Metali Mikroyapısı	Teorik ITAB Mikroyapısı	Deney Sonucu Elde Edilen ITAB Mikroyapısı
--	Martenzit+ Widmanstätten Yapısı	Perlit (Sorbit)+Ferrit	Kübik Mar. + Artık Östenit

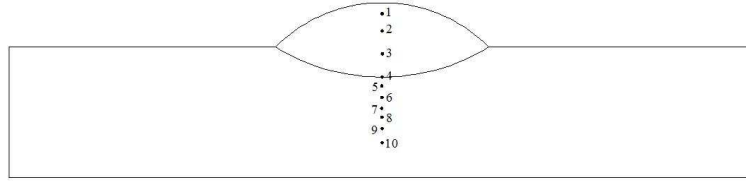
Mikroyapı resimlerinden Bölüm 5'te Örnek 4'de belirtilen ve ITAB'da oluşacağı öngörülen Perlit (Sorbit)+Ferrit yapının, deney sonucunda oluşmadığı ve onun yerine kübik martenzit + artık östenitin olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak parçanın tavlama sonrasında kaynak edilinceye kadar geçen sürede ısı kaybederek soğuması ve bu yüzden ilk sıcaklığının düşmesi verilebilir. Böylece ilk sıcaklığı dolayısı ile ön tavlama sıcaklığı azalan malzemede, soğuma hızının martenzitik yapı oluşmayacak şekilde düşmediği düşünülmektedir.

Artık (kalıntı) östenit; östenitin martenzite dönüşmesi esnasında martenzite dönüşmeyip, mikroyapıda kalan östenit şeklinde ifade edilmektedir (Asi, 2004).

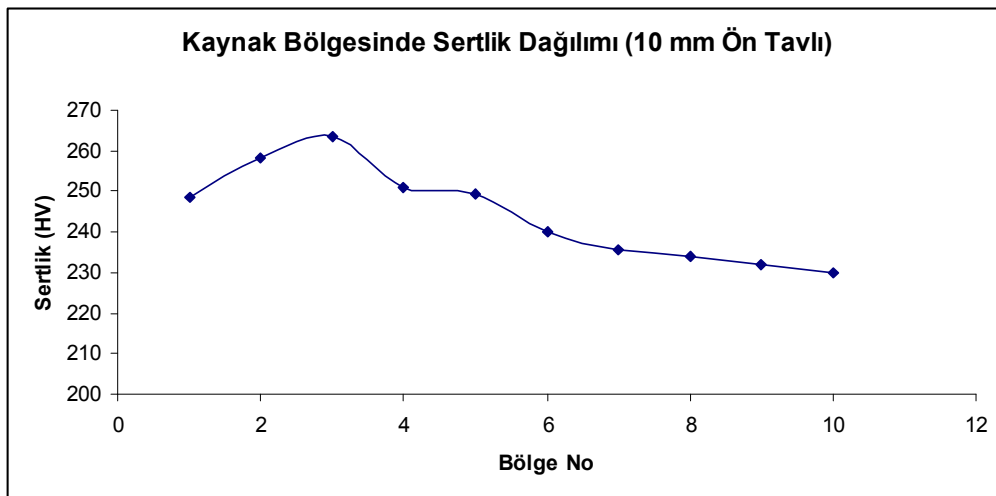
7.5.2.4 Örtülü E. (Ön Tavlı) Uygulaması İçin Yapılan Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sertlik ölçümleri kaynak metali merkezinden başlayarak ana metale doğru 1 kg yük altında yapılmış ve sonuçlar Tablo 7.25'te ve Şekil 7.5.2.4.1'de verilmiştir.

Tablo 7.25 Örtülü E. (Ön Tavlı) için yapılan sertlik ölçümü sonuçları



Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sertlik	248,6	258,3	263,5	251	249,3	240	235,5	233,9	232,1	229,8



Şekil 7.5.2.4.1 Örtülü E. (Ön Tavlı) için kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı

Şekil 7.5.2.4.1 ve Tablo 7.25'ten de görüldüğü üzere kaynak metalinin sertliği ITAB'dan daha fazla çıkmıştır. Bunun sebebi olarak kaynak metalinde elde edilen iç yapının martenzit olması verilebilir. Ancak sertlik değerlerine bakıldığında, ön tavlammamış malzemenin kaynak bölgesinin ön tavlammış malzemenin kaynak bölgesine göre daha sert olduğu görülmektedir. Bu durumda ön tavlama ile sertliğin düştüğü kanısına varılabilir.

8. DENEYSEL UYGULAMALARDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Bölüm 5’te, literatür taramasında ulaşılan ve kaynak işleminde ısı tüketimi - malzeme - kalınlık ilişkisini belirten formüller ve çizelgelere yer verilmiş; bu teorik yaklaşımlar, yine literatürde verilen ve pratik uygulamalarda kullanılması önerilen parametrelerden faydalanmak suretiyle örneklendirilmiştir.

Örneklerden elde edilen sonuçların doğruluğunun belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel uygulamaların neticeleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Üç mm kalınlığındaki Fe 37 malzemelere Örtülü Elektrot ve MAG yöntemleri ile çekilen dikişlerin mikroyapı incelemesi sonuçlarında ön görülen yapıların oluştuğu görülmüştür. Aynı zamanda ITAB genişliklerinin ölçüm sonuçları, teorik sonuçlara oldukça yakın çıkmıştır. Her ne kadar ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişlikleri tek tek ölçülemedi olsa da, ölçülen ITAB genişliğinin teorik ITAB genişliğine yakın çıkması sebebiyle, hesap yoluyla bulunan ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişliklerinin yaklaşık doğru olduğu söylenebilir. Bu durum ITAB genişliğinin hesabında kullanılan formül ve değerlerin, bu pratik uygulama için doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Sertlik değerleri açısından bakıldığında, daha sert olması beklenen ITAB’ın hem MAG hem de Örtülü Elektrot uygulaması için kaynak metalinden daha düşük sertliğe sahip olduğu gözlenmiştir. MAG uygulamasında kullanılan elektrottaki alaşım elementlerinin bileşiminin esas metaldekilerden daha fazla olması sonucu kaynak metalinin sertleştiği düşünülmektedir. Ancak Örtülü Elektrot ile uygulamada elektrotun karbon eşdeğeri miktarının esas metalinkinden daha düşük olmasına rağmen kaynak metalinin daha sert çıkması, kaynak metalinin daha hızlı soğumasına bağlanmaktadır.

Öte yandan ısı girdisinin düşük olduğu Örtülü El. ile kaynak uygulamasının ITAB sertlik değerleri, ısı girdisinin yüksek olduğu MAG uygulamasının ITAB sertlik değerlerine göre çok az da olsa yüksek çıkmıştır. Bu durum, düşük ısı girdisinin hızlı soğumaya ve dolayısı ile sertliğin artmasına sebebiyet verdiğini düşündürmektedir.

2. Üç mm kalınlığındaki AISI 304 malzemelere TIG ve Plazma yöntemleri ile çekilen dikişlerin mikroyapı incelemesi sonuçlarında ön görülen yapıların oluştuğu görülmüştür. Ancak ITAB ve ITAB’ı oluşturan bölgelerin genişlikleri mikroskop veya kumpas ile ölçülemedi. Çünkü ITAB’da, tane irileşmesi veya küçülmesi gibi dönüşümler görülemedi. Ayrıca dağlama neticesinde ITAB sınırları da

belirlenememiştir. Paslanmaz çeliğin dönüşüm göstermeyen bir özelliğe sahip olması bu duruma sebep olarak verilebilir. Böylece ITAB genişliğinin hesabında kullanılan formül ve değerlerin, bu uygulama için doğru sonuç verip vermediği anlaşılamamıştır.

Sertlik değerleri açısından bakıldığında, daha sert olması beklenen ITAB'ın hem TIG hem de Plazma uygulaması için kaynak metalinden daha düşük sertliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Bu duruma sebep olarak kaynak metalinde oluşan delta ferrit fazı gösterilebilir. Literatürde de delta ferritin paslanmaz çelik kaynaklarında mekanik özellikleri olumsuz etkilediği ve sertleşmeye sebep olduğu belirtilmektedir.

Öte yandan ısı girdisinin düşük olduğu Plazma ile kaynak uygulamasının ITAB sertlik değerleri, ısı girdisinin yüksek olduğu TIG uygulamasının ITAB sertlik değerlerine göre az da olsa yüksek çıkmıştır. Bu durum, düşük ısı girdisinin hızlı soğumaya ve dolayısı ile sertliğin artmasına sebebiyet verdiğini düşündürmektedir.

3. Altı mm kalınlığındaki Fe 37 çelik ve AISI 304 paslanmaz çelik malzemelere Toz Altı yöntemi ile çekilen dikişlerin mikroyapı incelemesi sonuçlarında ön görülen yapıların oluştuğu görülmüştür. AISI 304 paslanmazın kaynak metalinde oluşan çatlakların, uygun olmayan elektrotun kullanılması neticesinde soğuma esnasında meydana geldiği düşünülmektedir. Fe 37 çelik için ITAB'ı oluşturan bölgelerin ve dolayısı ile ITAB'ın genişliğinin ölçüm sonuçları, teorik sonuçlara oldukça yakın çıkmıştır. Ancak paslanmaz çelik için yine ITAB'da bir dönüşümün görülememesi ve dağlama neticesinde ITAB sınırının belirlenememesi sonucunda ITAB'ı oluşturan bölgelerin ve ITAB'ın genişlikleri ölçülememiştir.

Sertlik değerleri açısından bakıldığında, daha sert olması beklenen ITAB'ın hem Fe 37 çelik hem de AISI 304 paslanmaz çelik için kaynak metalinden daha düşük sertliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Fe 37 için elektrot bileşimindeki manganın bu duruma sebep olduğu, AISI 304 için ise kaynak metalinde oluşan martenzitik yapının bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir.

4. On mm kalınlığındaki ön tavlı ve ön tavsız Fe 37 malzemelere Örtülü Elektrot yöntemi ile çekilen dikişlerin mikroyapı incelemesi sonuçlarında, ön tavsız uygulama için beklenen martenzitik yapının oluştuğu görülmüştür. Ancak, ön tavlı parçada Perlit (Sorbit) + Ferrit olması öngörülen ITAB içyapısının yerine, yine martenzitik yapının oluştuğu görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak parçanın tavlama sonrasında kaynak edilinceye kadar geçen sürede ısı kaybederek soğuması ve bu yüzden ilk

sıcaklığının düşmesi verilebilir. Böylece ön tavlama sıcaklığı dolayısı ile ilk sıcaklığı azalan malzemede, soğuma hızının martenzitik yapı oluşmayacak şekilde düşmediği düşünülmektedir.

Yapılan ölçümler sonucunda her iki uygulama için de, ITAB'ı oluşturan bölgelerin ve dolayısı ile ITAB genişliklerinin, teorik sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durum ITAB genişliğinin hesabında kullanılan formül ve değerlerin, bu pratik uygulama için doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Sertlik değerleri açısından bakıldığında, daha sert olması beklenen ITAB'ın her iki uygulama için de kaynak metalinden daha yumuşak olduğu görülmüştür. Bu duruma sebep olarak, hızlı soğuma sonucu kaynak metallere oluşan fazların daha sert olması verilebilir. Ancak sertlik ölçüm sonuçları dikkatle incelendiğinde, ön tavlı uygulamasında elde edilen sertlik değerlerinin, ön tavsız uygulamada elde edilen sertlik değerlerinden daha düşük olduğu görülecektir. Bu durum parçalara ön tav uygulanarak kaynak bölgesinin sertliğinin düşürülebileceğini göstermektedir.

9. TEORİK ARAŞTIRMA VE DENEYSEL UYGULAMA SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Ark esaslı yöntemlerde ısı tüketimi ile malzeme-kalınlık ilişkisinin incelendiği bu çalışmada, yapılan teorik ve deneysel uygulamalardan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Aynı tip ve kalınlıktaki malzemelerin farklı ark yöntemleri ile kaynağında, farklı iç yapıda ve dolayısı ile farklı sertlikte kaynak metali ve ITAB oluşabilmektedir. Bu durum, 3 mm kalınlıklı Fe 37 çeliklerine MAG ve Örtülü Elektrot ile yapılan deneysel uygulama sonuçlarından görülmektedir.
2. Literatürde yalın karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için ITAB genişliğinin bulunmasına yönelik verilen teorik yaklaşımların pratikte de kullanılabilceği, Fe 37 için yapılan deneysel uygulamaların sonuçlarında görülmüştür. Ayrıca benzer yaklaşımdan hareketle hesaplanan ITAB'ı oluşturan bölgelerin (iri taneli, ince taneli ve kısmen dönüşmüş bölge) genişlikleri de deneysel çalışmaların sonuçlarıyla uyum göstermektedir.

Aynı düşünce tarzından hareketle teorik araştırma sırasında hesaplanan, fakat ITAB'da, tane irileşmesi veya küçülmesi gibi dönüşümler görülemediği, ayrıca dağlama neticesinde ITAB sınırlarının da belirlenemediği paslanmaz çelikler için sonuçların doğruluğu ispatlanamamıştır. Bu durumun sebebi olarak, östenitik tip paslanmaz çeliğin dönüşüm göstermeyen bir yapıya sahip olması verilebilir.

Ancak Fe 37 deney sonuçlarından; malzemenin fiziksel özelliklerinin, ısı girdisinin, kalınlığın ve malzeme tipine göre bir metalürjik değişimin oluşmadığı en yüksek sıcaklık değerinin bilinmesi halinde, ITAB'ın genişliğinin büyük bir yaklaşıklıkla bulunabileceği görülmektedir.

3. Isı tesiri altındaki bölgeler için tepe sıcaklıklarının dağılımı, bu tez için deneysel bir çalışma ile ölçülerek gösterilememiştir. Ancak ITAB genişliğinin belirlenmesinde kullanılan formül ile tepe sıcaklıklarının belirlenmesinde kullanılan formül aynıdır. Formülün esas olarak ITAB'daki tepe sıcaklıklarının bulunması amacıyla türetilmesi ve deneysel ITAB genişliklerinin teorik ITAB genişliklerine uyumlu çıkması, teorik tepe sıcaklıkları dağılımı hesaplarının büyük bir yaklaşıklıkla doğru olduğunu düşündürmektedir.
4. Literatürde, ısı girdisinin artmasıyla soğuma hızının azalacağı belirtilmektedir. Deneysel Çalışma 1 ve Deneysel Çalışma 2 sonucunda elde edilen ITAB sertlikleri bu

durumu destekler niteliktedir. Çünkü ısı girdisinin düşük olduğu Örtülü El. ile kaynak uygulamasının ITAB sertlik değerleri, ısı girdisinin yüksek olduğu MAG uygulamasının ITAB sertlik değerlerine göre az da olsa yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde, ısı girdisinin düşük olduğu Plazma uygulamasının ITAB sertlik değerleri, ısı girdisinin yüksek olduğu TIG uygulamasına göre az da olsa yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar; ısı girdisinin artmasıyla soğuma hızının ve dolayısı ile sertliğin azalacağı şeklinde açıklanabilir.

5. Teorik araştırma sonucunda malzeme tipinin ısı tüketimini, ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliğini (dolayısı ile ITAB genişliğini) ve kaynak bölgesi mikroyapısını doğrudan etkileyeceği düşünülmekteydi. Bu durumun doğruluğunu görmek için yapılan Deneysel Çalışma 2 sonuçlarında malzeme tipinin ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişliklerine ve ITAB genişliğine olan etkisi paslanmaz çeliğin dönüşüm göstermemesi nedeniyle görülememiştir. Ancak mikroyapı sonuçlarından kaynak edilecek malzeme tipinin değişmesi sonucunda, tüm kaynak parametrelerinin gözden geçirilmesi (gerekliyorsa değiştirilmesi) gerektiği görülmüştür. Sadece bu durumun bile malzeme tipinin kaynak işlemi üzerine çok önemli etkileri bulunduğunu göstermeye yeterli olduğu düşünülmektedir.
6. Kalınlığın da kaynak işlemi üzerine önemli etkileri olduğu gerek teorik araştırmalardan gerekse deneysel çalışmaların sonuçlarından görülmektedir. Kalınlığın artması ile soğuma hızının arttığına; 10 mm kalınlıklı Fe 37 malzemelere, literatürde 4 mm kalınlık için yeter derecede olduğu belirtilen ısı girdisi ile yapılan kaynakların mikroyapı incelemesinde elde edilen martenzitik yapılar kanıt niteliğindedir.
7. Literatürde, ön tavlamanın ITAB genişliğini ve tepe sıcaklık değerlerini artırmasına rağmen, soğuma hızını düşürerek ITAB'da daha yumuşak iç yapıların oluşumunu teşvik ettiği belirtilmektedir. Bu durumu Deneysel Uygulama 4'te elde edilen sonuçlar da desteklemektedir.
8. Literatürde, malzeme bileşimi ve soğuma hızına bağlı olarak kaynak sonrası elde edilecek iç yapının tahmininde kullanılan çeşitli diyagramlar bulunmaktadır ve bu diyagramların büyük bir yaklaşıklıkla doğru sonuçlar verdiği ifade edilmektedir. Teorik araştırmada tahmin edilen sekiz iç yapıdan yedisinin deneysel uygulamalar sonucunda elde edildiği görülmüştür. Ön tavllanmış malzemede tahmin edilen iç yapının beklendiği şekilde çıkmamasına, parçanın tavlama sonrasında kaynak edilinceye kadar geçen sürede ısı kaybederek soğuması ve ilk sıcaklığının düşmesi

sebepler olarak verilebilir. Böylece ön tavlama sıcaklığı dolayısıyla ilk sıcaklığı azalan malzemede, soğuma hızının martenzitik yapı oluşmayacak şekilde düşmediği düşünülmektedir.

9. Bu tez çalışmasında yapılan bütün deneysel uygulamalarda, kaynak metali ITAB'dan daha sert çıkmıştır. Bu durum, literatürde bahsedilen ve bir çok araştırma ile desteklenen ITAB'ın kaynak bölgesindeki en sert kısım olması durumuna ters düşmektedir. Kaynak metalleriindeki bu sertlik fazlalıklarının oluşumuna, kullanılan elektrot bileşimlerindeki alaşım elementlerinin kaynak metaline geçerek bu kısmı sertleştirmesinin ve kaynak metalindeki soğumanın ITAB'dan daha hızlı olmasının sebepleri olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Aichele, G., (2001), Kaynak ve Kesme Teknolojisinde Parametre ve Değer Tabloları (Çev., S. Anık ve M. Varol, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Anık,S., (1996), Kaynak Teknolojisi, 170: 153-222, Makine Mühendisliği El Kitabı Cilt 2, M. Cerit, (Der.), TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayını.

Asi, O., (2004), “Sementasyon Yapılan SAE 8620 Çeliğinde Meydana Gelen Kalıntı Östenit Miktarlarının İncelenmesi”, Gazi Üni. Fen Bilimleri Dergisi, 103-113.

Aslan, S., ve Eroğlu, M., (2001), Düşük Karbonlu Bir Çelikte Molibden'in ITAB'ın Mikroyapısı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Kaynak Teknolojileri III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, İst.

Bozacı, A., (2000), Makine Elemanları Cilt 1, Seç Yayın Dağıtım, İst., 38.

Cary, H.B., (1989), Modern Welding Technology, Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.

Cin, M., (1978), Elektrik Ark Kaynağında Isı Tesiri Altındaki Bölgenin Etüdü, Doktora Tezi, İTÜ.

Çavuşoğlu, İ., (1997), Çeliklerin Kaynağında Isıl İşlemlerin Isı Etkisi Altında Kalan Bölgedeki Oluşumlara Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ.

Eroğlu, M. ve Aksoy, M., (1999), “15Mo3 Çeliğinin Kaynağında Enerji Girişinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapısı Ve Mekanik Özelliklere Etkisi”, Kaynak Teknolojileri II. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı.

Ertürk, İ., (1987), Gaz Altı Kaynak Teknikleri, Türkiye Halk Bankası A.Ş. Fon Kredileri Müdürlüğü, Ankara, 37-38.

Eryürek, İ., B., (2004), Çelikler İçin Örtülü Elektrot Seçimi, Askaynak Yayını, İstanbul.

Funderburk, R.S., (1997), “Fundamentals of Preheat”, Welding Innovation, 14(2).

Funderburk, R.S., (1999), “A Look At Heat Input”, Welding Innovation, 16(1).

Gourd, L.M., (1996), Kaynak Teknolojisinin Esasları (Çev., B. Eryürek, O. Bodur ve A. Dikicioğlu), Birsen Yayınevi, İstanbul, 21-122.

Gültekin, N., (1991), Kaynak Tekniği, Engin Ofset, İstanbul, 85-200.

Gültekin, N., (2006), Kaynak Metalürjisi ve Problemleri, Yüksek Lisans Ders Notları.

Handbook Committee, (1976), Welding Handbook Volume 1, AWS, Miami, 35-143.

Handbook Committee, (1989), Metals Handbook Volume 6 Welding, Brazing And Soldering, ASM International, 3-44.

İnce, H., (1982), Elektrik Ark Kaynağında Isı Tesiri Altındaki Bölgede Tane İrileşmesinin Etüdü, Doktora Tezi, İTÜ.

Juan, W., Yajlang L. ve Peng L., (Nisan 2003), “Effect of Weld Heat Input On Toughness And Structure Of HAZ Of A New Super-High Strength Steel”, Indian Academy Of Sciences, 301-305.

Kahraman, N., Turgutlu, A. ve Gülenç, B., (2005), “Bakır Ve Çelik Levhaların Örtülü Elektrot Ve TIG Kaynak Yöntemleri İle Birleştirilmesi Ve Arayüzey Özelliklerinin İncelenmesi”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 20(2): 183-189.

Kakaç, S., (1998), Örneklerle Isı Transferi, Tıp&Teknik Yayıncılık, Ankara.

- Kaluç, E. ve Taban, E., (2004), "Petrol ve Doğalgaz Boru Hatlarının Yapımında Kullanılan Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler ve Kaynak Edilebilirliği", Mühendis ve Makine, Cilt:45, Sayı:536, 26-36.
- Kaluç, E., (2004), Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayını, 356: 101-307.
- Kayalı, E.S., (1984), Tozaltı Kaynak Metalinin Tokluğuna Alaşım Elementlerinin Etkisi, I. Ulusal Kaynak Sempozyumu Tebliğ Özetleri, İst.
- Kılık, R., (1983), Kaynak Bölgesindeki Sıcaklık Dağılım ve Değişimine Isıl Özelliklerin, Gizli Ergime Isısının ve Elektrot Çapının Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ.
- Kılık, R., (1984), İnce Levhaların Kaynağında Sıcaklık Dağılımına Elektrot Çapının Ve Levha Kalınlığının Etkisi, I. Ulusal Kaynak Sempozyumu Tebliğ Özetleri, İst.
- Kim, I.S, Son, J.S., Kim, I.G., Kim, J.Y. ve Kim O.S., (2002), "A Study On Relationship Between Process Variables And Bead Penetration For Robotic CO₂ Arc Welding", Journal of Materials Processing Technology, 136: 139-145.
- Kongel,A., (2005), Ergitme Esaslı Kaynak Uygulamalarında Kimyasal Bileşimi Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ.
- Kou, S., (1987), Welding Metallurgy, Wiley Interscience Publication, 3-352.
- Menzemer, C., Lam, P.C., Srivatson, T.S. ve Wittel, C.F., (1999), "An Investigation Of Fusion Zone Microstructures Of Welded Aluminum Joints", Materials Letters, 41: 192-197.
- Messler, R.W., (1999), Principles of Welding, Wiley Interscience Publication, 127-574
- Nguyen, T.C., (2005), Weld Defects In High Speed Gas Metal Arc Welding, Doctorate Thesis, Waterloo University, Canada.
- Oğuz, B., (1985), Karbonlu ve Alaşımlı Çeliklerin Kaynağı, Oerlikon Yayınları, İstanbul.
- Oğuz, B., (1989), Ark Kaynağı, Oerlikon Yayınları, İstanbul.
- Olson, D.L., Dixon, R. ve Liby A.L., (1990), Welding Theory And Practise Volume 8, North Holland Publication, 3-206.
- Ören, E., (2002), MAG Kaynağında Kaynak Parametrelerinin İç Köşe Dikiş Geometrisine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ.
- Özsaraç, U., Karadeniz, E. ve Yıldız, C., (2005), "The Effect Of Process Parameters On Penetration In Gas Metal Arc Welding", Materials And Design, 28: 649-656.
- Shome, M., (2006), "Effect Of Heat-Input On Austenite Grain Size In The Heat-Affected Zone Of HSLA-100 Steel", Materials Science And Engineering A.
- Society of Manufacturing Engineers, (1976), "Tool and Manufacturing Engineers Handbook", McGraw-Hill Book Company.
- Tanaka, M., Terasaki, H., Fujii, H. ve Ushio, M., (2006), " Anode Heat Transfer In TIG Welding And Its Effect On The Cross-Sectional Area Of Weld Penetration", ProQuest Science Journals, 20(4): 268-274.
- Tülbentçi, K., (1998), MIG-MAG Gaz Altı Kaynak Yöntemi, REM Matbaacılık, İstanbul, 43-131.
- Tülbentçi, K., Turgutlu, A. ve Gülenç, B., (1999), "Ark Kaynağında Kaynak Hızının Nüfuziyete Ve Mikroyapıya Etkisi", Tr. J. of Engineering and Environmental Science, TÜBİTAK, 251-259.

Yalçın, A.E., (2005), Koruyucu Gaz Kaynak Uygulamalarında Gaz Karışımları-Dikiş Formu İlişkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ.

İnternet Kaynakları

<http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/nx270.pdf>

http://www.fortunecity.com/village/lind/247/weld_book/Ch6.htm

<http://www.makinamuhendisi.com/idx/8/110/Makina-Magazin-Makale/article/Alam-elementlerinin-elik-yapsna-etkisi.html>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	06.05.1983	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1997-2001	Özel Marmara Evleri İhlas Lisesi
Lisans	2001-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2005-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı

Çalıştığı kurumlar

	2005-2006	Numan Pres Kalıp Mak. Yed. Parça İm. San. Paz. ve Dış Tic. Ltd. Şti.
--	-----------	---