

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK PLAKANIN (EN DIN 1.3964)
T BAĞLANTI KAYNAĞINDA İLAVE ISI GİRDİSİ UYGULAMASININ
MEYDANA GELEN DİSTORSİYONA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Murat İhsan YILMAZ

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Programı: Konstrüksiyon ve İmalat

Tez Danışmanı: Prof. Dr. H. Oktay BODUR

OCAK 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK PLAKANIN (EN DIN 1.3964)
T BAĞLANTI KAYNAĞINDA İLAVE ISI GİRDİSİ UYGULAMASININ
MEYDANA GELEN DİSTORSİYONA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Murat İhsan YILMAZ
(503012054)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Ocak 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 03 Mayıs 2007**

Tez Danışmanı : Prof..Dr. H. Oktay BODUR

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Adnan DİKİCİOĞLU)

Prof.Dr. Ayşegül AKDOĞAN (Y.T.Ü.)

Prof.Dr. Barlas ERYÜREK

Prof..Dr. Hüseyin SÖNMEZ (Y.T.Ü.)

OCAK 2007

ÖNSÖZ

Danışmam olmayı lütfeden, tez çalışmamda bilgi ve tecrübesini esirgemeyen ve beni her konuda destekleyen Prof. Dr. Oktay BODUR'a öncelikle teşekkür etmek istiyorum. Ayrıca; doktora çalışması yapmamı teşvik eden Prof. Dr. Mehmet YÜKSEL'e, kaynak tekniği konusunda derslerinden feyiz aldığım Prof. Dr. Selahaddin ANIK'a ve Doç. Dr. Murat VURAL'a, tez çalışmamı izleyip katkıda bulunan Prof. Dr. Ayşegül ALPDOĞAN ve Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU'na, İskoçya Strathclyde Üniversitesi'nde çalışmalarımı ilgili deney yapabilmeme olanak sağlayan Strathclyde Üniversitesi öğretim görevlisi Dr. Tuğrul ÇÖMLEKÇİ'ye ve deneysel çalışmalarımda her türlü teknik yardımı sağlayan Strathclyde Üniversitesi laboratuvar teknisyeni Steven BLACK'e, öğretim görevlisi Dr. Alex GALLOWAY'e ve araştırma görevlisi Dr. Duncan CAMİLLERİ'ye teşekkür ederim. İstanbul Tersanesi Komutanlığı personeline ve Yüzbaşı Gürol YILMAZ'a yardımlarından dolayı müteşekkirim.

Bu tezi, aileme, her konuda desteğini ve sevgisini esirgemeyen fedakâr eşime ve biricik kızıma adıyorum.

Ocak 2007

Murat ihsan YILMAZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	2
1.2. Çalışma Metodu	2
1.3. Literatür Özeti	3
2. KAYNAK DİSTORSİYONLARI	6
2.1. Isı Alanları	6
2.1.1 Isı Kaynakları ve Geometri Tanımlaması	7
2.1.2 temel denklemler	8
2.1.3 Başlangıç Ve Sınır Koşulları	9
2.2 Kaynak Gerilme Alanları ve Distorsiyon Analizi	11
2.2.1 Plastisite Teorisi Ana Prensipler	11
2.2.1.1 Metalik Malzemelerin Gerilme-Uzama Davranışları	11
2.2.1.2 Deformasyon Teorisi	12
2.2.1.3 Elastik Deformasyon	15
2.2.1.4 Plastik Deformasyon	15
2.2.1.5 Uzama Sertleşmesi (Pekleşme)	17
2.2.2. Kaynak Gerilmeleri Ve Deformasyonları	18
2.2.2.1 Kaynak Gerilmelerinin Ve Deformasyonlarının Sınıflandırılması	18
2.2.2.2. Kaynak Gerilmelerinin Ve Deformasyonların Sebepleri	20
2.2.2.3. Süreksiz Gerilme Alanları	22
2.2.2.4 Gerilmeler Ve Kaynağa Göre Eriyik Hareketi	25
2.2.2.5 Artık Gerilme Alanları	27
2.2.3. Kaynaklı Parçalarda Deformasyon	33
2.2.3.1. Alın Kaynaklarındaki Enine Çekme Mekanizması	33
2.2.3.2. Alın Kaynaklarında Boyuna Ve Enine Çekmeler	34
2.2.3.3. Kaynak Süresince Metal Hareketinin Kinetiği	36
2.2.3.4. Alın Kaynaklarında Dönme Distorsiyonu	37
2.2.3.5. Açısal Çekme	38
2.3 Kaynak Ondüle Distorsiyonları	43
2.3.1. Analitik Araştırma	43

3. KAYNAK DİSTORSİYONLARINI DÜZELTME TEKNİKLERİ	49
3.1. Mekanik Düzeltme	52
3.1.1. Kaynak Sonrası Mekanik Uzatma Modeli	52
3.1.2. Mekanik Uzatmanın Üç Boyutlu Modeli	54
3.2. Isıl Gerilme	56
3.2.1. Isıl Yükün Seçimini Etkileyen Faktörler	56
3.2.2. Hareket Eden Ve Sabit Isı Kaynaklarının Yerleştirilmesi	58
3.2.3. Isıl Gerilme Mekanizması	61
3.3. Açısal Çarpılmanın Düzeltme Teknikleri	62
4. AYDIN SINIFI MAYIN AVLAMA GEMİLERİNİN İNŞASI	65
4.1. Mayın Avlama Gemilerinin inşasında kullanılan ana malzemeler	65
4.1.1. Cam Elyafıyla Takviyeli Plastik	66
4.1.2. Manyetik Olmayan Çelik	66
4.2. Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı	67
4.2.1. Aydın Sınıfı Mayın Avlama Gemilerinde Ostenitik Paslanmaz Çeliğin Kullanımı	68
4.2.2. Aydın Sınıfı Mayın Avlama Gemilerinde Karşılaşılan Kaynak Distorsiyonları	69
4.2.3. Kaynak Distorsiyonlarını Düzeltme İşlemi	71
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	73
5.1 Deneyde Kullanılan Ölçme Sistemi	73
5.1.1 Kaynak Tezgâhı	73
5.1.2 Optik Uzaklık Sensörü (Lazer)	74
5.1.3. Adım motoru	76
5.1.4 Tarama Mekanizması	77
5.1.5 Ölçme Sisteminde Kullanılan Bilgisayar Donanımı	77
5.1.6 Termal Kamera	78
5.1.6.1 Termal Kamera Kalibrasyonu	80
5.1.7 Termokupul	80
5.2 Deney Parçasının Boyut Ölçümü	81
5.3 İlave Isı Girdisi	82
5.4 Deney Şartları	83
5.4.1. 1 Numaralı deneyin yapılışı	84
5.4.2. 2 Numaralı deneyin yapılışı	86
5.4.3. 3 Numaralı deneyin yapılışı	87
5.4.4. 4 Numaralı deneyin yapılışı	89
5.4.5. 5 Numaralı deneyin yapılışı	89
5.4.6. 6 Numaralı deneyin yapılışı	91
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	94
6.1. Deney Sonuçları	94
6.1.1. 1 Numaralı deneyin sonucu	94
6.1.2. 2 Numaralı deneyin sonucu	95
6.1.3. 3 Numaralı deneyin sonucu	96
6.1.4. 4 Numaralı deneyin sonucu	97
6.1.5. 5 Numaralı deneyin sonucu	98
6.1.6. 6 Numaralı deneyin sonucu	99

6.2. Deney sonuçlarının Değerlendirmesi	100
6.3. İlerde Yapılabilecek Çalışmalar	101
KAYNAKLAR	102
EK-A	105
EK-B	113
EK-C	116
ÖZGEÇMİŞ	125

KISALTMALAR

MAG	: Metal Active Gas
LSND	: Low Stress No Distortion
MKT	: Mayın Karşı Tedbir
GRP	: Glass-Reinforced Plastic
ITAB	: Isının Tesiri Altındaki Bölge
EN	: Euro Norm
LED	: Light Emitting diyote
MCM	: Mine Countermeasures

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Çeşitli kaynak yöntemlerinde ark verim katsayısı	8
Tablo 4.1. Mayın avlama/tarama gemisine sahip ülkeler	67
Tablo 4.2. Sıcaklık ve çeliğin karbon içeriğine göre en kısa sürede çökelmenin başladığı kritik sıcaklık.....	68
Tablo 4.3. X2CrNiMnMoNNb21-16-5-3 çeliğinin kimyasal bileşimi (EN DIN 1.3964).....	68
Tablo 5.1. Kaynak Şartları.....	84
Tablo A.1. Hücumbot inşasında, kaynak distorsiyonlarının alevle düzeltme işleminin, tüm kaynaklı imalattaki payı.....	105
Tablo A.2. Aydın sınıfı mayın avlama gemilerinin inşasında, kaynak distorsiyonlarının alevle düzeltme işleminin, tüm kaynaklı imalattaki payı.....	107

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	Kaynak arkı ve oksî-asetilen alevinin kaynak yoğunluklarının karşılaştırması.....	9
Şekil 2.2	Kaynak bağlantılı ısı iletimi için üç değişik sınır koşulunun şematik olarak gösterimi.....	10 13
Şekil 2.3	Gerçek gerilme-uzama eğrisi.....	
Şekil 2.4	Akma kriterinin asal gerilme boşluğu içerisinde geometrik gösterimi.....	17 18
Şekil 2.5	Deviatoric akma bölgesinin altı simetri eksene sahip olması....	
Şekil 2.6	İzotropik ve kinematik sertleşme kurallarının şematik gösterimi.....	19 21
Şekil 2.7	Çeşitli kaynak distorsiyon şekilleri.....	
Şekil 2.8	Sabit taban ve tavanlarla kısıtlanmış üç çubuk sistemi ve alın kaynağı ile simülasyonu.....	22 24
Şekil 2.9	Prizmatik bir yapıda gerilme kinetikleri.....	
Şekil 2.10	Kaynak esnasında sıcaklık ve gerilmenin değişiminin şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.11	Kaynak boyunca gerilmelerin ve sıcaklık dağılımlarının şematik gösterimi	27 28
Şekil 2.12	Enine gerilme gelişmesi.....	29
Şekil 2.13	Boylamasına kaynak gerilmelerine örnekler.....	30
Şekil 2.14	Karakteristik dilatometrik eğri.....	31
Şekil 2.15	Üç boyutlu boylamasına gerilme dağılımı.....	32
Şekil 2.16	Kaynak uzunluğunun etkisi.....	33
Şekil 2.17	Tek dikişli alın kaynağında enine artık gerilmeler.....	34
Şekil 2.18	Üç boyutlu enine artık gerilme gösterimi.....	35
Şekil 2.19	kalınlık boyunca enine kaynak gerilmeleri.....	36
Şekil 2.20	Kaynak enine çekme oluşumu.....	38
Şekil 2.21	Düzlemsel deformasyon dağılımı.....	
Şekil 2.22	Kaynağa hattına paralel yerleştirilen noktaların enine yer değiştirmeleri.....	39
Şekil 2.23	Alın kaynaklarında dönme distorsiyonundaki açılma ve kapanmaları gösteren şema.....	39 41
Şekil 2.24	Parça kalınlığı-açısal çarpılma ilişkisi.....	
Şekil 2.25	Parçanın kararlılığını kaybederek ondüle distorsiyona uğraması.....	41 42
Şekil 2.26	Açısal çarpılmanın gelişiminin şematik gösterimi.....	
Şekil 2.27	Kaynak işleminde zamanın bir fonksiyonu olarak ısınma ve soğumaya bağlı açısal çarpılma	43
Şekil 2.28	Kaynak uzunluğu boyunca ısı girdisine bağlı olarak açısal çekme.....	44 45
Şekil 2.29	Ondüle distorsiyon şekli.....	47
Şekil 2.30	Sınır Koşulları.....	47

Şekil 2.31	Kritik ondüle gerilme.....	48
Şekil 2.32	Kritik ondüle gerilme.....	53
Şekil 3.1	Mekanik doğrultmanın prensiplerini gösteren üç çubuk sistemi	
Şekil 3.2	Mekanik uzatmanın şematik gösterimi.....	54
Şekil 3.3	Mekanik düzeltme etkisi.....	55
Şekil 3.4	Kaynak sonrası mekanik düzeltme işleminin boylamasına kalıcı çekmelere etkisi.....	56
Şekil 3.5	Isı gerilmesi tekniğinin gösterimi.....	56
Şekil 3.6	Maksimum ısıtma sıcaklığının hesaplanması.....	57
Şekil 3.7	İlave ısıtıcıların seçimini etkileyen ana faktörlerin gösterimi....	57
Şekil 3.8	Isıl gerilme düzeltme etkisi.....	59
Şekil 3.9	Isıl gerilme düzeltme etkisi.....	60
Şekil 3.10	Kaynak merkez çizgisi boyunca boyuna gerilme dağılımı.....	61
Şekil 3.11	Isıl gerilmenin mekanizması.....	62
Şekil 3.12	Açısal çarpılmayı önleyici teknik, kaynak altından hareketli ısı kaynakları ve soğutmanın uygulanması.....	63
Şekil 3.13	Açısal çarpılmada uygulanan tekniklerin etkisi.....	63
Şekil 3.14	Açısal çarpılmanın önlenmesi için ısı kaynağının arkasına hareket eden su püskürtmesi ilave edilmesi.....	64
Şekil 4.1	Aydın Sınıfı mayın avlama gemisi.....	65
Şekil 4.2	Çeşitli metallerin ısı iletkenlik oranları.....	69
Şekil 4.3	Çeşitli metallerin ısı genleşme oranları.....	69
Şekil 4.4	Sıkça karşılaşılan çeşitli kaynak distorsiyonları.....	70
Şekil 4.5	Kaynak sonrası distorsiyona uğramış parça.....	70
Şekil 4.6	Kaynak sonrası distorsiyona uğramış parça.....	70
Şekil 4.7	Alevle düzeltme işlemi.....	71
Şekil 4.8	Alevle düzeltme işlemi.....	71
Şekil 4.9	Alevle düzeltme işlemi yapılmış köprü üstü görünümü.....	72
Şekil 4.10	Alevle düzeltme işlemi yapılmış köprü üstü görünümü.....	72
Şekil 5.1	Deneyde kullanılan kaynak tezgahı.....	73
Şekil 5.2	Kaynak Tezgâhında yapılan alın kaynağıyla ilgili deneylerden bir görünüm.....	74
Şekil 5.3	Kaynak tezgâhının çift taraflı kaynak yapabilecek şekilde tadilat yapılmış durumu.....	74
Şekil 5.4	Lazer ölçme sisteminin şematik gösterimi.....	75
Şekil 5.5	Ölçme sisteminde kullanılan lazer cihazı ve hareket mekanizması.....	76
Şekil 5.6	Deneyde Kullanılan adım motoru.....	76
Şekil 5.7	Kaynak tezgahında boyut ölçümünün şematik gösterimi.....	77
Şekil 5.8	Deneyde kullanılan bilgisayar programı ekranından görünüm..	77
Şekil 5.9	Bilgisayar Donanımı.....	78
Şekil 5.10	Deneyde kullanılan termal kamera.....	78
Şekil 5.11	Deneyde kullanılacak malzemelerin termal kamera için boyanması.....	79
Şekil 5.12	Çinko silikat kaplı plakanın yüzey emisyonunu gösteren diyagram.....	79
Şekil 5.13	Termal kameranın kalibrasyonu için kullanılan düzeneğin termal resmi.....	80
Şekil 5.14	Termokupulların plakanın alt kısmına yerleşim planı.....	80

Şekil 5.15	Kaynak esnasında sıcaklık ölçümü için termokupulların montesi.....	81
Şekil 5.16	Kaynak işlemi öncesi bir deney parçasının boyutsal ölçümü....	81
Şekil 5.17	Deney parçasına ilave ısı girdisi uygulamasının şematik gösterimi.....	83
Şekil 5.18	Deneyde kullanılan ilave ısı girdisinin test ölçümleri.....	83
Şekil 5.19	Deney parçasının şematik gösterimi.....	84
Şekil 5.20	Serbest hareketli deney parçasının kaynak öncesi görünümü.	85
Şekil 5.21	Kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı	86
Şekil 5.22	Termokupul kullanılarak elde edilen kaynak sıcaklık dağılımı..	87
Şekil 5.23	Hareketi kısıtlanmış deney parçasının kaynak sonrası görünümü.....	87
Şekil 5.24	termokupul kullanılarak elde edilen kaynak sıcaklık dağılımı...	88
Şekil 5.25	Hareketi kısıtlanmış ilave ısı girdili deney parçasının kaynak işlemi.....	88
Şekil 5.26	Kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	89
Şekil 5.27	termokupul kullanılarak elde edilen kaynak sıcaklık dağılımı..	90
Şekil 5.28	Serbest hareketli ilave ısı girdili deney parçasının kaynak sonrası görünümü.....	90
Şekil 5.29	Kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	91
Şekil 5.30	termokupul kullanılarak elde edilen kaynak sıcaklık dağılımı..	92
Şekil 5.31	Kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	92
Şekil 5.32	termokupul kullanılarak elde edilen kaynak sıcaklık dağılımı..	93
Şekil 6.1	1 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü.....	94
Şekil 6.2	1 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi.....	95
Şekil 6.3	2 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü.....	95
Şekil 6.4	2 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi.....	95
Şekil 6.5	3 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü.....	96
Şekil 6.6	3 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi.....	96
Şekil 6.7	4 numaralı deney parçası kaynak sonrası görünümü.....	97
Şekil 6.8	4 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi.....	97
Şekil 6.9	5 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü.....	98
Şekil 6.10	5 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi.....	98
Şekil 6.11	6 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü.....	99
Şekil 6.12	6 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi.....	99
Şekil B.1	1 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü.....	113
Şekil B.2	2 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü.....	113

Şekil B.3	3 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü.....	114
Şekil B.4	4 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü.....	114
Şekil B.5	5 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü.....	115
Şekil B.6	6 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü.....	115
Şekil C.1	1 numaralı deneyin kaynak esnasında LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	116
Şekil C.2	1 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	117
Şekil C.3	1 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	117
Şekil C.4	1 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	118
Şekil C.5	3 numaralı deneyin kaynak esnasında LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	118
Şekil C.6	3 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	119
Şekil C.7	3 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	119
Şekil C.8	3 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	120
Şekil C.9	5 numaralı deneyin kaynak esnasında LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	120
Şekil C.10	5 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	121
Şekil C.11	5 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	121
Şekil C.12	5 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	122
Şekil C.13	6 numaralı deneyin kaynak esnasında LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	122
Şekil C.14	6 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	123
Şekil C.15	6 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	123
Şekil C.16	6 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı.....	124

SEMBOL LİSTESİ

Q	: net ısı girdisi [W]
η	: ark verim katsayısı
U	: arkın voltajı [V]
I	: akım, [A]
λ	: Isı iletim katsayısı
c	: Kütleli ısı kapasitesi [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]
ρ	: malzeme yoğunluğu [$kg.m^{-3}$]
q_3	: ısı kaynağının hacimsel yoğunluğu [$W.m^{-3}$]
a	: ısı difüzivite katsayısıdır [$m^2.s$].
T_s	: Cismin dış yüzey sıcaklığı [$^{\circ}C$]
T_0	: başlangıç sıcaklığı [$^{\circ}C$]
q_{2s}	: Cismin dış yüzeyindeki ısı akısı
C	: Stefan-Boltzmann'ın katsayısı
l	: Test parçasının uzunluğu
dl	: gerilme sonucu uzamadaki değişim
ε	: toplam uzama
e	: mühendislik uzaması
σ_Y	: Akma sınırı [N/mm^2]
σ_{ij}	: Gerilme tansörü
σ	: gerilme [N/mm^2]
σ_{max}	: maksimum gerilme
ε^e	: elastik uzama
ε^p	: plastik uzama
ε^I	: ısı kaynaklı uzama
E	: elastisite modülü,
G	: kayma modülü
ΔT	: sıcaklık farkı
T_{max}	: maksimum sıcaklık [$^{\circ}C$]
ε_{tr}	: Artık gerilme dağılımı değişim uzaması
q_w	: uzunluk başına ısı girdisi [$J.S^{-1}.m^{-1}$]
Δ_{tr}	: plastik deformasyon miktarı
μ_{tr}	: enine çekme katsayısı
μ_l	: boyuna çekme katsayısı
L_w	: kaynak uzunluğu [m]
A	: kesit alanı [m^2],

β	: Açısal değişim
v	: kaynak hızı (mm.s^{-1})
w	: sapma miktarı [mm]
ν	: Poisson oranı
h	: plaka kalınlığı [mm]
N_x	:orta-plaka yükü [N/m]
η_x	: artık gerilme yükü [N/m]
σ_x	: boyuna gerilme [N/mm^2]
ε_x^p	: sabit ısıtma bantları için x yönündeki plastik uzama

**OSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK PLAKANIN (EN DIN 1.3964)
T BAĞLANTI KAYNAĞINDA İLAVE ISI GİRDİSİ UYGULAMASININ
MEYDANA GELEN DİSTORSİYONA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

ÖZET

Türk Deniz Kuvvetlerinin modernizasyonu kapsamında İstanbul Tersanesi Komutanlığı/Pendik'te, Alman Abeking&Rasmussen ve Lürssen firmalarının konsorsiyumu ile Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemileri inşa edilmektedir.

Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin, genel olarak dünya bahriyesindeki mayın avlama gemilerinden farkı, bu sınıf gemi inşasında kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerdir. Hali hazırda bu çeliği, Alman, İtalyan ve Kanada donanmaları kullanmaktadırlar. Anılan çeliğin, mayın avlama gemilerindeki kullanım amacı, manyetik olmamaları, deniz suyu korozyonuna dayanımlı olmaları ve yüksek mukavemete sahip olmalarıdır. Ancak manyetik olmayan ostenitik paslanmaz çeliklerin, ısı iletimlerinin kötü, buna mukabil ısı genleşmelerinin yüksek olması, bu çeliklerin kaynak sonrası distorsiyonlarının, diğer çeliklere oranla, daha fazla olmasına neden olmaktadır. Bu durum, kaynaklı parçaların montajları esnasında, birleştirme problemlerine yol açtığından, her kaynak işleminden sonra kaynaklı parçalar, alevle düzeltme işlemine tabi tutulmaktadır.

Günümüzde kaliteli bir ürün meydana getirirken ekonomik olması da büyük önem arz etmektedir. Kaynak distorsiyonlarının alevle düzeltme işleminin, zaman, işçilik ve harcanan malzeme olarak getirdiği yükün azaltılması üretim maliyetlerini düşüreceğinden ülke ekonomisine bir katkı olacaktır.

Bu tezin amacı, İstanbul Tersanesi Komutanlığı/Pendik'te imali devam eden Aydın Sınıfı mayın avlama gemilerinin kaynak işlemi sonrasında meydana gelen distorsiyonlarını en aza indirmek amaçlı, kaynak esnasında uygulanan ilave ısı girdisinin bir yöntem olarak uygulanabilirliğinin ispat edilmesidir.

Bir nevi onarım olan alevle düzeltme işlemi yerine, kaynak esnasında, ilave ısı girdisi verilerek Isıl Gerilme Tekniği'nin uygulanması, kaynak distorsiyonlarını önleyici bir işlem olarak, gemi inşa sanayinde, üzerinde bilimsel araştırmalar yapılan bir konudur.

Strathclyde Üniversitesi'nde yapılan deneyde, ostenitik paslanmaz çelikten mamul T kaynaklı bir parça temel alınarak, belirli şart ve koşullarda gazaltı kaynağı uygulanarak, termal kamera ile parça üzerinde kaynak ısısının ve ilave ısı girdisi ısısının dağılımı, termokupullar ile noktasal sıcaklık ölçümleri, lazer cihazı kullanılarak düzlemsellik ve distorsiyon ölçümleri yapılmıştır. Sonuç olarak İstanbul Tersanesi Komutanlığında ve İskoçya Strathclyde Üniversitesi'nde yapılan deneyler sonucunda, kaynak esnasında parçaya ilave ısı girdisi verilerek, Isıl Gerilme Tekniği uygulanmasının, T kaynaklı parçalarda, ondüle şeklindeki (buckling) distorsiyonlarını önlediği ve açılma çarpılmaları azalttığı ispatlanmıştır.

Isıl Gerilmesi Tekniği'nin öncelikle Aydın Sınıfı mayın avlama gemilerinin inşasında ve diğer gemi inşa sanayinde uygulanması ülke ekonomisine önemli katkılar sağlayacaktır.

EXAMINATION OF WELDING DISTORTION VIA APPLYING THERMAL TENSIONING TECHNIQUE ON STIFFENED WELDED PLATE OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL (EN DIN 1.3964)

SUMMARY

Under the construction of German Mine Hunter Consortium (Abeking&Rasmussen and Lürssen), Istanbul Shipyard/Pendik is building Aydın Class Mine Countermeasures (MCM) Vessels for Turkish Navy.

Aydın Class Mine Countermeasures (MCM) Vessels distinct from the other world navies because of their hull which made of austenitic stainless steel. Nowadays, German, Italian and Canadian navies use this type of steel for ship hulls. Austenitic stainless steel has many advantages, like resistant to the corrosion of sea water, high yield point and non-magnetic structure. But these metals are having also disadvantages, like poor heat conduction and high thermal expansion. These disadvantages create more distortions than normal steels in welding conditions. Fittings of welded structure are very important section in shipbuilding, so geometry of welded structure need to be accurate. For straightening of distortions, flame straightening method is widely using in shipbuilding industry.

Nowadays for quality products it is necessary to reduce price. Straightening of distortions via flame straightening method is extra consuming time, manpower and materials. So improving of straightening of distortions will be benefit for budget of government.

This thesis aim is to show benefits of usage of Thermal Tensioning Technique as a method of straightening of distortions for Aydın Class Mine Countermeasures (MCM) Vessels which are building at the Istanbul Shipyard/Pendik.

Straightening of distortions via Thermal Tensioning Technique is examining for ship building industry as a preventing method with many academic researches.

The experiment in the Strathclyde University, stiffened panel made of austenitic stainless steel is used. In specific condition under gas protection weld (MIG), thermal camera is used for distribution of heat, thermo couples are used for temperature measurement and laser appliance is used for distortion measurements. As a result, the experiments in Strathclyde University proved that Thermal Tensioning Technique prevent buckling distortions and improves angular distortions on stiffened welded plates.

Usage of Thermal Tensioning Technique for Aydın Class Mine Countermeasures (MCM) Vessels and also other type of ship building industry is additional benefit and assistance for economy.

1. GİRİŞ

Günümüz sanayinde yaygın olarak kullanılan kaynak teknolojisinin daha verimli ve ekonomik olması için birçok çalışma yapılmış ve halen yapılmaktadır. Bu çalışmalardan kaynak sonrası meydana gelen artık gerilmeler ve bunların sebep olduğu kaynak distorsiyonları bu tezin konusunu oluşturmaktadır.

Gemiler, yüzyıllar boyunca taşımacılıkta en ön sırada yer almışlardır. Tarihe bakıldığında geçmişten günümüze, gemicilik ve gemi inşa sanayi yüksek süratli bir gelişme sağlamıştır. Geçmişte ağaçtan yapılan kanolardan, günümüzde devasa boyuttaki, yüksek mukavemetli çelikten mamul gemilere kadar, gemi inşa sanayi önemli bir gelişme kaydetmiştir. Gemilerin inşa metotları da her devir içerisinde sürekli gelişme kaydetmiştir. Geçmiş yüzyıllardan günümüze gemi inşa süresi kısalmıştır. Bu müthiş ilerleme hızı, gemi inşa sanayinde kullanılmaya başlayan icatların sayesinde olmuştur. Bunların en önemlisi 1930 lu yıllarda sektöre giren yeni bir birleştirme yöntemi olan kaynak teknolojisidir.

Kaynak teknolojisinin başlangıcında, yeni malzemeler ve teknikler uygulanmaya başlanmış ve bu durum beraberinde birçok problem de ortaya çıkarmıştır. Bunların en dramatik sayılabilecek örneği, 1940 lı yıllarda, Liberty sınıfı gemilerin, Amerika Birleşik Devletleri'nde, kaynak teknolojisi kullanılarak, yaklaşık 250 günde denize indirilmeleridir. Hatta bu sınıf gemilerin en hızlı inşası 7 gün 14 saat ve 23 dakikada denize indirilenidir [1]. Bu gemilerin tarih sahnesinde yerlerini almaları, sadece kısa sürede inşa edilmeleriyle değil, çok başka bir sebep olan, kısa süre ikiye ayrılıp batmalarıyla. Buna sebep olarak kaynak teknolojisinin çok yeni olmasıyla birlikte, tecrübe ve bilgi eksikliğinden kaynaklanan hatalar gösterilmiştir.

Kaynak distorsiyonlarının azaltılması için ısı girdisinin azaltılması ve konstrüktif önlemler, ilk başta yapılması gerekenler olmakla birlikte, tasarımın getirdiği bazı kısıtlamalar, kaynak sonrası meydana gelen distorsiyonları önleyememektedir. Bu çalışmada, deneysel olarak, ilave ısı girdisinin, donanma gemilerinde kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerin, gazaltı kaynağında meydana gelen ondüle distorsiyonlarını önlenebileceği kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Kaynak teknolojisinin kullanımının yaygınlaşması, tasarımcıya geniş bir yelpazede kolaylıklar sağlamakla birlikte, artık gerilmelerin sebep olduğu distorsiyonlar, kaynaklı yapının şeklini olumsuz etkilemektedir. Günümüzde yüksek mukavemetli çeliklerin artışı ile birlikte, ağırlıktan tasarruf sağlamak amacıyla, ince sacların kullanımı artmıştır. Özellikle gemi sanayinde ince sacların kaynaklı birleştirmeleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak sac kalınlıklarının azalması, kaynak sonrası artık gerilmelerin neden olduğu distorsiyonları belirgin hale getirmekte, yapının şekli bozulmakta ve boyut toleransları değişmektedir. Bu durum da, parçaların montaj aşamalarında, boyut değişikliği nedeniyle sorunlar yaşanmasına sebep olmaktadır. Bu durumu düzeltmek amacıyla, yaygın olarak alevle düzeltme işlemi uygulanmaktadır. Ancak bu işlem, yoğun olarak iş gücü kullanmayı gerektirmekte, üretim zamanı artmakta ve kullanılan ilave malzemeler (asetilen, oksijen v.b.) sebebiyle maliyeti arttırmaktadır. Genel olarak, alevle düzeltme işlemi zamanının, tüm kaynaklı birleştirmedeki zamana oranı, %10 ila 20 civarında verilmektedir [2]. Bu oran Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerde yaklaşık %35 [Tablo A.1] olup üretim maliyeti açısından önemli yükler getirmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, İstanbul Tersanesi Komutanlığı'nda halen inşası devam eden Aydın sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde sıkça kullanılan, T şeklindeki kaynaklı bağlantıların, gaz altında çift taraflı kaynakları sonrası meydana gelen ondüle şeklindeki distorsiyonlar ele alınarak, kaynak esnasında ilave ısı girdisi ile bu distorsiyonların önlenebileceği ispatlanmaya çalışılmıştır.

1.2. Çalışma Metodu

Literatürdeki çalışmalar ışığında, kaynak esnasında ilave ısı girdisi uygulama yöntemine ait teorik bilgilerle, Strathclyde Üniversitesi/İskoçya'da Makine Mühendisliği Bölümü Deney Laboratuvarı'nda yapılmak üzere bir deney yöntemi oluşturulmuştur.

Deneyde, Türk Donanması'na ait Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin inşasında kullanılan ostenitik paslanmaz çelikten plakalar kullanılmıştır. Deney şart

ve koşulları İstanbul Tersanesi/Pendik'te inşası devam eden mayın gemileri temel alınarak oluşturulmuştur.

Deneyde kullanılan plakalar, kaynak işleminden önce, termal kamera görüntüsü için özel boya ile boyanmışlardır, daha sonra T parçası olarak kullanılan plakaların her biri, punta kaynağı ile ana gövdeye tutturulmuştur. Bu işlemlerden sonra lazer cihazı ile boyutsal ölçümleri yapılan plakalar, sırasıyla, tersanedeki koşullarda ve ilave ısı girdisi uygulamasıyla kaynak edilmişlerdir. Kaynak işlemi esnasında plakaların altına yerleştirilen termokupullarla ve termal kamerayla, sıcaklık ve ısı dağılımları kaydedilmiştir. Kaynak işleminden sonra meydana gelen deformasyonu ölçmek amacıyla her bir plaka lazer cihazıyla tekrar boyutsal ölçüm işlemine tabi tutulmuştur.

Deneyin amacı olan, distorsiyonların ilave ısı girdisi ile önlenmesi çalışması, ilave ısı girdisi için belirlenen parametrelerin uygulanmasına ve elde edilen neticelere göre, en uygun şart ve koşulların elde edilmesi için bu parametrelerin değiştirilerek tekrar edilmesi prensibine dayandırılmıştır.

1.3. Literatür  zeti

Özellikle ince levhalarda meydana gelen ondüle şeklindeki distorsiyonlar hem deneysel hem de sayısal metotlarla birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır [3–15]. 1959 yılında Watanabe ve Satoh soyadlı araştırmacılar, ondüle şeklindeki distorsiyonu, yapı çeliğinden mamul ince plakaların kaynağında gözlemişlerdir [3]. Yine aynı yıl, Masubuchi bu alanda yaptığı çalışmalarını daha da ileri götürerek aynı sonuçları gözlemlemiştir [4]. Bahsedilen bu çalışmalarda dar ve uzun levhalar kullanılmıştır. 1972 yılında, Taniguchi, sayısal ve deneysel yaklaşımın birleşimi bir çalışma ile alüminyum panel yapıların kaynağında açısal çarpılmayı incelemiştir [5]. Bu çalışmada levha kalınlığı ile açısal çarpılma arasında bir bağını ortaya konmuştur. 1975 yılında Pattee, çeşitli sınır koşullarında alüminyum levhaların ondüle şeklindeki distorsiyonlarını incelemek üzere deneysel çalışmalar yapmıştır [6]. Elde ettiği sonuçlar daha önce bahsedilen araştırmacılar ile aynı gözlemlere dayanıyordu. 1976 yılında Satoh ve Terasaki, geniş bir araştırma yaparak, çeşitli malzemelerin kaynaklarında artık gerilmeleri önleyecek açısal çarpılmayı ve enine çekmeyi tanımlayacak basit bir formülasyon geliştirmişlerdir [7]. Terai, gemi inşasında kullanılan ince levhalarda kaynak distorsiyonlarını giderecek çeşitli düzeltme

teknikleri üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bunlar n ısıtma ve n gerilme gibi uygulamalardı [8]. Bu metotların kaynak imalatında uygulanmasıyla açısıal çarpılma oranları düşüş göstermiştir. Penso, yumuşak çelikler üzerinde eğilme şeklindeki distorsiyonların analizi için, teorik ve deneysel çalışmalar yapmıştır [9]. Terai, n ısıtma ve n gerilme uygulamaları ile ondüle şeklindeki distorsiyonlar üzerinde çalışmalarını daha da ileri götürerek başarılı neticeler aldı [10]. Uzun yıllar araştırmacılar kaynak sonrası meydana gelen distorsiyonların tahmini için sonlu elemanlar metoduyla çalışmalar yaptılar. Birçok karmaşık modeller geliştirdi. Kaynak distorsiyonları hakkında önemli faydalar sağlayan bu karmaşık modeller, sanayide, uygulama safhasında yoğun olarak bilgisayar hesaplamalarına ihtiyaç duyduğu için pratik olarak kullanılmamıştır. Daniewicz, gemi inşasındaki imalatlar için teorik ve deneysel içerikli ve sonlu elemanlar metodunu kullanarak bir çalışma yapmış ve kaynak distorsiyonlarını tahmin etmeye çalışmıştır [11]. Son yıllarda Michaleris ve De-Biccari, büyük ve karmaşık yapılarda kaynak sonrası meydana gelen distorsiyonları tahmin edici sayısal analiz teknikleri geliştirmişlerdir [12]. Geliştirdikleri bu teknikle, iki boyutlu kaynak simölasyonunu, üç boyutlu yapı analizi ile birleştirmişlerdir. Sayısal teknik, ondüle kaynak distorsiyonlarını değerlendirmekte kullanılmıştır. Termal-elastik-plastik kaynak simölasyonu ve sonlu elemanlar analizi ile uygulanan kaynak yükü ve yapının kritik ondüle değerinin tespit edilmesine çalışılmıştır. Bu yöntem özellikle araştırmacının termal gerilme yaratarak, ince levhaların kaynak distorsiyonlarını önleyici çalışmalarında kullanılmıştır. Düzeltme teknikleri konusunda, gerek kaynak öncesi, gerekse kaynak sonrası ısı uygulamalarına ilişkin birçok patent alınmıştır. Örneğin Japonya’da alınan JP-A-6018292 numaralı patent, kalın plakalardaki açısıal çarpılmaları kontrol altına almakla ilgili, kaynak sonrası işlemlerle ilgiliydi. Buna göre, kaynak bitiminde, kaynak bölgesi soğutulurken kaynağın her iki yanına ısı uygulanmakta, böylelikle düzgün bir ısı dağılımıyla açısıal çarpılmalar minimuma indirilmekteydi. Sovyet patenti SU-A-1066765 ise kaynak bölgesindeki sıcaklık yükselmesini önleyici ısı emen malzemeler kullanmaktaydı. Bir başka Japon patenti JP-A 5311138 de açısıal çarpılmayı önleyici ilave ısı girdisi ve hareketi kısıtlanması uygulaması geliştirmiştir. Burada kaynağa yakın bölgenin ısınması ve kaynak bölgesinin soğuması sonucu, düzgün olmayan sıcaklık dağılımı sebebiyle çekme gerilmesi meydana gelir ve basma gerilmesini kontrol etmektedir. Bu metotta, kaynak boyunca, kaynağın her iki tarafı da sabitlenmektedir. Bu metot deneysel olarak Burak tarafından incelenmiştir

[13]. Ancak bu metodun, 4 mm den düşük kalınlıklardaki levhalarda pek verimli olmadığı Guan tarafından tespit edilmiştir [14]. Çin patenti 87100959, Guan tarafından alınmış [14] ve daha sonra Guan, Brown ve Guo tarafından geliştirilerek uluslararası patente (PCT/GB88/00136) dönüştürülmüştür [15]. Japon patenti JP-A-5311138 e benzer ancak, ilave ısı girdisi ve soğutması, daha aktif olan uygun şekilde hareket sınırlaması yapılmış bir yöntem uygulamışlardır. Bu metoda düşük gerilimli deformasyonsuz metot ismi verilmiştir. Bu yöntem 4 mm den düşük kalınlıklar için distorsiyonu önlediği belirtilmektedir.

2. KAYNAK DİSTORSİYONLARI

Kaynak teknolojinin gemi inşaa sektöründe uygulanabilirliğine yönelik geçmişten bu yana ciddi araştırmalar yapılmıştır. Kaynak işlemleri kaynak bölgesinin yüksek sıcaklıklara çıkmasına ve ardından soğumasına sebep olmakta ve bu durum hacimsel değişimlere, dolayısıyla, artık gerilmelere ve distorsiyonlara yol açmaktadır. Kaynak gerilmeleri ve deformasyonlar birbirleriyle yakından ilişkilidir. Kaynak bölgesindeki ısınma ve soğuma, ısı kaynaklı uzamalara sebep olmaktadır. Kaynak bölgesinin ısınmasıyla oluşan uzamalar, plastik şekil değişimlerine, bu da distorsiyonlara yol açan iç gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır.

Kalıcı deformasyonlar, kaynaklı parçaların montajında ve kalitelerinde birçok problem meydana getirirler. Distorsiyona uğramış ve boyutları değişmiş parçaların yapının kullanılabilirliğini önemli oranda düşürür. Bu sebepten dolayı gerilmeler ve şekil değişimleri, tasarım aşamasında düşünülmesi gerekli önemli konulardır. Yapıların kaynak sonrası durumları ve boyutsal doğrulukları tasarım aşamasında tahmin etmek son derece önemlidir.

Son on yılda gemi inşaa tasarımcıları, yakıt ekonomisini iyileştirmek, ağırlık tonajlarını azaltmak ve görev kapasitesini arttırmak amacıyla, gemi inşasında kullanılan levhaları daha ince ve daha hafif ağırlıkta olanlarla değiştirme zorunluluğu duymuşlardır. Bu durum artık gerilmelerin sebep olduğu deformasyon bozukluklarının artmasına sebep olmuştur.

2.1. Isı Alanları

Kaynak işlemlerinin çoğunun temel prensibi kaynaklı parçanın belirli bir kısmının ergime noktasına kadar ısıtılıp tekrar soğuması prensibine dayanır. Kaynak işlemlerinde, sıcaklık dağılımı, hem zaman, hem de yön bakımından düzgün olmayıp, kaynaklı parçaların deformasyon bozukluğunun ana sebebidir.

Kaynaklı birleştirmelerde deformasyon ve gerilme sorunları çözmek için öncelikle sıcaklık dağılımlarının yakından incelenmesi ve en uygun sıcaklık dağılımının tespit

edilmesi gerekmektedir. Kaynaklı parçalarda sıcaklık dağılımının tespiti için birçok bilimsel araştırmalar yapılmış ve halen yapılmaktadır.

Bu çalışmalardan bazıları şunlardır;

- Bir boyutlu çözümlerden, üç boyutlu çözümlere kadar (üç boyutlu ısı kaynağı dağılımı ve parça yüzeylerinden ısı kayıplarının dikkate alındığı) analitik modellemeler,
- Sonlu değişimler analizi
- Sonlu elemanlar metodu

Zaman içerisinde ısı transferi problemlerinin çözümü, bilgisayar kapasitelerinin artmasıyla değişime uğramıştır. Yukarıda verilen çalışmalardan ısı transferinde analitik çözümler altmış beş yıllık [16,17], sayısal çözümler ise otuz beş yıllık geçmişe sahiptir [18,19]. Son on beş yıldır ise sonlu elemanlar metodu yoğun olarak kullanılmaktadır [20].

Analitik metotlar, boyutsal olarak basit olan kaynaklarda, kabul edilebilir doğruluk oranlarında, sıcaklık dağılımlarının belirlenmesinde kullanılabilmektedir. Analizin doğruluk oranı, sıcaklık değişimlerinin kaynak arkına çok yakın olmadığı alanlarda daha yüksektir. Bu metodun avantajlarından biri ana faktörlerin (kaynak parametreleri, iş parçasının ana ölçüleri ve malzeme özellikleri) analizine olanak tanınması ve hesaplama zamanının çok kısa olmasıdır. Bunun yanında analitik çözümün ana sorunlarından biri doğrusal olmayan problemlerin çözümüne olanak tanımamasıdır.

Sonlu değişimler metotlarının kullanılması analitik ve sonlu elemanlar metotları arasında bir nevi geçiştir. Sonlu değişimler metodunun başlıca avantajı basit ve fiziksel olarak kolay anlaşılabilir olmasıdır. Ancak bu metotta kullanılan eğrisel alanlar oldukça karmaşıktır.

On beş yılı aşkın bir süredir, sonlu elemanlar metodu, ısı transferi problemlerinin çözümünde yaygın ve güvenilir olarak kullanılan bir teknik olmuştur. Bu zaman diliminde, işlemcileri hızlı ve kapasiteleri yüksek bilgisayarların da gelişimiyle, sonlu elemanlar analizi yapabilen ticari programlar piyasalara girmiş ve yaygınlaşmıştır.

2.1.1 Isı Kaynakları ve Geometri Tanımlaması

Arktaki elektrik enerjisinin tamamının ısı enerjisine dönüştüğü kabul edilmekle birlikte bu enerjinin tamamı ilave metalin ve ana parçanın ısınması için kullanılmamaktadır. Enerjinin bir kısmı ısı kaybı olarak harcanmaktadır. Kaynak arkının efektif enerjisi;

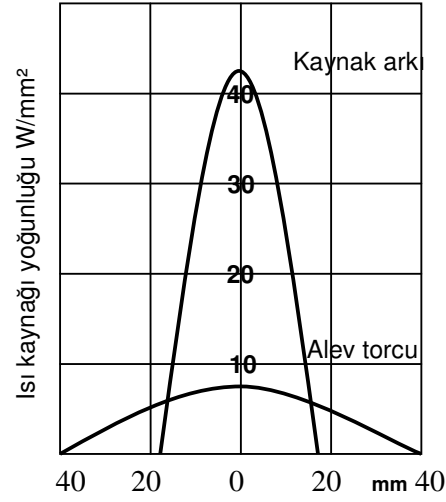
$$Q = \eta \cdot U \cdot I \quad (2.1)$$

Burada, Q net ısı girdisi , [W]; η ark verim katsayısı; U arkın voltajı [V]; I akım, [A]. Denklemden yer alan ark verim katsayısı η , kaynak yöntemine göre farklılık göstermektedir (Tablo 2.1)

Tablo 2.1: Çeşitli kaynak yöntemlerinde ark verim katsayısı [16]

Kaynak yöntemi	Örtülü elektrot ile	TIG kaynağı (argon gazı)	MIG kaynağı (argon gazı)	Tozaltı kaynağı
Akımın cinsi	Alternatif	Alternatif	Doğru	Alternatif
η değeri	0,70–0,85	0,22–0,48	0,66–0,69	0,90–0,99

Kaynak işleminde ısı kaynağındaki güç yoğunluğu da önemli bir parametredir. Şekil 2.1 de kaynak ısı sağlayıcısının ısı yoğunluklarının ne kadar farklı olabileceği gösterilmiştir [21] . Buna göre alev torcu geniş ve düşük yoğunlukta, buna mukabil kaynak arkı ise dar ve yüksek yoğunlukta. Yine plazma, elektron ve lazer kaynakları, daha dar ve daha yüksek yoğunlukta. Bir ısı kaynağı modeli seçerken yukarıda bahsedilen konuya uygun bir model seçilmelidir.



Şekil 2.1: Kaynak arkı ve oksii-asetilen alevinin kaynak yoğunluklarının karşılaştırması (net ısı girdisi her iki halde sabit) [21]

2.1.2 Temel Denklemler

Isı transferinin temel denklemlerinden biri Fourier in ısı iletim kanunudur. Bu denklem sıcaklık gradyene $\frac{\partial T}{\partial n} [K.m^{-1}]$ bağlı olarak ısı akış yoğunluğunu $q_2 [J.m^{-2}.s^{-1}]$ temsil eder (2.2). Bir başka ifade ile bir katı içerisinde ısı sıcaktan soğuk alanlara doğru yayılır.

$$q_2 = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.2)$$

Isı iletim katsayısı λ , kimyasal bileşime, mikro yapıya ve sıcaklığa bağlıdır.

Isı transferi analizinin başlıca prensiplerinden, bahsedilmesi gereken diğer bir denklem, ısı iletiminin alan denklemidir (2.3). Fiziksel olarak, zamana bağımlı sıcaklık dağılımını ve yönsel durumu birbirine bağlar.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_3 \quad (2.3)$$

c Kütleli ısı kapasitesi $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$ ρ malzeme yoğunluğu $[kg.m^{-3}]$ ve q_3 ısı kaynağının hacimsel yoğunluğu $[W.m^{-3}]$ dur.

(2.3) denklemi Fourier ısı iletim kanunu ve enerjinin korunumu kanunundan kolayca türetilir.

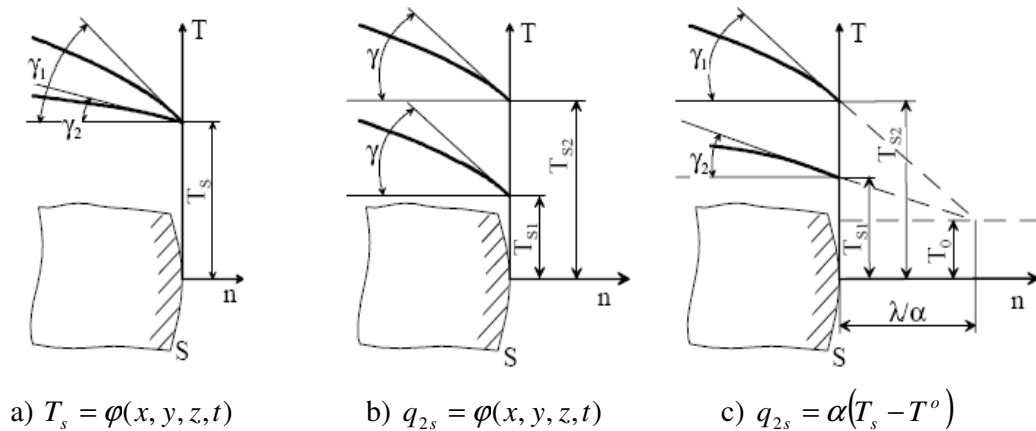
Genel durumlarda $c\rho, \lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ karakteristikleri sıcaklığa bağlıdır. (2.3) denkleminin kendisi doğrusal değildir. Analitik çözüm metodu, yukarıda bahsedilen faktörlerin sıcaklığa bağımlılığının ihmal edilmesini gerektirir (kaynak uygulamalarındaki ısı akış problemleri doğruluktan önemli bir kayıp vermeden doğrusallığa ve basitleştirmeye sonuç itibariyle varabilir). Bu varsayım ısı iletim alan denkleminin doğrusal basit haline götürmektedir (2.4).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_3}{c\rho} = a \nabla^2 T + \frac{q_3}{c\rho} \quad (2.4)$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \text{ ısı difüzivite katsayısıdır } [m^2.s].$$

2.1.3 Başlangıç ve Sınır Koşulları

Katı bir cisimdeki ısı iletimi problemini doğru bir biçimde formüle edebilmek için başlangıç ve sınır koşullarının bilinmesine ihtiyaç vardır. Problemde başlangıç sıcaklık dağılımı ($t=0s$) koordinatların $T(x,y,z,0)$ bir fonksiyonudur. Kaynak uygulamalarında başlangıç koşulları genellikle izotermaldir. $T(x,y,z,0)=T_0 = sbt$.



Şekil 2.2: Kaynak bağlantılı ısı iletimi için üç değişik sınır koşulunun şematik olarak gösterimi a) tanımlı yüzey sıcaklığı b) tanımlı ısı kaynağı yoğunluğu c) Newton'un ısı etkileşimi kanunu [23]

Sınır koşulları iş parçasının çevresiyle ilişkisinin kurallarını temsil eder. Kaynakla ilgili problemlerde genellikle üç çeşit sınır koşulu mevcuttur [23], bunlar;

1. Cismin dış yüzey sıcaklığı zamanın ve yerin bir fonksiyonu olarak verilmiştir (yüzeyin tanımlanmış sıcaklığı).
2. Cismin dış yüzeyindeki ısı akısı zamanın ve yerin bir fonksiyonu olarak verilmiştir (tanımlanmış ısı kaynağının yoğunluğunun yüzey boyunca zamanın fonksiyonu olarak dağılımı).
3. Bir katı yüzey sıcaklığı farklı bir akışkanla temas ediyorsa temas yüzeylerindeki ısı akıları birbirine eşittir (tanımlanmış ısı kaynağının yoğunluğunun yüzey boyunca yüzey ve çevre sıcaklığının fonksiyonu olarak dağılımı).

Sınır koşullunun ilki, Şekil 2.2.a.'da grafik olarak gösterilmiştir. Burada, cismin içindeki sıcaklık dağılımının ne çeşit olduğunun önemi yoktur ve cismin yüzeyi T_s sıcaklığına ulaşmaya çalışır. Bu duruma bir örnek vermek gerekirse tüm yüzeyi kendisini çevreleyen su sıcaklığında olan, sualtı kaynağı özel bir durum olarak gösterilebilir. Yüzey boyunca ısı akışı Şekil 2.2.b.'de tanımlanmıştır. Bu durum tanjant γ değerlerini yüzeyde sıcaklık dağılımının belirli bir değerine sahip olmaya zorlar. Bu değer cismin içindeki sıcaklık dağılımıyla değişmez. Bu koşulla örneğin belirli bir yüzey boyunca bir sıcaklık dağılımı model olarak alınabilir.

Bu koşulların özel bir durumu adiyabatik sınır koşullarıdır. Adiyabatik sınırlar, özellikle basitleştirilmiş analitik yaklaşımlarda, yaygın olarak kullanılırlar. Bu çeşit bir durum, izotermelerin, söz konusu olan yüzeye dik olmaları durumunda oldukça iyi yaklaşımlar vermektedir.

Üçüncü çeşit sınır koşulu Newton'un ısınma/soğuma kanunu olarak da adlandırılır. Bu kanunun grafiksel gösterimi Şekil 2.2.c. dedir. Tanjant γ değerleri, yüzeydeki sıcaklık dağılımına, yüzeyden belirli bir uzaklıkta birbirleriyle kesişmeye zorlanır. Bu durum Fourier ısı iletimi kanunu ile açıklanabilir ve bu yolla bir matematiksel model oluşturulabilir (2.5).

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = \alpha (T_s - T_0) \quad (2.5)$$

Newton'un kanunu, parça yüzeyi boyunca ısı kaynağı/sönümlleme yoğunluğunun, ısı transfer katsayısı α boyunca yüzey sıcaklığı T_s ile çevre sıcaklığı T_0 arasındaki

sıcaklık farkıyla orantısal olmasını şart koşar. Bu katsayı bir ışıyım toplamı α_c gibi ve radyasyon α_r gibi ısı transfer katsayıları olarak sunulabilir.

α_c nin değeri, ısı değişim koşullarına ve malzemelere göre farklılık gösterir ve bu değer referans literatürlerde bulunabilir. Bu arada radyasyonla ısı iletimi katsayısı α_r listelenmemiş olsa bile 2.6 formülünden hesaplanabilir. C stefan-boltzmann'ın katsayısıdır ve bu katsayı ısı transferi konulu birçok kitapta yer almaktadır.

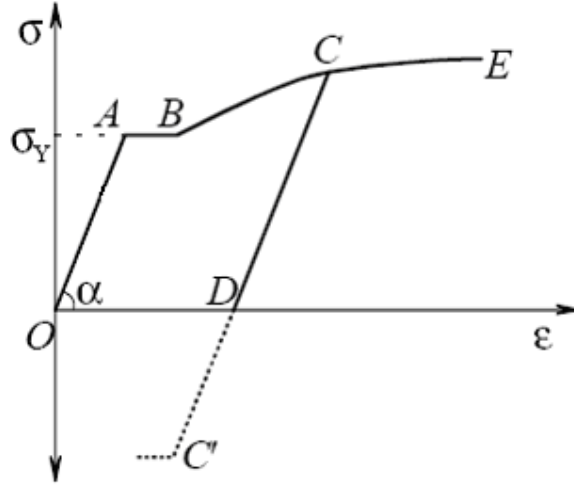
$$\alpha_r = C(T_s + T_0)(T_s^2 + T_0^2) \quad (2.6)$$

2.2 Kaynak Gerilme Alanları Ve Distorsiyon Analizi

2.2.1 Plastisite Teorisi Ana Prensipler

2.2.1.1 Metalik Malzemelerin Gerilme-Uzama Davranışları

Basit çekme ya da basma testleri, gerilme-uzama eğrilerini oluşturmak amacıyla yapılır. Gerçek gerilme, test parçasının, o anki kesit alanının yüke bölünmesiyle tanımlanmasına karşın, nominal gerilme ise (başlangıç kesit alanı kullanılarak) çok farklı olabilmektedir. l Test parçasının uzunluğu, dl ise gerilme sonucu uzamadaki değişim olarak tanımlanırsa gerçek uzama $d\varepsilon = dl/l$ dir. Başlangıç boyu l_0 ise toplam uzama $\varepsilon = \ln(l/l_0)$, gerçek ya da doğal uzama olarak adlandırılır. Diğer bir kavram ise mühendislik uzaması e dir. Bu değer, uzama ya da kısalma miktarının orijinal boya oranıdır. Doğal uzama mühendislik uzamasıyla gösterilirse $\varepsilon = \ln(1 + e)$ formülü kullanılır (uzama için) (basma için ise negatif değer) Böylelikle plastik deformasyon ε , çekme gerilmesinde, e den düşük, basmada ise büyüktür.



Şekil 2.3: Gerçek gerilme-uzama eğrisi [24]

Şekil 2.3 de gösterilen AB kısmı, metalde dislokasyonların tane sınırlarına ulaşmaya kadar serbestçe hareket etmelerinden sonra ortaya çıkar [24]. Bu durum sünek malzemelerin tipik bir özelliğidir. Akma sınırının bu özelliği genellikle ihmal edilir. Akma sınırının geçilmesiyle plastik deformasyon süreci başlar ve gerilme artar. Artan gerilme ile gerilme-uzama eğrisinin eğimi de azalır. Eğer yük C noktasında bırakılırsa CD kısmı elastik olarak geriye döner. Bu noktaya kadar meydana gelen plastik uzama ise OD ile gösterilen kısma eşdeğerdir. Eğer test parçası D noktasından itibaren yüklenmeye tekrar başlanırsa, akma sınırı eskisine nazaran yüksek olacaktır. Buna da pekleşme adı verilir ($\sigma_Y^C > \sigma_Y$). Eğer test parçası D noktasından itibaren DC' yolunca basma gerilmesine tabi tutulursa, yeni akma sınırı C', C noktasından belirgin şekilde düşüktür. Bu olgu Bauschinger etkisi olarak adlandırılır. Buna sebep olarak yapı içindeki artık gerilmeler gösterilebilir. Anılan etki basma-çekme gerilmesi döngüsündeki parçalarda önemlidir.

2.2.1.2 Deformasyon Teorisi

Bir parçanın yük altındaki gerilme-uzama karakteristiklerinden başlıcaları gerilme ve uzama tansörüdür. Gerilme tansörü σ_{ij} dokuz elemanlı bir matristir (2.7);

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} \quad (2.7)$$

$i = x, y, z$, söz konusu olan noktaların etrafında başlangıç hacminin düzlemine olan dikliği belirler; $j = x, y, z$ i düzleminde gerilme uygulamalarının yönünü belirler. Gerilme tansöründe simetri kabulü yapılır. Gerilme tansörün elemanları $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \sigma_{xz} = \sigma_{zx}$, v.b. şeklinde yazılabilir. Bunun anlamı, parçanın gerilme durumu, gerilme tansörü, σ_{ij} nin altı elemanla karakterize edilebilmesidir. İndeksleri $i = j$ olan elemanlar normal gerilme ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$) olarak adlandırılırlar. İndeksleri $i \neq j$ olan elemanlar kayma gerilme ($\sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$) olarak adlandırılırlar.

Gerilme tansörünü küresel tansöre $\delta_{ij} \cdot \sigma$ ayrıştırarak şu şekilde yazmak da mümkündür;

$$\delta_{ij} \cdot \sigma = \begin{vmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \end{vmatrix} \quad (2.8)$$

Ortalama basınç 2.9 denkleminde gösterilmiş olup bu değer 2.10 denkleminde karşılık gelen nokta içindir.

$$\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) / 3 \quad (2.9)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} - \sigma & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} - \sigma \end{vmatrix} \quad (2.10)$$

Uzama tansörü (2.11) simetrisi kabulleri kullanılır ve küresel tansör $\delta_{ij} \cdot \epsilon$ ile e_{ij} analog olarak gösterilir.

$$\epsilon_{ij} = \begin{vmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{vmatrix} \quad (2.11)$$

Söz konusu olan herhangi bir nokta için tansör elemanları σ_{ij} ve ε_{ij} seçilen koordinat sistemine bağlı olarak bulunurlar. σ_{ij} , ε_{ij} ve $S_{ij} \cdot e_{ij}$ yeni bir koordinat sistemiyle değişmeyen karakteristiklere sahiptirler. Bunlardan en kullanışlı olanları şunlardır;

1. Ortalama basınç σ
2. Hacimsel genişleme

$$3\varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad (2.12)$$

3. Eşdeğer gerilme

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)} \quad (2.13)$$

4. Uzama

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{xz}^2 + \varepsilon_{yz}^2)} \quad (2.14)$$

Parçadaki herhangi bir noktada teğet uzama ve gerilmelerin sıfıra eşit olduğu üç dik düzlem mevcuttur. Bu düzlemlerin normallerinin yönleri gerilme ve uzama tansörlerinin ana yönlerini oluşturur. Bu yönler seçilen başlangıç koordinat sistemine bağımlı değildir. Bunun manası, herhangi bir gerilme durumunda, basit bir basmanın bileşimi şeklinde karşılıklı üç dik yönlerde temsil edilebilmesidir. $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmeler ve $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ asal uzamalar olarak adlandırılır.

Deformasyon sürecinin tam bir modelini oluşturabilmek için yukarıda bahsedilen kavramlar yeterli değildir. Gerilme ve uzamanın birbirleriyle etkileşimi hakkında teoriye ve böyle bir teoride de basitleştirmeye ve kabullere ihtiyaç vardır. Bunlardan biri 2.15 denklemidir.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^I \quad (2.15)$$

e, p ve I harfleri sırasıyla elastik, plastik ve ısı plastik deformasyonu temsil eder.

Çok kristalli malzemelerde, deformasyonun üç alt kademe altında incelenmesi modern bir anlayıştır. Bu anlayışla, metalik malzemenin elastik deformasyonu kafesin düzeltilebilir distorsiyonudur. Buna sıcaklık ya da gerilme değişimi neden olabilir.

Dönüşmeyen (plastik) deformasyon sadece zaman, sıcaklık ve gerilmenin bir bileşimi olarak oluşurlar. Birçok durumda metallerin deformasyonunda kayma gerilmelerinin belirlediği kayma mekanizması etkili olur.

2.2.1.3 Elastik Deformasyon

Deformasyon tansörleri ve gerilme arasındaki bağıntı, elastik malzemelerin doğrusallığının klasik bir anlayışına dayanmaktadır. Deformasyon ve gerilmenin elastik malzemelerde doğruluğunu ve birbirine bağımlılığı kanununu, Robert Hooke 1678 yılında formüle etmiştir. Buna göre, uzama kuvvetle orantılıdır.

Bu kanunun modern formülasyonu biraz daha genişletilmiştir. Deforme olan kısmın herhangi bir noktası için elastik uzama tansörlerinin bileşenleri, doğrusal gerilme tansörleri bileşenlerine bağlıdır. Genel anlamda matrisin elastik özellikleri 36 adet elemandan oluşur. Aynı zamanda elastik özelliklerden malzemelerin çoğunluğu pratik olarak izotropik malzemelerdir. Bu durum mevcut katsayıları 2 ye düşürür. Bunlar; elastisite modülü E , kayma modülü G dir. Birbirleriyle $E / G = 2(1 + \nu)$ bağıntısı mevcut olup ν poisson katsayısıdır.

2.2.1.4 Plastik Deformasyon

Bir malzemenin yüke bindiğindeki durumda, parçanın başlangıç deformasyonu tamamen elastiktir (yük kalktığında ilk şekline döner). Uygulanan gerilmenin kritik bir anında plastik deformasyon başlar. Elastik davranışın limitini tanımlayan kanuna akma kriteri denir. Akma kriterinin matematiksel modeli için bazı kabuller gereklidir. Bunlar;

- Uzama oranının ve ısıнын etkileri göz ardı edilebilir.
- Bauschiger etkisi ve süreksizlik kısmı ele alınmaz
- Malzeme izotropiktir.

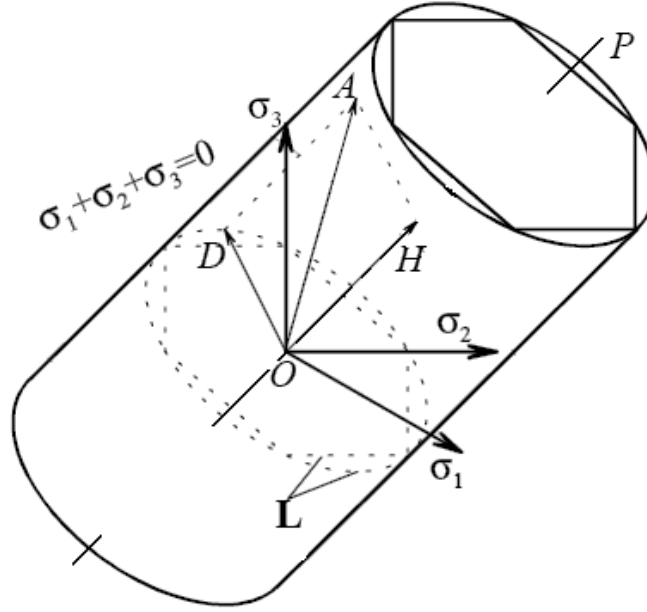
Deneyssel gerçekler göstermiştir ki malzemenin akması, düzgün hidrostatik gerilmeden ya da basma gerilmesinden etkilenmemektedir. Bu durum akma kriterinin tanımlamasında önemli basitleştirmeler sunar.

Her bir koordinat yönünde asal gerilmelerle birlikte üç eşit birbirine dik eksenler sistemi incelenebilir (Şekil 2.4) [25]. Orijinden geçen bir vektör, parçanın herhangi bir noktasının gerilme durumunu temsil edebilir. OP çizgisi üç eşit eksene ayrılır. Bazı gerilme durumlarını temsil eden OA vektörü ele alınırsa, bu vektör iki

bileşene ayrılabilir. OP boyunca giden OH bileşeni eşit bileşenli hidrostatik gerilmeyi $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ temsil eder. OP yönüne dik giden OD S_1, S_2, S_3 bileşenli gerilmeyi temsil eder.

Verilen herhangi bir gerilme durumu için gerilme vektörü OP ye dik ve O içinden geçen düzlemde bulunacaktır. Önceden de bahsedildiği gibi hidrostatik gerilmenin akma bir etkisi yoktur. Akma gerilme vektörü OP nin karakteristiklerine bağlıdır. Bu sebeple akma yüzeyi düzleme dik bir silindirdir.

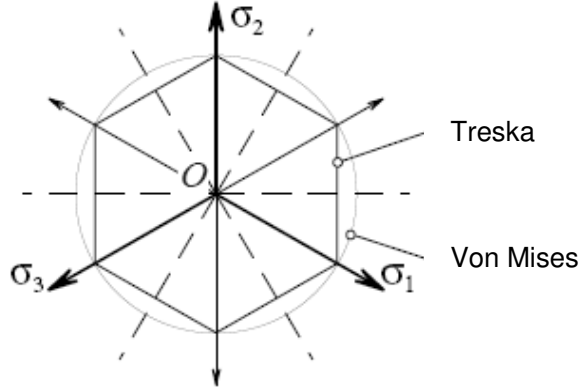
Bu silindirin yüzeyinde yer alan gerilme noktalarında, herhangi bir gerilme akma durumundan sorumlu iken silindir içinde yer alan herhangi bir gerilme noktası ise elastik gerilme durumundan sorumludur. L eğrisi düzlemle kesişen akma yüzeyi boyunca akma kriterini tanımlar.



Şekil 2.4: Akma kriterinin asal gerilme boşluğu içerisinde geometrik gösterimi [25]

İzotropik malzemelerde akma, malzemenin asal gerilmelerine bağlı olup yönlerinden bağımsızdır. Bu sebeple eğer gerilme $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ akmaya sebep oluyorsa her biri de oluyor demektir. Bunun anlamı akma bölgesinin σ_1 eksenine simetrik olduğudur. Aynı şekilde σ_2 ve σ_3 eksenine de simetriktir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi Bauschinger etkisi ihmal edilmişti. Dolayısı ile $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ plastik durum ise $-(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ de aynıdır. Yukarıda bahsedilen gerçekler ışığında akma bölgesinin 12 adet 30° tekrar ettiği sonucuna varılabilir (Şekil 2.5)



Şekil 2.5 : Akma bölgesinin altı simetri eksene sahip olması. [25]

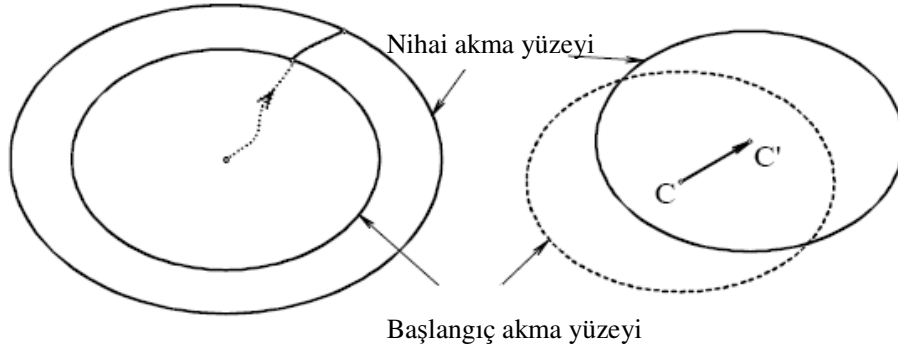
Birçok değişik akma kriteri yıllara sari önerilmiştir. Hali hazırda Treska ve Von Mises kriterleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.5 de iki kriter gösterilmektedir.

2.2.1.5 Uzama sertleşmesi (pekleşme)

Yapılan çalışmalar, bir malzeme akmaya başladığında gerilme vektörünün de akma bölgesine ulaştığını göstermiştir. Eğer malzeme sertleşmiyorsa gerilme noktası her zaman belirli bir akma bölgesinde kalıyordur. Uzama sertleşmesine maruz bir malzeme için akma bölgesinin büyüklük ve şekli deformasyon sürecinin seyrine bağlıdır. Basitleştirilmiş olarak malzeme akmasını tanımlayan iki yaklaşım şu şekildedir;

- izotropik sertleşmesi
- anizotropik (kinematik) sertleşmesi

izotropik sertleşme teorisi şu kabullere dayanır; malzeme izotropiktir ve Bauschinger etkisi göz ardı edilmiştir. Bunun dışında akma yüzeyinin de şekil değiştirmeden genişlediği varsayılmıştır.



Şekil 2.6 : İzotropik ve kinematik sertleşme kurallarının şematik gösterimi [25]

Kinematik sertleşme teorisi Bauschinger etkisini dikkate alır ve malzemeyi anizotropik olarak farz eder. Akma yüzeyinin dokuz boyutsal gerilme boşluğuna dönüşümü farz edilir. Gerçekte, yukarıda bahsedilen yaklaşımların birleşimi olan akma yüzeyinin genişlemesi ve anında dönüşümü şeklinde, sertleşme gerçekleşir.

2.2.2 Kaynak Gerilmeleri ve Deformasyonları

2.2.2.1 Kaynak Gerilmelerinin ve Deformasyonlarının Sınıflandırılması

Kaynak işlemi boyunca artan gerilmelere iç gerilmeler olarak atıfta bulunulabilir. İç gerilmeler, dışarıdan herhangi bir kuvvet uygulanmadan oluşan gerilmelerdir. Bu çeşit gerilmeler örneğin kesme, taşlama ve eğme gibi metal işleri sırasında meydana gelebilirler. Cıvatalanmış bir birleştirmede, cıvata uzamaya, parçalar ise basmaya maruz olup, iç gerilmelere örnek olarak verilebilir. İç gerilmeler aynı zamanda makro ve mikro gerilmeler olarak da alt dallara ayrılabilirler.

Deformasyon sürecinde iç gerilmelerin etkilerini değerlendirirken makro gerilmelere önem vermek gerekir. Makro gerilmeler dışarıdan bir kuvvetle oluşan gerilmeler olup kaynak gerilmeleri de makro gerilmelerin bir koludur.

Daha önce bahsedildiği gibi iç gerilmeler kendi içlerinde bir denge durumundadırlar. Bu sebeple, parçadaki gerilmelerin dağılımlarında, herhangi bir kesitteki gerilme, kuvvetlerin toplamı ve moment kuvvetlerinin toplamı tarafından dengelenmelidir. Özellikle x eksenine dik düzlemlerde şu şekilde olmalıdır;

$$\int_A \sigma_x . dA = 0 ; \quad \int_A \sigma_x . y . dA = 0 \quad \int_A \sigma_x . z . dA = 0 \quad (2.16)$$

σ_x , y, z koordinatlarında bir nokta, A ise kesit alanında normal gerilmedir.

Kaynak gerilmelerini aşağıdaki bileşenlerle sınıflandırabiliriz;

1. Ömür,
2. Yön,
3. Başlangıç Noktası

Birinci karakteristiğe göre kaynak gerilmeleri geçici ya da kalıcı olabilir. Geçici gerilmeler durağan olmayan ısıtma ve soğutma işlemlerin belirli bir anında meydana gelirler. Kalıcı (artık) gerilmeler ise tüm kaynak işlemi sona erdiği ve sıcaklığın, oda sıcaklığına soğumasıyla gerçekleşir.

Doğrusal olarak, kaynak gerilmeleri, uzunlamasına (kaynağa paralel) ve enine (kaynağa dik) gerilmeler olarak alt dallara ayrılırlar.

Kaynak gerilmeleri oluşumlarına göre şu alt dallara ayrılırlar;

- Isı gerilmeleri
- Metalin plastik şekil değişimi sebebiyle oluşan gerilmeler
- Metalin faz dönüşümü sebebiyle oluşan gerilmeler.

Isı gerilmeleri, sıcaklık eşitlenmesinin ardından kaybolurlar. Faz dönüşümleri bazı alaşımlı metallerde kaynak esnasında kaybolabilirler. Düşük alaşımlı çeliklerin işlemlerinde faz dönüşümleri yüksek sıcaklıklarda meydana gelir. Malzeme yumuşamaya başladığında faz dönüşümüyle meydana gelen hacimsel değişme önemli bir gerilme değişimi meydana getirmez. Plastik deformasyon sonucu meydana gelen gerilmeler kaynağa yakın ve kaynak dikişinde daima mevcuttur.

Kaynak deformasyonlarını sınıflarken, yalnızca herhangi bir noktadaki uzama değil, açısal değişim ve boyuttaki sapmalar gibi konular da bahis konudur.

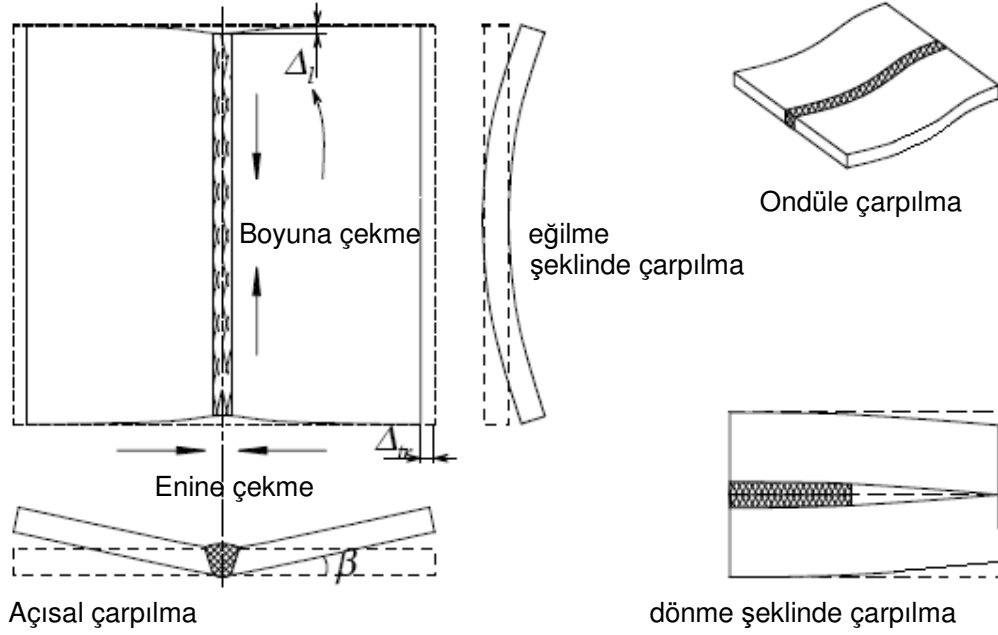
Gerilme durumları içerisinde, kaynak gerilmeleri kalıcı ya da geçici olabilir. Kaynaklı parçalarda üç çeşit ana boyut değişimi aşağıda sunulmuştur.

- Enine çekme
- Uzunlamasına çekme
- Açısal çarpılma (kaynak çizgisi etrafında dönme)

Çok detaylı bir bakış açısından kaynak deformasyonları (çekme, distorsiyon) şu şekilde sınıflandırılabilir (Şekil 2.7);

- Enine çekme (çekme kaynak merkez çizgisine diktir)
- Uzunlamasına/boyuna çekme (kaynak çizgisi boyunca çekme)

- Açısal çarpılma (distorsiyon) (kalınlık yönü boyunca düzgün olmayan sıcaklık dağılımı sonucu)
- Dönme distorsiyonu (ısısal genleşme ve çekme dolayısıyla parça düzlemindeki açısal çarpılma)
- Eğme distorsiyonu (kaynak çizgisi boyunca ve parçaya dik düzlem içindeki distorsiyon)
- Ondüle- (ince parçalarda basma gerilmelerin kararlılığı bozarak distorsiyona sebebiyet vermeleri)



Şekil 2.7: Çeşitli kaynak distorsiyon şekilleri

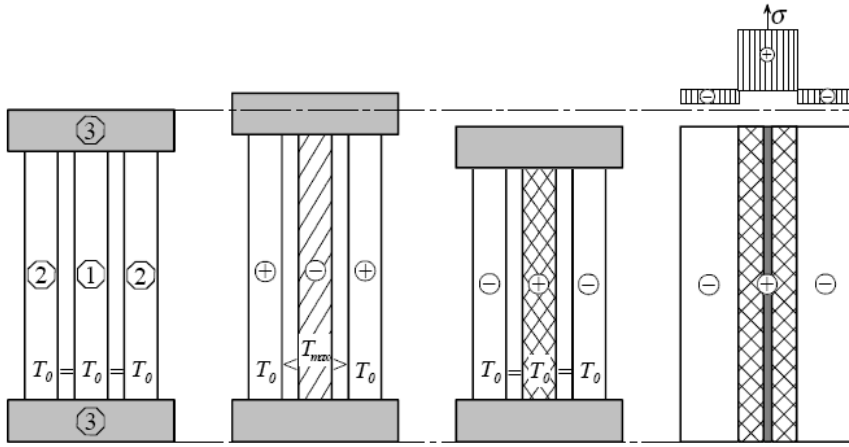
2.2.2.2. Kaynak Gerilmelerinin ve Deformasyonların Sebepleri

Kaynak işlemi, sıcaklık dağılımının çok farklı olduğu bir ısıtma ile parçaların birleşimini sağlar. Kaynak arkına yakın bölgeler, binlerce santigrat derece sıcaklığa kadar ısınmakta ve akabinde soğumakta olup, burada meydana gelen sıcaklık parçanın diğer kısımlarına iletilmektedir. Yerel ısınma ve akabinde soğuma hacimsel değişime bu da geçici ve kalıcı gerilmeler ile deformasyonlara sebebiyet verir [26]

Birbirine eşit küplerden oluşmuş bir parça ele alınırsa ısınma işlemi bu elemanların düzgün ısınmasıyla koordinat ekseninde genişlemelerine yol açacaktır. Aynı boyutta genişleyen bu parçalardan müteşekkil yapıda içsel gerilme mevcut olmayacaktır. Ancak ısınma düzgün olmazsa, her bir element, ΔT sıcaklık farkı ile orantılı genişlemeye çalışacaktır ve her biri farklı boyutlarda olacaktır. Bu elementleri

birleştirerek kalıbı belli bir yapı oluşturmak mümkün değildir. Aynı zamanda bu elementler komşu elementlerle sınırlandırıldığından serbestçe hareketleri de mümkün değildir.

Eğer ısınma sürecinde tüm parçalar elastik olarak şekil değiştiriyorsa soğuma sonrası parça, ilk şeklini iç gerilmesiz alacaktır. Ancak, ısınma sırasında elementler plastik olarak şekil değiştiriyorsa, soğuma sonrası plastik deformasyonlarıyla orantılı değişmek isteyeceklerdir. Bu sebeple, parçada artık gerilmeler ve deformasyonlar mevcut olacaktır.



Şekil 2.8: Sabit taban ve tavanlarla kısıtlanmış üç çubuk sistemi ve alın kaynağı ile simülasyonu [25]

Genel olarak kaynak esnasında düzgün olmayan ısı dağılımı karışık üç eksenli gerilmeler meydana getirir. Başka bir deyişle küpler farklı yönlerde genişlemek istemektedirler. Ancak çoğu durumda gerilmenin bazı bileşenleri ihmal edilebilirler. Bahsedilen gerilmeleri iki, hatta bir boyuttaki gerilme durumlarında incelemek mümkün olabilmektedir.

Bir boyutta basitleştirilmiş bir sistem Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Sistemde, merkezde yer alan bir çubuk (1) bunun her iki yanında birer çubuk (2) ve her üç çubuğu bir arada tutan sabit plaka (3) mevcuttur. Çubukların başlangıç boyları birbirine eşittir. Merkez çubuğu (1) kaynak bölgesini canlandırmak maksadıyla yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yan çubuklar (2) ise kaynak bölgesinin dışındaki alanı temsilen sabit sıcaklıkta bırakılmıştır.

Merkez çubuğu T_{max} sıcaklığına kadar ısıtarak $\Delta l = \alpha \cdot T_{max} \cdot l$ boyutu kadar uzamaya çalışmaktadır.

Ancak yan çubuklar, merkez çubuğun serbest hareketini engelleyip, yapıda basma gerilmesi meydana getirirler. Eğer merkez çubuğu, elastik olarak basma gerilmesine maruz kalırsa, soğuma sonrası ilk formuna artık gerilmesiz olarak geri döner. Ancak merkez çubuğu, basma gerilmesi neticesinde plastik olarak deformasyona uğrarsa yapıda basma uzaması hâsıl olur. Soğuma sürecinde merkez çubuğu kısalma isteyecek ancak yan çubuklar ise ilk boylarını muhafaza etmek isteyeceklerdir. Bu sebepten dolayı yan çubuklarda (2) basma gerilmesi meydana gelirken merkez çubuğunda (kaynak bölgesi) çekme gerilmesi hâsıl olur.

2.2.2.3. Süreksiz Gerilme Alanları

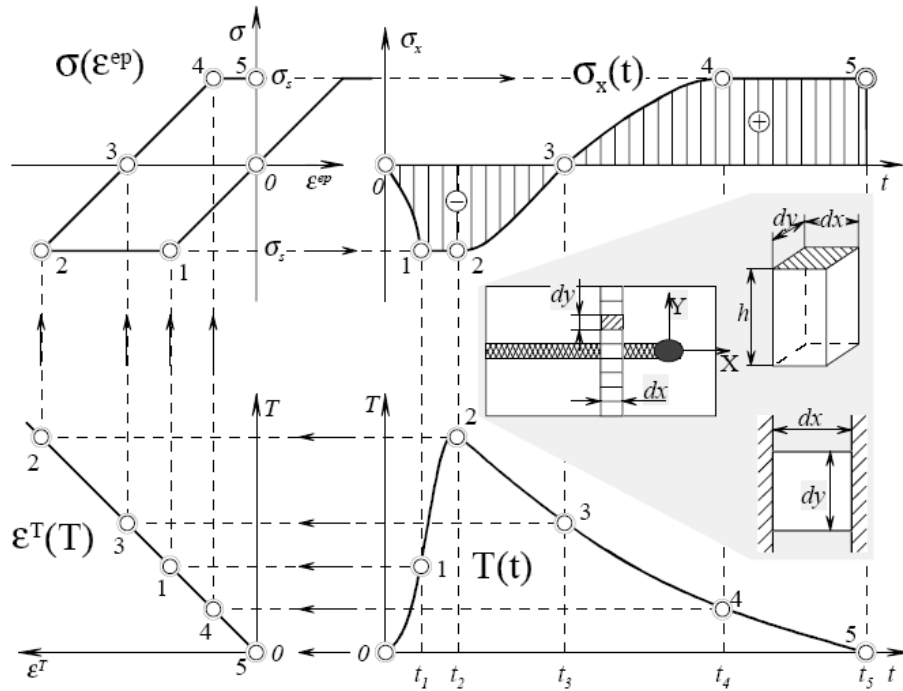
Kaynak işlemi süresince, gerilme-uzama alanı gelişimi, metalin elastik-plastik davranışı, sabit olmayan sıcaklık durumları ve çok yüksek sıcaklık gradyeni ile karakterize edilmiştir. Geçici ve kalıcı gerilme gelişimi, yapı elemanlarının hacimsel değişimine bağlıdır. Parça boyunca, ısının artışı ve sıcaklık dengelemesiyle, metal içerisinde sıcaklık değişimi devam etmektedir. Gerilme alanının kinetiğinde, gerilim gelişme işi, kaynak periyodu ve akabinde soğumayla devam etmektedir. Kaynak işlemi boyunca birçok değişken var olduğu için gerilme kinetiğinin incelenmesi zorlu bir işlemdir.

Kaynak işlemi boyunca, uzunlamasına gerilme gelişiminde ise başlangıç noktası olarak tipik bir ısı döngüsü ele alınabilir. Gerilme gelişimini izleyebilmek amacıyla başlangıç hacim elemanı seçmek gerekir. İnce bir levha kaynağı ele alınırsa (kalınlık boyunca ısı dağılımı ihmal edilebilir). Şekil 2.9 da görüldüğü gibi başlangıç elemanı seçilebilir. Prizma içindeki sıcaklık, elemanın hacminin küçük olması dolayısıyla sabit olarak alınabilir. Genellikle kaynaklı bir yapı, kaynak yönü boyunca (burada ele alınan durumda ε_x) toplam deformasyonu koruyacak biçimde kararludur ve bu deformasyon hareketi kısıtlanmamış ısı gerilmesi deformasyonundan (ε^T) biraz küçüktür. Bu durum kaynak dikişine yakın elemanlar için doğrudur. Bu sebeple prizmanın x yönü boyunca boyutunu değiştirmedeği varsayılır. Aynı zamanda ısınma ve soğuma süreçlerinde elemanda boyuna gerilme σ_x meydana gelir.

Basitleştirmek için bir boyutlu gerilme durumu ele alınırsa, σ_y 'nin sifıra eşit olduğunu farz edilebilir (y yönünde eleman gerilmesiz deforme olabilir). Özetle, uzunlamasına yönde $\sigma_x \neq 0, \varepsilon_x = 0$ ancak enine yönde $\sigma_y = 0, \varepsilon_x \neq 0$ dır.

Elemanda, gerilme döngüsünü analiz etmek için, malzemenin deformasyon eğrisi (gerilme-uzama) ve yüksek sıcaklıklarda malzemenin hacimsel genişleme (dilatometrik) eğrisi bilgilerine ihtiyaç vardır. Malzeme içindeki yapısal değişimi ihmal etmek için, dilatometrik eğri, düz bir çizgi olarak ele alınabilir (ısıl genişleme katsayısı α sabit olmak üzere).

Gerilme uzama eğrilerini oluştururken ilk yaklaşım olarak ideal bir gerilme-uzama eğrisi ele alınabilir. Analizi şematik olarak göstermek için, eğri derecelendirilmiştir. Bu şekilde eğrinin elastik kısmı ε^{ep} eksenine doğru 45° oluşturulur (elastik deformasyon ve uygulanan gerilme diyagramda aynı boyda gösterilmiştir).



Şekil 2.9 : Prizmatik bir yapıda gerilme kinetikleri [25]

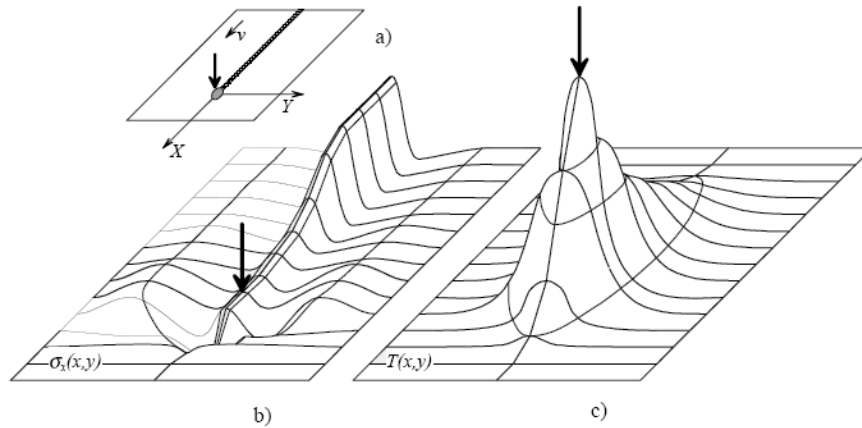
Dilatometrik eğri $\varepsilon^T(T)$ gerilme-uzama diyagramının $\sigma(\varepsilon^{ep})$ altına yerleştirilmiştir. Termal döngü $T(t)$ $\varepsilon^T(T)$ nin sağına yerleştirilmiştir. Tüm derecelendirmeler koordinatlara yerleştirilmiştir. Gerilme döngüsü $\sigma_x(t)$ şekilde görüldüğü gibi çizilebilir.

Örneğin; t_1 zamanında T_1 sıcaklığı 1 noktası ile temsil edilsin. Bu noktadan yatay bir çizgi, T_1 sıcaklığına denk gelen genişlemeyi gösterir. X yönündeki sabit prizma durumu için ε_1^T serbest termal genişlemeyi belirler. Diyagram $\sigma(\varepsilon^{ep})$ ye dikey olarak

uzatılırsa bir başka 1 noktası elde edilir. Bu nokta σ_x ve t_1 de ϵ_x^e ile zaman içinde σ_x σ_y akma limitini ulaştığında rastlantı anıyla karakterize edilir.

2 noktası termal döngüde maksimum sıcaklığı ve maksimum plastik basma uzamasını göstermektedir. t_2 Zamanından sonraki soğuma sürecinde yük boşalımı başlar ve t_3 anına kadar devam eder. t_3 anında elastik gerilme ve uzama sıfıra eşittir. t_3 den t_4 e kadar elastik çekme uzaması büyür. t_4 te ikinci plastik deformasyon başlar (ters tarafta). t_5 tamamen soğumuş duruma karşılık gelmektedir.

Şekil 2.10 kaynak esnasında meydana gelen, uzunlamasına gerilme dağılımını ve sıcaklık dağılımını şematik olarak gösterir. Örnekte basit bir parça üzerinde analiz yapılmıştır. Kaynak arkı x eksenini boyunca v hızı ile hareket etmekte ve ok ile gösterilmektedir.



Şekil 2.10 : Kaynak esnasında sıcaklık ve gerilmenin değişiminin şematik gösterimi a)kaynak işlemi b) levha boyunca uzunlamasına gerilme dağılımı c) levha boyunca sıcaklık dağılımı [25]

Isı kaynağından oldukça uzakta sıcaklık sabit ve gerilme her yerde sıfıra eşittir. X ekseninin negatif yönüne hareket edildiğinde sıcaklığın yükselmeye başladığı noktaya erişilir. Kaynak çizgisine yakın noktalarda uzunlamasına yönünde basma meydana gelir. Bu hızlı düşme değişikliği, boylamasına gerilmenin hızlı yükselmesine eşlik eder.

Gerilme değişikliği, ısı kaynağının önündeki sıcaklık gradyanine orantılıdır. Bu durum, değişen sıcaklıkla akma noktasına σ_y ye sebebiyet verir. Bilindiği gibi yüksek sıcaklıklarda malzeme yumuşar. Belli bir sıcaklıktan sonra (yumuşak çelikler için yumuşama sıcaklığı $T \approx 600^\circ C$) malzeme σ_y nin neredeyse

sıfır olduğu duruma ulaşır. Dolayısıyla kaynak çizgisine yakın yer alan noktalar yumuşama sıcaklığına ulaşır ve boylamasına gerilme değeri sıfır değerine kadar tırmanır.

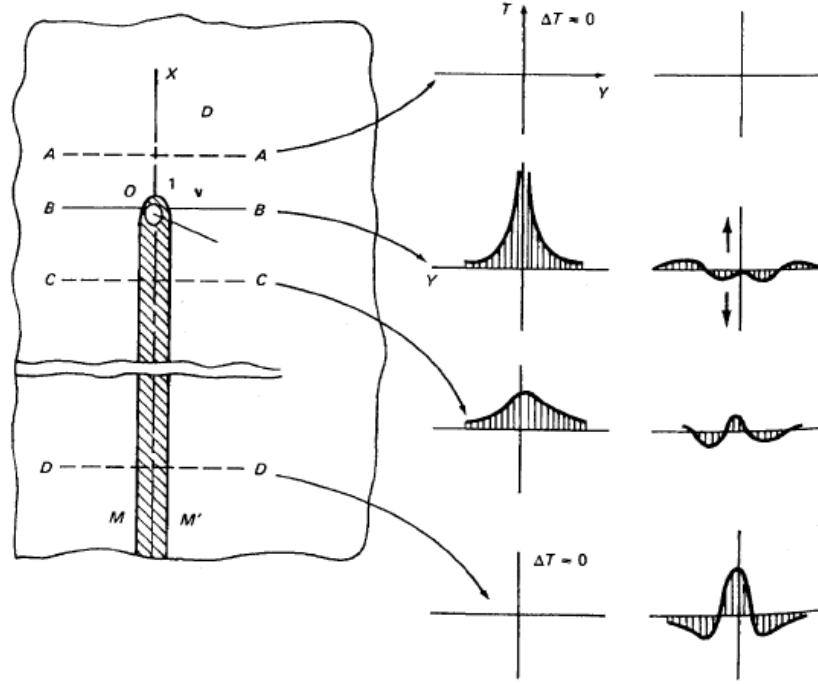
Kaynak arkından kısa mesafede olan bölgelerde, gerilmeler basma şeklindedir. Çünkü bu alanların genleşmesi, sıcaklığı düşük olan malzemeyle çevrilmiştir. Bununla birlikte, kaynak arkından yeterince uzaktaki alanlardaki gerilmeler çekme şeklindedir ve kaynak yakınındaki basma gerilmeleri ile dengelenmişlerdir.

Bu durum daha da açılacak olursa, kaynak arkının belirli bir uzaklık arkasında, sıcaklık, yeterli bir dereceye düşerek, sıcaklık değişimin neden olduğu deformasyona direnecek kadar mukavemet kazanır. Kaynağa yakın alanlar, soğuma sürecinde çeker ve çekme gerilmesi oluşur.

Belirli bir zaman sonra, kaynağa göre sıcaklık değişimi kaybolur. Boylamasına yüksek çekme gerilmesi (genellikle akma sınırına kadar) kaynak yakınlarında oluşur. Kaynaktan yeterince uzaktaki bölgelerde basma gerilmeleri mevcuttur.

2.2.2.4 Gerilmeler ve Kaynağa Göre Eriyik Hareketi

Şekil 2.11 klasik bir kaynak esnasında, sıcaklık değişimlerini ve gerilmelerini göstermektedir [27]. Kaynak arkı v hızı ile O eksenı boyunca hareket etmektedir. Kaynak sıcaklık döngüsüne bağılı olarak plastik deformasyonların meydana geldiğı taralı alanlar vasıtasıyla gösterilmiştir. Taralı alanların dışında, elastik şekil değişimi meydana geldiğı kabul edilmiştir. Y eksenı boyunca normal gerilmeler ve kesme gerilmeleri mevcut olup diğerlerine göre küçük olmaları dolayısı ile gösterilmemişlerdir.



Şekil 2.11: Kaynak boyunca gerilmelerin ve sıcaklık dağılımlarının şematik gösterimi [27]

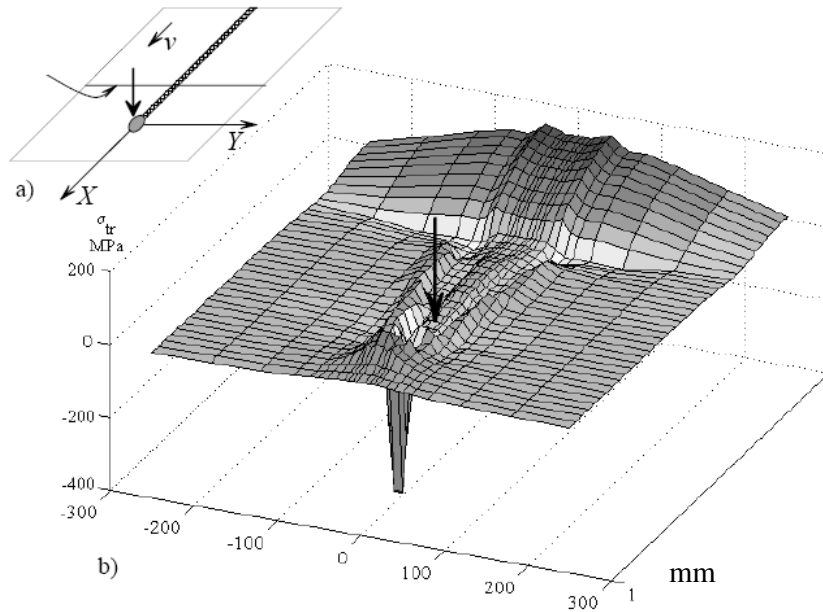
- (1) A-A Bölümü boyunca, kaynağa göre sıcaklık gradyeninin eğimi ve gerilmeler sıfıra yakındır, çünkü ana metal kaynak arkından henüz etkilenmemiştir.
- (2) B-B Bölümü boyunca, kaynak yakınında sıcaklık gradyeni yüksektir. Kaynak arkının altında gerilme alanı sıfıra yakındır, çünkü eriyik metal kesme ve gerilme yüklerini taşımamaktadır. Ark merkezinden hareketle, gerilmeler basma şekline dönüşmektedir. Buna sebep ana metal tarafından sınırlanan kaynak havuzunu çevreleyen metalin genişlemesidir. Düşük metal sıcaklığında akma sınırı yüksek olduğundan düşük sıcaklıkta ya da ark merkezinden uzaklaşıldığında, bu alanlarda basma gerilmesi artar. Çekme gerilmesi, basma gerilmesini dengelemek amacıyla kaynak arkından uzakta meydana gelir.
- (3) C-C Bölümü boyunca, kaynak arkı hareketince metal soğumaya başlar. Metal büzülürken çekme gerilmesi kaynak etrafındaki bölgede oluşur ve kaynak uzunluğu arttıkça gerilme basma gerilmesine dönüşür.
- (4) D-D Bölümü boyunca sıcaklık gradyeni mevcut değildir. Yüksek çekme gerilmesi kaynakta ve bitişiğinde mevcuttur. Basma gerilmesi kaynaktan uzakta meydana gelmiştir.

Kaynak boyunca, kaynak genişler ve büzülür. Eğer tüm sıcaklık değişimleri boyunca, kaynak tamamen elastik kalırsa, sıcaklık, başlangıç sıcaklığına döndüğünde gerilme ve uzamalar kaybolur. Gerçekte sıcaklık yükselmesine bağlı olarak plastik uzamalar meydana gelir. Dolayısıyla, kaynak sonrası deformasyonlar kalıcı hale gelerek distorsiyonları meydana getirirler.

Kaynak işleminde, enine gerilme gelişimine örnek olarak, serbest kenarlı bir plakanın üç boyutlu sonlu elemanlar metoduyla elde edilen grafiği verilebilir (Şekil 2.12) [22]. İlk bakışta enine gerilme davranışı, özellikle soğumanın başlangıcında boylamasına gerilme davranışına benzer.

Isı kaynağından uzakta sıcaklık değişimi olmadığından gerilme sıfıra eşittir. Isı kaynağına yaklaştıkça, ilk olarak sıcaklık halen sıfır iken bir çekme gerilmesi tümseği ile karşılaşılır. Akabinde basma gerilmesine doğru ani bir düşüş gösterir ve yükselmiş sıcaklıkta akma sınırına ulaşır. Daha sonra artan sıcaklıkla, düşük akma sınırı limitiyle, enine gerilme değeri sıfır değerine yükselir.

Isı kaynağının sağ ilerisinde yüksek başlı bölgenin bulunması gerilme tümseğinin varlığıyla açıklanabilir. 2.16 verilen denklemlere göre, enine gerilmeler uzunlamasına bölümde kendinden dengeli durumda bulunurlar. Çekme gerilmesi bölgesi dengeyi sağlayıcı (parçanın sıcak bölgeleri etrafında kaçınılmayan baskı bölgelerine karşı genişleme) bir özelliğe sahiptir.



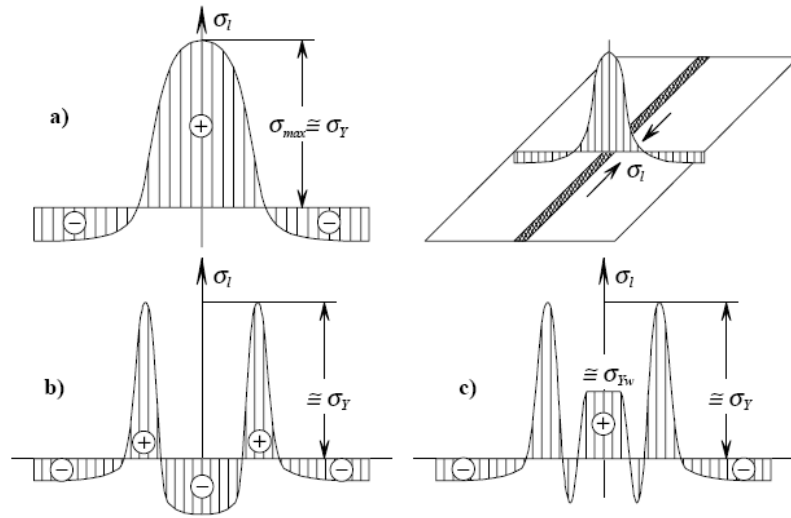
Şekil 2.12: Enine gerilme gelişmesi a) kaynak işlemi planı b) kaynak kesit alanında enine gerilme gelişimi. [22]

Zaman ekseninin ötesinde, kaynak arkının belirli bir mesafe önünde, sıcaklık yeteri kadar düşerek malzeme sıcaklık değişimiyle meydana gelen deformasyonlara dirençli hale gelir. Soğuma alanlarıyla kaynak çekmeye ve çekme gerilmesi artmaya başlar.

2.2.2.5 Artık Gerilme Alanları

Kaynak işlemine göre, boylamasına artık gerilme oluşumunda kaynaktaki maksimum uzunlamasına artık gerilme σ_x , genellikle akma sınırı σ_y ye yakındır. Kademeli olarak, plastik deformasyon bölgesi kaynak ekseninden uzaklaştıkça, uzunlamasına çekme gerilmesi, bitişik alanlardaki basma değerlerine doğru gevşer. Bir kaynaktaki artık gerilme dağılımı Şekil 2.13.a'da gösterilenden farklılık gösterebilir [22]. Ana metalin ve kaynağın alaşımlarına göre şekil çok farklı olabilir. Kaynak işlemi esnasındaki soğuma oranı ve çeliğin başlangıç aşaması gerilme dağılımları üzerinde ciddi etkileri vardır.

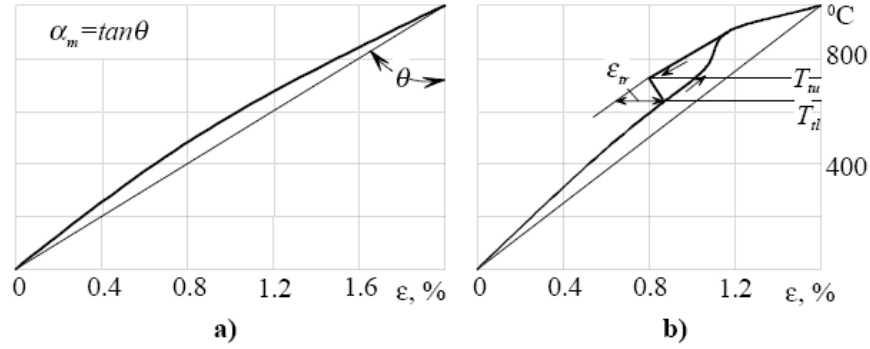
Ostenitik paslanmaz çeliklerin ısı genleşme katsayıları α düşük karbonlu çeliklerden büyüktür. Bu çeliklerin yumuşamaları düşük karbonlu çeliklere nazaran daha yüksek sıcaklarda meydana gelir. Bu sebeple ostenitik çelikler yüksek ısı gerilmelerine maruz kalırlar. Gerilme-uzama diyagramında akma platosuna sahip değildirler. Bu durum ve yüksek plastik deformasyon metalin uzama sertleşmesine ve dolayısıyla boylamasına gerilmeler malzemenin deforme olmamış durumu için olan akma sınırından yüksektir.



Şekil 2.13: Boylamasına kaynak gerilmelerine örnekler a) yumuşak çelik b) yüksek alaşımlı martenzitik dolgu çeliği c) yüksek alaşımlı ostenitik dolgu çeliği. [22]

Kaynak kesit alanında, boylamasına gerilmelerin davranışı, ostenitik ve düşük karbonlu çeliklerde benzerdir.

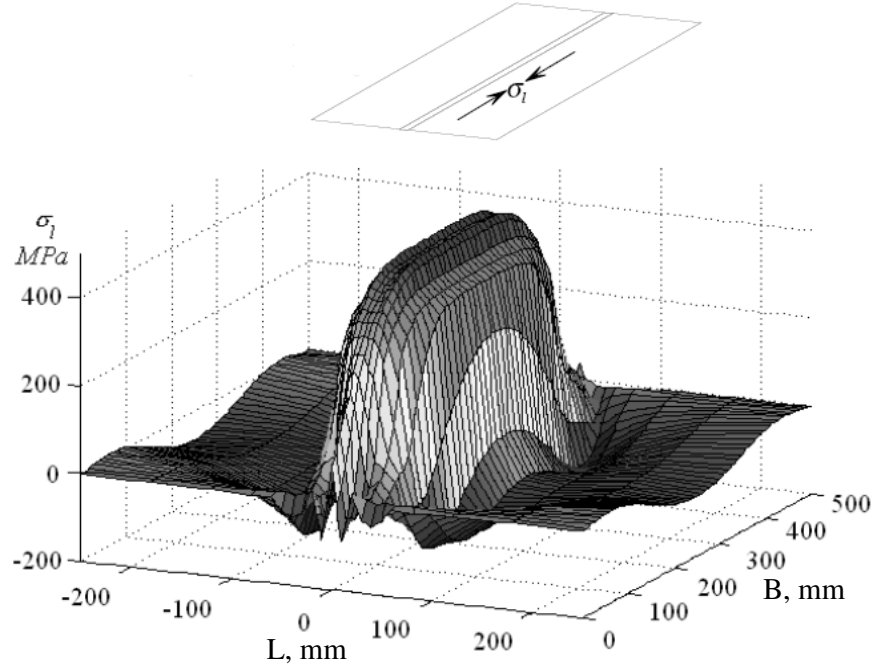
Kaynak esnasında, mikro yapı değişiklikleri, artık gerilmelerin dağılımını ciddi anlamda modifiye edebilir. Şekil 2.14.b'de yapısal değişiklikleri bir malzeme için dilatometrik eğride göstermektedir [28].



Şekil 2.14: Karakteristik dilatometrik eğri a) ostenitik çelik b) perlit içeren çelik [28]

Eğer faz değişimi, soğuma esnasında düşük sıcaklıklarda gerçekleşiyorsa, kademeli çekme değişimi süratli genleşmeye döner. Sonraki soğuma, kaynak dikişine yakın malzemenin daha da uzamasına ve çekme gerilmesinin yükselmesine sebep verebilir. Artık gerilme dağılımı, değişim uzamasına (ϵ_{tr}) ve düşük dönüşüm sıcaklığına (T_{tr}) bağlıdır. Eğer soğuma oranı, martenzitik yapı oluşturacak kadar yüksek ise kaynak bölgesine yakın alanlarda, basma gerilmesi gözlenir (Şekil 2.13.b).

Plastik deformasyon bölgesinin genişliği, kaynak parametrelerine, malzeme özelliklerine ve yapının kararlılığına bağlıdır. Bu parametre için, en önemli malzeme özelliği, akma sınırı (σ_y), elastisite modülü (E) ve ısı genleşme katsayısıdır (α). Akma sınırının (σ_y) yükselmesi, daha dar plastik deformasyon alanlarının oluşmasını sağlar. Elastisite modülü ve ısı genleşme katsayılarının yüksek olması ise plastik deformasyon bölgesini genişletir.

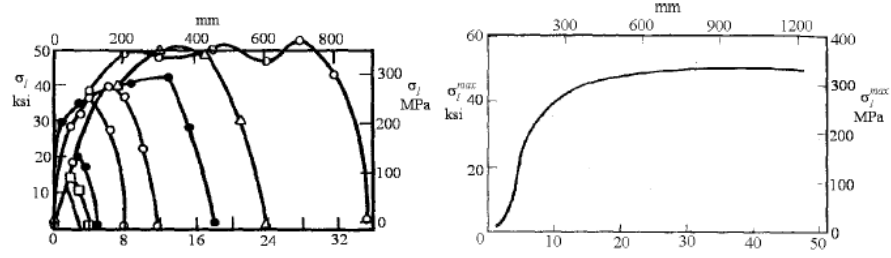


Şekil 2.15: Üç boyutlu boylamasına gerilme dağılımı. [22]

Ana kaynak parametreleri, uzunluk başına ısı girdisi (q_w) ve kaynak hızıdır (v). Geniş levhaların kaynağı esnasında, q_w nin yüksek olması geniş plastik deformasyon alanlarının oluşmasına sebep olur. Sabit ısı girdisinde kaynak hızını arttırmak ise serbest yüzeyden önemsiz ısı kayıplarını izoterm büyüme oranına götürür ve ayrıca deformasyon alanını daraltır.

Şekil 2.15’de üç boyutlu boylamasına gerilme dağılımı gösteren bir örnek verilmiştir [22]. Kaynak işleminde gerilme durumunun karmaşıklığı göstermesi bakımından iyi bir örnektir. Bu örnekte, düşük sıcaklıkta bir faz dönüşümü meydana gelmemiştir. Plakanın orta kesiti, diğer Şekil 2.13.a’yı temsil etmektedir.

Test parçasının uzunluğunun etkisi Şekil 2.16’da verilmiştir. Bu bilgiler DeGarmo isimli araştırmacı tarafından yapılan 25 mm kalınlığa sahip bir plakanın çift dikişli tozaltı kaynağından elde edilmiştir [18] (Bu bilgiler kaynak parametreleri için referans olarak alınmaz). Kaynağın başlangıcındaki ya da sonundaki bir uzaklık, kaynak boyunca, boylamasına gerilmenin maksimum değerine ulaştığındaki plastik deformasyon bölgesinin genişliğine yakındır..

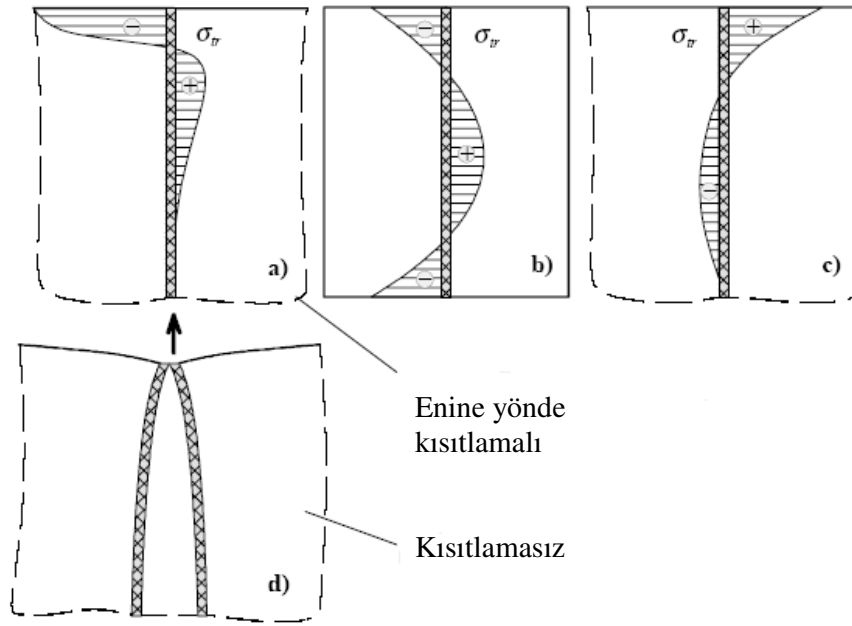


Şekil 2.16: kaynak uzunluğunun etkisi a) boylamasına artık gerilme dağılımı b) maksimum boylamasına gerilme dağılımı. [28].

Özetle Şekil 2.16.b’de verilen grafiğin incelenmesinden grafik şeklinin kaynak parametrelerine, malzeme özelliklerine ve yapının kararlılığına bağlı olduğu sonucu çıkarılabilir [28].

Boylamasına artık gerilmeler kaynağın her iki sonundan bir uzaklıkta büyümeye başlar. Yüksek çekme gerilmesi kaynağın merkez bölgesinde meydana gelir. Şekil 2.16.a’dan da açıkça görüleceği üzere kaynak uzunluğunun artması merkez bölgesindeki gerilme tepesini yükseltir. Deney parçası için açıklama yapmak gerekirse, 450 mm den uzun kaynak boylarında boylamasına artık gerilme dağılımı daha düzgün olduğu görülmekte ve aynı zamanda maksimum artık gerilmeye ulaşılmaktadır.

Kaynak işlemine göre artık enine gerilme oluşumu kaynaklı parçalar soğuduktan sonra, enine ve boyuna malzeme kısaltmalarına göre yapıda enine artık gerilmeler ortaya çıkar. Eğer plakalar hareket serbestisi içerisinde kaynak edilmişler ise enine gerilmeler fazla geniş değildir. Yüksek değerler kaynak bölgesinin sonunda oluşurlar. Gerilmeler basma ve çekme olabilir.

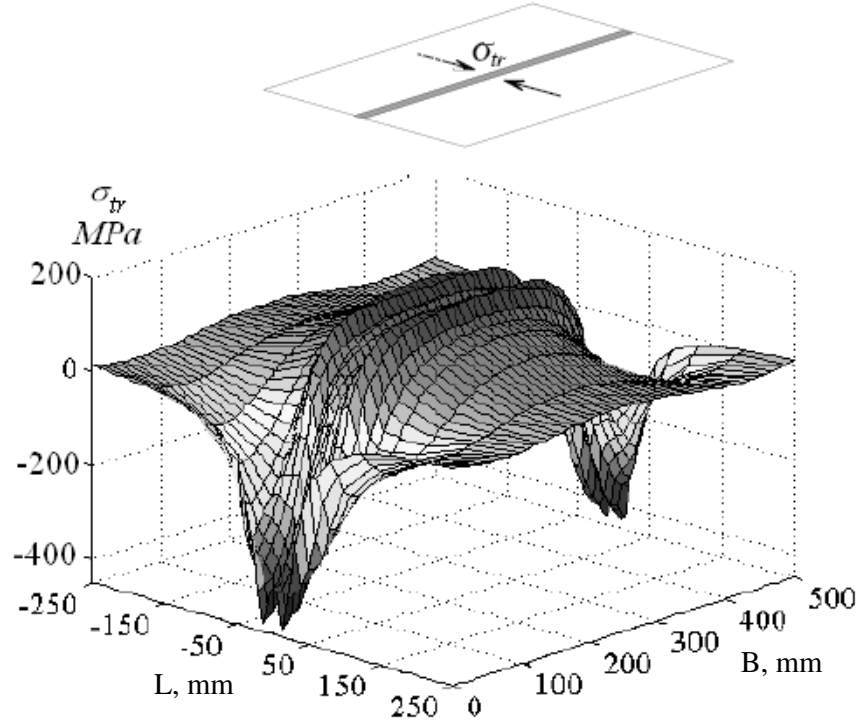


Şekil 2.17: Tek dikişli alın kaynağında enine artık gerilmeler ; a) uzun plakada süratli doldurma b) kısa plakada süratli doldurma c) uzun plakada yavaş doldurma. [29]

Eğer kaynak işlemi esnasında, enine yönde bir kısıtlama yapılmazsa kaynak uzunluğunun ortasında bir boşluk meydana gelir. Plastik deformasyon bölgesinde uzunlamasına kısalma meydana gelirken, basma gerilmeleri oluşur ve plakanın köşeleri Şekil 2.17.d’de gösterildiği gibi eğilmeye çalışır [29]. Kaynak uzunluğunun ortasına yaklaşıldığında enine gerilmeye, kaynak sonunda ise enine basma gerilmesi oluşur.

Kısa ve dar plakaların kaynağında ve yüksek süratli kaynak hızlarında, plaka köşeleri soğuma esnasında birbirlerine doğru hareket ederler ve uzunlamasına kısalma, plakayı eğmeye çalışır. Sonuç olarak, Şekil 2.17.b’de gösterilen form kaynak merkez çizgisi boyunca oluşur.

Eğer kaynak hızı kaynak metalinin oda sıcaklığına düşmesi için yeterince düşükse, malzeme yüke dayanabildiğinde, kaynak arkının yakın bir arkasında ve kaynak sonuna doğru çekme gerilmeleri Şekil 2.17.c’de gösterildiği gibi oluşur. Hareket kısıtlaması yapılması durumunda enine artık gerilmelerin dağılımında birçok değişiklik gözlenir.



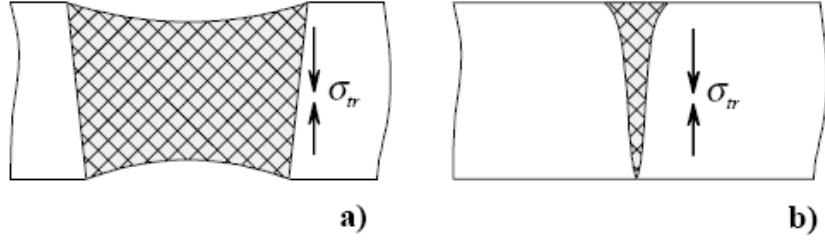
Şekil 2.18: Üç boyutlu enine artık gerilme gösterimi [22].

Üç boyutlu enine artık gerilme dağılımına bir örnek Şekil 2.18’de verilmiştir [22]. Küçük bir plaka temel alınarak yapılan bir örnektir. Her birinin boyutu 250 x 500 mm dir. Şekil 2.18’den görüleceği üzere, artık enine gerilmelerin maksimum değerleri kaynak sonlarında meydana gelmiştir.

Enine gerilmeler, kalınlık arttıkça kaynakta mevcut olabilmektedirler. Bazı kaynaklı durumlarda, bu durum, göz önüne alınacak kadar önemli olabilir. Bu tezde gemi sanayinde kullanılan kaynak işlemlerinin sonucu olan deformasyonlar ele alındığından birçok durumda enine artık gerilmeler kalınlık boyunca ihmal edilebilir.

Enine artık gerilmelerin, kalınlık boyunca ihmal edilebilirliğine örnek Şekil 2.19’da verilmiştir. Gerilme ve deformasyonlar genellikle zıttırlar. Deformasyonlar kısıtlandıkça, gerilmeler artmış, tersine ise azalmıştır.

Şekil 2.19.a’daki kaynak örneğinde iki ince plaka tek dikişli olarak birleştirilmiştir. Bu tip işlemler genellikle göreceli olarak geniş plastik deformasyona uğramış alanlarla karakterize edilirler. Kaynak çizgisine yakın alandaki malzeme kalınlığı boyunca az ya da çok hareket edebilirler. Bu sebeple enine gerilmeler düşüktür.



Şekil 2.19: kalınlık boyunca enine kaynak gerilmeleri a) geniş plastik deformasyona tabi alan b) dar plastik deformasyona tabi alan [25].

Şekil 2.19.b’de elektron ışını kalın ve orta kalınlıktaki plakalar için kullanılarak kaynak yapılmıştır. Dar alan kalınlık boyunca kısıtlanmıştır. Bu şekilde kalınlık boyunca yüksek artık gerilmeler başlatılmıştır

2.2.3. Kaynaklı Parçalarda Deformasyon

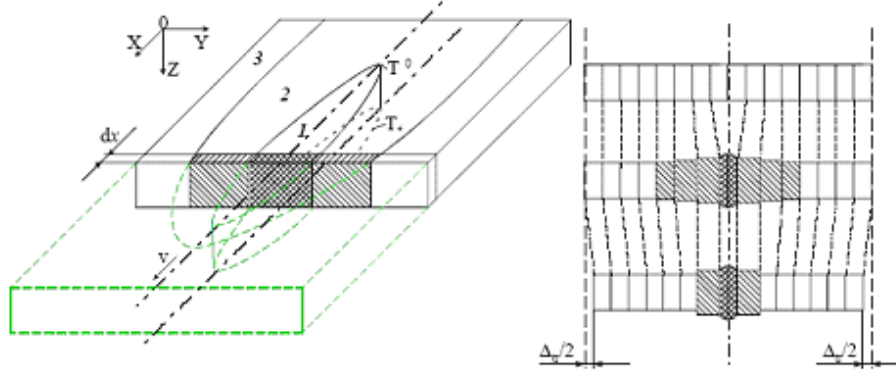
2.2.3.1. Alın Kaynaklarındaki Enine Çekme Mekanizması

En yaygın olarak kullanılan tek dikişli alın kaynağı bir örnek olarak baz alınmıştır. Burada meydana gelen deformasyon, diğer kaynak deformasyonları için de karakteristiktir.

Kaynak deformasyonlarını daha iyi anlayabilmek için, enine deformasyonları ele alınabilir (Şekil 2.20). dx Kesit alanına yakından bakıldığında üç belirgin bölgeden ibaret olduğunu görülmektedir.

1. Yumuşak metal bölgesi (no 1) (izoterm T^*)
2. T^* ve T_0 arasındaki bölge (no 2) Sahip olunan sıcaklıktan başlangıç sıcaklığı T_0 a düzgün bir düşüş ile.
3. Soğuk bölge (no 3) sıcaklığın önemli ölçüde değişmediği, sıcaklık alanını sardığı ve genişlemesine müsaade etmediği.

Soğuk bölgenin kesit alanını, birçok eşit dikdörtgenlere ayrılmış ve kaynak süresince nasıl şekil değişimine uğradıklarına bakılmıştır. Şekil 2.20’de gösterilen birinci süreç kaynağın kesit alanını geçtiği anın sonrasındır.



Şekil 2.20: Kaynak enine çekme oluşumu [22].

Yukarıda bahsedilen üç bölgenin her biri dx kesit alanından geçer. Soğuk bölgeler sabit olarak birbirlerini tutarlar ve bahis konusu kesit alanların genişlemesine izin vermezler. Bu durumda ısınan metal (1 ve 2 nolu bölge) merkez çizgisine doğru genişleme eğilimi gösterir ve 1 bölgesini sıkıştırır. Aynı anda soğuk bölgenin elementleri değişmeden kalırlar, metalin birinci ve ikinci bölgeleri kaynak merkez çizgisine yaklaşırlarken, birinci bölgenin yumuşayan elementleri, y yönünde, Δ_r miktarı kadar plastik deformasyona uğramaya başlar. Başka bir ifade ile ikinci bölgedeki elementler, birinci bölgedeki yumuşak elementlerle elastik ve plastik ilişki içerisine girerek y yönüne genişler.

2.2.3.2. Alın Kaynaklarında Boyuna ve Enine Çekmeler

Merkez kaynak çizgisine yakın elementler hariç (sadece yumuşak bölgedekiler değil), plaka elementleri soğuma sürecinde, kademeli olarak başlangıç geometrik durumlarına geri dönerler. Isınma periyodunda, orta bölgedeki bazı elementler plastik deformasyona uğrarlar. Soğumuş halin bir sonucu olarak, plakanın dış kenarları kaynak merkez çizgisine yaklaşırlar. Gatovskii isimli araştırmacı çalışmalarında bazı basitleştirmeler yaparak artık enine ve boyuna çekmeler için fiziksel bir model oluşturmuştur [19]. Bu denklemler aşağıdadır (2.16).

$$\begin{aligned}\Delta_{tr} &= \mu_{tr} \cdot \frac{\alpha}{c\rho} \cdot \frac{q_w}{h} = -1.25 \frac{\alpha}{c\rho} \cdot \frac{q_w}{h} \\ \Delta_l &= \mu_l \frac{\alpha}{c\rho} \cdot \frac{q_w}{h} = -0.335 \frac{\alpha}{c\rho} \cdot \frac{q_w}{A} \cdot L_w\end{aligned}\tag{2.16}$$

μ_{tr} ve μ_l enine ve boyuna çekmelerin katsayıları, q_w kaynak uzunluğu başına net ısı girdisi $[J.S^{-1}.m^{-1}]$, A kesit alanı $[m^2]$, L_w kaynak uzunluğu $[m]$

Vinokurov isimli araştırmacı çalışmalarında μ_{tr} değerini 1.0 ila 1.4 arasında kullanmıştır [20]. Aynı zamanda yukarıdaki denklemleri 16 mm kalınlığına kadar az karbonlu az alaşımlı ve ostenitik çelikler için kullanılabilir farz etmiştir.

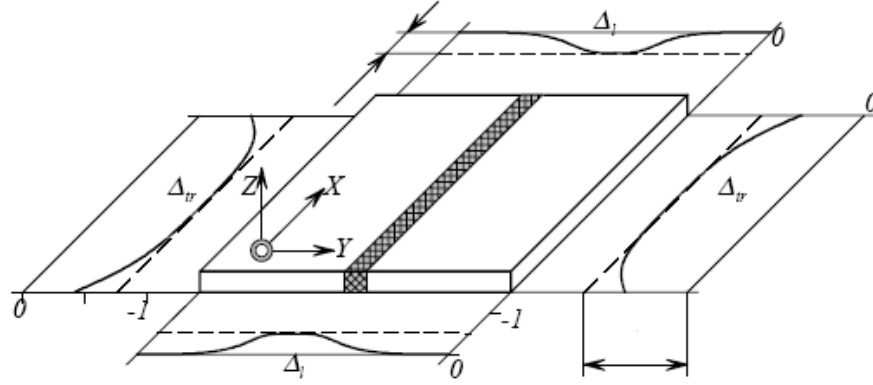
Yukarıda verilen denklemler yaklaşık çözümler sunmakta birlikte çoğu durum için isabetli çözümler üretmektedir. Ancak aşağıdaki durumlar göz önüne alınmalıdır.

1. Yüzeyden ısıнын önemli etkisi kaybolmaktadır (yüksek ısıma ısı transferi katsayısı ile ince levhaların kaynağında)
2. Ön gerilmeli parçaların kaynağında verilen başlangıç gerilmesi belirlenen yöndeki deformasyonu azaltmaktadır. Başlangıç basma gerilmesi ise ters etkiyi verir.
3. Yetersiz nüfuziyetle kaynak. Soğuk metalin varlığı yapının kararlılığını arttırmakta ve enine/boyuna deformasyonları ciddi olarak düşürmektedir.

Yukarıda verilen denklemlerle tahminler yapılabilir, ancak parçalar her zaman bahsedildiği gibi basit dikdörtgenler olmamaktadır. Şekil 2.21 gerçek bir deformasyon şeklini göstermektedir.

Boyuna gerilmelerin kaynağa yakın olarak yoğunlaştığı açıktır. Eğer parça geniş ise ve kaynak merkez çizgisi boyunca uygulanan boyuna yüke dayanabilecek kadar kararlı ise, parçanın geri kalan genişliğinde sıfıra yakındır.

Enine çekme plakanın orta bölgesinde her iki sona göre daha fazladır. Bu durum plaka uzunluğu boyunca U şeklinde bir dağılım verir. Bu düzgün olmayan dağılım karakteristiği genişlik arttıkça düzelir.



Şekil 2.21: Düzlemsel deformasyon dağılımı, ----- 2.16 denklemlerine göredir. [22].

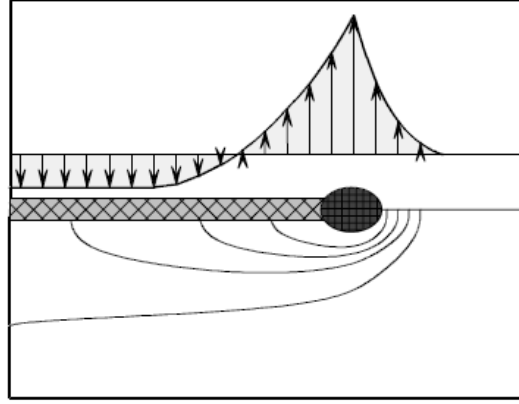
Enine çekmenin, U şeklideki dağılımı köşelere yakın plakanın kararlılığının azalması ile açıklanabilir. Bu sebeple şekilden dx kesit alanı kaynağın başlangıcına ya da sonuna yakın olarak yerleştirilir, ilk sıcak süreç boyunca daha az sınırlandırılır. Plakanın sonuna doğru enine çekme azalmaya yüz tutar. Aynı zamanda benzer U şekli tam olarak tanımlanmamıştır. Bazı küçük örneklerde fıçı şeklinde distorsiyonlar meydana gelebilir.

2.2.3.3 Kaynak Süresince Metal Hareketinin Kinetiği

Düzlemsel deformasyonlar ancak soğuma süreci tamamen bittiğinde belirgin hale gelirler. Çekmeye yol açan plastik deformasyon, gerçeğine rağmen kaynak işleminin kendisinde meydana gelir.

Plaka üzerinden ısı kaynağı geçerken, sadece belirli bir metal parçası hareket halindedir. Bu sebeple, ilave mingeneler, kaynak esnasında çekmede önemli bir etkiye haiz değildirler. Soğuma sürecinde ise bu durum değişir. Eğer mingeneler yeterince güçlü ise, plastik deformasyon, kalıcı enine ve boyuna çekmeyi düşüren, rol alabilir.

Şekil 2.22’de kaynak yakınlarına yerleştirilen noktaların, kaynak anında enine metal hareketi gösterilmiştir. Isı kaynağının önündeki sıcaklığın yükselmesi sebebiyle, metal genişlemeye başlar.

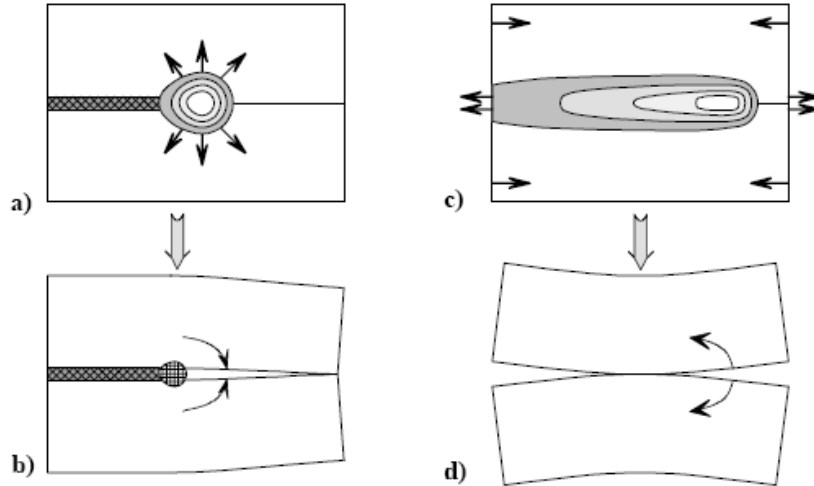


Şekil 2.22: Kaynak hattına paralel ve yakın yerleştirilen noktaların enine yer değiştirmeleri [22].

2.2.3.4. Alın Kaynaklarında Dönme Distorsiyonu

Alın birleştirmelerinin dönme distorsiyonu, kaynak süresince, plaka uzunluk oranıyla metal yumuşama sıcaklığından (yumuşak çelikler için $T^* = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) etkilenir. Plakanın büyük bir parça uzunluğunca, T^* izotermi genişlediği durumda (Şekil 2.23.c) kaynak dikişi boyunca plaka köşeleri her iki uzunlaması yönüne genişleme şansı bulur.

Kaynağa yakın sıcak parça genişlediğinden bir boşluk meydana gelir. Ancak plakanın soğuk parçası buna karşı mücadele eder. Plakanın formu Şekil 2.25.d'deki gibi olmaya meyil eder.



Şekil 2.23: Alın kaynaklarında dönme distorsiyonundaki açılma ve kapanmaları gösteren şema; a) ve c) diğerlerine nazaran kısa ve uzun metal izotermine sahip sırasıyla sıcaklık dağılımı ve kuvvet oluşumu; b)kapanma oluşumu d) açılma oluşumu [22].

Bu çeşit dönme distorsiyonları yüksek kaynak hızları ve güçlü ısı kaynakları kullanılan tozaltı kaynak işlemleri için karakteristiktir.

Göreceli olarak kısa ve yuvarlatılmış T^* izotermi (Şekil 2.23.a) için sıcak alan az ya da çok, diğer yönler genleşmeye çalışır. Isı kaynağının arkasındaki metal katılaşmış ve yüke dayanabilecek sıcaklığa soğumuştur.

Ark yanına yerleşmiş sıcak parçanın genleşmesiyle boşluk küçülür, ancak parçanın soğuk kısmı buna karşı koymaya çalışır. Isı kaynağının arkasındaki plaka köşeleri her yöne serbestçe genişleyecek şansa sahip değildirler. Kaynağın önündeki kapanan boşluk sebebiyle Şekil 2.23.b’de oklarla işaretlendiği gibi, metal için tek seçenek, öne doğru ilerlemektir. Bu tip dönme distorsiyonu, düşük kaynak hızlı ve düşük güçteki ısı kaynağı olan örtülü elektrotlarla yapılan kaynak işlemi için karakteristiktir.

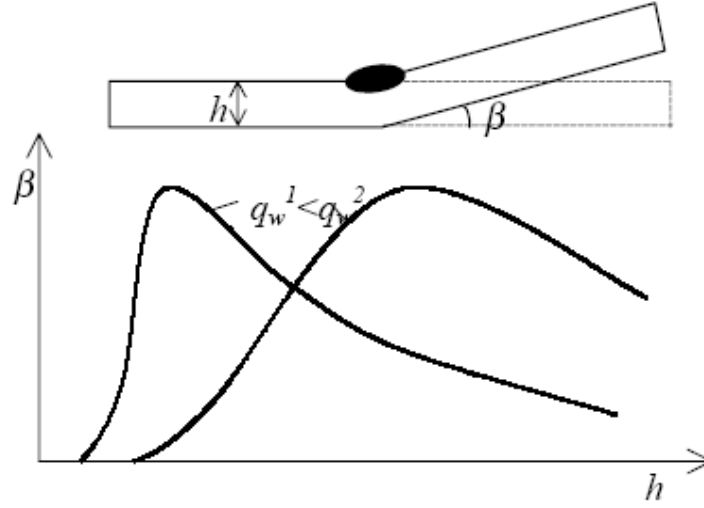
2.2.3.5. Açısal Çekme

Yerel deformasyonun çeşitlerine bakıldığında, kaynaklı parçaların oluşturulmasında ortaya çıkan yerel deformasyona, kısaca ondüle distorsiyon (enine ve boyuna çekme) adı verilir. Yerel deformasyonların kaynağı;

1. İki birleştirilecek parça birbirleriyle ilişkili dik düzlemde kaynak yönüne doğru dönerler. Kalınlık boyunca düzgün olmayan ısı dağılımı sonucu meydana gelirler.
2. Boylamasına çekme kuvvetleriyle parçanın kararlılığı bozulur (ondüle). Genellikle ince parçalarda görülür.

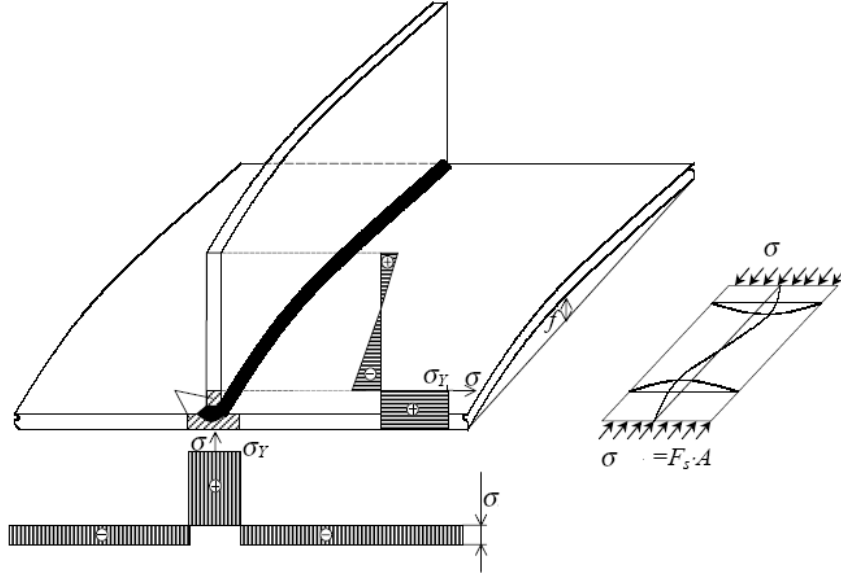
Açısal çarpılma hemen hemen tüm kaynak işlemlerinde görülebilir. Şekil 2.24’de açısal çarpılmayı parçanın kalınlığına ve ısı girdisine göre göstermektedir [30].

Küçük kalınlıklar için, kalınlık boyunca, sıcaklık dağılımının düzgün olmasından ötürü açısal çarpılma belirgin değildir. Kalın parçalar için açısal çarpılmanın belirgin olmayışı parçanın kararlılığındandır. Orta kalınlıktaki parçada açısal çarpılma fazladır. Isı girdisi q_w nin artırılması eğrinin artmasına neden olur (Şekil 2.24).



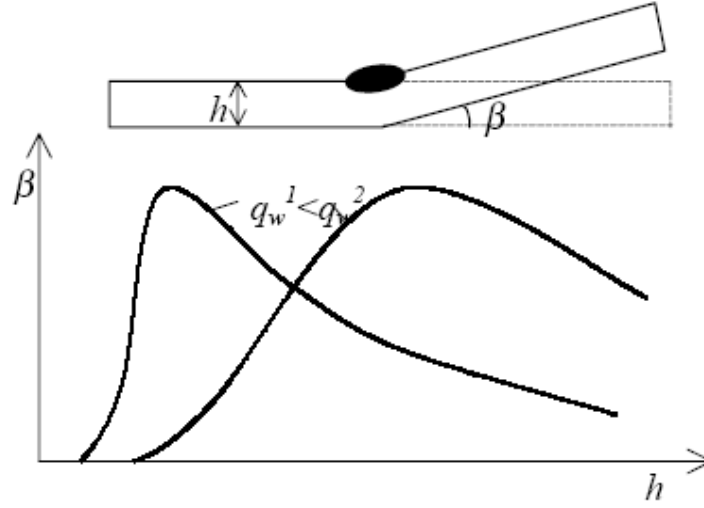
Şekil 2.24: parça kalınlığı-açısal çarpılma ilişkisi [22].

Bahsedildiği gibi ondüle distorsiyon şekli ince parçalarda meydana gelir. Bu durumda uzunlamasına çekme gerilmesi $\sigma_{çekme}$ ondüle distorsiyona sebep olan kritik gerilmeye σ_{kr} ulaşır ($\sigma_{çekme} \approx \sigma_{kr}$).



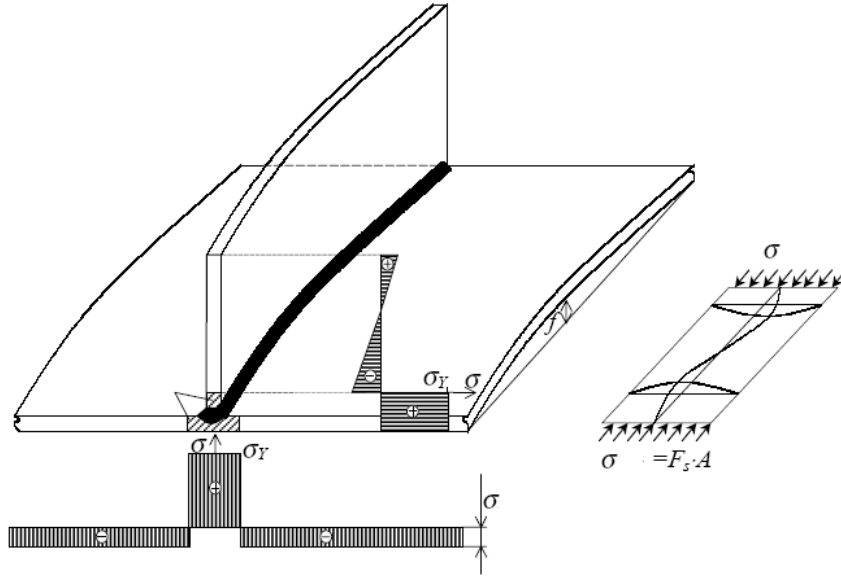
Şekil 2.25: Parçanın kararlılığını kaybederek ondüle distorsiyona uğraması [22].

Şekil 2.25'de T bağlantısının enine kesitinde boyuna artık gerilme dağılımı göstermektedir.



Şekil 2.24: parça kalınlığı-açısal çarpılma ilişkisi [22].

Bahsedildiği gibi ondüle distorsiyon şekli ince parçalarda meydana gelir. Bu durumda uzunlamasına çekme gerilmesi $\sigma_{çekme}$ ondüle distorsiyona sebep olan kritik gerilmeye σ_{kr} ulaşır ($\sigma_{çekme} \approx \sigma_{kr}$).



Şekil 2.25: Parçanın kararlılığını kaybederek ondüle distorsiyona uğraması [22].

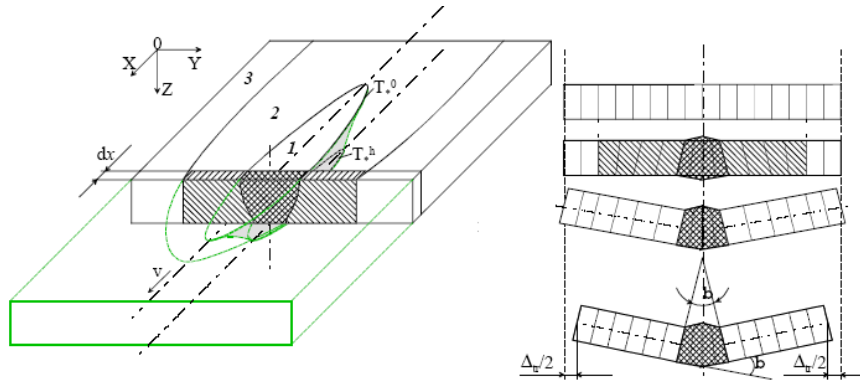
Şekil 2.25'de T bağlantısının enine kesitinde boyuna artık gerilme dağılımı göstermektedir.

Kaynak yanındaki dar alan hariç, boylamasına artık gerilme, neredeyse parça boyunca düzgündür. Bu durum, bazı durumlarda ondüle distorsiyon analizine kolaylıklar sağlar. Şekil 2.25 aynı zamanda karmaşık termo-mekanik problemlerinin de basit olan bir mekanizmaya göre gösterilmesi açısından da iyi bir örnektir.

Açısal distorsiyonun gelişiminin kinetiğinde, açısal çarpılmanın nasıl meydana geldiğini görmek için, alın kaynağı işlemi incelenebilir (Şekil 2.26) . Metal yumuşama sıcaklığındaki yüzeyde T^0 * (düz çizgi) ve tabanda T^h * (kesikli çizgi) sıcaklıkları şekilde gösterilmiştir. dx kesit alanını ele alınırsa bu kesitin üç karakteristik bölgeden müteşekkil olduğunu görülebilir.

1. Yumuşamış metal bölgesi (no 1) (T^* izoterm)
2. T^* ve T_0 arasındaki bölge (no 2) Sahip olunan sıcaklıktan başlangıç sıcaklığı T_0 a düzgün bir düşüş ile.
3. Soğuk bölge (no 3) sıcaklığın önemli ölçüde değişmediği, sıcaklık alanını sardığı ve genişlemesine müsaade etmediği.

Yukarıda bahsedilen üç bölgenin her biri dx kesitini geçer. Soğuk bölgeler sabit olarak birbirlerini tutarlar ve bahis konusu kesit alanların genişlemesine izin vermezler. Bu durumda ısınan metal (1 ve 2 nolu bölge) merkez çizgisine doğru genişleme eğilimi gösterir ve 1 bölgesini sıkıştırır, kalıcı plastik deformasyonu dahil.



Şekil 2.26: Açısal çarpılmanın gelişiminin şematik gösterimi; 1. evre-ısı kaynağının dx kesit alanını geçtikten hemen sonra; 2.evre-plaka kalınlığı boyunca sıcaklık gradyanının azalmasından sonra; 3. evre- tamamen soğumanın sonrası [22].

Malzemenin yüzeyi, yüksek bir sıcaklığa ısıtıldığından, bu alana ait noktalar taban yüzeyi boyunca kaynak merkez çizgisine ötelenir.

Şekil 2.26'in sağ tarafında açılma çarpılmanın birçok evresi gösterilmiştir. Kesit alanı dik çizgilerle bölünmüştür. Bu durum metal hareketinin gerçek dinamiklerinin görülmesine sağlar.

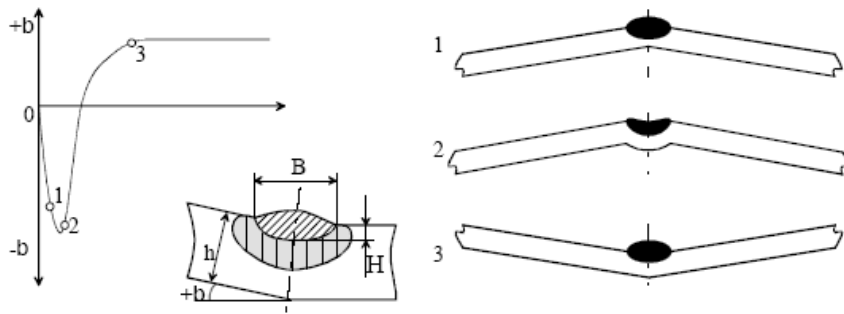
1. Evrede kalınlık boyunca ve enine yönlerde düzgün olmayan yer değişimleri gösterilmiştir. Yüzeye yakın yerdeki noktalar ters taraftaki noktalar yerine CL ye doğru taşınarak büyür, bu durum orijinal dikdörtgen şeklin trapez şekle dönüşümüne yol açar.

2. Evre boyunca tetragonaller tekrar dikdörtgen şekle döner, ancak değişik genişliklerde. Bunlar olurken plakaların yanları birbirlerine doğru β açısıyla eğilirler.

Enine yönde sıcaklık eşitlenmesinden sonra, 3. evreye doğru, tüm plaka enine yönde Δ_r kadar düzgün kısalır. Bu anda plastik olarak deforme olan ve yumuşamış metal bölgesine doğru dikdörtgen şekli yenilenmiş olur.

Kaynak işleminin bitirilmesi sürecinde açılma çarpılmanın davranışı Şekil 2.27'da gösterilmiştir. Şekil 2.27 zamanla açılma (β) değişimi şematize etmektedir.

Isınma sürecinin başlangıcında ısı kaynağına yakın alanlar soğuk olan alanlara nazaran daha güçlü bir eğilimle genişlemeye çalışırlar. Plakaların köşeleri eğilmeye başlar. Ancak genişleyen kısımlar ihtiyacı olandan daha az serbest hareket alanı bulur. Plakanın diğer bölümleri direnerek sıcak alanın plastik deformasyona uğramasına sebep olur. Bu durum Şekil 2.27 dikey olarak taramalarla gösterilmiştir.



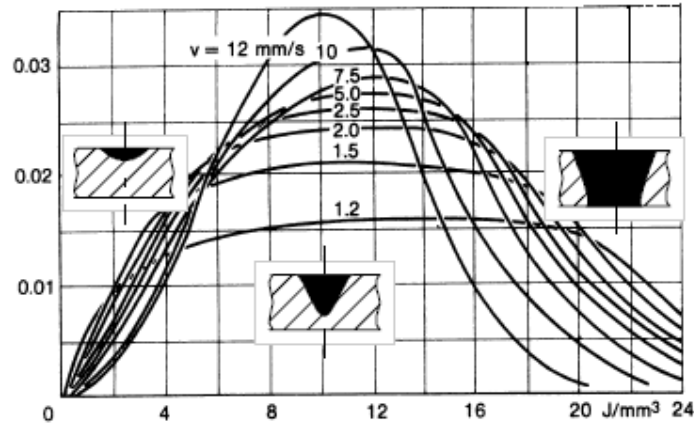
Şekil 2.27: kaynak işleminde zamanın bir fonksiyonu olarak ısınma ve soğumaya bağlı açılma çarpılma H dikey derinliği B dikey genişliği [22].

Açısal çarpılmanın büyüklüğü birçok faktöre bağlıdır, bunlar;

1. Nüfuziyet derinliği ilişkisi H/h
2. Dikiş genişliği ilişkisi B/h
3. Dikiş formu
4. Ana ve ilave malzemenin özellikleridir.

Kaynak dikişinin formu güç kaynağının yoğunluğuna ve diğer özelliklerine bağlıdır. Literatürde bulunan raporlarda çok değişik fikirler bulunmaktadır. Birincisi, yukarıda bahsedilen faktörlerin değişkenliği, diğeri ise ısı kaynağı dağılımının belirsizliğidir. Birleştirilen parçalar arasındaki enerji dağılımının düzensizliği, çok çeşitli büyüklükte açısal çarpılma yaratır. Buradan deney sonuçlarını kestirebilmek ve diğer durumlara adapte edebilmek zordur. Tahmin edilen sonuçlar ister termo-mekanik analiz, isterse basit denklem yardımıyla olsun gerçek bir yaklaşıma hizmet eder.

Açısal çarpılmaya ilişkin ilk yaklaşım düşük karbonlu çeliklerin alın kaynağında bir diyagram yardımıyla A.S.Kuzimov tarafından kullanılmıştır [31]. Şekil 2.28'da Gösterilen diyagram deneysel verilerden elde edilmiştir.



Şekil 2.28: Kaynak uzunluğu boyunca ısı girdisine bağlı olarak $\Delta\beta$ açısal çekme[31]

Diyagramda başlangıçtan itibaren artan q_w/h^2 parametresiyle β açısı artar ve $q_w/h^2 \approx 10 \text{ J.mm}^{-3}$ değerinde maksimum değerine ulaşır. Bu mertebeden sonra açısal çarpılma azalır.

Diyagramın sol tarafında yer alan küçük β açısı kalınlık boyunca yeteri kadar güçlü bir ısı kaynağına sahip olamayarak malzeminin yeterince yumuşamadığı anlamına

gelebilir. Bu durumda soğuk metal kısmı eğme kuvvetine karşı gelebilecek kadar kararlıdır. Diyagramın sağ tarafındaki β açısının düşmesi, kalınlık boyunca sıcaklık gradyeninin kaybolmasına bağlıdır. Bu durumda plakanın katmanları, y yönünde enine genişleyerek, düşük direnç (plastik deformasyon) ve sonuç olarak azaltılmış açılal çarpılma meydana gelir.

V şeklindeki köşe hazırlığı alın kaynağı durumunda dolgu malzemesinin çekmesi sonucu açılal çarpılma meydana gelir. Dikiş şeklinin V şeklinde oluştuğunu farz ederek β açısı için basit bir denklem oluşturulabilir.

$$\beta = 2\alpha.T_*. \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.17)$$

α ısııl genişleme katsayısı, T^* malzemenin yumuşama sıcaklığı (yumuşak malzemeler için $T^*=600$ °C ve θ V şekli açısıdır.

Diğer bir empirik formül 2.15 Okerblom tarafından 1955 yılında önerilmiştir [22].

$$\beta = 0.13. \frac{I.U}{v.h^3} \quad (2.18)$$

I akım (A) U voltaj (V) v kaynak hızı (mm.s^{-1}) ve h plaka kalınlığı (mm)dir.

Uzun plaka kaynaklarında kaynak dikişi boyunca sıcaklık dağılımı dikkate değer bir şekilde değişiklik gösterir. Ve açılal çarpılma plaka boyunca farklılık gösterir.

2.3 Kaynak Ondüle Distorsiyonları

Basit bir tanımla elastik ondüle distorsiyon, basmaya tabi olan bir sütünür. Yük belli bir değere ve ya kritik ondüle yüküne ulaştığında sütün yana doğru deforme olmaya başlar. Başka bir tanımla ondüle distorsiyon, az bir basma gerilmesi artmasında ani geniş deformasyonların görülmesi olayıdır. Plakalar kaynak edildiğinde Şekil 2.29'da görüldüğü üzere yerel ısınma ve soğumalardan dolayı basma gerilmesi oluşur, eğer basma gerilmesi kritik ondüle gerilmesini aşarsa distorsiyon meydana gelir. Kaynak esnasında ani gerilme yükselmelerini ve meydana gelen distorsiyonun büyüklüğü ve yönünü kestirme oldukça güçtür.



Şekil 2.29: Ondüle distorsiyon şekli

Ondüle şeklindeki kaynak distorsiyonları diğer distorsiyon şekillerinden farklılık gösterir. Şöyle ki;

- Birden fazla kalıcı şekil değişimi mevcuttur. Bu da ondüle distorsiyonun anlaşılmasına olanak verir. Eğer kaynaklı parça ince ise genellikle ondüle şeklindeki distorsiyon belirgin hale gelir.
- Deformasyonun miktarı tipik kaynak distorsiyonlarından daha fazladır. Bu da ondüle distorsiyonun anlaşılmasına olanak verir.

2.3.1 Analitik araştırma

Ondüle distorsiyon ve etkileri hakkında temel bilgiler “kaynaklı yapıların analizi” isimli çalışmada Masabuchi tarafından verilmiştir [32]. Basit olması açısından analizde dört varsayım kullanılmıştır. (1) elastik gerilmelerin süper pozisyonu mümkündür, (2) gerilmeler plaka boyunca ani olarak uygulanmakta ve kaynak hattına paralel düzgün dağılım olarak bulunmaktadır, (3) yalnızca uzunlamasına artık gerilmeler mevcuttur, (4) kaynaklı parçada yalnızca σ_T ve σ_C büyüklüğünde düzgün çekme ve basma gerilmeleri mevcuttur. Eğer plaka genişliği b ise denge durumu şu şekilde yazılabilir;

$$\sigma_T \cdot (2r) = -\sigma_C \cdot (b - 2r) \quad (2.19)$$

Basma gerilmesi – olarak alınmıştır.

Doğrusal elastiklik farz edilerek diferansiyel denklem şu şekilde yazılabilir

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{1}{D} (N_x + \eta_x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (2.20)$$

w sapma mm

$$D = Eh^3 / 12(1 - \nu^2) \quad (2.21)$$

E young modülü (N/mm²)

ν ise poisson oranıdır.

h plaka kalınlığı mm

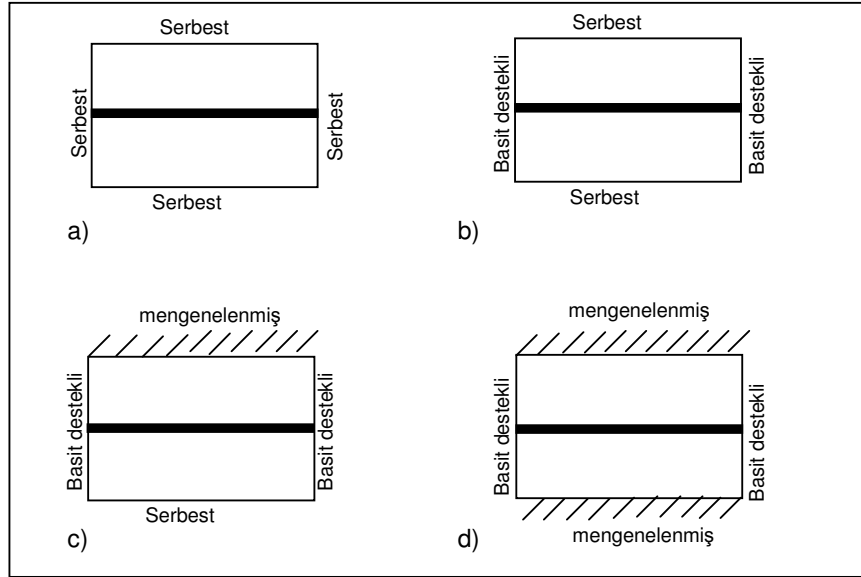
N_x orta-plaka yükü (N/m) and η_x artık gerilme yükü N/m

Yukarıda verilen denklem şu şekilde de yazılabilir

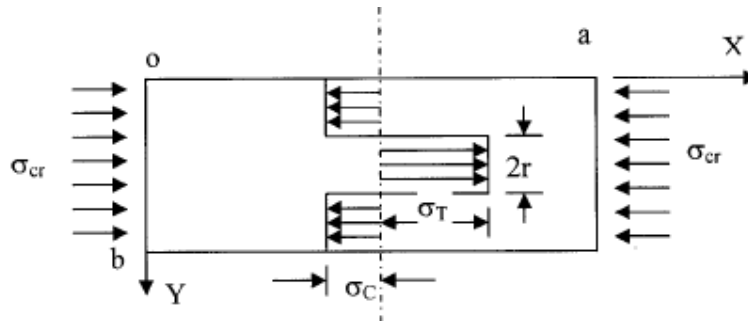
$$w(x, y) = \int_0^a \int_0^b \left[(N_x + \eta_x) \frac{\partial^2 w}{\partial E^2} \right] G(x, y; E, n) dE. dn \quad (2.22)$$

$G(x,y;E,n)$ sınır koşullarını karşılayan uygun bir gren fonksiyonunudur. Bu denklem alın kaynağı için belirli sınır koşullarında çözülmüştür.

Sınır koşulları Şekil 2.30'de gösterilmiştir.



Şekil 2.30: Sınır Koşulları [32].



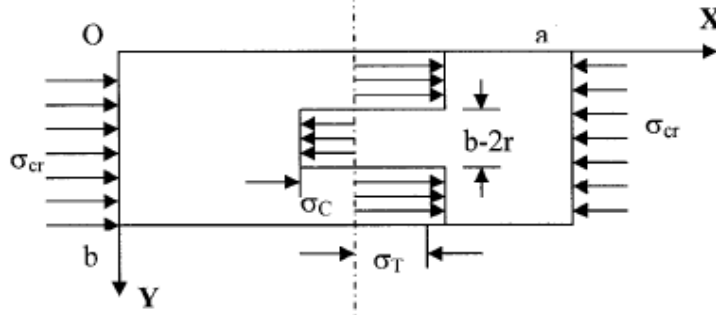
Şekil 2.31: kritik ondüle gerilme (plakanın ortasında alın kaynağı $y=b/2$) [32].

Basit destekli eksenel olmayan basma gerilmesi altındaki dikdörtgen plaka

$$\sigma_{cr} = \frac{E\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{b} \right)^2 \left(m \frac{b}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 + \sigma_c \cdot \frac{\sin(2\pi/b)}{(2\pi/b)} \quad (2.23)$$

Sıkıştırılmış eksenel olmayan basma gerilmesi altındaki dikdörtgen plaka

$$\sigma_{cr} = \frac{E\pi^2}{144(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left(48m^2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + \frac{48a^2}{m^2b^2} + 32\right) + \sigma_c \left(\frac{\sin(2\pi r/b)}{3\pi/2b} + \frac{\sin(4\pi r/b)}{(12\pi/b)}\right) \quad (2.24)$$



Şekil 2.32: kritik ondüle gerilme plakanın her iki yanında alın kaynağı y=0; y=b [32]

Basit destekli eksenel olmayan basma gerilmesi altındaki dikdörtgen plaka

$$\sigma_{cr} = \frac{E\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left(m \frac{b}{a} + \frac{a}{mb}\right)^2 - \sigma_c \cdot \frac{\sin(\pi(b-2r)/b)}{(2\pi/b)} \quad (2.25)$$

Sıkıştırılmış eksenel olmayan basma gerilmesi altındaki dikdörtgen plaka

$$\sigma_{cr} = \frac{E\pi^2}{144(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left(48m^2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + \frac{48a^2}{m^2b^2} + 32\right) - \sigma_c \left(\frac{\sin(2\pi r/b)}{3\pi/2b} - \frac{\sin(4\pi r/b)}{(12\pi/b)}\right) \quad (2.26)$$

Eğer artık gerilmeler kritik ondüle gerilmesinden yüksek ise ondüle distorsiyon meydana gelir. Tasarım aşamasında malzeme seçimi ve boyutlar ilk olarak düşünülen kısımlardır. Öncelikle kritik gerilme bulunur ve kaynak parametreleri buna göre seçilir.

3. KAYNAK DİSTORSİYONLARINI DÜZELTME TEKNİKLERİ

İnce sacların kullanımının artmasıyla birlikte kaynak sonrası distorsiyon problemi, günümüzün yeni ihtiyaçları karşısında, ciddi bir sorun olarak tersanelerde görülmeye başlamıştır. İnce saclar kullanılarak yapılan kaynak sonrasında, ondüle şeklindeki distorsiyon çeşidinde artmalar görülmüş, bununla birlikte montaj aşamasında, bağlantıların tam birleşmemesinden ötürü, gereğinden fazla ilave metal harcamasının yapılması gerekmiştir. Meydana gelen çarpılmaların düzeltilmesi amacıyla alevle düzeltme işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır.

İnce sacların ondüle şeklini almalarına meyilli olmalarına sebep, bunların taşınmaları, kesilmeleri ya da kaynak işlemleri sırasında meydana gelen artık gerilmelerinin, yapının geometrisine bağlı olarak, kritik bir gerilme değerini aşmasıdır.

Önceki araştırmalarda, Masabuchi, ondüle distorsiyonlar için deneysel bir metot geliştirmiştir [32]. Ondüle distorsiyona yol açan birçok faktörler incelenmiştir. Örneğin, kaynak ısı girdisi ve parça kalınlığı. Ondüle distorsiyonlara sebep kaynak bölgesinden uzakta konuşlanan basma artık gerilmeleridir. Ondüle distorsiyonları önlemenin en etkili yolu kaynak boyutunu küçülterek ısı girdisini azaltmaktır.

Kaynak sonrası meydana gelen artık gerilmeleri azaltmak amacıyla, termal-mekanik iyileştirme teknikleri uygulanabilmektedir. Gemi yapımında, uzunlamasına alın kaynağı birleştirmelerinde kaynağın her iki yanına sıcaklık bantları yerleştiren sıcaklık dağılımını kullanarak artık gerilmeleri azaltan ilk olarak Grene ve Holzbaur'dur [33]. Böylelikle, kaynak sonrası meydana gelen artık gerilmeler, sıcaklık bantları yardımıyla, ısının kontrol edilmesiyle azaltılabilmektedir. Günümüzde, artık gerilmelerin azaltılmasına yönelik, birçok metot bu iki araştırmacının tanımladığı prensibe dayanmaktadır. Bundan önceki teknikler arasında, her kaynak pasosu sonrası, soğutma işlemi ile uygulanan ısı sönümleme kaynak tekniği Barber [34] tarafından araştırılmıştır.

En son yapılan gelişmeler de yukarıda bahsedilen prensipler çerçevesinde gerçekleşmiştir, hatta bunlar arasında detaylı olarak önemli kontrol parametrelerinin incelenenleri de bulunmaktadır. Örneğin Guan [35] tarafından geliştirilen, düşük gerilimli distorsiyonsuz teknik (Low Stres No Distortion) sayılabilir. Bu kavramı Yang [36] daha da geliştirerek hem artık gerilmelerin hem de ondüle distorsiyonlarının kaynağa soğuma esnasında yan yana ve kaynağın her iki tarafına merdaneler ile mekanik olarak baskı uygulanmasıyla önlenebileceğini göstermiştir. Gemi inşa sektöründe yaygın olarak kullanılan T kaynaklarında ise Michaleris ve Sun [37], yine Grene ve Holzbaaur'un ortaya koyduğu prensiple ısısal gerilme tekniğini uygulamışlardır. Yine aynı şekilde Dong, ısısal gerdirme tekniği ile artık gerilmeleri ve distorsiyonları alüminyum levhaların onarım kaynaklarında başarılı bir şekilde kullanmıştır.

Kaynak gerilme ve deformasyonları kaynaklı yapının performansında birçok değişik etkiye sahiptirler. Genellikle bu etkiler olumsuz yapıdadır.

Üç eksenli artık çekme gerilmesinin yapıdaki kusurlarla birleşmesi gevrek kırılmaya yol açar. Eksenel olmayan ya da çift eksenli artık çekme gerilmesi korozyona dayanımı düşürür ve aynı zamanda yapının kararlılık limitini yükseltir. Artık basma gerilmelerinin yapıda bulunması ise yorulma dayanımını arttırır.

Kaynaklı yapıların deformasyonunda artık gerilmelerin bulunması yapının kesin ölçülerdeki geometrisini kullanımını ve üretim maliyetini önemli ölçüde etkiler. Tüm bunlar sebebiyle kaynaklı işlemlerde düzeltme tekniklerinin uygulanması kaçınılmazdır. Düzeltme teknikleri ile belirlenen limitler dahilinde kalıcı gerilmeler ve deformasyonlar kontrol edilmeye çalışılır.

Buradaki problem geniş boyutta kaynak artık gerilmeleriyle distorsiyonların karşıt şekilde davranışlarıdır. Örneğin, parçalar kaynak esnasında sabit bir şekilde tutturulursa yapının distorsiyonu düşüktür. Ancak bu durumda artık gerilmeler serbest haldeki kaynaklı yapıların aksine daha yüksek olacaktır. Sonuç olarak öyle bir metot kullanılmalıdır ki artık gerilmeleri düşük tutarken distorsiyonlar da az olsun. Burada özetlenecek olan teknikler bahsedilen artık gerilmeleri rahatlatıcı metotlar üzerine yoğunlaşmışlardır.

Kaynak deformasyonlarını ve gerilmeleri azaltıcı çok çeşitli metotlar bulunmaktadır. Aynı zamanda tüm bu metotların paydası birdir. Düzeltme tekniklerini

sınıflandırmak bu tekniklerin limitlerini ve performanslarını değerlendirmede yardımcı olacaktır.

Bu tekniklerin dayandıkları temel mekanizmalar üç ana prensip olarak bilinirler;

1. Isıtma sürecinde plastik uzama değerlerinin ve plastik uzama alanlarının hacimlerinin azaltılması
2. Plastik kısalmayı karşılamak üzere soğuma sürecinde yada kaynak tamamlandığında plastik uzama uygulanması
3. Kaynak deformasyonlarını karşılamak üzere değişik sırada ön kaynaklar uygulanması ve geniş parçalar kullanılması kaynak deformasyonları konusunda dikkate alınmalıdır.

İlk prensip olarak, uygulanan ısının ve mekanik yöntemin ayarlanması ele alınmalıdır.

Bu amaçla önlemler;

- Ön ısıtma
- Kaynak dikişi sayısını ve ölçünün küçültülmesi
- Kaynak uzunluğu boyunca net ısı girdisinin düşürülmesi
- İlave ısı sönmüleyicilerinin uygulanması
- Ön gerilme verilmiş parçaların kaynak edilmesidir.

İkinci prensip olarak ısınma sürecinde kalıcı plastik deformasyon alanı hacminin azaltılması önerilir. Bu amaçla önlemler;

- Dövme (çekiçleme) uygulaması
- Haddeleme uygulanması
- Uzatma ve eğme
- Yüksek sıcaklık tavlama yöntemleridir.

Üçüncü olarak uygulanacak prensipte ise alınabilecek önlemler;

- Deformasyonların tahmin edilerek değişik sırada kaynak yapmak
- Simetrik birleştirme teknikleri uygulamak (çift taraflı, altlı üstlü kaynak yapmak v.b.)
- Ve diğer tasarım önlemleridir.

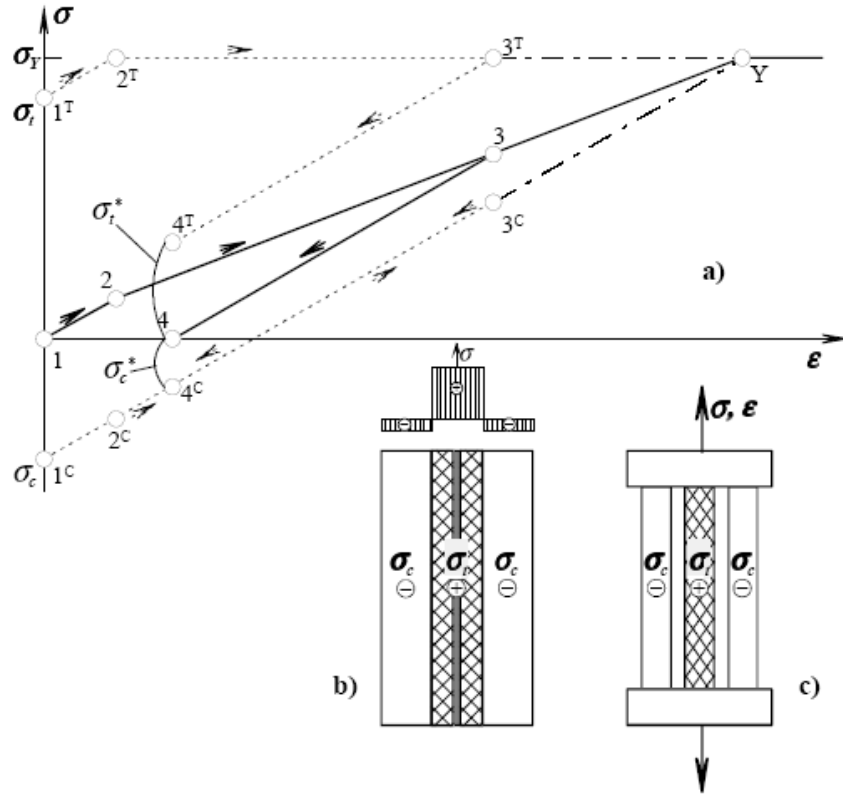
3.1. Mekanik Düzeltme

Mekanik düzeltme kaynak yapılırken ya da kaynak işlemi tamamlandığında uygulanabilir. Bu metotla kaynaklı yapıda bulunan artık gerilmeler tatmin edici bir şekilde azaltılabilir. Ancak ne var ki bu tekniği pratikte uygulamak zordur. Örneğin 20 mm kalınlığında ve 1000 mm genişliğindeki bir plakada, plakayı tutarak ön gerilme vermek için Şekil 3.1'den de görülebileceği üzere yaklaşık $4 \cdot 10^6$ N luk kuvvet gerekmektedir. Böyle bir tertibat ise günümüzde kullanılmamaktadır. Aşağıda farz edilen örnek gerilme azaltma metotlarının daha rahat anlaşılmasını sağlayacaktır.

3.1.1. Kaynak Sonrası Mekanik Uzatma Modeli

2. Bölüm Şekil 2.8'de üç çubuk metoduyla kaynak işlemi anlatılmıştı. Yine bu anlatım modelini kullanarak kaynak sonrası mekanik uzatma yöntemi açıklanabilir. Faz dönüşümü göstermeyen malzemelerden imal edilen parçalarda seçilen kaynak yöntemine uygun olarak kaynağa yakın kısımlarda yüksek çekme gerilmelerinin olduğu (akma sınırına yakın) iyi bilenen bir olgudur. Buradan kaynağı simülasyon edebilmek için kendini dengeleyen, merkezdeki çubuğun σ_t yüksek çekme gerilmesine yandaki iki çubuğun ise $\sigma_c = \sigma_t / 2$ değerinde basma gerilmesine maruz kaldığı üç çubuklu sistem ele alınmıştır. Uzatma modelini oluşturmak amacıyla hariçten bir yük σ çekme gerilmesiyle üç çubuk sistemine uygulanmıştır. Bu durumda gerilme gelişimi hem merkez çubukta hem de yan çubuklarda şekilde gösterilmiştir. Başlangıç noktasından itibaren (1^C , 1^T ve 1 basma, çekme ve hariçten uygulanan yükü temsil etmektedir) uzama ile birlikte gerilmeler artmaktadır.

Eğer yapı yalnızca elastik bölgede kalacak şekilde uzatılırsa (2^C , 2^T ve 2 noktalarına kadar) yük kalktığında yapı tekrar ilk haline geri döner. Bu sebeple gerilme rahatlaması gerçekleştirmek istiyorsak yapıda plastik deformasyon meydana getirmek gereklidir.



Şekil 3.1: Mekanik doğrultmanın prensiplerini gösteren üç çubuk sistemi a) artık gerilme rahatlatması için çekme ve basma yüklemesi ve boşaltması (σ_c^* ve σ_i^* uygulanan metottan sonraki artık gerilmeler b) kaynak edilmiş durumdaki plaka c) üç çubuk sistemi [22].

Merkezdeki çubukta, çekme gerilmesi, akma sınırına ulaştıktan sonra, yapının kararlılığı merkez çubuğun akmasıyla birlikte deformasyon gerilmesinin artmamasından ötürü düşer. Bu sebeple ilave yük, gerilme eğrisi eğimini değiştirir

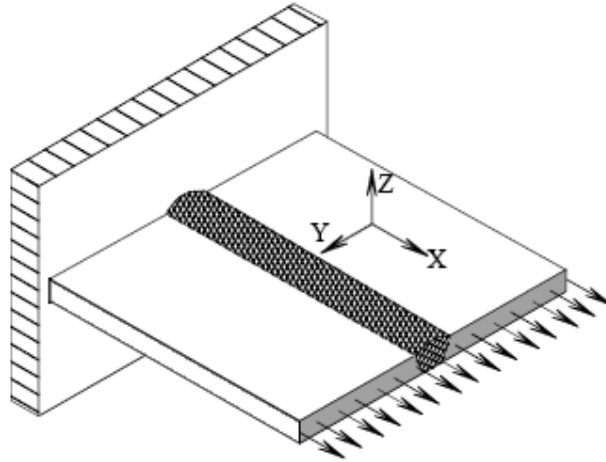
Eğer yapı 3^T , 3^C ve 3 ile gösterilen gerilme-uzama durumuna ulaştığında harici yükün kaldırılması ile gerilme sebepli yük kaybolur bu sırada yapıda bazı kalıcı uzamalar mevcuttur. Elastik deformasyonlu yan çubukların rahatlaması aynı eğriyi takiple 4^C noktasına yüklenir ve boşaltılır. Merkez çubukta önemli çekme gerilmesi rahatlaması elde edilir. Merkez çubuktaki artık gerilme 4^T noktası ile temsil edilir.

Sonuç olarak yapıda mevcut σ_c^* ve σ_i^* artık gerilmeleri başlangıç durumundan daha düşük değerlere sahiptirler.

Ele alınan modele göre her üç çubukta akma sınırına ulaştığında (şekilde Y ile gösterilen nokta) σ_c^* ve σ_t^* tamamen kaybolur.

3.1.2. Mekanik Uzatmanın Üç Boyutlu Modeli

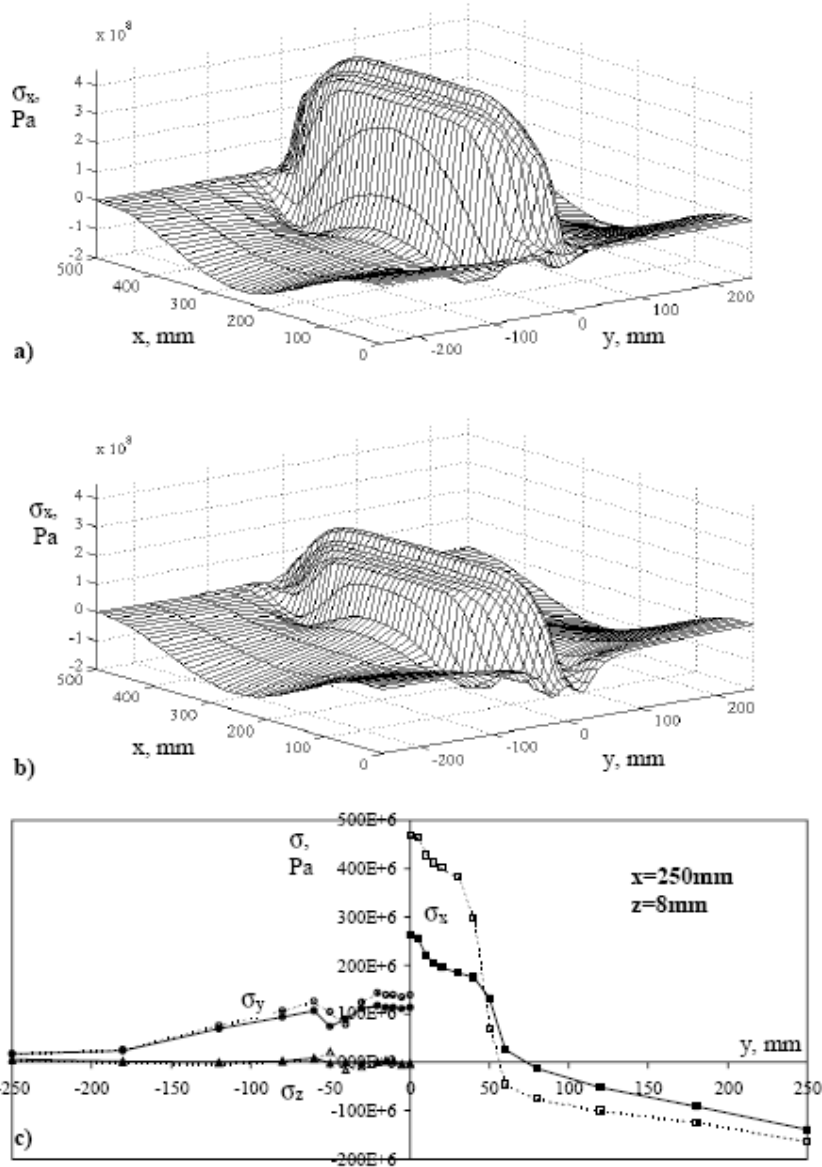
Şekil 3.2’de mekanik uzatmanın etkisi gösterilmiştir [22]. Bu sonuçlar, doğrusal olmayan statik gerilme/yer değiştirme analizi için, üç boyutlu mekanik modele dayandırılarak Pilipenko tarafından hesaplanmıştır [22]. Modelde plakanın köşesinden ($x=500\text{mm}$) kuvvet uygulanırken plaka köşesinden ($x=0\text{ mm}$) mengenenmiştir. 20 mm kalınlığında ve 500 mm genişliğindeki plakaya 2.10^6 N ($\sigma = 200\text{N.mm}^{-2}$) kuvvet uygulanmıştır. Bu durumun şeması Şekil 3.2’dedir. Şekil 3.3. a. ve b.’de $z=8\text{ mm}$ de boylamasına gerilme dağılımı aynı gerilme skalası için verilmiştir. Basit bir boylamasına uzatma işlemiyle (başlangıç $\sigma_x^{\max}$ ın % 45 i kadar)önemli oranda boylamasına artık gerilme rahatlamasına sebep olduğu grafikten görülmektedir. 1 boyutlu gerilme durumunda σ_x in tepe noktası $\sigma = 200\text{N.mm}^{-2}$ düşmelidir. Ancak karmaşık 3 boyulu gerilme durumunda azalma biraz daha fazladır ($\sigma_x^{\max} 209\text{ N.mm}^{-2}$)



Şekil 3.2: Mekanik uzatmanın şematik gösterimi [22].

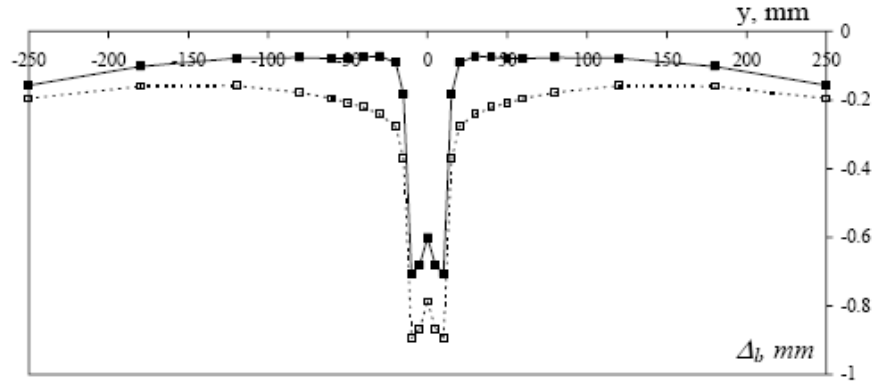
Şekil 3.3.b ve c’de mekanik uzatma σ_x boylamasına gerilmesini düşürdüğü gözlemlenmektedir. Başka bir ifade ile uygulama sonrası kaynak edilmiş hal ile karşılaştırıldığında gerilme dağılımı formu benzerlik gösterir. Başlıca farklılık ilave gerilme alanının kaynak başlangıcına ve sonuna yakın olmasıdır. Uzatma işleminden

sonra boyuna gerilme yaklaşık 10 kat fazla, σ_y gerilmesinin yaklaşık % 8 ne eşit ve basmada % 30 una eşittir (kaynağa dik köşeler boyunca $\sigma_x=0$ dır)



Şekil 3.3: mekanik uzatma etkisi a) kaynak edilmiş halde boylamasına artık gerilme σ_x dağılımı ($z=8$ mm) b) mekanik uzatma işleminden sonra boylamasına artık gerilme σ_x dağılımı ($z=8$ mm) c) her üç gerilme durumunda mekanik uzatmanın etkisi (kesik çizgiler kaynak edilmiş hali göstermektedir) [22].

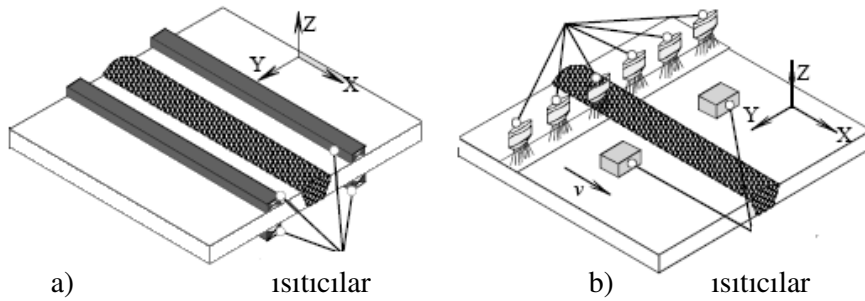
Mekanik uzatmanın sonucu olarak enine gerilme σ_y ve σ_x değeri düşürülmüş olur. Mekanik uzatmanın kalıcı deformasyonlar üzerinde de faydaları vardır. Bu etki Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Maksimum boylamasına çekme % 20 düşmüştür. Enine kaynak çekmesi ise önemli bir değişim göstermemiştir.



Şekil 3.4: Kaynak sonrası mekanik germe işleminin boylamasına kalıcı çekmelere etkisi (kesik çizgiler mekanik gerilmiş hali, düz çizgiler ise kaynak edilmiş hali göstermektedir) [22].

3.2. Isıl Gerilmesi Tekniği

Daha önce bahsedildiği gibi kaynak bölgesine yakın alanda, ilave plastik uzama yaratmakla artık gerilmeler azaltılabilir. Kaynak dikişinin uzatılması sadece mekanik olarak sağlanmayıp düşük sıcaklık alanları ile plastik deformasyona uğratmadan da yapılabilir. Bu prensibe dayalı ısı gerilmesi işlemi Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Isıl gerilmesi tekniğinin gösterimi [22].

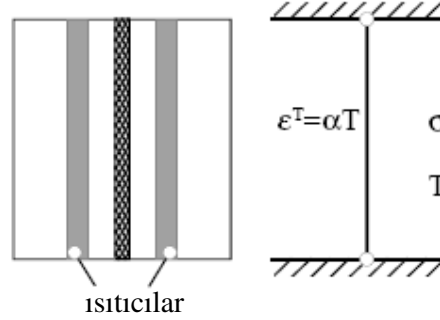
3.2.1. Isıl Yükün Seçimini Etkileyen Faktörler

Isıl gerilme işleminde birçok değişken vardır. Tasarım aşamasında bunlardan en önemlileri;

- Maksimum sıcaklık
- Isıtılan alanın genişliği

- Isıtma zamanı
- Kaynak dikişinden uzaklık

Isınma alanlarında yeni bir plastik deformasyon yaratmamak için ısıtma belirli bir değerde kalmalıdır. Bu seviye şekil de görüleceği üzere basitçe hesaplanabilir.



$$\epsilon^T = \alpha T \quad \sigma_Y / E = \alpha T \quad (3.1)$$

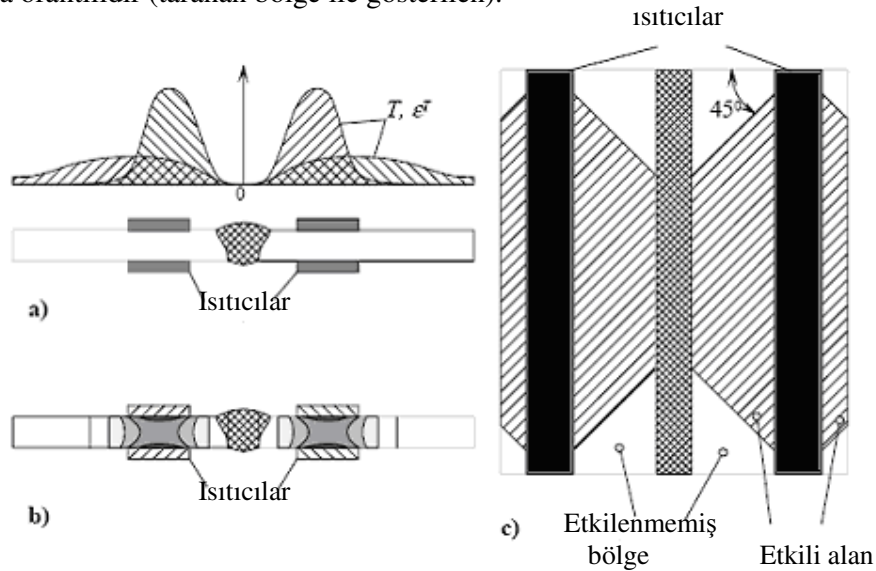
$$T_h^{\max} = \sigma_Y / \alpha E \quad (3.2)$$

Şekil 3.6: Maksimum ısıtma sıcaklığının hesaplanması

Plakayı basit tek boyutlu bir model olarak farz edersek maksimum ısıtma sıcaklığı çelikler için yaklaşık 170 °C dir.

Gerçek durumlar için plaka tamamen sabit değildir ve bazı ile elastik genleşmeler olabilmektedir. Buradan $T_h^{\max}$ bahsedilen basit modelden biraz daha fazla olabilir.

Isınma alanının genişliğinin etkisi, Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Daraltılmış ısı uygulaması, sınırlandırılmış ısı yükselmesi yaratır, tersine ise geniş ısınma, sıcaklık dağılımını genişletir. Isınma ile meydana gelen kuvvet, sıcaklık eğrisi altındaki alanla orantılıdır (taranan bölge ile gösterilen).



Şekil 3.7: ilave ısıtıcıların seçimini etkileyen ana faktörlerin gösterimi a) ısınan alanın genişliği b) ısınma zamanı c) kaynak dikişinden uzaklık [22].

İzin verilen sıcaklıktan daha geniş bir alanı ısıtmak uygulamanın etkisini önemli oranda arttırmakta olduğu sonucuna varılabilir. Ekonomik sebepler dolayısıyla her zaman geniş parçaların tüm yüzeyi ısıtılamamaktadır. Bu durumda ısıtıcıların genişliğini makul bir seviyede tutarak maksimum çekme gerilmesi kabul edilebilir seviyede tutabilir.

Isıtma zamanı ve ısıtmanın yoğunluğu sıcaklık dağılımını belirler. Kalınlık yönü boyunca, düşük sıcaklık gradyanıyla, sıcaklık alanı yaratmaya götürür (Şekil 3.7.b). Aynı zamanda eğer kalınlık boyunca düzgün bir sıcaklık dağılımı için zaman harcanırsa sıcaklık fazla yükselebilir ki, bu, yüksek çekme artık gerilmeleri bakımından istenmeyen bir durumdur.

Isı yoğunluğu ve ısıtma zamanı her bir durum için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Isıtıcıların tam yerini ayrı ayrı hesaplamak güçtür. Kaynak dikişi boyunca çekme gerilmesi olan bölgede sıcaklık yükselmesini önlemek için ısıtıcılar uzağa konur. Ancak bunun da olabilirliği sınırlayıcı bir faktördür. Bu faktör Saint-Venant prensibine dayanır (Şekil 3.7.c). Bu prensip yardımıyla genişletme alanı tespit edilir. Bu prensibe göre kaynaktan uzakta hareket eden ısıtıcılar uygulamanın etkisini azaltır.

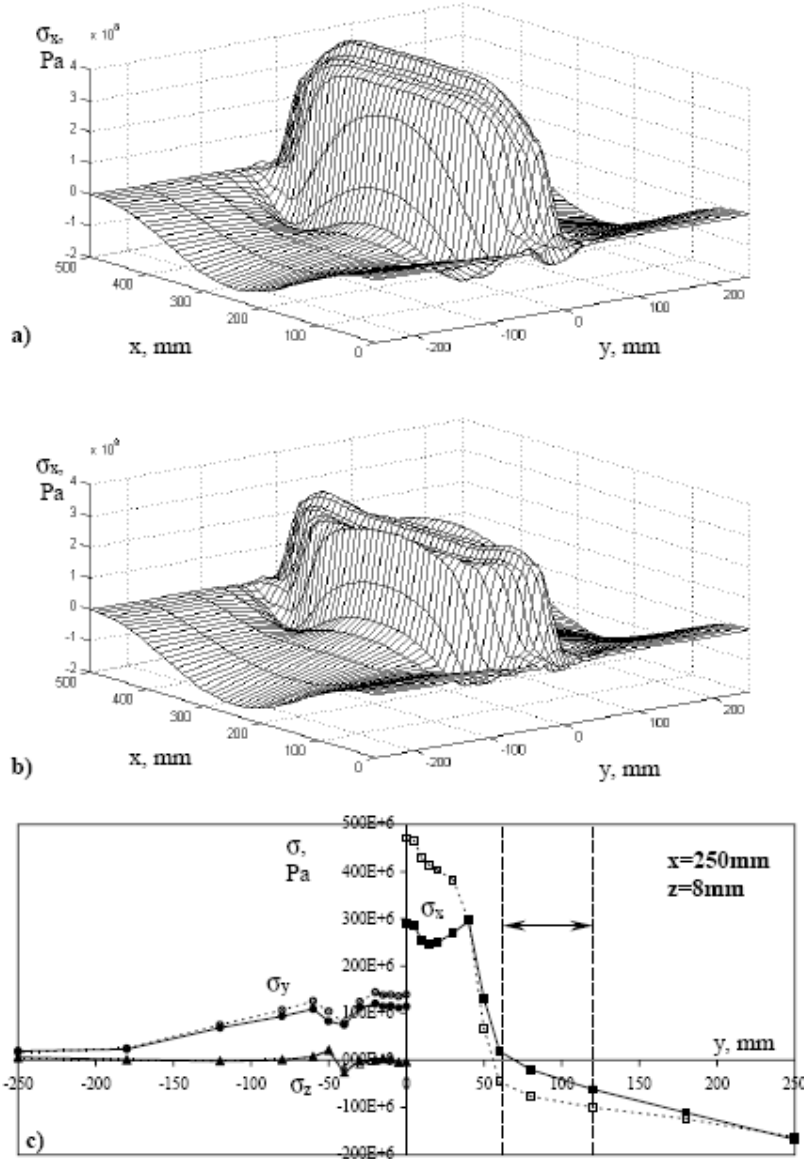
3.2.2 Hareket Eden ve Sabit Isı Kaynaklarının Yerleştirilmesi

Burada ısı gerilme tekniğine ilişkin, iki adet üç boyutlu termo-mekanik modeli oluşturulmuştur [22]. Şekil 3.5’de gösterilen iki ayrı tekniğin gösterilmesi amacıyla bahsedilen modeller kullanılmıştır.

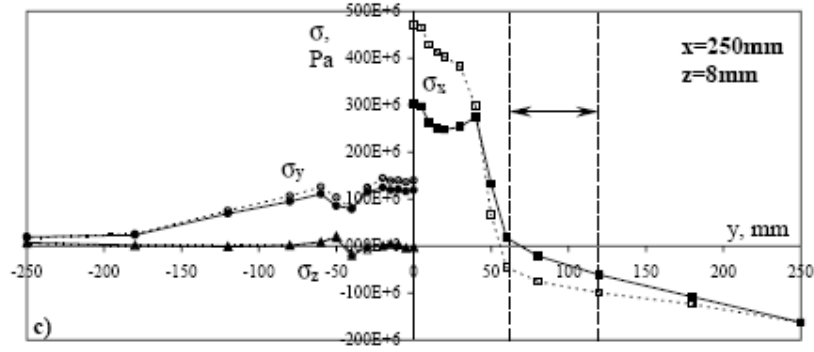
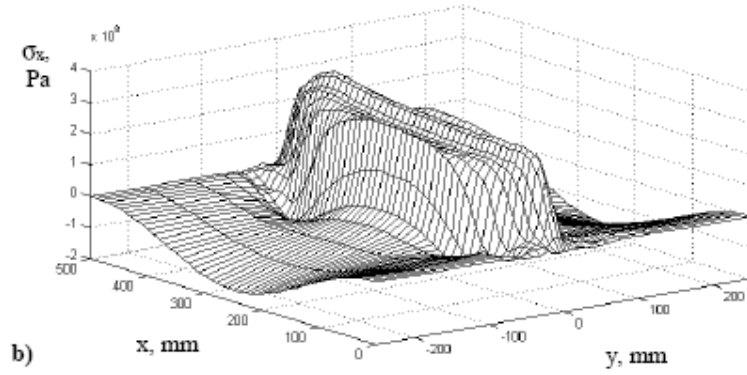
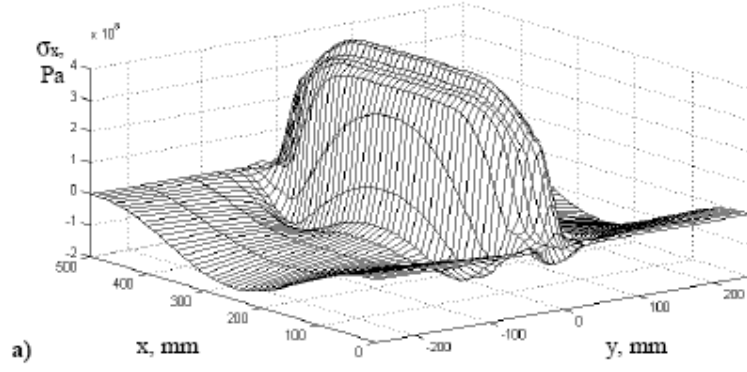
İlk modelde Şekil 3.5 a.’da gösterildiği gibi kaynak merkez çizgisinden 60 mm uzaklıkta ve 60 mm genişliğinde ısı kaynağı kullanılmıştır. Isı plakasının her iki tarafına da uygulanmıştır. Kullanılan maksimum sıcaklık 190⁰C dir. Elde edilen sonuçlar Pilipenko tarafından hesaplanarak Şekil 3.8’de sunulmuştur [22].

Grafiğin konkav tepesi uygulamadan sonraki σ_x boylamasına gerilmeyi (Şekil 3.8.c düz çizgi) temsil eder. Kaynağa yakın alanın uzaması yan alanlara basma gerilmesi oluşturur. Uzayan alanın akma sınırına ulaşması da sınırlandırılmıştır. Verilen örnek e bu alan kaynak boyunca 80 mm genişliğinde bant ile sınırlandırılmıştır. $y=40$ mm olan noktada σ_x değeri değişmeden kaldığını işaret eder.

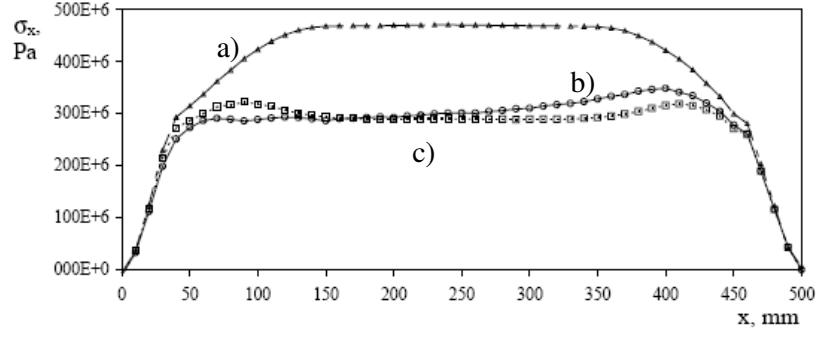
Kaynak merkez çizgisine yakın noktalarda boylamasına artık gerilme σ_x ısı uygulamasına göre azalır. Diğer bir ısı gerilme tekniği Şekil 3.5 b.'de gösterilmiştir. Modelde 60 x 60 mm iki adet ısı kaynağı merkezden 90 mm uzaklıkta kaynak hızında hareket etmişlerdir. Isı kaynakları plakanın her iki yanına da uygulanmıştır. Burada ayrıca ısı kaynaklarının 100 mm arkasından plaka yüzeyine su püskürtülerek soğutma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Pilipenko tarafından hesaplanarak Şekil 3.9'de sunulmuştur [22].



Şekil 3.8: ısı gerilme düzeltme etkisi a) kaynak edilmiş halde boylamasına artık gerilme σ_x dağılımı (z=8 mm) b) mekanik uzatma işleminden sonra boylamasına artık gerilme σ_x dağılımı (z=8 mm) c) her üç gerilme durumunda mekanik düzeltmenin etkisi (----- kaynak edilirken ve _____ ısı gerilmenden sonra) [22]



Şekil 3.9: ısıl gerilme düzeltme etkisi a) kaynak edilmiş halde boylamasına artık gerilme σ_x dağılımı ($z=8$ mm) b) mekanik uzatma işleminden sonra boylamasına artık gerilme σ_x dağılımı ($z=8$ mm) c) her üç gerilme durumunda mekanik düzeltmenin etkisi (----- kaynak edilirken ve _____ ısıl gerilmeden sonra) [22]



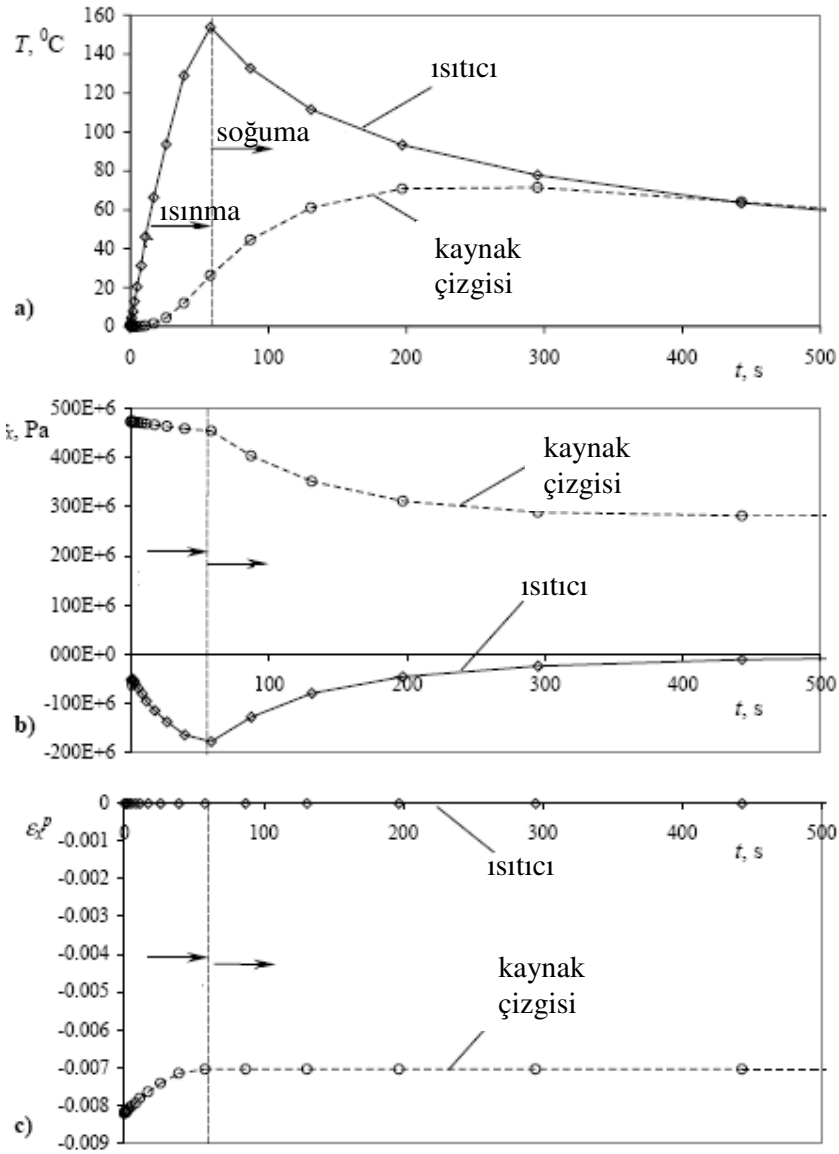
Şekil 3.10: Kaynak merkez çizgisi boyunca boyuna gerilme dağılımı a) normal kaynak edilmiş hali b) hareketli ısı kaynakları/soğutma suyu c) sabit ısı kaynağı [22]

Isıl gerilme tekniklerinden hareket eden ısı kaynağında elde edilen sonuçlar sabit olana benzerlikler göstermektedir. Aralarındaki başlıca fark hareket eden ısı kaynağında maksimum σ_x değerinin kaynak bitiğinde %20 daha fazla olmasıdır (Şekil 3.10).

3.2.3. Isıl Gerilme Mekanizması

Isıl gerilmenin mekanizması şekil 3.11’de gösterilmiştir. İki nokta ele alınmıştır. Bir tanesi kaynak dikişine yakın diğeri ise ısı kaynağının altıdır. Sıcaklık yükselmesinin gelişimi T, boyuna gerilme σ_x ve x yönündeki plastik uzama ϵ_x^p sabit ısıtma bantları için şekilde gösterilmiştir. Yükselen sıcaklıkla birlikte ısıtıcıların altındaki basma alanları ayrıca basmaya maruz kalırlar (plastik deformasyon olmadan)

Aynı zamanda kaynak merkezine yakın uzayan bölge üç boyutlu gerilme durumun değişikliği ile bir miktar rahatlar. Bu bölge ısıtma süresince plastik basmanın azalmasına maruz kalır [22].



Şekil 3.11: Isıl gerilmenin mekanizması. [22].

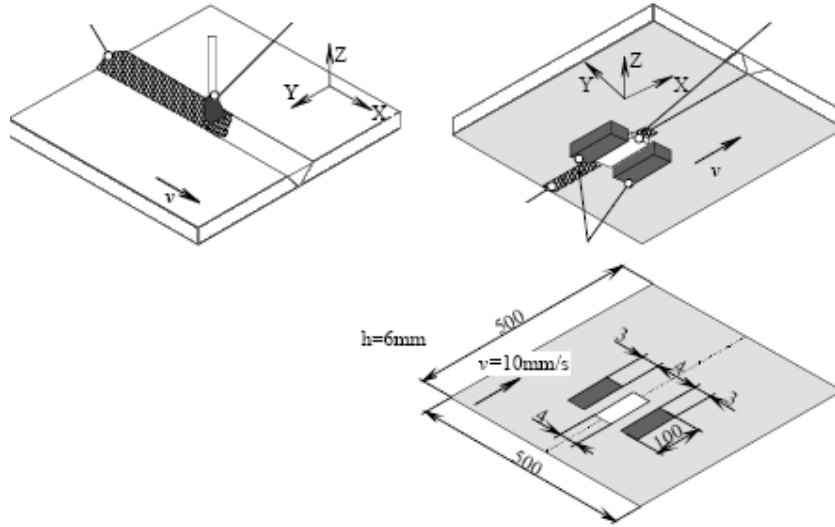
3.3. Açısal Çarpılmanın Düzeltilme Teknikleri

Açısal çarpılmanın düzeltilmesi amacıyla birkaç teknik önerilmiştir. Bu teknikler ondüle distorsiyon oluşumunun dikkatli bir analizine dayandırılmıştır.

Her şeyden önce açısal çarpılma gelişimi, sıcaklık gradyeninin kalınlık boyunca değişimine dayanır. Değişik enine çekme kuvvetleri üst ve alt yüzeylerde etkili olarak iş parçasının açısal değişime sebep olurlar.

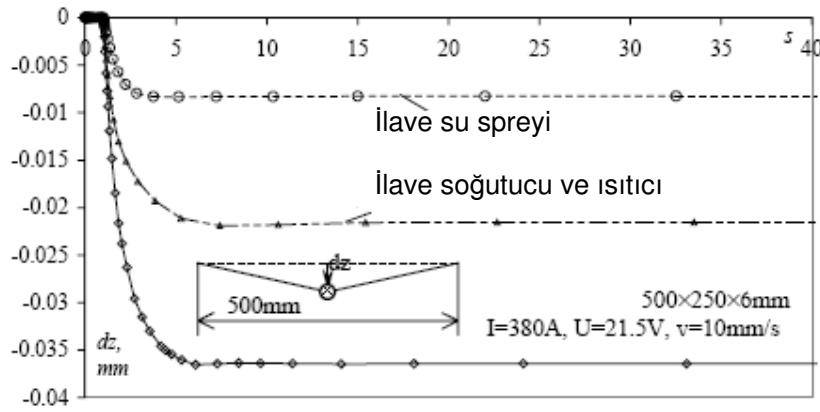
Açısal çarpılmayı azaltmak için kalınlık boyunca ısı dağılımının düzgünsüzlüğünün giderilmesine çalışılmalıdır. Bunu yapmanın bir yolu çift taraflı kaynak tekniği

kullanmaktır. Eğer tek taraflı kaynak yapılması gerekiyorsa şekilde gösterilen teknik kullanılabilir.



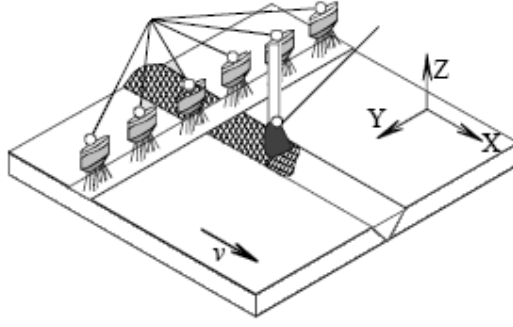
Şekil 3.12: açısız çarpılmayı önleyici teknik, kaynak altından hareketli ısı kaynakları ve soğutmanın uygulanması. [22].

Soğutulmuş ve ısıtılarak uygulanan (Şekil 3.12) bu tekniğin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar iki boyutlu sonlu elemanlar düzlem uzama modeli ile şekil 3.13’de sunulmuştur.



Şekil 3.13: Açısız çarpımda uygulanan tekniklerin etkisi. [22]

Uygulanan tekniğin verimi gayet belirgin olup 6 mm kalınlığındaki plaka için Şekil 3.13’de gösterilmiştir [22]. Kullanılan bu teknik ile $\%40$ lık bir açısız çarpılma iyileştirmesi elde edilmiştir.



Şekil 3.14: Açısal çarpılmanın önlenebilmesi için ısı kaynağının arkasına hareket eden su püskürtmesi ilave edilmesi [22].

Şekil 3.14’de gösterilen teknik te kalınlık boyunca sıcaklık eşitlenmesi prensibine dayanmaktadır. Ancak püskürtülen su direkt olarak ısı kaynağının arkasına uygulanması gerekir burada da kaynak banyosuna su gelmemesine dikkat etmek gerekir. Bu teknikte yaklaşık % 75 açısal çarpılma azaltılmıştır.

4. DONANMA GEMİLERİNDE KULLANILAN OSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK DİSTORSİYONLARI

Türk Deniz Kuvvetlerinin modernizasyonu kapsamında İstanbul Tersanesi /Pendik'te Alman Abeking&Rasmussen ve Lürssen firmalarının konsorsiyumu ile Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemileri inşa edilmektedir.

Aydın sınıfı mayın karşı tedbir gemileri inşasında karşılaşılan kaynak sonrası distorsiyonlar ve bunları düzeltme teknikleri bu bölümde incelenmiştir.



Şekil 4.1: Aydın Sınıfı mayın avlama gemisi

4.1. Mayın Karşı Tedbir Gemilerinin İnşasında Kullanılan Ana Malzemeler

Donanmaya sahip birçok ülke, Mayın Karşı Tedbir (MKT) gemisi tekne inşasında kullanılan, bakım/idamesi masraflı klasik ahşap malzemenin yerine geçecek yeni bir malzeme için araştırmalar yapmaktadırlar [38]. Bahse konu araştırmalarını, klasik ahşap malzemenin yerine modern, cam elyafıyla takviyeli plastik / GRP (Glass-Reinforced Plastic) ve manyetik olmayan çelik teknolojileri üzerinde yoğunlaştırmışlardır. Cam elyafıyla takviyeli plastik ve manyetik olmayan çeliklerin, manyetik yapıda olmaması, şoka karşı mukavim oluşu, yangına karşı hassas olmaması (ahşap malzemeye nazaran) ve bakım-onarım kolaylığı gibi avantajları

nedeniyle, MKT gemilerinin tekne inşasında son yıllarda ana malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır.

4.1.1. Cam Elyafıyla Takviyeli Plastik

Cam elyafıyla takviyeli plastik malzeme kullanılarak gemi inşa etmenin üç şekli mevcuttur. Bunlar mono blok, tek cidarlı gövde (Single Skin Framed) ve sandviç tip gemi inşasıdır [39].

Mono blok teknelerde, omurga ve gövdenin tek bir parça olarak inşası söz konusudur. Tekne, oldukça kalın cam elyafıyla takviyeli plastikle kaplanmış ve ana bölmeler arası, ilave parçalar ile takviye edilmiştir. Tekneler güçlü ve esnek bir yapıda olmalarının yanı sıra, oldukça ağır bir yapıya sahiptirler.

Tek cidarlı gövde, iskelet üzerine tek kaplama şeklinde yapılan inşadır. Bu tekne yapısında, hafif plastik kaplama üzerindeki eğimli alabandalara çapraz ve boyuna takviyeler konulmuştur.

Sandviç tipi inşa, İsveç tarafından geliştirilen çift cidarlı teknelere uygulanmış olup, yapılan şoka mukavemet testlerinden arzu edilen neticeler elde edilmiştir.

Cam elyafıyla takviyeli plastik tekne yapımı iklimlendirme kontrollü altyapı ve tesisler ile eğitilmiş personele ihtiyaç göstermesi açısından bu kaynakların hazır olmaması durumunda ilk yatırım maliyeti yüksek bir inşa yöntemi olabilmektedir.

4.1.2. Manyetik Olmayan Çelik

Uygulamaya geçiş için geniş çaplı yatırıma, altyapı ve tesise ihtiyaç gerektirmemesi, mukavemet dayanımı ve manyetik iz özelliklerinin iyi olmasından dolayı MKT gemileri ana tekne yapımında ve düşük manyetik özellikler istenen metal aksamın ham maddesi olarak, manyetik olmayan çelik günümüzde etkin olarak kullanılmaktadır.

1994-2002 yılları içerisinde hizmete giren mayın tarama/avlama gemileri dikkate alındığında çeşitli ülkelerin tekne malzemesi seçimine yönelik tercihleri Tablo 4.1’de listelenmiştir [39].

Tablo 4.1: Mayın avlama/tarama gemisine sahip ülkeler

ÜLKE	GRP	N.M.ÇELİK	AHŞAP	GEMİ SINIFI	ORİJİN
Avustralya	X			Huon	İtalyan, Gaeta
Danimarka	X			Flyvefisker	
Mısır	X			Mayın avlama	A.B.D.
Fransa	X			Eridan ve Altair	
İtalya	X			Gaeta	
Norveç	X FRP			Oksoy ve Alta	
Güney Kore	X			Yang Yang	
Pakistan	X			Tripartite	Fransız, Eridan
Singapur	X			Landsort	İsveç
Suudi Arabistan	X			Sandown	İngiliz, Sandown
İspanya	X			Segara	İngiliz, Sandown
Tayland	X			Gaete	İtalyan, Gaeta
İsveç	X			Styrsö	
İngiltere	X			Sandown	
A.B.D.	X			Osprey	İtalyan, Gaeta
Kanada		X		Kingston	
Almanya		X		Frankenthal	
Türkiye		X		Aydın	Alman, Frankenthal
Bangladeş		X		Sagar	Çin, T43
Japonya			X	Uwajima ve Sugashima	

4.2. Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Ostenitik krom nikelli paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerini etkileyen fiziksel özelliklerinin yanında, metalürjik etkenler de bu tür çeliklerin kaynağında önemlidir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında delta ferrit fazının oluşumu, taneler arası korozyona hassasiyet, gerilmeli korozyona hassasiyet ve sigma fazının oluşması istenmez.

Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı esnasında eriyen bölge çok kısa bir zamanda katılaşp hızla soğuduğundan ve elektrot olarak kullanılan alaşımların karbon içeriği de düşük olduğundan, kaynak metali için karbür çökeltme tehlikesi yoktur. Ancak ısıнын tesiri altında kalan bölge (ITAB) kaynak süresi boyunca 500-900 °C sıcaklık aralığında tavlı olarak kalmakta ve karbon içeriğinin yüksek olması halinde ostenit tane sınırlarında karbür çökeltmesi meydana gelmektedir. Sıcaklık ve çeliğin karbon içeriğine göre en kısa sürede çökeltmenin başladığı sıcaklığa kritik sıcaklık denmektedir (Tablo 4.2).

Tablo. 4.2: Sıcaklık ve çeliğin karbon içeriğine göre en kısa sürede çökelmenin başladığı kritik sıcaklık [2].

Karbon içeriği (%)	Kuluçka periyodu (dakika)	Kritik Sıcaklık (C)
0,03	11	650
0,05	7	650
0,06	2,5	670
0,08	0,3	750

Taneler arası korozyonu önlemek amacıyla uygulanan diğer bir yöntem ise karbonun kroma karşı ilgisinden daha yüksek bir ilgiye sahip bir elementin çeliğin bileşimine katılmasıdır. Bu elementler titanyum, niyobyum ve tantalyumdur.

% 9 dan daha az nikel içeren ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak bölgesinde sigma fazının oluşması da bu tür çeliklerde kaynak kabiliyetini olumsuz etkileyen başka bir olgudur.

4.2.1. Aydın Sınıfı Mayın avlama gemilerinde Ostenitik Paslanmaz Çeliğin Kullanımı

Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin inşasında manyetik olmayan ostenitik paslanmaz çelikler kullanılmaktadır. Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin, genel olarak dünya bahriyesindeki mayın karşı tedbir gemilerinden farkı, bu sınıf gemi inşasında kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerdir. Hali hazırda bu çeliği, Alman, İtalyan ve Kanada donanmaları kullanılmaktadırlar. Anılan çeliğin, mayın avlama gemilerindeki kullanım amacı, manyetik olmamaları, deniz suyu korozyonuna dayanımlı olmaları ve yüksek mukavemete sahip olmalarıdır.

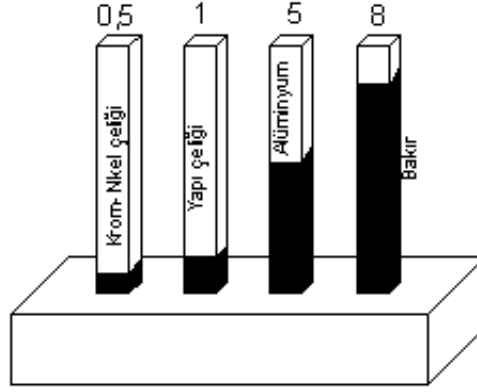
Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerin (EN DIN 1.3964) içyapısı incelendiğinde (Tablo 4.3) içerdiği elementler bakımından ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında söz konusu olan olumsuzluların meydana gelmeyeceği görülmektedir.

Tablo 4.3: X2CrNiMnMoNNb21-16-5-3 çeliğinin kimyasal bileşimi

(%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Nb
Min	-	-	3,0	-	-	18,0	2,7	15,0	0,20	-
Max	0,03	1,0	6,0	0,025	0,015	21,0	3,7	18,0	0,35	0,25

4.2.2 Aydın Sınıfı Mayın Avlama Gemilerinde karşılaşılan Kaynak Distorsiyonları

Aydın sınıfı mayın avlama gemilerinde kullanılan ostenitik paslanmaz çelik sahip olduğu özellik gereği, yapı çeliklerine nazaran ısı iletimi düşük buna karşın ısı genleşmesi yüksek bir çeliktir (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3).



Şekil 4.2: çeşitli metallerin ısı iletkenlik oranları



Şekil 4.3: çeşitli metallerin ısı genleşme oranları

Bu sebepten dolayı kaynak sonrası distorsiyonları yapı çeliklerine nazaran daha fazla olmaktadır. İstanbul Tersanesi/Pendik'te inşa edilen yapı çeliğinden mamul hücumbotlarda kaynak sonrası meydana gelen distorsiyonların düzeltilmesi için tüm kaynaklı imallerin içerisinde % 15 lik bir dilim mevcut iken (Tablo A.1) bu oran ostenitik paslanmaz çelikten imal edilen aydın sınıfı mayın avlama gemilerinde % 35 tir (Tablo A.2).

Aydın sınıfı mayın avlama gemilerinde diğer gemi sanayinde olduğu gibi ince sacların kullanımı yoğunluktadır.



enine çekme



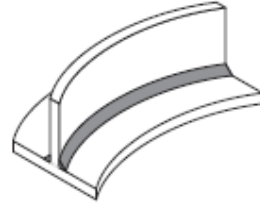
açısal çarpılma



Boylamasına çekme



ondüle distorsiyon



bel verme

Şekil 4.4: Sıkça karşılaşılan çeşitli kaynak distorsiyonları



Şekil 4.5: Kaynak sonrası distorsiyona uğramış parça



Şekil 4.6: Kaynak sonrası distorsiyona uğramış parça

4.2.3 Kaynak Distorsiyonlarını Düzeltme İşlemi

Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin inşasında, kaynak sonrası meydana gelen distorsiyonlar gerek ilk geminin inşa edildiği Alman tersanelerinde, gerekse İstanbul tersanesinde oksî-asetilen alevi kullanılarak düzeltilmektedir.

Meydana gelen kaynak distorsiyonlar, oksî-asetilen aleviyle, bu işlemde tecrübe kazanmış personelce kullanılarak düzeltilmektedir. Ancak ostenitik paslanmaz çeliklerin ısıl genleşmelerinin yüksek buna karşın ısı iletimlerinin düşük olması, kaynak sonrası meydana gelen deformasyon oranının, diğer çeliklere göre daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu durum da, distorsiyon düzeltme işlemine harcanan zaman, iş gücü ve malzemeyi arttırmaktadır.

Şekil 4.7’de distorsiyona uğramış bir parçanın iki işçi ile önce oksî-asetilen aleviyle ısıtılıp ardından su ile soğutularak yapılan düzeltme işlemi görülmektedir.



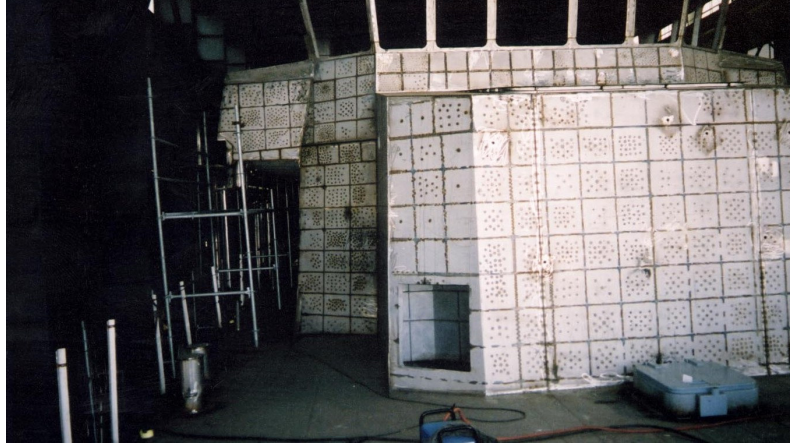
Şekil 4.7: Alevle düzeltme işlemi



Şekil 4.8: Alevle düzeltme işlemi

Şekil 4.8’de distorsiyona uğramış parçanın kaynak edildiği bölgenin arkasından alevle düzeltme işleminin tatbik edildiği görülmektedir.

Distorsiyona neden olan artık gerilmeleri parçadan uzaklaştırmak amacıyla nokta alev düzeltmesi uygulanmış köprü üstüne ait resimler Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.9: Alevle düzeltme işlemi yapılmış köprü üstü görünümü



Şekil 4.10: Alevle düzeltme işlemi yapılmış köprü üstü görünümü

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

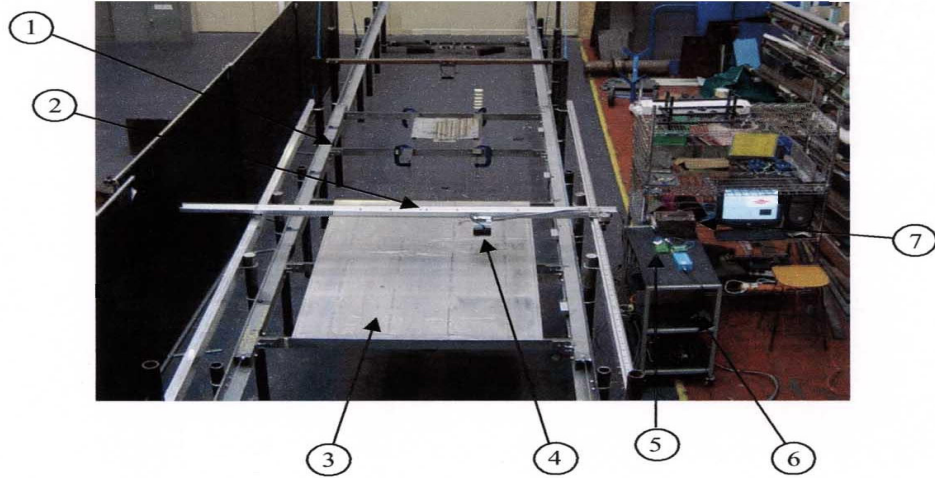
Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinde kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerin (EN DIN 1.3964) koruyucu gaz altında, T bağlantısı şeklindeki çift taraflı kaynakları sonrası meydana gelen distorsiyonların incelenmesi, İskoçya Strathclyde Üniversitesi Makine mühendisliği Bölümü’nde çeşitli kaynak araştırmaları yapmak üzere kurulan deney laboratuvarı’nda yapılmıştır.

5.1 Deneyde Kullanılan Ölçme Sistemi

Ostenitik paslanmaz çelikten mamul plakaların koruyucu gaz altında T şeklindeki kaynaklarında meydana gelen distorsiyonlarının incelenmesi amacıyla, plakaların kaynak öncesi ve sonrası boyutsal ölçümleri, kaynak esnasında sıcaklık ölçümleri ve ısı dağılımları bu amaç için kurulmuş kaynak tezgâhında gerçekleştirilmiştir.

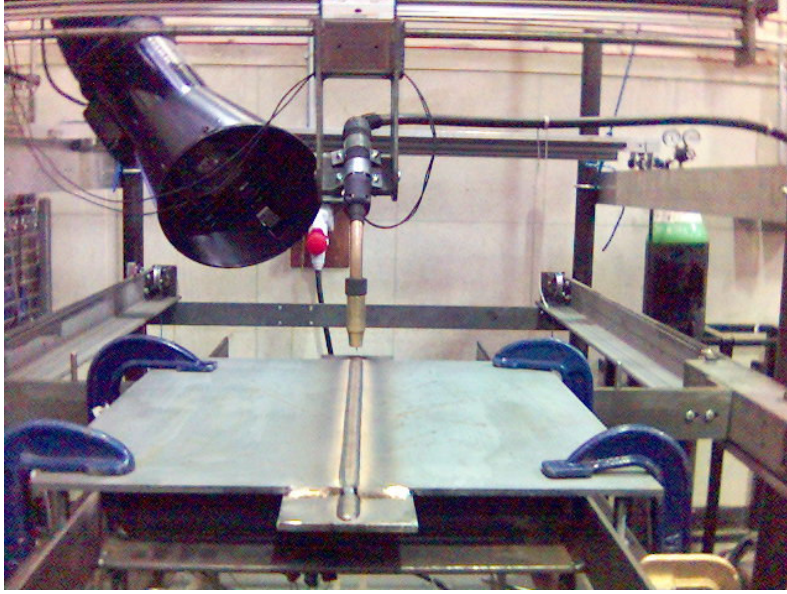
5.1.1 Kaynak Tezgâhı

Deneyde kullanılan kaynak tezgâhı ve bileşenleri Şekil 5.1 de gösterilmiştir.

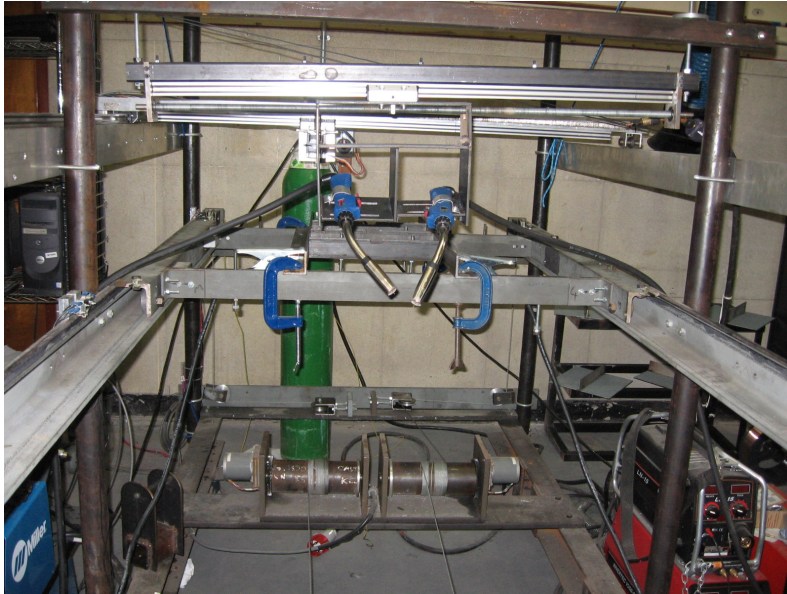


Şekil 5.1: Deneyde kullanılan kaynak tezgâhı; 1) Lazer cihazının hareket etmesini sağlayan çerçeve 2) Lazer cihazının hareket mekanizması 3) Deney plakası 4) Lazer cihazı 5) Adım motoru kumanda panosu 6) Lazer cihazı güç kaynağı 7) Bilgisayar donanımı

Deneyde kullanılan kaynak tezgâhında, yapımından itibaren, alın kaynağı birleştirilmeleri ile ilgili deneyler yapıldığından (Şekil 5.2), bahse konu tezgâhta, T şeklindeki çift taraflı kaynakların yapılabilmesi için tadilat yapılmıştır (Şekil 5.3).



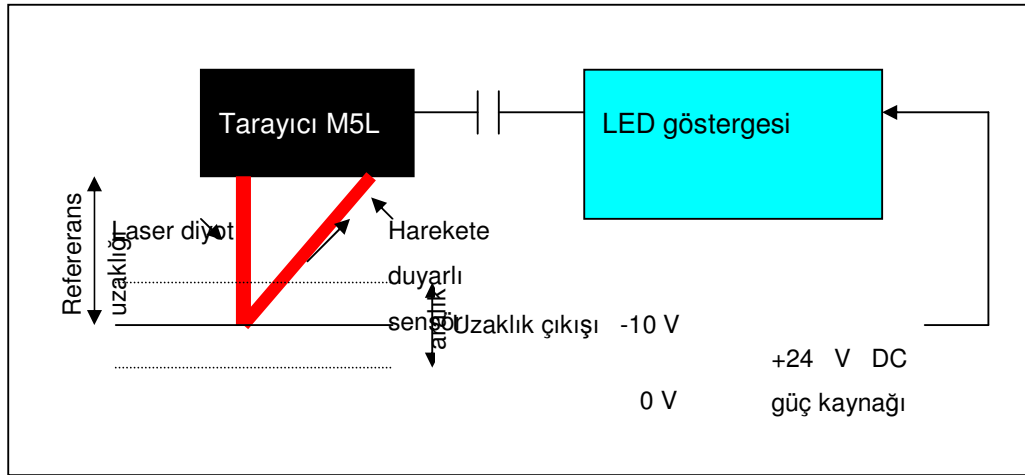
Şekil 5.2: Kaynak Tezgâhında yapılan alın kaynağıyla ilgili deneylerden bir görünüm



Şekil 5.3: Kaynak tezgâhının çift taraflı kaynak yapabilecek şekilde tadilat yapılmış durumu

5.1.2 Optik Uzaklık Sensörü (Lazer)

Deneyde kullanılan plakaların kaynak işlemi öncesi ve kaynak işlemi sonrası boyutsal ölçümlerini gerçekleştirmek amacıyla optik uzaklık sensörü kullanılmıştır. Optik uzaklık sensörü, bir lazer diyot ve pozisyona (harekete) duyarlı cihazdan oluşmaktadır. Ölçülen uzaklık sinyali, uzaklığa (mm) oranlı voltaj (V) olarak görülmekte olup sıfırlama (referans noktası), ölçme aralığının ortasından yapılmaktadır. Bu sistemde uzak cisimler bir pozitif voltaja (+10 VDC ye kadar) yakın cisimler ise bir negatif voltaja (-10 VDC ye kadar) düşmektedir (Şekil 5.4).



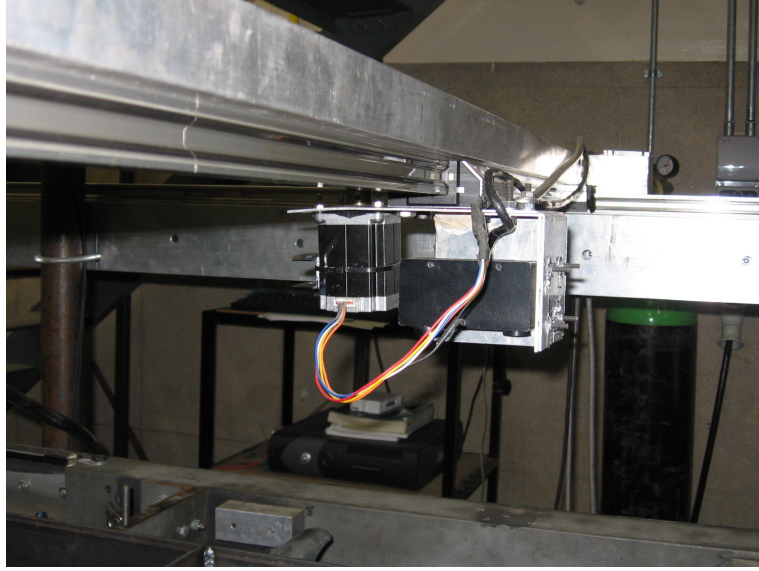
Şekil 5.4: Lazer ölçme sisteminin şematik gösterimi

Burada çıkış, 0 dan 10 VDC aralığında yansıtılan ışığın yoğunluğu temsil eder. 1 VDC nin altında, sensör, limitlerinde çalışır ve hata verebilir. Mekanik sistemlerin tersine lazer uzaklık sensörü histerisiz ya da tekrar eden hatalara sahip değildir. Cihazın doğruluğu, gürültü, doğrusallık ya da yüzey kalitesine bağlıdır.

Alıcı element, ölçülen uzaklığın, doğrusal bir çıkışını vermeyen, harekete duyarlı bir sensördür. Doğrusallık, elektronikte uygulanan ve yüzey yansımalarının değişik faktörleri ile ölçülen uzaklığa orantılı, çıkış voltajının gönderilmesini içerir. Bahse konu çıkış voltajı deney laboratuvarında kullanılan programda (Labview) uzaklığa dönüştürülür.

Uzaklık ölçümü, üçgen açıları prensibine göre gerçekleşir. Analog çıkış, referans uzaklıktan sapmanın doğrusal voltaj şeklidir ve +/- 10 VDC aralığına sahiptir. Sensör, sürekli olmayan ışığı yayan ve böylelikle ortam ışığından bağımsız olan bir sinyaldir. Yayılarak yansıyan ışık noktası, harekete duyarlı sensör (HDS) e lensler

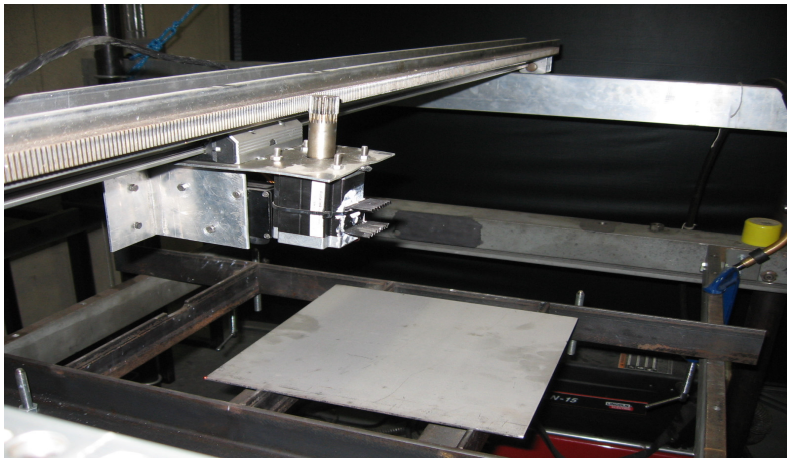
vasıtasıyla ulaşır. Işığın yoğunluğu yüzeyin yansımaya faktörüne göre otomatik olarak ayarlanır, eğer yansıyan ışığın yoğunluğu çok düşükse LED göstergesinden bu durum anlaşılır.



Şekil 5.5: Ölçme sisteminde kullanılan lazer cihazı ve hareket mekanizması

5.1.3. Adım motoru

Ölçme sisteminde kullanılan lazer cihazı, kramayer dişli üzerinde hareket eden, pinyon dişliye sahip bir motor (adım motoru) tarafından tahrik edilmektedir (Şekil 5.6). Adım motorunun kullanılmasındaki amaç dijital olarak kontrol edilebilmesidir. Böylelikle motorun dönüş sayısı hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir. Bu durum ölçümlerin istenilen noktada yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

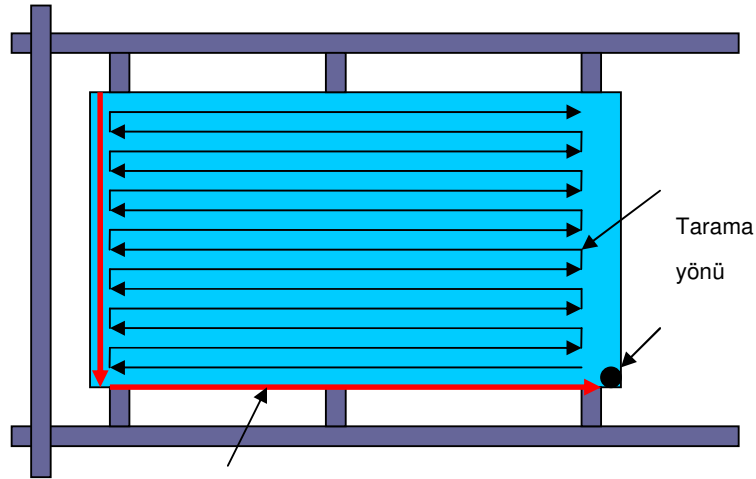


Şekil 5.6: Deneyde Kullanılan adım motoru

Adım motoru pinyonunun dönme hızı, giriş sinyalleri frekansı ile kontrol edilir. Adım motoru dijital çıkış sinyalleri üreten bir bilgisayar programı vasıtasıyla (Labview) bilgisayar üzerinden kontrol edilmektedir.

5.1.4 Tarama Mekanizması

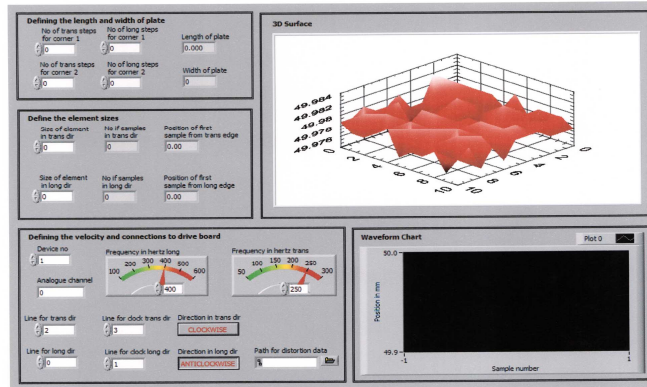
Kaynak tezgâhının üzerine monte edilen lazer cihazı, distorsiyon ölçümü yapılacak plaka yüzeyini Şekil 5.7’de gösterildiği gibi önceden belirlenen bir güzergâh paralelinde tarar.



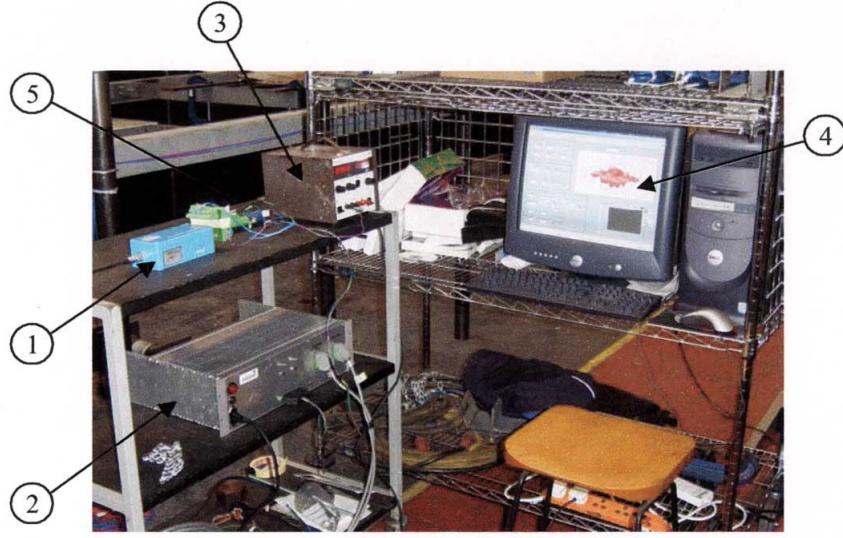
Şekil 5.7: Kaynak tezgahında boyut ölçümünün şematik gösterimi

5.1.5 Ölçme Sisteminde Kullanılan Bilgisayar Donanımı

Ölçme sisteminde Labview 6.0 isimli program ile (Şekil 5.8). adım motorunun kontrolü ve lazer cihazından bilgi okunması gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.9)



Şekil 5.8: Deneyde kullanılan bilgisayar programı ekranından görünüm



Şekil 5.9 : Bilgisayar Donanımı; 1) Lazer cihazının LED göstergeleri 2) Adım motoru kumanda panosu 3) Lazer güç ünitesi 4) Ölçme sisteminde kullanılan Bilgisayar 5) Bilgi transfer kartı

5.1.6 Termal Kamera

Deney esnasında kaynak sıcaklığının ve ilave ısı kaynağının sıcaklık dağılımlarının incelenmesi termal kamera (ThermaCam SC500 FLIR systems) ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.10). Termal grafiğin çalışma prensibi, grafiği istenen parçadan infrared emisyonunun yakalanması yoluylaadır. Termal kamera 3 ila 12 μm aralığındaki dalga boyunda infrared radyasyonunu yakalamaktadır.

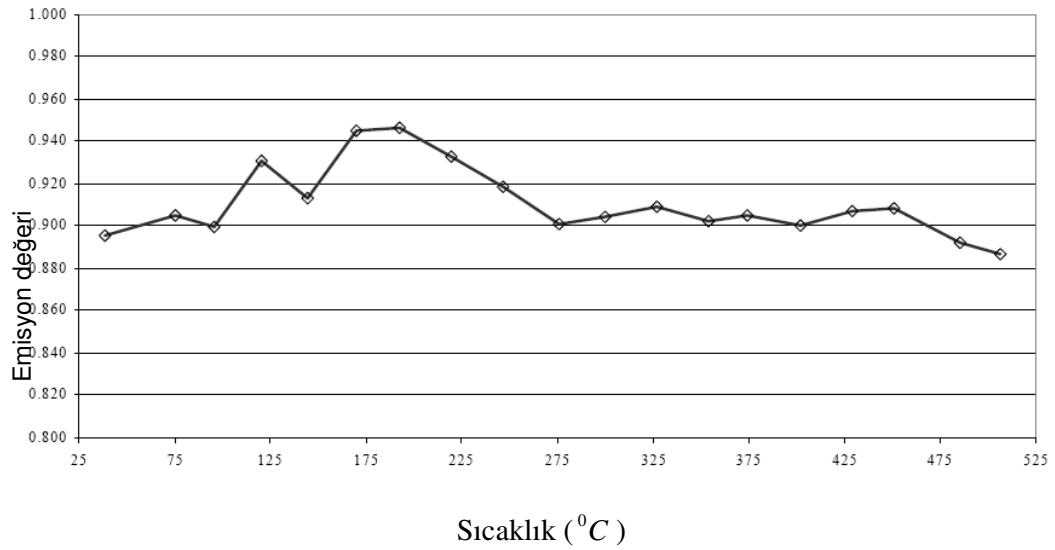


Şekil 5.10: Deneyde kullanılan termal kamera

Termal kameradan doğru bilgilerin alınması malzemenin emisyonuna bu da büyük oranda malzemenin yüzey durumuna bağlıdır. Bu sebeplerden dolayı deney parçaları raspanmış ve çinko silikat içerikli gri mat boya ile boyanmıştır (Şekil 5.11) (grey Interplate 937 Nippe Cermao – Çinko silikat). Bunun dışında emisyon sıcaklığının da bir fonksiyonudur (Şekil 5.12), özellikle yüksek sıcaklıklarda ($>500^{\circ}\text{C}$) doğruluktan sapmalar olabilmektedir [39]. Kaynak işleminde distorsiyon incelendiğinden bu durum bir olumsuzluk yaratmamaktadır.



Şekil 5.11:Deneyde kullanılacak malzemelerin termal kamera için boyanması

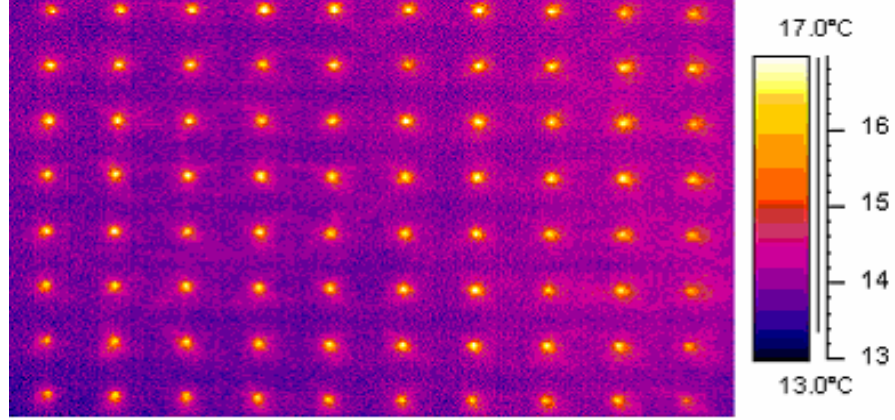


Şekil 5.12: Çinko silikat kaplı plakanın yüzey emisyonunu gösteren diyagram

5.1.6.1 Termal Kamera Kalibrasyonu

Termal kameranın görüntü kalibrasyonu için, 100 adet 5 voltluk LED ışık 70 mm aralıklı olacak Şekil 5.13’de gösterildiği gibi bir çerçeve içine yerleştirilmiştir.

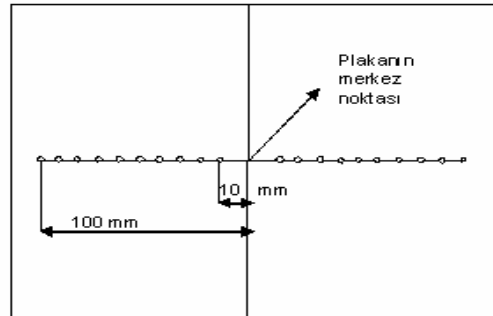
Bahse konu düzenek termal kameranın lensinden kaynaklanabilecek olası hataların düzeltilmesine olanak sağlamaktadır.



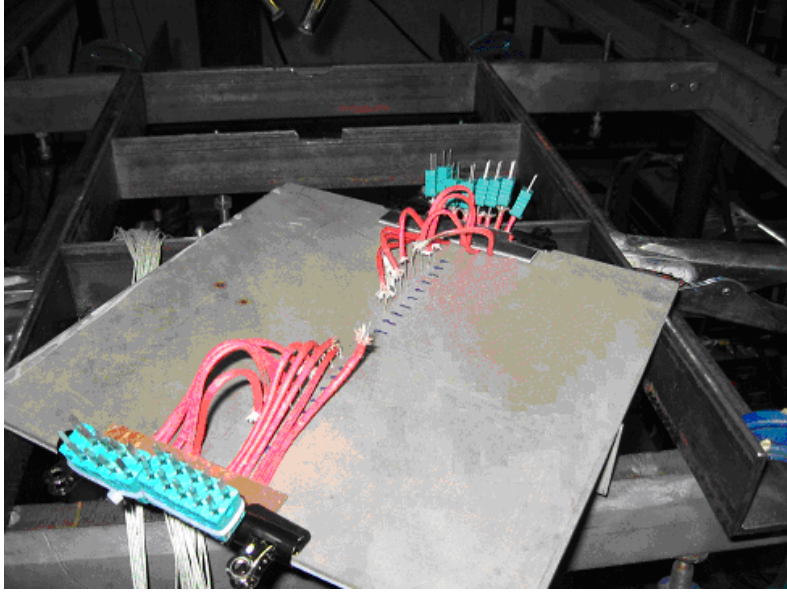
Şekil 5.13: Termal kameranın kalibrasyonu için kullanılan düzeneğin termal resmi

5.1.7 Termokupul

Kaynak esnasında plaka üzerinde belirli noktalarındaki sıcaklık dağılımının ölçülebilmesi amacıyla 20 adet termokupul kullanılmıştır. termokupulların montajı amacıyla Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de gösterildiği gibi her bir deney parçasının belirlenen noktalarına, 2 mm derinliğinde ve 1 mm çapında delikler açılmıştır. Kaynak işlemi esnasında termokupullardan okunan değerler zamanın bir fonksiyonu olarak Labview adlı bilgisayar programı vasıtasıyla bilgisayara kaydedilmiştir.



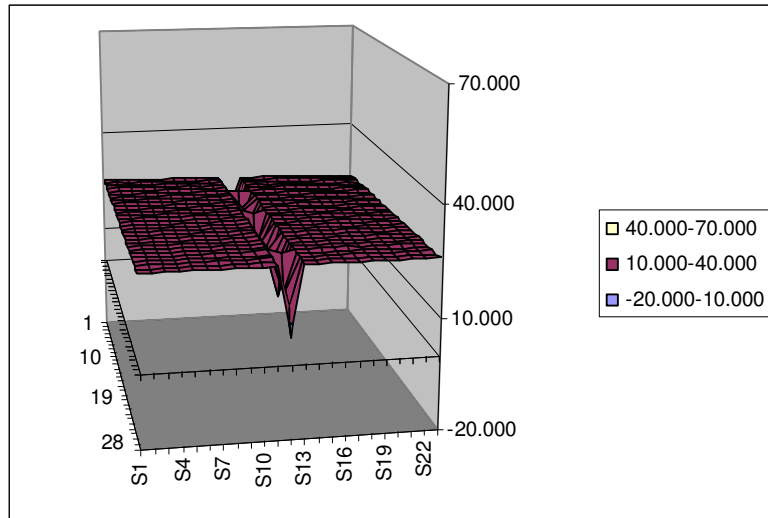
Şekil 5.14: Termokupulların plakanın alt kısmına yerleşim planı



Şekil 5.15: Kaynak esnasında sıcaklık ölçümü için termokupulların montesi

5.2 Deney Parçasının Boyut Ölçümü

Her bir deney parçası kaynak işlemi öncesinde ve kaynak işlemi sonrasında lazer cihazı kullanılarak boyutsal ölçüme tabi tutulmuş, böylelikle kaynak işleminin meydana getirdiği distorsiyon sayısal olarak gösterilmiştir (Şekil 5.16). Bu işlem için deney parçası 4 nokta üzerine oturtularak (ucu sivriltilmiş saplama) sıfır ayarları lazer cihazının hassas boyutsal toleransı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.16: Kaynak işlemi öncesi bir deney parçasının boyutsal ölçümü

Sıfır ayarları yapılan deney parçalarının tüm yüzeyi, lazer cihazıyla taranmış ve veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Kaynak öncesi yapılan tüm bu işlemler kaynak sonrası da tekrarlanarak kaynak işleminin neden olduğu deformasyonlar kaydedilmiştir.

5.3 İlave Isı Girdisi

Aydın sınıfı mayın avlama gemilerinin inşasında kaynak sonrası meydana gelen deformasyonların düzeltilmesi amacıyla alevle düzeltme işlemi uygulanmaktadır. Burada kullanılan alev, oksî-asetilen alevi olduğundan, deney şartlarında da oksî-asetilen alevi kullanılmıştır.

3. Bölüm 3.1 ve 3.2 numaralı denklemler kullanılarak basit olarak plastik deformasyon yaratmadan iç gerilmeleri azaltmak için gerekli sıcaklık hesaplanabilir. Bu şekilde;

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot (T_{\max} - T_{\text{ortam}}) \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$$

$$T_{\max} = \sigma_{akma} / \alpha \cdot E + T_{\text{ortam}}$$

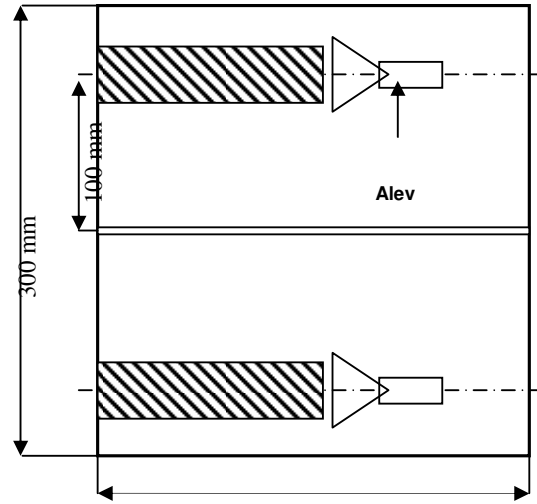
$T \approx 170^{\circ}\text{C}$ elde edilir.

$$\sigma_y = 430 \text{ N/mm}^2, \alpha = 14,7 \cdot 10^{-6} \text{ m/(m.K)}, E = 195 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$$

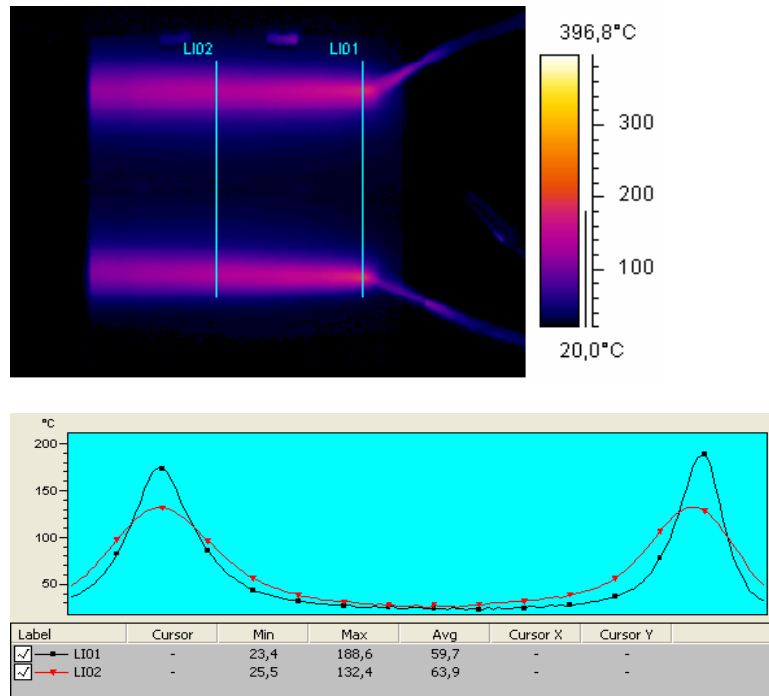
İlave ısı girdisi olarak, oksî-asetilen alevi kullanıldığından, deney parçasında maksimum 170°C lik sıcaklığa ulaşabilmek için gerekli gaz sıcaklığı ve parçanın yüzey sıcaklığı termal kamera ile parçanın ısısı ise, deney parçalarının altına yerleştirilen 20 adet termokupul vasıtasıyla kontrol edilmiştir. İlave ısı girdisinin deney parçası üzerindeki uygulama yeri Şekil 5.17’de verilmiştir.

Kullanılan oksî-asetilen alevinin verdiği sıcaklık ve ısı dağılımı kaynak işlemi yapılmadan önce test edilerek ayarlanmıştır (Şekil 5.18). Test işleminde termal kamera ve termokupullar kullanılarak gerekli düzeltmeler yapılmıştır.

Deney parçasında, ilave ısı girdisinin uygulama yerinin belirlenmesi, gerek parçanın gerçek boyutlarından küçük olması, gerekse deneysel ortamın sağladığı tekrar etme kolaylıklarından ötürü teorik olarak hesaplanmamıştır.



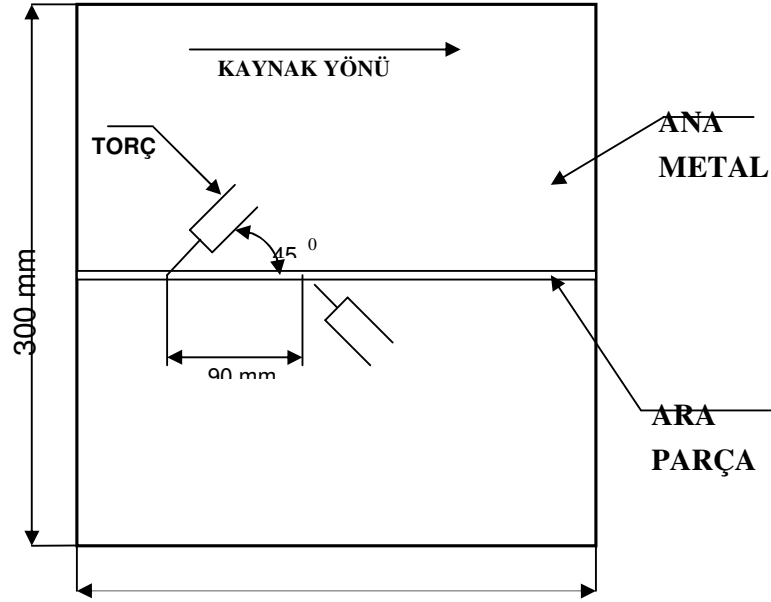
Şekil 5.17: Deney parçasına ilave ısı girdisi uygulamasının şematik gösterimi



Şekil 5.18: Deneyde kullanılan ilave ısı girdisinin test ölçümleri

5.4 Deney Şartları

Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemilerinin inşasında kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerin (EN DIN 1.3964) kaynak distorsiyonlarını incelemek üzere 300 x 300 mm ebatlarında ve 3 mm kalınlığında plaka ve T kaynağı yapabilmek için 300 x 50 mm ebatlarında ve 3 mm kalınlığında destek parçası kullanılmıştır (Şekil 5.19).



Şekil 5.19: Deney parçasının şematik gösterimi

İlave kaynak metali olarak 1 mm çapında ostenitik paslanmaz çelik (EN DIN 1.3954) ve gazaltı kaynağında koruyucu gaz olarak %92 Argon+%8 O₂ karışımına sahip gaz kullanılmıştır. Ara parça ana parçaya çift taraflı kaynak edilmiştir.

Ana plaka üzerine ara parça punta kaynağı ile tutturulmuştur. Boyut ölçümleri kaynak öncesinde ara parçalı olarak yapılmıştır.

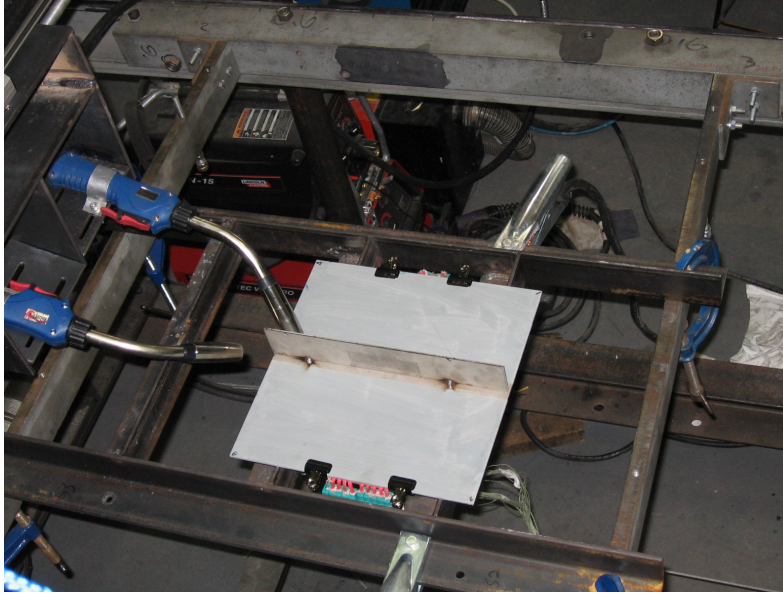
Her bir deney parçasının hangi şart ve koşullarda kaynak edildiği Tablo 5.1 de verilmiştir.

Tablo 5.1: Kaynak Şartları

DENEY NO	BOYUT (mm)	VOLTAJ (V)	AMPER (A)	İLERLEME HIZI (mm/s)	TEL İLERLEME HIZI (mm/s)	İLAVE ISI GİRDİSİ (°C)	HAREKET KISITLAMASI
1	300x300x3	23.5	186	10	231	Yok	Yok
2	300x300x3	23.5	186	10	231	Yok	Var
3	300x300x3	23.5	186	10	231	Var (160 °C)	Var
4	300x300x3	23.5	186	10	231	Var (160 °C)	Yok
5	300x300x3	23.5	186	10	231	Var (140 °C)	Var
6	300x300x3	23.5	186	10	231	Var (200 °C)	Var

5.4.1 1 Numaralı Deneyin Yapılışı

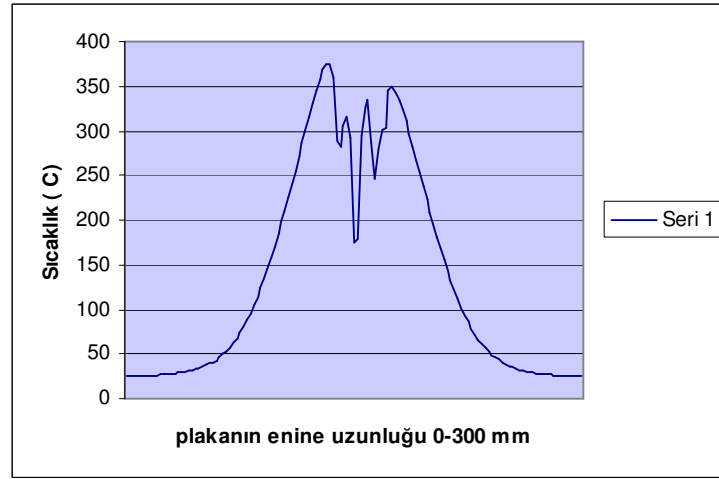
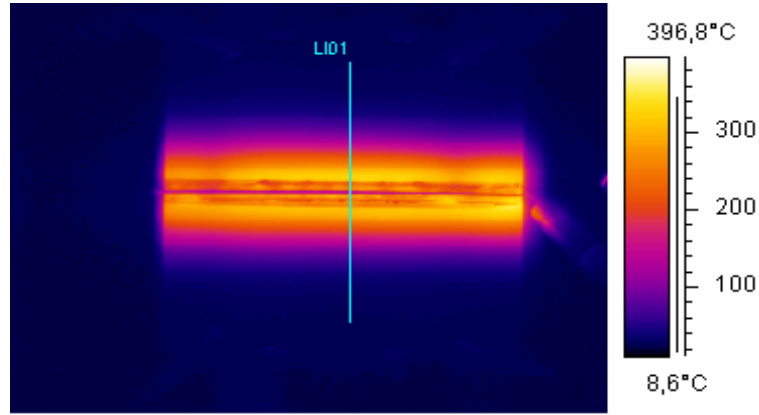
Kaynak öncesi boyutsal ölçümü yapılan (Şekil B.1) ve termokupulları monte edilen plaka, hareket kısıtlaması olmaksızın Tablo 5.1 de belirtilen koşullarda çift taraflı kaynak edilmiştir (Şekil 5.20)



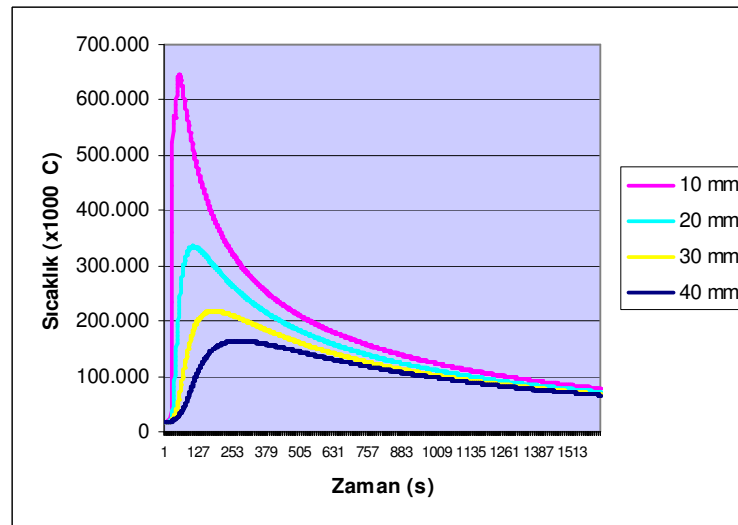
Şekil 5.20: Serbest hareketli deney parçasının kaynak öncesi görünümü

Deney parçası kaynak edilirken termal kamera ile kaynak bölgesindeki ısı dağılımı kaydedilmiştir (Şekil 5.21)

Kaynak işleminin başlangıcından itibaren, kaynak bölgesinin sıcaklık dağılımı termokupullarla tespit edilerek, termokupulların kaynak merkezine dik uzaklıklardaki değerleri Şekil 5.22’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



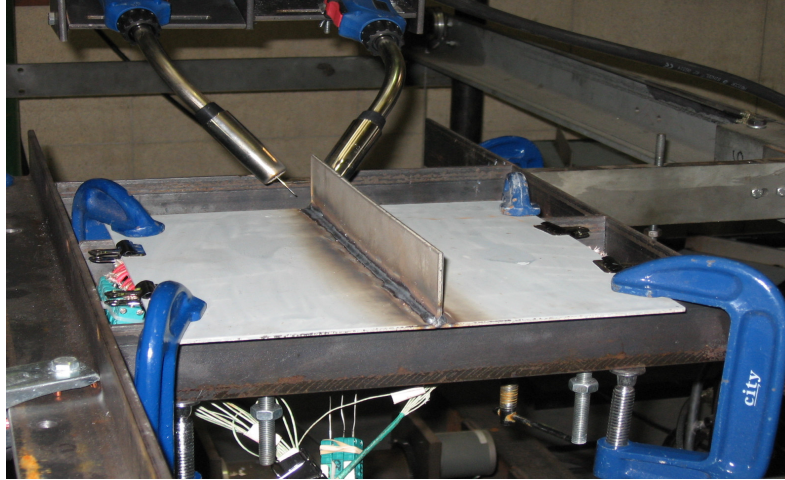
Şekil 5.21: Kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



Şekil 5.22: Termokupul kullanılarak elde edilen kaynak sıcaklık dağılımı

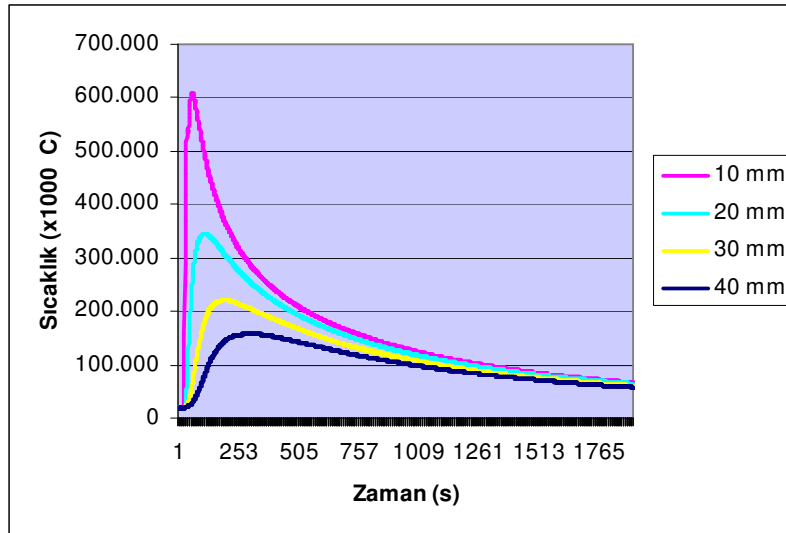
5.4.2. 2 Numaralı Deneyin Yapılışı

Kaynak öncesi boyutsal ölçümü yapılan (Şekil B.2) ve termokupulları monte edilen plakanın hareketleri kısıtlanmak üzere dört köşesinden kelepçelenmiş halde kaynak edilmiştir (Şekil 5.23)



Şekil 5.23: Hareketi kısıtlanmış deney parçasının kaynak sonrası görünümü

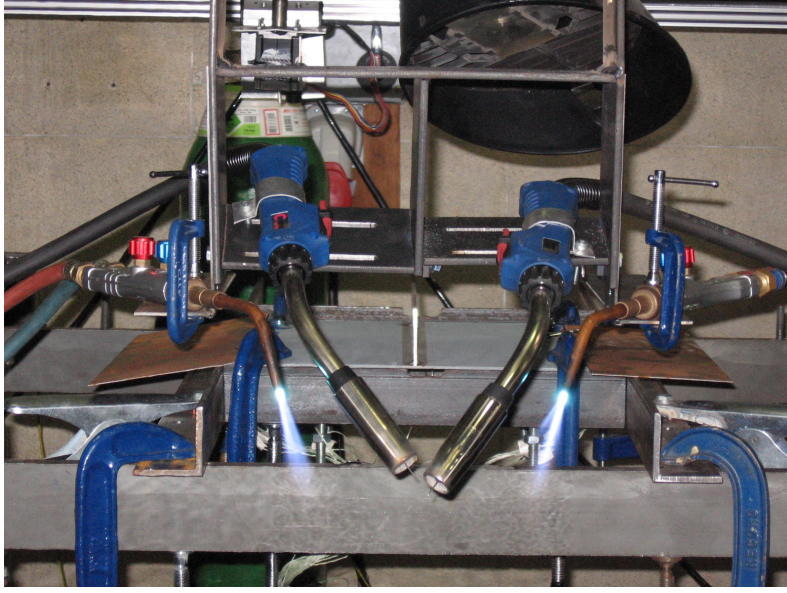
Kaynak işleminin başlangıcından itibaren, kaynak bölgesinin sıcaklık dağılımı termokupullarla tespit edilerek, termokupulların kaynak merkezine dik uzaklıklardaki değerleri Şekil 5.24’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.24: Termokupul kullanılarak elde edilen kaynak sıcaklık dağılımı

5.4.3. 3 Numaralı Deneyin Yapılışı

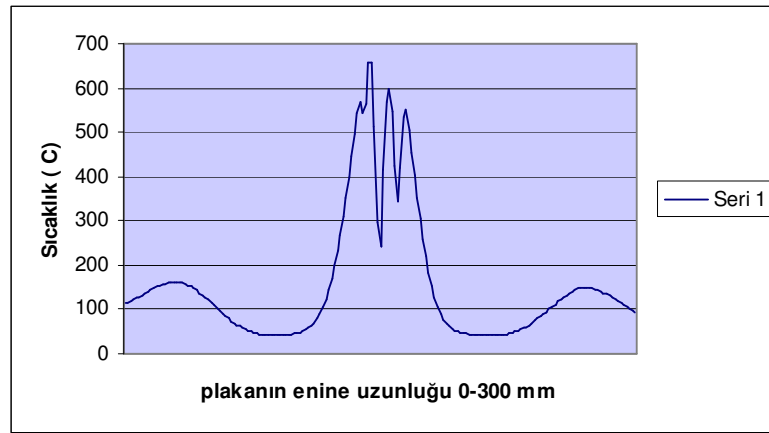
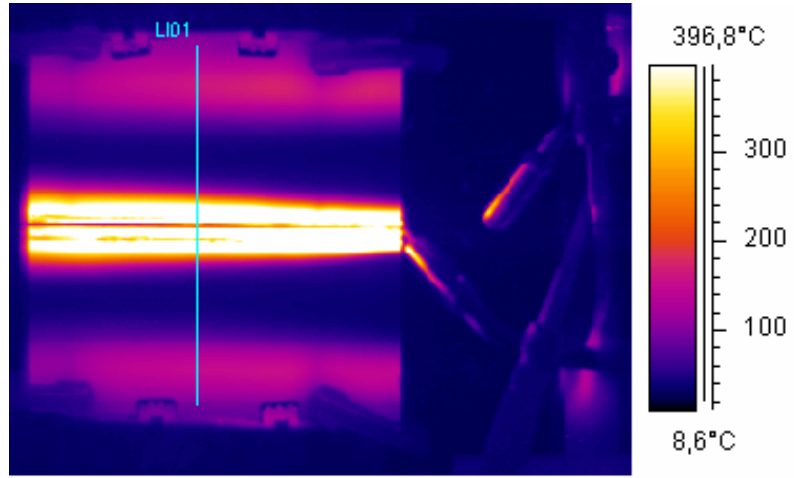
Kaynak öncesi boyutsal ölçümü yapılan (Şekil B.3) ve termokupulları monte edilen plaka hareketi kısıtlanmak üzere dört köşesinden mengene ile sabitlenmiş olduğu halde ilave ısı girdisi ile kaynak edilmiştir (Şekil 5.25).



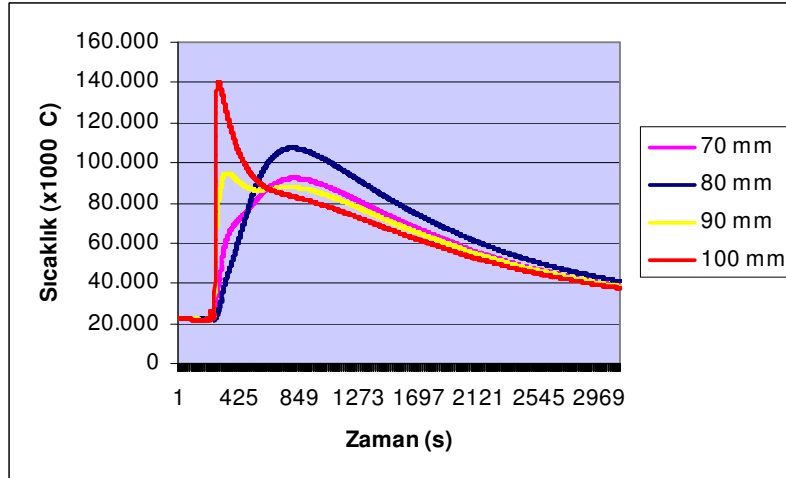
Şekil 5.25: Hareketi kısıtlanmış ilave ısı girdili deney parçasının kaynak işlemi

Deney parçası kaynak edilirken termal kamera ile kaynak bölgesindeki ısı dağılımı kaydedilmiştir (Şekil 5.26)

Kaynak işleminin başlangıcından itibaren, kaynak bölgesinin sıcaklık dağılımı termokupullarla tespit edilerek, termokupulların kaynak merkezine dik uzaklıklardaki değerleri Şekil 5.27’de grafiksel olarak gösterilmiştir. Termokupullarla elde edilen sıcaklık dağılımlarıyla, termal kamerayla tespit edilen sıcak dağılımları arasında yaklaşık 20°C lik bir fark bulunmaktadır. Buna sebep termokupulların plakanın alt kısmından değer okumasıdır.



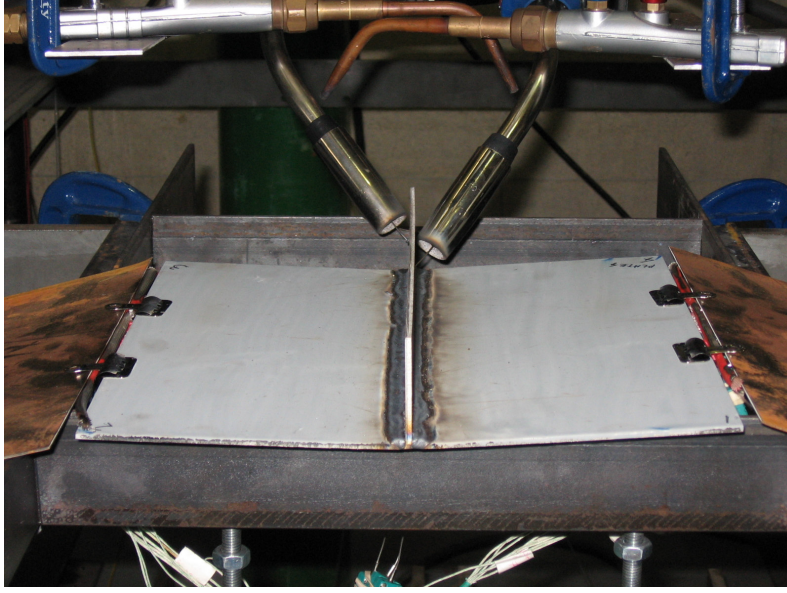
Şekil 5.26: Kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



Şekil 5.27: termokupul kullanılarak elde edilen kaynak sıcaklık dağılımı

5.4.4 4 Numaralı Deneyin Yapılışı

Kaynak öncesi boyutsal ölçümü yapılan (Şekil B.4) ve termokupulları monte edilen plaka serbest hareketli olduğu halde ilave ısı girdisi ile kaynak edilmiştir (Şekil 5.28).



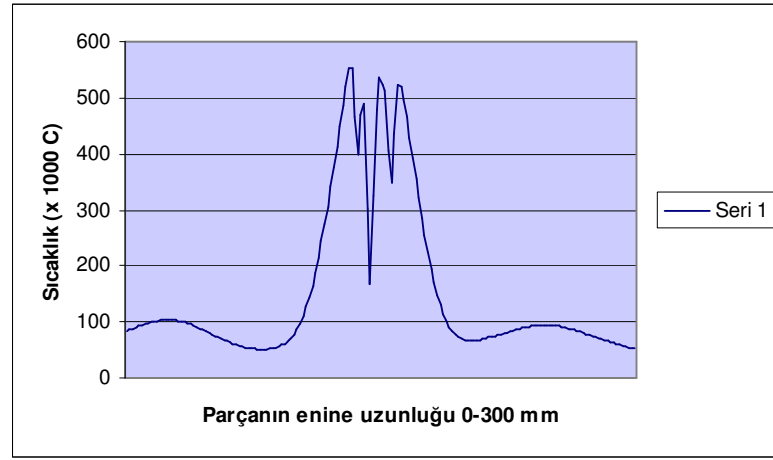
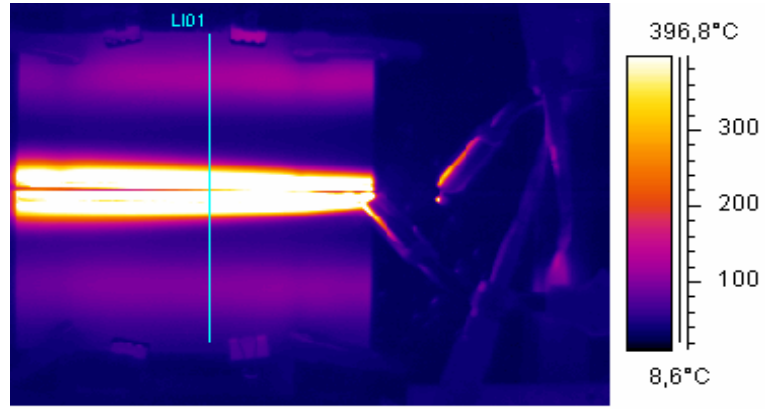
Şekil 5.28: Serbest hareketli ilave ısı girdili deney parçasının kaynak sonrası görünümü

5.4.5 5 numaralı deneyin yapılışı

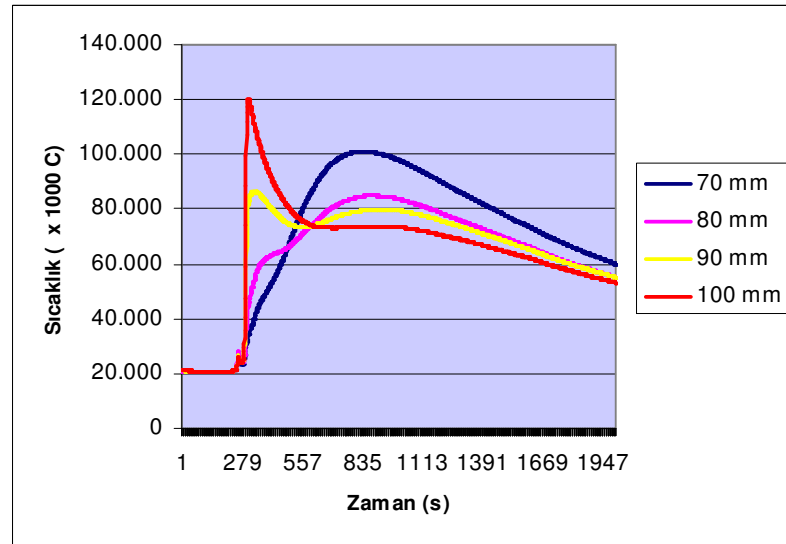
Kaynak öncesi boyutsal ölçümü yapılan (Şekil B.5) ve termokupulları monte edilen plaka hareketi kısıtlanmak üzere dört köşesinden mengene ile sabitlenmiş olduğu halde ilave ısı girdisi ile kaynak edilmiştir.

Deney parçası kaynak edilirken termal kamera ile kaynak bölgesindeki ısı dağılımı kaydedilmiştir (Şekil 5.29)

Kaynak işleminin başlangıcından itibaren, kaynak bölgesinin sıcaklık dağılımı termokupullarla tespit edilerek, termokupulların kaynak merkezine dik uzaklıklardaki değerleri Şekil 5.30'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Termokupullarla elde edilen sıcaklık dağılımlarıyla, termal kamerayla tespit edilen sıcak dağılımları arasında yaklaşık 20°C lik bir fark bulunmaktadır. Buna sebep termokupulların plakanın alt kısmından değer okumasıdır.



Şekil 5.29: Kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



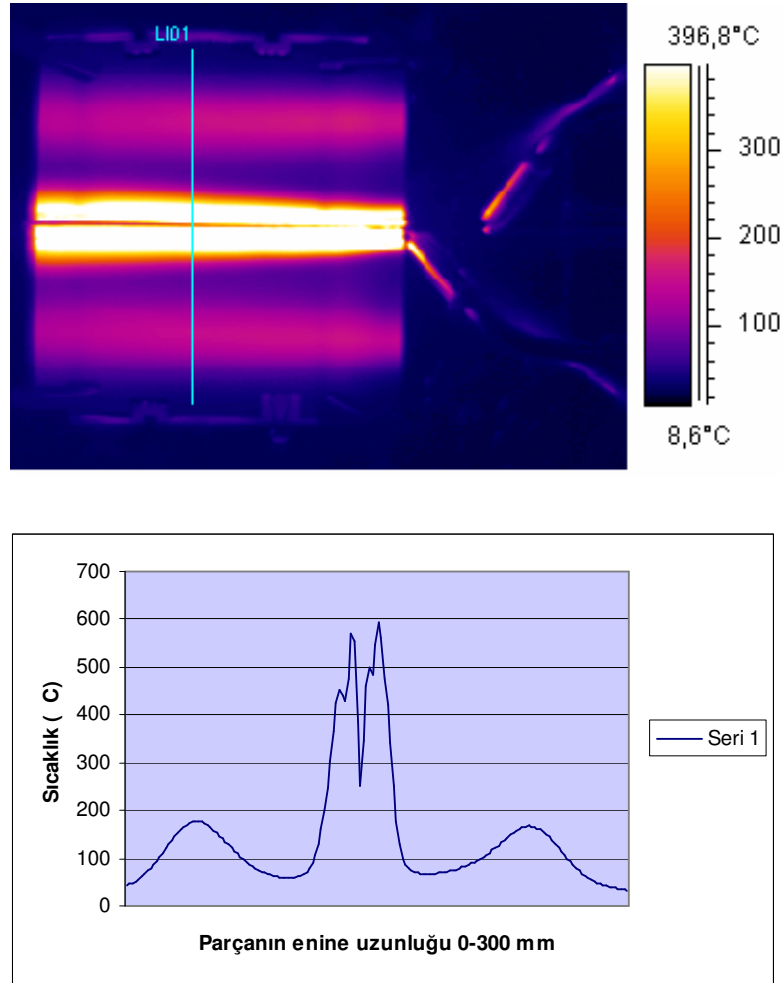
Şekil 5.30: Termokupul kullanılarak elde edilen kaynak sıcaklık dağılımı

5.4.6 6 Numaralı Deneyin Yapılışı

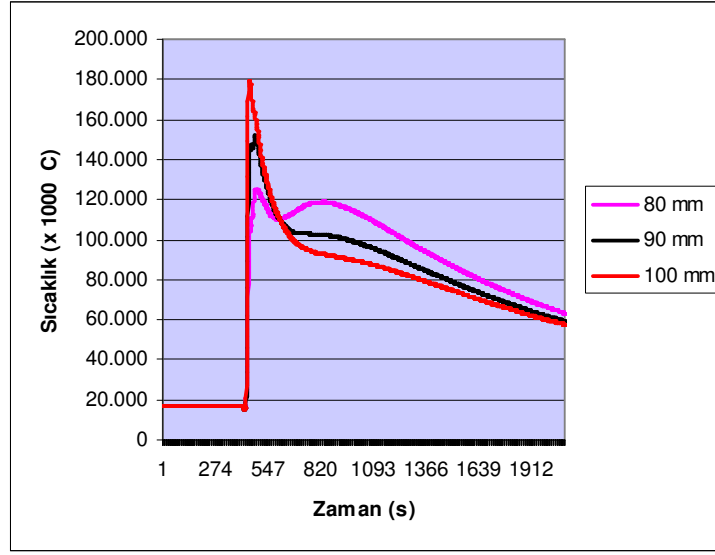
Kaynak öncesi boyutsal ölçümü yapılan (Şekil B.6) ve termokupulları monte edilen plaka hareketi kısıtlanmak üzere dört köşesinden mengene ile sabitlenmiş olduğu halde ilave ısı girdisi ile kaynak edilmiştir.

Deney parçası kaynak edilirken termal kamera ile kaynak bölgesindeki ısı dağılımı kaydedilmiştir (Şekil 5.31)

Kaynak işleminin başlangıcından itibaren, kaynak bölgesinin sıcaklık dağılımı termokupullarla tespit edilerek, termokupulların kaynak merkezine dik uzaklıklardaki değerleri Şekil 5.32’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.31: Kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



Şekil 5.32: Termokupul kullanılarak elde edilen kaynak sıcaklık dağılımı

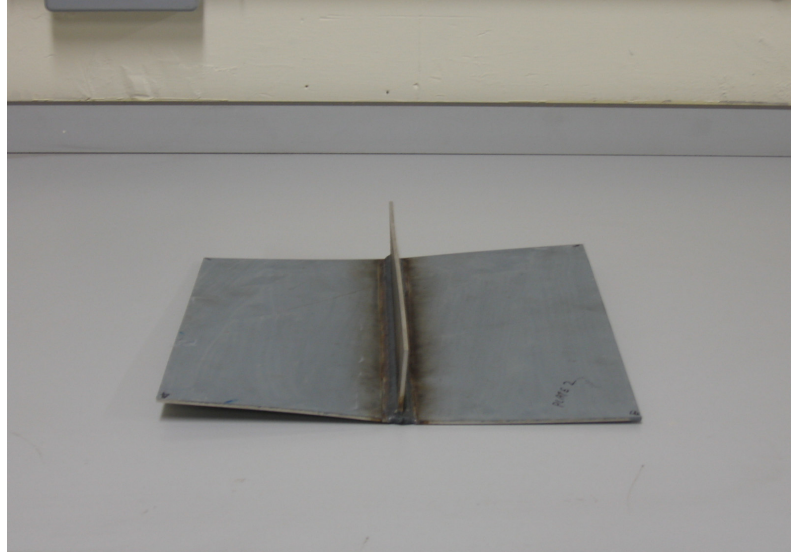
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Deney sonuçları

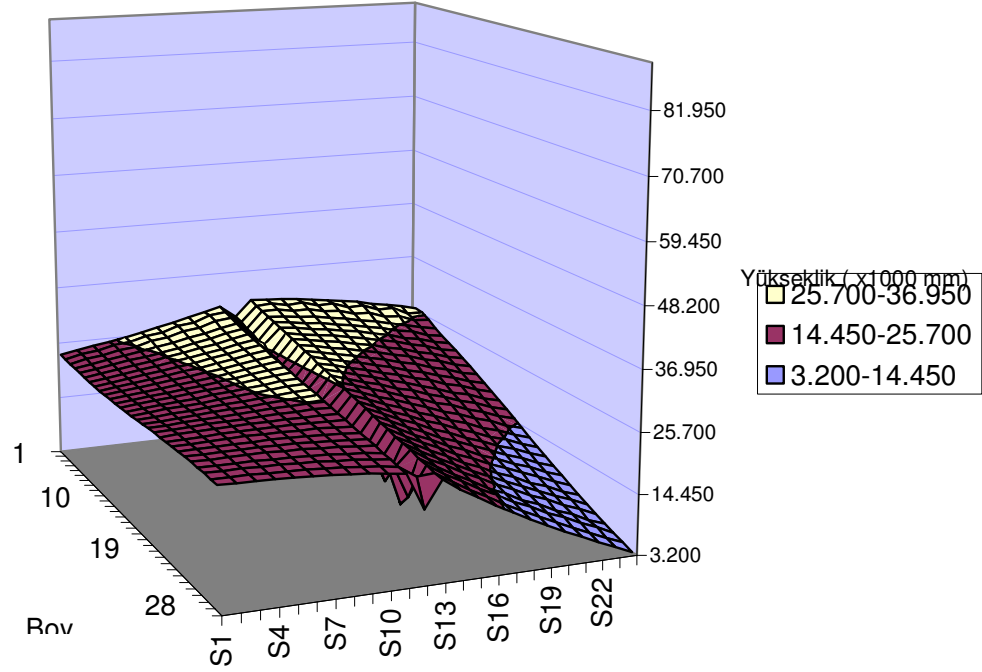
6.1.1. 1 Numaralı Deney Sonucu

Bu deneyde, tersanedeki imalat işlemleri gibi, deney parçası serbest hareketli ve ilave ısı girdisi olmadan Tablo 5.1’deki koşullarda kaynak edilmiştir.

Kaynak işlemi sonrası deney parçasının görünümü Şekil 6.1’ de lazer cihazı taramasıyla elde edilen boyutsal değişimi ise Şekil 6.2’dedir.



Şekil 6.1: 1 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü

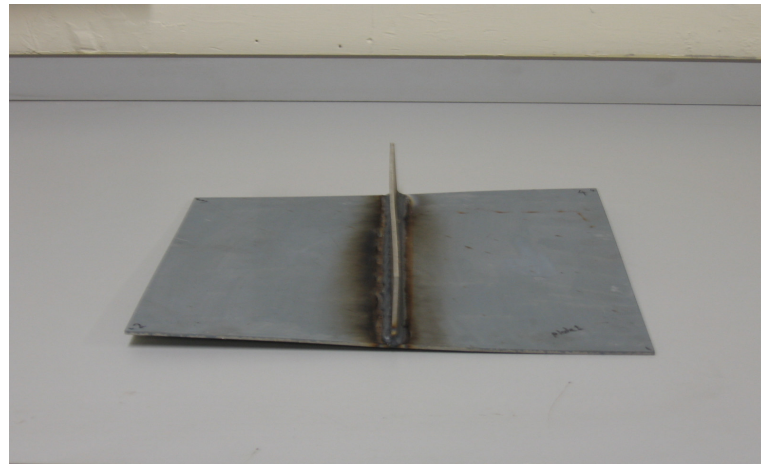


Şekil 6.2: 1 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi

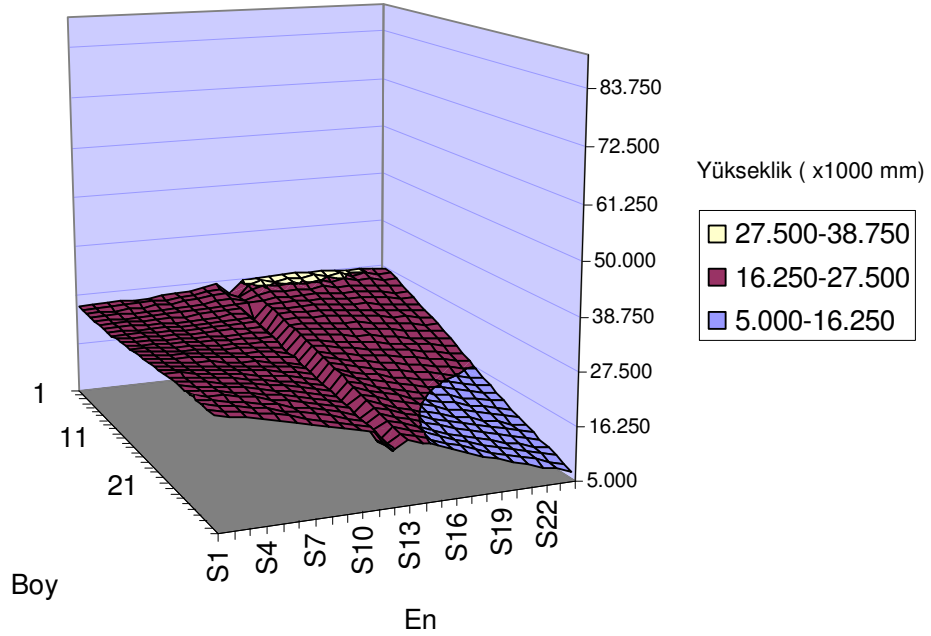
6.1.2 2 Numaralı Deneyin Sonucu

Bu deneyde, deney parçası hareketleri kısıtlanmak üzere dört köşesinden sabitlenerek ve ilave ısı girdisi olmadan Tablo 5.1’deki koşullarda kaynak edilmiştir.

Kaynak işlemi sonrası deney parçasının görünümü Şekil 6.3’ de lazer cihazı taramasıyla elde edilen boyutsal değişimi ise Şekil 6.4’ dendir.



Şekil 6.3: 2 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü

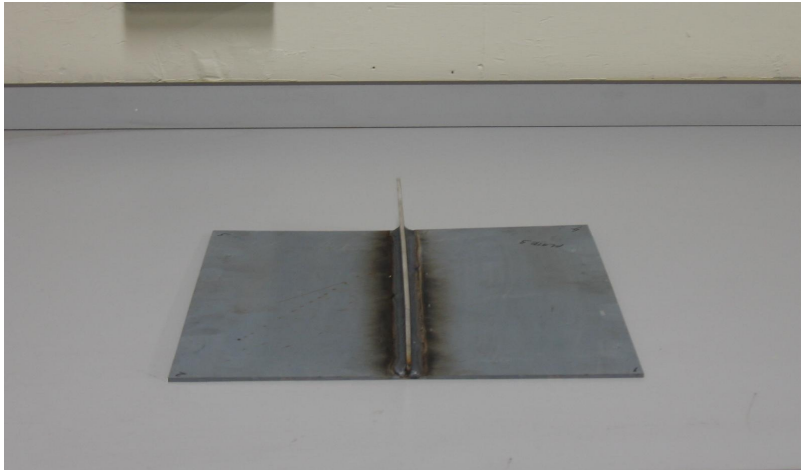


Şekil 6.2: 1 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi

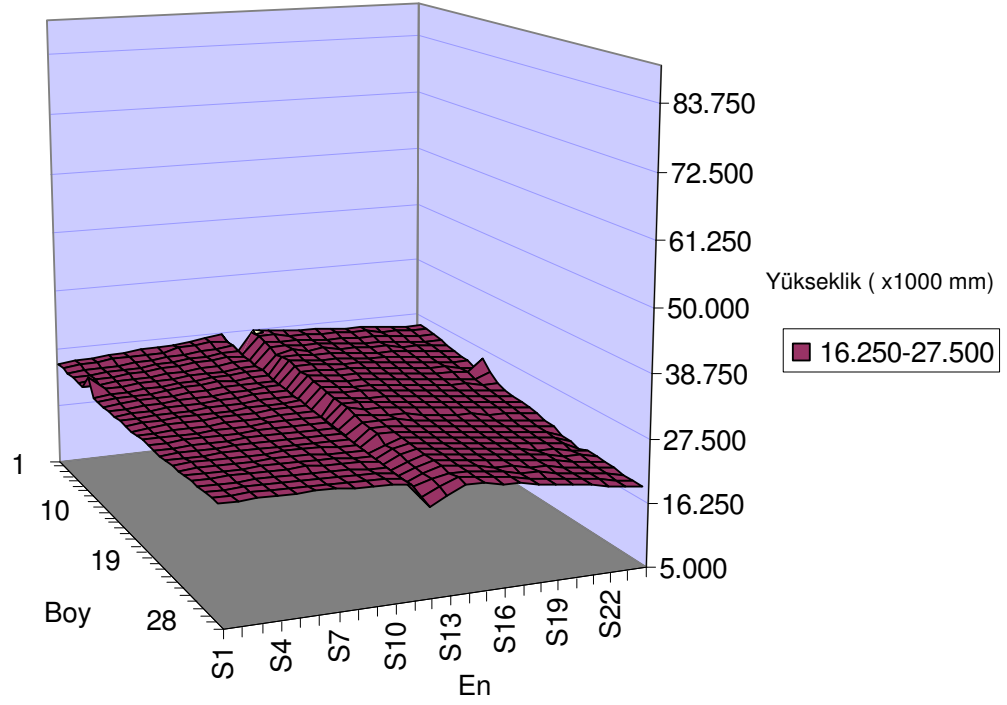
6.1.3 3 Numaralı Deneyin Sonucu

Bu deneyde, deney parçası hareketleri kısıtlanmak üzere dört köşesinden sabitlenerek ve ilave ısı girdisi uygulanarak Tablo 5.1’deki koşullarda kaynak edilmiştir.

Kaynak işlemi sonrası deney parçasının görünümü Şekil 6.5’ de lazer cihazı taramasıyla elde edilen boyutsal değişimi ise Şekil 6.6’dadır.



Şekil 6.5:3 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü

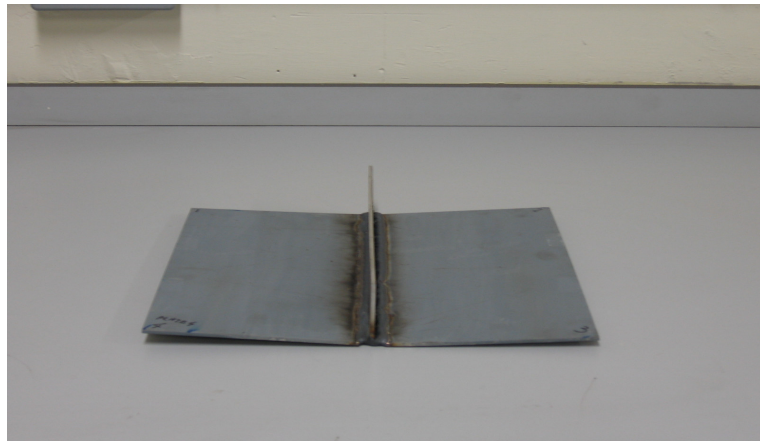


Şekil 6.6: 3 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi

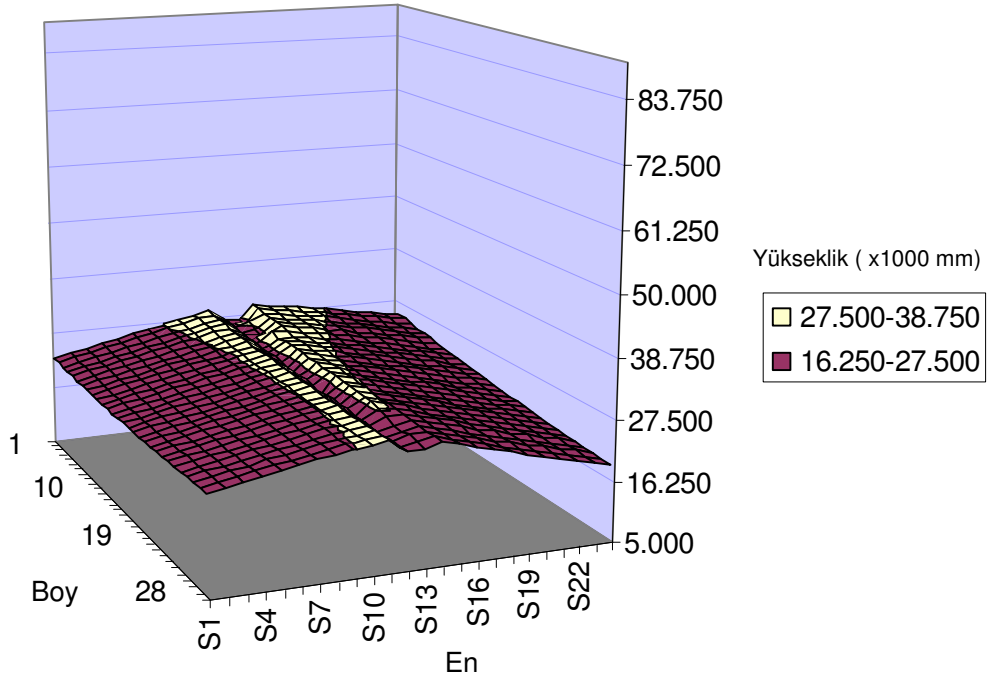
6.1.4 4 Numaralı Deneyin Sonucu

Bu deneyde, deney parçası serbest hareketli ve ilave ısı girdisi uygulanarak Tablo 5.1'deki koşullarda kaynak edilmiştir.

Kaynak işlemi sonrası deney parçasının görünümü Şekil 6.7' de lazer cihazı taramasıyla elde edilen boyutsal değişimi ise Şekil 6.8'dedir.



Şekil 6.7: 4 numaralı deney parçası kaynak sonrası görünümü

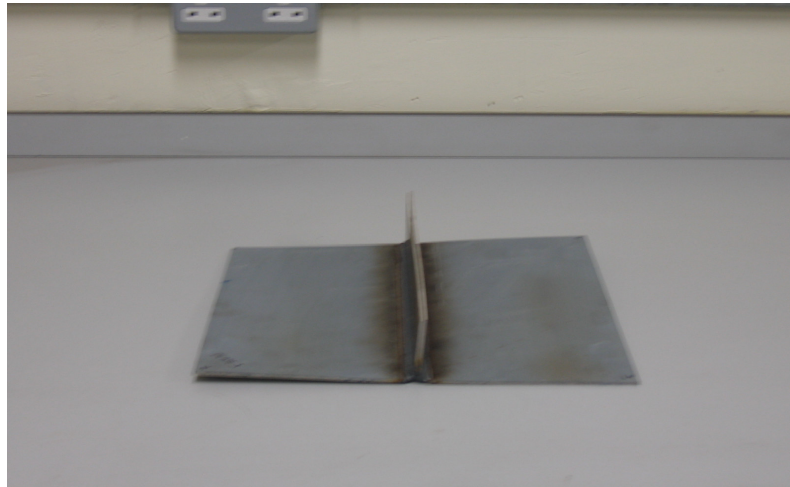


Şekil 6.8: 4 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi

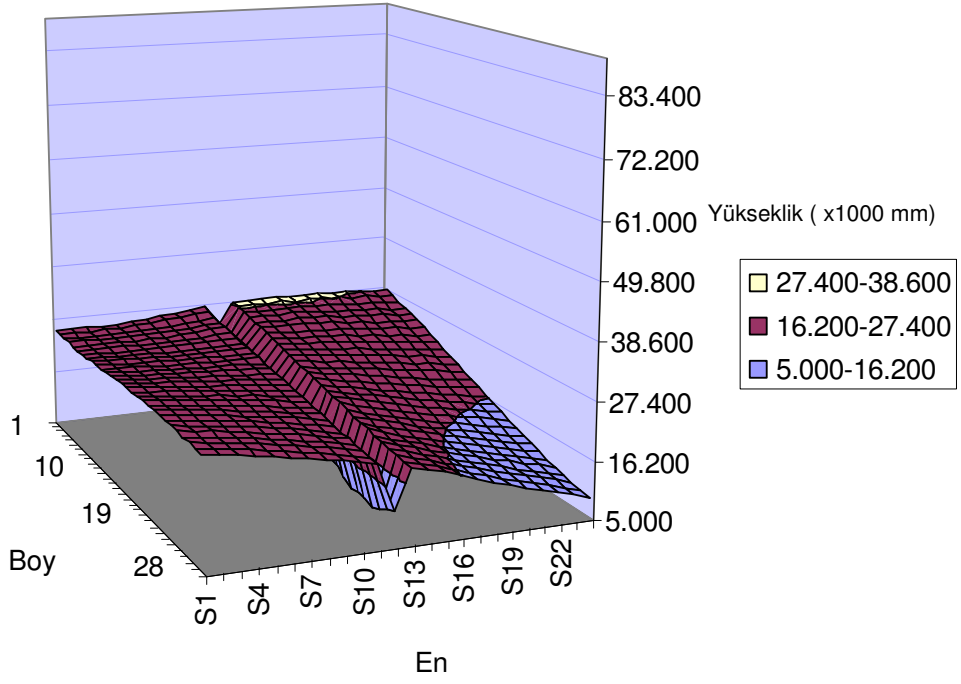
6.1.5 5 Numaralı Deneyin Sonucu

Bu deneyde, deney parçası hareketleri kısıtlanmak üzere dört köşesinden sabitlenerek ve ilave ısı girdisi uygulanarak Tablo 5.1’deki koşullarda kaynak edilmiştir.

Kaynak işlemi sonrası deney parçasının görünümü Şekil 6.9’ da lazer cihazı taramasıyla elde edilen boyutsal değişimi ise Şekil 6.10 ’dadır.



Şekil 6.9: 5 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü

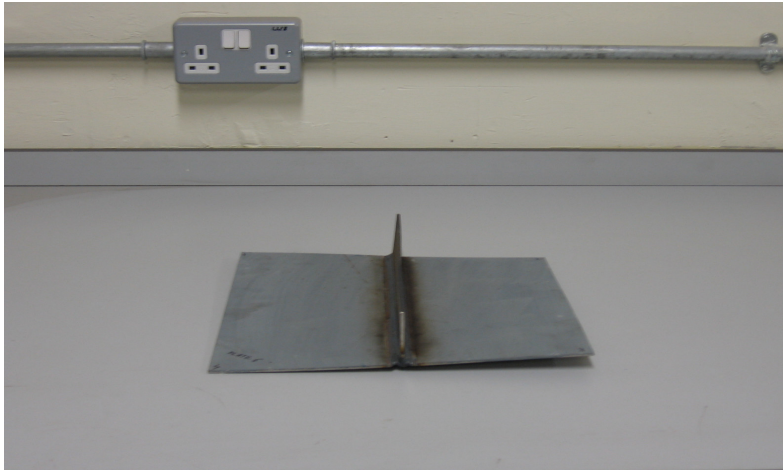


Şekil 6.10: 5 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi

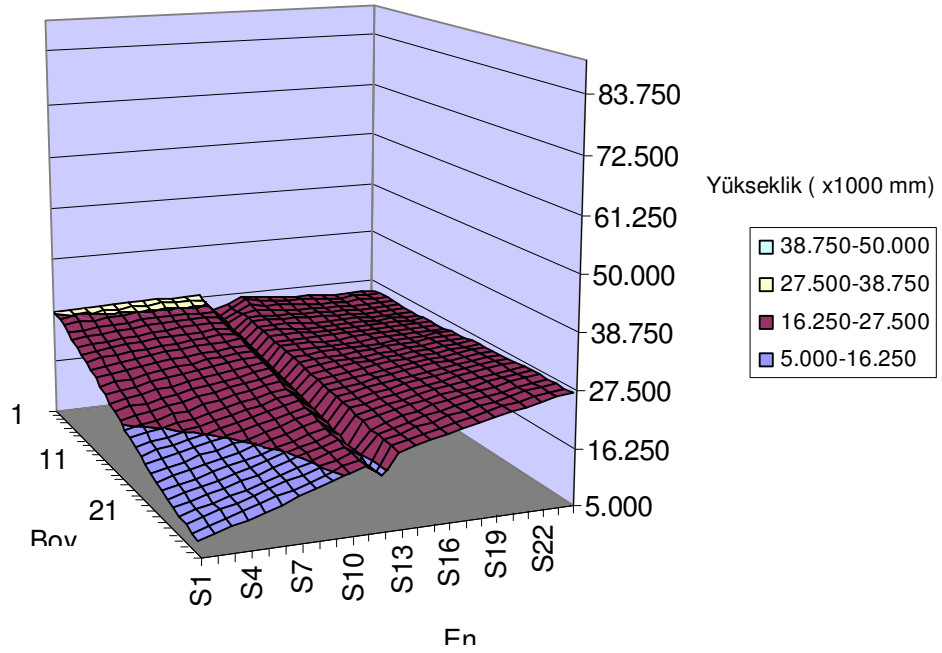
6.1.6 6 Numaralı Deneyin Sonucu

Bu deneyde, deney parçası hareketleri kısıtlanmak üzere dört köşesinden sabitlenerek ve ilave ısı girdisi uygulanarak Tablo 5.1’deki koşullarda kaynak edilmiştir.

Kaynak işlemi sonrası deney parçasının görünümü Şekil 6.11’de lazer cihazı taramasıyla elde edilen boyutsal değişimi ise Şekil 6.12’dedir.



Şekil 6.11: 6 numaralı deney parçasının kaynak sonrası görünümü



Şekil 6.12: 6 numaralı deney parçasının kaynak distorsiyonlarının grafiksel gösterimi

6.2. Deney Sonuçların Değerlendirilmesi

Askeri sahada ileri teknoloji ürünü malzemelerin kullanımı, donanma gemilerinde kullanılan çeliklerinde çeşitlilik yelpazesini genişletmiştir. Bu kapsamda, donanma gemilerinin inşasında, sahip olduğu ayırt edici özelliklerinden ötürü ostenitik paslanmaz çeliklerin kullanımı yaygınlaşmıştır.

İstanbul Tersanesi/Pendik'te, Aydın Sınıfı mayın karşı tedbir gemileri inşasında kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerin, kaynak işlemi sonrası meydana gelen distorsiyonları ve bu distorsiyonların düzeltme işleminin getirdiği maliyetlerin azaltılmasına yönelik olarak, kaynak işlemi esnasında ilave ısı girdisi uygulanmasının etkileri bu tezde incelenmiştir.

Yapılan deneyler neticesinde, elde edilen verilerden, ilave ısı girdisi uygulamasının, ondüle şeklindeki kaynak distorsiyonlarını önlediği ve bunun sonucunda belirgin hale gelen açısıl çarpılmanın ise parçanın hareketini kısıtlayıcı önlemlerle engellenebileceği görülmüştür.

Yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar özetlenirse;

a) Ostenitik paslanmaz çeliklerin genel yapı çeliklerine nazaran ısı genleşmelerinin yüksek buna mukabil ısı iletimlerinin düşük olması bu çeliklerin kaynak distorsiyonlarını daha belirgin hale getirdiği bilenen bir olgudur. Yapılan deneysel çalışma ile hali hazırda uygulaması olmayan, ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak esnasında ilave ısı girdisi uygulamasıyla, boylamasına çekme gerilmesi meydana getirmek, bu bölgede kaynaktan dolayı oluşan basma gerilmesini azaltmakta ve kritik ondüle oluşum gerilmesinden aşağıda tutmaktadır. Böylelikle ondüle şeklindeki distorsiyon oluşumu engellenebilmektedir.

b) Yapılan deneylerde ilave ısı girdisi uygulaması, ondüle şeklindeki kaynak distorsiyonlarının oluşumunu önlemekte ancak açısız çarpılmaların oluşumunu engelleyememektedir. Açısız çarpılmalar günümüz sanayisinde de genel yapı çelikleri için hareket kısıtlaması uygulanarak önlenmektedir. Buradan faydalanarak ostenitik paslanmaz çelikten parçadaki açısız çarpılmayı da engellemek üzere ilave ısı girdisi uygulamasıyla birlikte, hareket kısıtlaması uygulaması tatbik edilmiş böylelikle parçadaki distorsiyon oluşumları tamamıyla engellenmiştir.

6.3. İleride Yapılabilecek Çalışmalar

Günümüzde ostenitik paslanmaz çelikten mamul gemilerin yapım aşamasında, özellikle ince plakalarda oluşan ondüle şeklindeki distorsiyonlar alevle düzeltme işlemiyle ancak kaynaktan sonra düzeltilebilmektedir. Büyük maliyet gerektiren bu işlemlerin yerine alternatif olarak önerilen kaynak esnasında ilave ısı girdisi uygulamasıyla, zaman ve işçilikten tasarruf edilebilecektir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar, gemi inşa sanayinde kullanılan parçaların deney laboratuvarında kullanılabilir ölçülere getirilmesiyle elde edilmişlerdir. Gemi inşa sanayinde kullanılan, gerçek boyutlar üzerinde çalışmalar yapılması, kullanılacak tekniğin pratik olarak uygulanabilirliğinin ve maliyet giderlerinin tespit edilmesinde önemlidir. Ayrıca kullanılması önerilen tekniğin, otomasyonu da ancak birebir ölçülerdeki parçalar üzerinde yapılabilecektir. Bu amaçla, gemi inşasında kullanılan, gerçek ölçülerdeki bir parçaya göre, deney şartlarının oluşturulması önem arz etmektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçların gemi inşa sanayine uygulanması için İstanbul Teknik Üniversitesi, TÜBİTAK ve Deniz Kuvvetleri Komutanlığı nezdinde

başvurular bilahare yapılacaktır. Finansal destek sağlanması durumunda, İskoçya Strathclyde Üniversitesi'ndeki deney laboratuvarı, daha geniş parçaların kaynak işlemi için geliştirilip kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Zjinkin V. B.** 1995. Theory and design of the ship, Sudostroenie, St Petersburg.
- [2] **Anık, S. Ve Vural, M.,** 2000. 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [3] **Watanabe, M. ve Satoh, K.,** 1959. Fundamental study on buckling of thin steel plate due to bead-welding, *Japan Welding Society*. 27(6): 13–20.
- [4] **Masubuchi, K.,** 1959. New approach to the problem on residual stress and deformation due to welding. Transportation Technical Research Institute Report 8(12), United states of America.
- [5] **Taniguchi, C.** 1972. Out-of-plane distortion caused by fillet welds in aluminum. *Master's thesis*. Massachusetts Instituted of Technology, USA.
- [6] **Pattee, F. M.** 1975. Buckling distortion of thin aluminum plates during welding. *Master's thesis*. Massachusetts Instituted of Technology, USA.
- [7] **Satoh, K. ve Terasaki, T.** 1976. Effect of welding conditions on residual stress distributions and welding deformation in welded structures materials. *Japan Welding Society*. 45(1): 42–53.
- [8] **Terai, K., Matsui, S., Kinoshita, T.,** 1976. Study on Prevention of Welding Deformation in Thin-Skin Plate Structures. Kawasaki Technical Review 61: 61–66.Tokya, Japan.
- [9] **Penso, J. A.** 1992. Development of a PCbased FEM model to predict weld distortion. *Master's thesis*. The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- [10] **Daniewicz, S. R., McAninch, M. D., Mc-Farland, B. ve Knoll, D.** 1993. Application of distortion control technology during fabrication of large offshore structures. *International Conference on Modeling and Control of Joining Processes*.
- [11] **Michaleris, P., and DeBiccari, A.** 1997. Prediction of welding distortion. *Welding Journal* **76**, 172-s to 179-s.
- [12] **Burak, Ya, Romanchuk, P., Kazimirov, A.A. and Morgun, V.P,** 1979. Selection of the optimum fields for preheating plates before welding. *Avt. Svarka*, 5:5–9, Russia.

- [13] **Guan, Q., Leggatt, R. H. ve Brown, K. W.** 1988. Low stress, non-distortion (LSND) TIG welding of thin-walled structural elements. The Welding Institute Research Report 374. Abington, Cambridge, U.K.
- [14] **Guan, Q., Guo, D.,** 1987. Method and Apparatus for Low Stress and Non-Distortion Welding of Thin-Walled Structural Elements. Chinese Patent No.87100959.
- [15] **Guan, Q., Brown, K. W. ve Guo, D.,** 1988. International patent specification No. PCT/GB88/00136.
- [16] **Rosenthal, D., Schmerber, H.:** 1938. Thermal study of arc welding, *Welding Journal*, N4, pp.4-8
- [17] **Rykalın, N.N.** 1938. Temperature distribution in the elements of the structure during welding, *Avtogennoe Delo*, N5 and N7, Russia.
- [18] **Westby, O:** 1968. Temperature distribution in the work-piece by welding, Doctoral Thesis, The technical University of Norway, Trondheim,
- [19] **Friedman, E:** 1975. Thermo-mechanical analysis of the welding process using the finite element method, American society of Mechanical Engineering Pressure Vessel Technical report, pp. 206-213;
- [20] **Runnemalm, H:** 1999. Efficient finite element modeling and simulation of welding", *Doctoral Thesis*, The technical University of Norway, Trondheim.
- [21] **Anık, S.,** 1981. Kaynak Tekniği cilt 3., İ.T.Ü Makina Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [22] **Pilipenko, A:** 2001. Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding. Their mitigation techniques, *PhD Thesis*, Norwegian University ,Norway.
- [23] **Karkhin, V. A. :**1990. Principles of heat transfer in weldments technical report, Leningrad Technical University
- [24] **Boyer, H. E.:** 1987. Atlas oif stress-strain curves, ASM International, USA,
- [25] **Chakrabarty, J:** 2000. Applied plasticity, Springer-Verlag, New-York,
- [26] **Gourd, L.M. (çevirenler Eryürek, B., Bodur, O., Dikicioğlu, A.):** 1993. "Kaynak Teknolojisinin esasları" Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [27] **Masubuchi, K:** 1993. "Residual Stres and Distortion", ASM Handbook, volume 6, pp.1094.s, United States of America

- [28] **Vinokurov, V. A.:** 1977. Welding stresses and distortion, Wetherby, British Library
- [29] **DeGarmo, E. P., Meriam, J. L., Johanssen, F:** 1946. The effect of weld length upon the residual stresses of unstrained butt welds, *Welding Journal*, 25(8),pp. 485s-486s;
- [30] **Radaj, D:** 1992. Heat effects of welding, Springer-Verlag, Berlin.
- [31] **Okerblom, N.O.:** 1955. The calculations of deformation of welded metal structures,Mashgiz, Moscow, , Russia
- [32] **Kuzminov, A. S.:** 1956. Calculation principles of total deformation of ship hull structures, Works of Central Scientific Research Institute of Shipbuilding Industry, N9., Russia.;
- [33] **Masubuchi, K:** 1980, Analysis of welded structures, Pergamon Press, London.
- [34] **Grene, T.W, Houltzbaaur, A.A.:** 1946, “controlled Low Temperature Stress Relieving”, welding J.Res.Suppl., Vol.11, No.3, 1946, pp.171s-185s.
- [35] **Barber, T.E., Brust, F.W.:** 1981, “Controlling Residual Stresses by Heat Sink Welding”, Batelle Memorial Institute, Electric Power Research Institute Report NP-2159-LD
- [36] **Guan, Q., Zhang, C.X., Guo, D.L.:** 1994, “Dynamic Control of welding Distortion by Moving Spot Heat Sink”, *Welding in the world*, Vol.33, No.4, pp.308-312
- [37] **Ynag, Y.P., Dong, P., Tian, X., zhang, Z.:** 1988,“Prevention of Hot Cracking of High Strenght Aluminum Alloy by Mechanical Rolling”, Proc.5 th Int.Conf.on Trends in welding Research, pp.700-705
- [38] **Michaleris, P., Sun, X.:** 1997, “Finite element analysis of Thermal Tensioning Techniques Mitigating weld Buckling Distortion”, *Welding J.*, Vol. 76, pp. 451-457.
- [39] **Dz.K.K.,** 2005, Mayın avlama gemileri raporu, Ankara
- [40] **Camileri, D., Gray, T., Comlekci, T.,** 2004, Use of Thermography to Calibrate Fusion Welding Procedures in Virtual Fabrication Applications, Strathclyde University, Glasgow

EK-A

Tablo A.1: Hücumbot inşasında, kaynak distorsiyonlarının alevle düzeltme işleminin, tüm kaynaklı imalattaki payı

G/M H/B (HÜCUMBOT) KAYNAK FABRİKASI İŞLERİ

Kullanılan malzemeler : St 37 - St 42 - St 52

<u>İşin Adı</u>	<u>Süre (gün)</u>	<u>Kişi Sayısı</u>	<u>Adamxgün</u>
1-1 Section Ön imalat kaynak işleri	13	2	26
1-1 Section Ana tülani, flor ve borda kaynak işleri	12	2	24
1-1 Section harici kaplama kaynak işleri	12	4	48
1-1 Section montajı kaynak işleri	13	4	52
1-2 Section ön imalat kaynak işleri	15	2	30
1-2 Section Tülani, kemere, perde, borda posta ve köşebent kaynak işleri	17	2	34
1-2 Section harici kaplama kaynak işleri	12	4	48
1-2 Section montajı kaynak işleri	12	4	48
2-1 Section Ön imalat kaynak işleri	21	2	42
2-1 Section Ana tülani, flor ve borda kaynak işleri	17	2	34
2-1 Section harici kaplama kaynak işleri	12	4	48
2-1 Section montajı kaynak işleri	7	4	28
2-2 Section Ön imalat kaynak işleri	8	2	16
2-2 Section tülani, kemere, perde, borda, posta ve köşebent kaynak işleri	17	2	34
2-2 Section harici kaplama kaynak işleri	12	4	48
2-2 Section montajı kaynak işleri	9	4	36
3-1 Section Ön imalat kaynak işleri	15	2	30
3-1 Section tülani/ flor/ borda köşebent kaynak işleri	17	2	34
3-1 Section harici kaplama kaynak işleri	14	4	56
3-2 Section Ön imalat kaynak işleri	12	2	24
3-2 Section tülani, kemere, perde, borda, posta ve borda köşebent kaynak işleri	17	2	34
3-2 Section harici kaplama kaynak işleri	12	4	48
3-2 Section montajı kaynak işleri	6	4	24
4-1 Section Ön imalat kaynak işleri	16	2	32
4-1 Section Ana tülani/ flor/ borda köşebent kaynak işleri	17	2	34
4-1 Section harici kaplama kaynak işleri	18	4	72
4-2 Section Ön imalat kaynak işleri	15	2	30
4-2 Section tülani, kemere, perde, borda, posta ve köşebent kaynak işleri	17	2	34
4-2 Section harici kaplama kaynak işleri	7	4	28
4-2 Section montajı kaynak işleri	7	4	28
5-1 Section Ön imalat kaynak işleri	17	2	34
5-1 Section Ana tülani/ flor/ borda köşebent kaynak işleri	17	2	34

Tablo A.1: Hücumbot inşasında, kaynak distorsiyonlarının alevle düzeltme işleminin, tüm kaynaklı imalattaki payı (devamı)

<u>İşin Adı</u>	<u>Süre (gün)</u>	<u>Kişi Sayısı</u>	<u>Adamxgün</u>
5-1 Section harici kaplama kaynak işleri	12	4	48
5-1 Section montajı kaynak işleri	7	4	28
5-2 Section Ön imalat kaynak işleri	15	2	30
5-2 Section tülani,kemere,perde,borda,posta ve köşebent kaynak işleri	15	2	30
5-2 Section harici kaplama kaynak işleri	12	4	48
5-2 Section montajı kaynak işleri	9	4	36
6-1 Section Ön imalat kaynak işleri	12	2	24
6-1 Section Ana tülani/lor/borda köşebent kaynak işleri	17	2	34
6-1 Section harici kaplama kaynak işleri	12	4	48
6-1 Section montajı kaynak işleri	17	4	68
Üst bina montaj kaynak işleri	10	4	40
Kıç üst bina ön imalat ve montaj kaynak işleri	19	4	76
			1682
Düzeltilme işleri			
3-1 Section imalatı eleman taşlama ve düzeltme işleri	20	2	40
4-1 Section imalatı eleman taşlama ve düzeltme işleri	15	2	30
5-1 Section imalatı eleman taşlama ve düzeltme işleri	10	2	20
2-1 Section imalatı eleman taşlama ve düzeltme işleri	16	2	32
4-2 Section imalatı eleman taşlama ve düzeltme işleri	17	2	34
3-2 Section imalatı eleman taşlama ve düzeltme işleri	5	2	10
1-1 Section imalatı eleman taşlama ve düzeltme işleri	13	2	26
2-2 Section imalatı eleman taşlama ve düzeltme işleri	11	2	22
5-2 Section imalatı eleman taşlama ve düzeltme işleri	12	2	24
6-1 Section imalatı eleman taşlama ve düzeltme işleri	13	2	26
1-2 Section imalatı eleman taşlama ve düzeltme işleri	12	2	24
			288
		Toplam adamxgün sayısı	
			1970
Düzeltilme işlerini toplam çıplak tekne imalatı içindeki miktarı(%)			14,61929

Tablo A.2.: Aydın sınıfı mayın avlama gemilerinin inşasında, kaynak distorsiyonlarının alevle düzeltme işleminin, tüm kaynaklı imalattaki payı

MAYIN AVLAMA GEMİSİ KAYNAK FABRİKASI İŞLERİ

Kullanılan malzeme : 1.3964 (X2CrNiMnMoNNb 21-16-5-3)

İşin Adı	Süre (gün)	Kişi Sayısı	Adamxgün
01.1 Section Görder ve Flor kaynak işleri	5	1	5
01.2 Section Görder ve Flor kaynak işleri	5	1	5
01.1 Section Görder-Flor ve hollanda profillerinin kaynağı	11	1	11
01.2 Section Görder-Flor ve profillerinin kaynağı	5	1	5
01.1/01.2 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	10	1	10
01.1/01.2 Section harici kaplama sacının kaynatılması	15	1	15
01.1/01.2 Section Kontrol Sonrası düzeltme işleri	1	1	1
01.1 Section GV. Tülani-kemere kaynak işleri	4	1	4
01.1 Section posta kaynak işleri	4	1	4
01.1 Section perde kaynak işleri	2	1	2
01.3 Section GV. Tülani-kemere kaynak işleri	4	1	4
01.3 Section posta kaynak işleri	4	1	4
01.3 Section perde kaynak işleri	2	1	2
01.1/01.3 Section Ana güverte sac birleştirilmesi	2	1	2
01.1/01.3 Section Gv. Tülani-Lama ve Kemerelelerin	12	1	12
01.1/01.3 Section perdelerin kaynatılması	10	1	10
01.1/01.3 Section postaların kaynatılması	10	1	10
01.1/01.3 Section Hollanda profillerinin kaynatılması	10	1	10
01.1/01.3 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	8	1	8
01.1/01.3 Section harici kaplama sacının kaynatılması	10	1	10
01.1/01.3 Section kontrol sonrası düzeltme işleri	1	1	1
02.1 Section Gv. Görder ve Flor kaynak işleri	4	1	4
02.3 Görder ve Flor kaynak işleri	10	1	10
02.1/02.3 Section Tank güverte sac birleştirilmesi	2	1	2
02.3 Section Görder-Flor ve profillerinin kaynağı	5	1	5
02.1 Section Görder-Flor ve hollanda profillerinin kaynağı	5	1	5
02.3 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	3	1	3
02.1 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	3	1	3
02.3 Harici kaplama sacının kaynatılması	8	1	8
02.1 Harici kaplama sacının kaynatılması	7	1	7
02.1/02.3 Section kontrol sonrası düzeltme işleri	1	1	1
02.2 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	4	1	4
02.2 Section Posta kaynak işleri	4	1	4
02.4 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	7	1	7
02.4 Section Posta kaynak işleri	4	1	4
02.4 Section Perde kaynak işleri	2	1	2
02.2/02.4 Section Güverte sac birleştirilmesi	2	1	2
02.2/02.4 Section Gv. Tülani ve kemere kaynatılması	15	1	15
02.2/02.4 Section Perdelerin kaynatılması	6	1	6

Tablo A.2.: Aydın sınıfı mayın avlama gemilerinin inşasında, kaynak distorsiyonlarının alevle düzeltme işleminin, tüm kaynaklı imalattaki payı (devamı)

<u>İşin Adı</u>	<u>Süre (gün)</u>	<u>Kişi Sayısı</u>	<u>Adamxgün</u>
02.2/02.4 Section Postaların kaynatılması	9	1	9
02.2/02.4 Section □ollanda profillerinin kaynatılması	10	1	10
02.2/02.4 Section harici kaplama sacının kaynatılması	10	1	10
02.2/02.4 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	7	1	7
02.2/02.4 Section kontrol sonrası düzeltme işleri	1	1	1
03.1 Section Tank platformu sacının kaynatılması	2	1	2
03.1 Section Görder ve Flor kaynak işleri	4	1	4
03.1 Section Görder-Flor ve Hollanda profillerinin K.	18	1	18
03.1 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	10	1	10
03.1 Section harici kaplama sacının kaynatılması	20	1	20
03.1 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	4	1	4
03.1 section Posta kaynak işleri	3	1	3
03.1 section Perde imalatı(sac birleşimi)	3	1	3
03.1 Section Gv. Tülani-Lama ve Kemerlerin Kay.	15	1	15
03.1 Section Perdelerin Kaynatılması	16	1	16
03.1 Section Postaların kaynatılması	7	1	7
03.1 Section Hollanda profillerinin kaynatılması	5	1	5
03.1 Section Harici kaplama sacının kaynatılması	8	1	8
03.2 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	5	1	5
03.2 Section Posta kaynak işleri	4	1	4
03.2 Section Perde imalatı(sac birleşimi)	3	1	3
03.2 Section Gv. Tülani-Lama ve kemerelerin kayn.	10	1	10
03.2 Section Sancak-İskele yan duvar kaynağı	8	1	8
03.2 Section İskele yan duvar Posta kaynağı	2	1	2
03.2 Section İskele yan duvar profillerinin kaynağı	1	1	1
03.2 Section İskele yan duvar kaynağı/düzeltilme işleri	2	1	2
03.2 Section İskele yan duvar harici kaplama sac kayn.	3	1	3
03.2 Section Sancak yan duvar posta kaynağı	2	1	2
03.2 Section Sancak yan duvar □ollanda profil kaynağı	1	1	1
03.2 Section Sancak yan duvar Tig kaynağı ve düzeltme işleri	2	1	2
03.2 Section Sancak yan duvar harici kaplama sac k.	3	1	3
03.2 Section perdelerin kaynatılması	7	1	7
03.2 Section kontrolü sonrası düzeltme işleri	1	1	1
03.3 Section Tank platform sacı kaynatılması	2	1	2
03.3 Section Görder ve Flor kaynak işleri	3	1	3
03.3 Section Görder-Flor ve Hollanda profillerinin k.	10	1	10
03.3 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	5	1	5
03.3 Section Harici kaplama sacının kaynatılması	15	1	15
03.3 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	3	1	3
03.3 Section posta kaynak işleri	4	1	4
03.3 Section perde imalatı(sac birleşimi)	3	1	3
03.3 Section Section Gv. Tülani-Lama ve Kemerelerin kaynatılması	15	1	15

Tablo A.2.: Aydın sınıfı mayın avlama gemilerinin inşasında, kaynak distorsiyonlarının alevle düzeltme işleminin, tüm kaynaklı imalattaki payı (devamı)

<u>İşin Adı</u>	<u>Süre (gün)</u>	<u>Kişi Sayısı</u>	<u>Adamxgün</u>
03.3 Section perdelerin kaynatılması	14	1	14
03.3 Section postaların kaynatılması	9	1	9
03.3 Section Hollanda profillerinin kaynatılması	5	1	5
03.3 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	5	1	5
03.3 Section harici kaplama sacının kaynatılması	10	1	10
03.1/03.3 Section kontrol sonrası düzeltme işleri	1	1	1
03.4 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	5	1	5
03.4 Section Posta kaynak işleri	4	1	4
03.4 Section Perde imalatı(sac birleşimi)	3	1	3
03.4 Section Gv. Tülani-kemerelerin kaynatılması	15	1	15
03.4 Section Sancak-İskele yan duvar kaynağı	4	1	4
03.4 Section İskele yan duvar Posta kaynağı	2	1	2
03.4 Section İskele yan duvar profillerinin kaynağı	2	1	2
03.4 Section İskele yan duvar Tig kaynağı ve düzeltme işleri	4	1	4
03.4 Section İskele yan duvar harici kaplama sac k.	3	1	3
03.4 Section Sancak yan duvar posta kaynağı	2	1	2
03.4 Section Sancak yan duvar hollanda profil kaynağı	2	1	2
03.4 Section Sancak yan duvar Tig kaynağı ve düzeltme işleri	4	1	4
03.4 Section Sancak yan duvar harici kaplama sac k.	2	1	2
03.4 Section perdelerin kaynatılması	7	1	7
03.4 Section kontrolü sonrası düzeltme işleri	1	1	1
04.1 Section Tank platform sacı kaynatılması	2	1	2
04.1 Section Görder ve Flor kaynak işleri	5	1	5
04.1 Section Görder-Flor ve Hollanda profillerinin k.	10	1	10
04.1 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	4	1	4
04.1 Section Harici kaplama sacının kaynatılması	10	1	10
04.1 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	4	1	4
04.1 Section posta kaynak işleri	4	1	4
04.1 Section perde imalatı(sac birleşimi)	3	1	3
04.1 Section Gv. Tülani ve Kemerelerin kaynatılması	15	1	15
04.1 Section perdelerin kaynatılması	12	1	12
04.1 Section postaların kaynatılması	4	1	4
04.1 Section Hollanda profillerinin kaynatılması	5	1	5
04.1 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	5	1	5
04.1 Section harici kaplama sacının kaynatılması	6	1	6
04.2 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	5	1	5
04.2 Section Posta kaynak işleri	4	1	4
04.2 Section Çelik Bölme Perde imalatı(sac birleşimi)	3	1	3
04.2 Section Gv. Tülani-Lama ve kemerelerin k.	15	1	15
04.2 Section Sancak-İskele yan duvar kaynağı	5	1	5
04.2 Section İskele yan duvar Posta kaynağı	3	1	3
04.2 Section İskele yan duvar hollanda profillerinin kaynağı	2	1	2

Tablo A.2.: Aydın sınıfı mayın avlama gemilerinin inşasında, kaynak distorsiyonlarının alevle düzeltme işleminin, tüm kaynaklı imalattaki payı (devamı)

<u>İşin Adı</u>	<u>Süre (gün)</u>	<u>Kişi Sayısı</u>	<u>Adamxgün</u>
04.2 Section İskele yan duvar Tig kaynağı ve düzeltme işleri	2	1	2
04.2 Section İskele yan duvar harici kaplama sac k.	3	1	3
04.2 Section Sancak yan duvar posta kaynağı	3	1	3
04.2 Section Sancak yan duvar hollandanda profil kaynağı	2	1	2
04.2 Section Sancak yan duvar Tig kaynağı ve düzeltme işleri	2	1	2
04.2 Section Sancak yan duvar harici kaplama sac k.	3	1	3
04.2 Section perdelerin kaynatılması	7	1	7
04.2 Section kontrolü sonrası düzeltme işleri	1	1	1
04.3 Section Tank platform sacı kaynatılması	2	1	2
04.3 Section Görder ve Flor kaynak işleri	3	1	3
04.3 Section Görder-Flor ve profillerinin kaynağı	10	1	10
04.3 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	5	1	5
04.3 Section Harici kaplama sacının kaynatılması	8	1	8
04.3 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	5	1	5
04.3 Section posta kaynak işleri	5	1	5
04.3 Section perde imalatı(sac birleşimi)	3	1	3
04.3 Section Gv. Tülani ve Kemerelerin kaynatılması	10	1	10
04.3 Section perdelerin kaynatılması	8	1	8
04.3 Section postaların kaynatılması	7	1	7
04.3 Section Hollanda profillerinin kaynatılması	5	1	5
04.3 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	5	1	5
04.3 Section harici kaplama sacının kaynatılması	8	1	8
04.1/04.3 Section kontrol sonrası düzeltme işleri	1	1	1
04.4 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	4	1	4
04.4 Section Posta kaynak işleri	4	1	4
04.4 Section Çelik Bölme Perde imalatı(sac birleşimi)	3	1	3
04.4 Section Gv. Tülani-Lama ve kemerelerin kaynatılması	15	1	15
04.4 Section Sancak-İskele yan duvar kaynağı	3	1	3
04.4 Section İskele yan duvar Posta kaynağı	3	1	3
04.4 Section İskele yan duvar hollandanda profillerinin k.	3	1	3
04.4 Section İskele yan duvar kaynağı/düzeltilme işleri	3	1	3
04.4 Section İskele yan duvar harici kaplama sac k.	5	1	5
04.4 Section Sancak yan duvar posta kaynağı	5	1	5
04.4 Section Sancak yan duvar hollandanda profil kaynağı	7	1	7
04.4 Section Sancak yan duvar Tig kaynağı ve düzeltme işleri	3	1	3
04.4 Section Sancak yan duvar harici kaplama sac kaynağı	3	1	3
04.4 Section perdelerin kaynatılması	5	1	5
04.4 Section kontrolü sonrası düzeltme işleri	1	1	1
05.1 Section Gv. Tülani ve Kemere kaynak işleri	5	1	5
05.1 Section Görder ve Flor kaynak işleri	7	1	7

Tablo A.2.: Aydın sınıfı mayın avlama gemilerinin inşasında, kaynak distorsiyonlarının alevle düzeltme işleminin, tüm kaynaklı imalattaki payı (devamı)

<u>İşin Adı</u>	<u>Süre (gün)</u>	<u>Kişi Sayısı</u>	<u>Adamxgün</u>
05.1 Section posta kaynak işleri	5	1	5
05.1 section Perde kaynak işleri	2	1	2
05.1 Section Gv. Tülani-Lama ve Kemerelerin k.	15	1	15
05.1 Section perdelerin kaynatılması	7	1	7
05.1 Section Görder ve Florların kaynatılması	4	1	4
05.1 Section Postaların kaynatılması	10	1	10
05.1 Section Hollanda profillerinin kaynatılması	7	1	7
05.1 Section Tig kaynağı ve düzeltme işlemleri	6	1	6
05.1 Section harici kaplama sacının kaynatılması	10	1	10
05.1 Section kontrol sonrası düzeltme işlemleri	1	1	1
05.1 Section baş bodoslama Güv. Sac kaynağı-1	5	1	5
05.1 Section baş bodoslama eleman kaynak işleri	10	1	10
05.1 Section baş bodoslama Güv. Sac kaynağı-2	5	1	5
05.1 Section baş bodoslama -ana güv. Birleştirilmesi	5	1	5
06.1 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	4	1	4
06.1 Section perde kaynak işleri	2	1	2
06.1 Section iç bölme perde imalatı(sac birleşimi)	3	1	3
06.1 Section Gv. Tülani-Lama ve Kemerelerin k.	10	1	10
06.1 Section perdelerin kaynatılması	10	1	10
06.1 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	10	1	10
06.1 Section kontrol sonrası düzeltme işleri	1	1	1
07.1 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	5	1	5
07.1 Section perde kaynak işleri	3	1	3
07.1 Section iç bölme perde imalatı(sac birleşimi)	4	1	4
07.1 Section Gv. Tülani-Lama ve Kemerelerin k.	25	1	25
07.1 Section perdelerin kaynatılması	15	1	15
07.1 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	15	1	15
07.1 Section kontrol sonrası düzeltme işleri	1	1	1
08.1 Section Gv. Tülani-Kemere kaynak işleri	5	1	5
08.1 Section perde kaynak işleri	3	1	3
08.1 Section iç bölme perde imalatı(sac birleşimi)	4	1	4
08.1 Section Gv. Tülani-Lama ve Kemerelerin k.	15	1	15
08.1 Section perdelerin kaynatılması	20	1	20
08.1 Section Tig kaynağı ve düzeltme işleri	10	1	10
08.1 Section kontrol sonrası düzeltme işleri	1	1	1
İzolasyon çivi montajı	40	2	80
			1238
Düzeltilme işleri			
01.1 Section görder ve flor düzeltme işleri	8	2	16
01.2 Section görder ve flor düzeltme işleri	10	2	20
01.1 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	10	2	20
01.1 Section Posta düzeltme işleri	7	2	14
01.1 Section Perde taşıma ve düzeltme işleri	2	2	4
01.3 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	5	2	10
01.3 Section Posta düzeltme işleri	6	2	12

Tablo A.2.: Aydın sınıfı mayın avlama gemilerinin inşasında, kaynak distorsiyonlarının alevle düzeltme işleminin, tüm kaynaklı imalattaki payı (devamı)

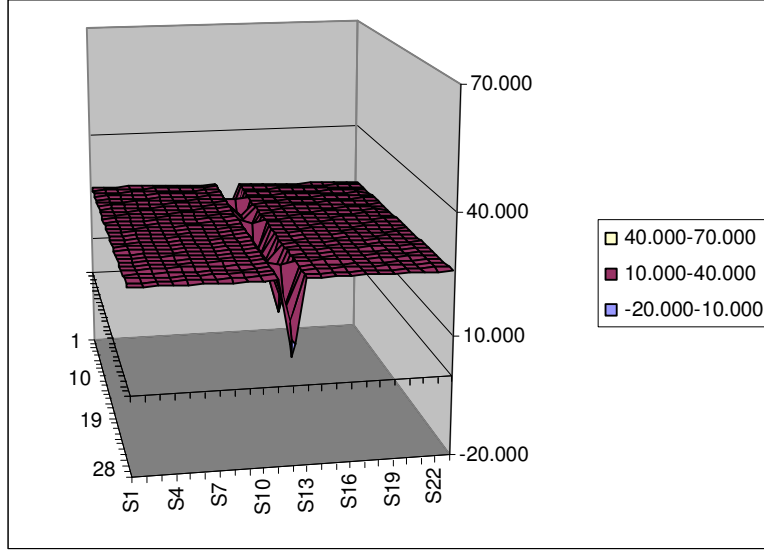
<u>İşin Adı</u>	<u>Süre (gün)</u>	<u>Kişi Sayısı</u>	<u>Adamxgün</u>
01.3 Section Perde taşıma ve düzeltme işleri	2	2	4
02.1 section Gv. Görder ve flor düzeltme işleri	8	2	16
02.3 Section Görder ve flor düzeltme işleri	10	2	20
02.2 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	10	2	20
02.2 Section posta düzeltme işleri	6	2	12
02.4 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	9	2	18
02.4 Section posta düzeltme işleri	6	2	12
02.4 Section perde taşıma ve düzeltme işleri	2	2	4
03.1 Section Görder ve Flor düzeltme işleri	8	2	16
03.1 Section Gv. Tülani -Kemere düzeltme işleri	7	2	14
03.1 Section posta düzeltme işleri	7	2	14
03.2 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	10	2	20
03.2 Section posta düzeltme işleri	6	2	12
03.3 Section Görder ve Flor düzeltme işleri	7	2	14
03.3 Section Gv. Tülani -Kemere düzeltme işleri	7	2	14
03.3 Section posta düzeltme işleri	7	2	14
03.4 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	6	2	12
03.4 Section posta düzeltme işleri	5	2	10
04.1 Section Görder ve Flor düzeltme işleri	8	2	16
04.1 Section Gv. Tülani -Kemere düzeltme işleri	8	2	16
04.1 Section posta düzeltme işleri	8	2	16
04.2 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	8	2	16
04.2 Section posta düzeltme işleri	8	2	16
04.3 Section Görder ve Flor düzeltme işleri	6	2	12
04.3 Section Gv. Tülani -Kemere düzeltme işleri	8	2	16
04.3 Section posta düzeltme işleri	8	2	16
04.4 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	6	2	12
04.4 Section posta düzeltme işleri	6	2	12
05.1 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	8	2	16
05.1 Section Görder ve Flor düzeltme işleri	10	2	20
05.1 Section posta düzeltme işleri	8	2	16
05.1 Section perde taşıma ve düzeltme işleri	2	2	4
06.1 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	6	2	12
06.1 Section perde düzeltme işleri	2	2	4
07.1 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	10	2	20
07.1 Section perde düzeltme işleri	3	2	6
08.1 Section Gv. Tülani ve kemere düzeltme işleri	10	2	20
08.1 Section perde düzeltme işleri	3	2	6
			614

Toplam adamxgün sayısı
1852

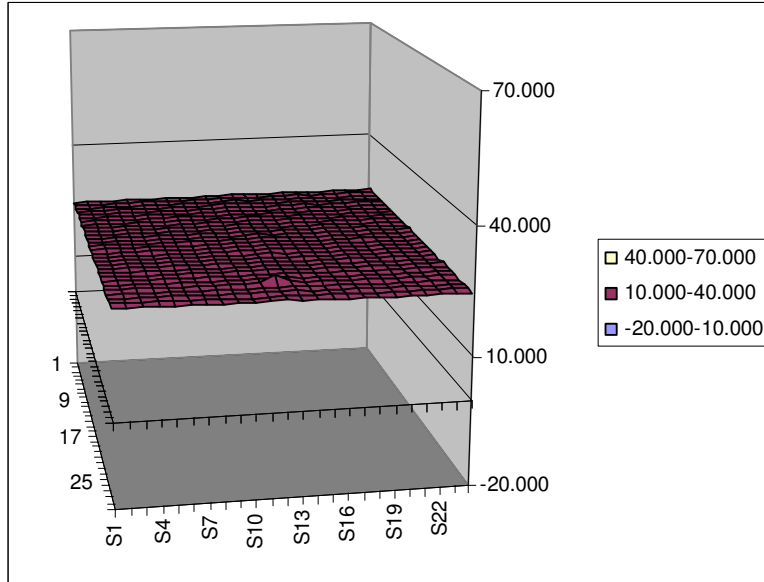
Düzeltilme işlerini toplam çıplak tekne imalatı içindeki miktarı(%)

35,15

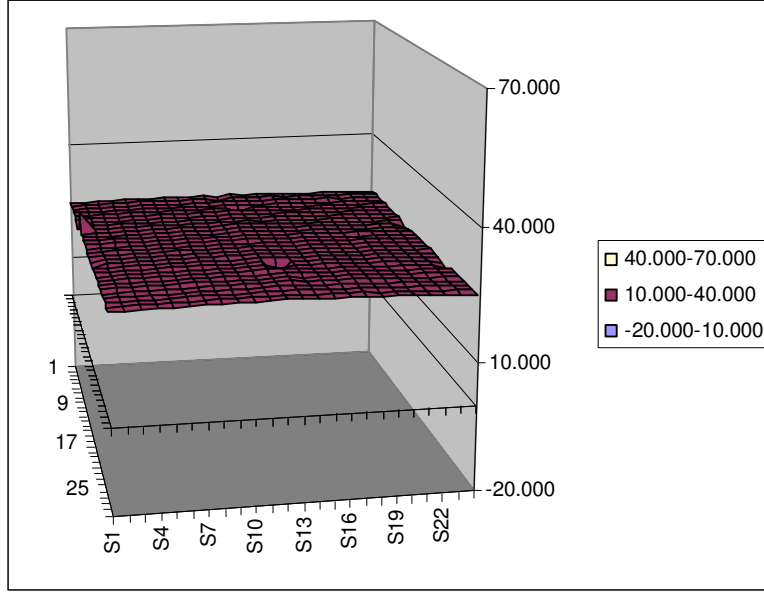
EK-B



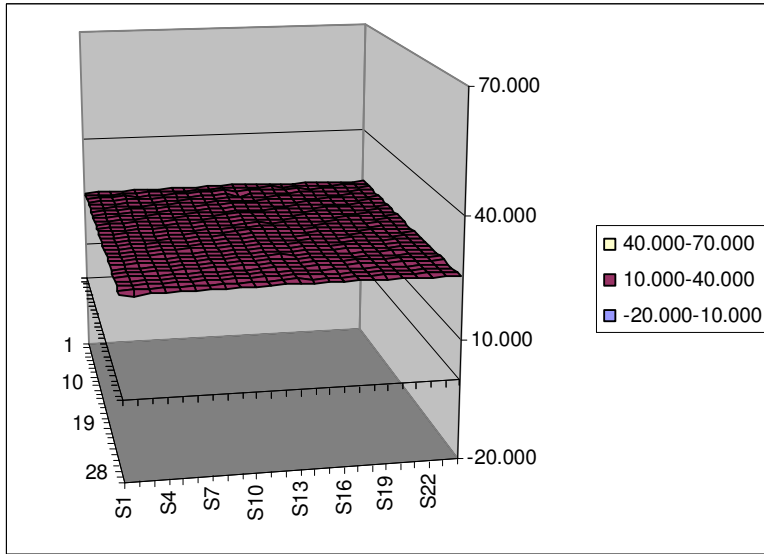
Şekil B.1: 1 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü



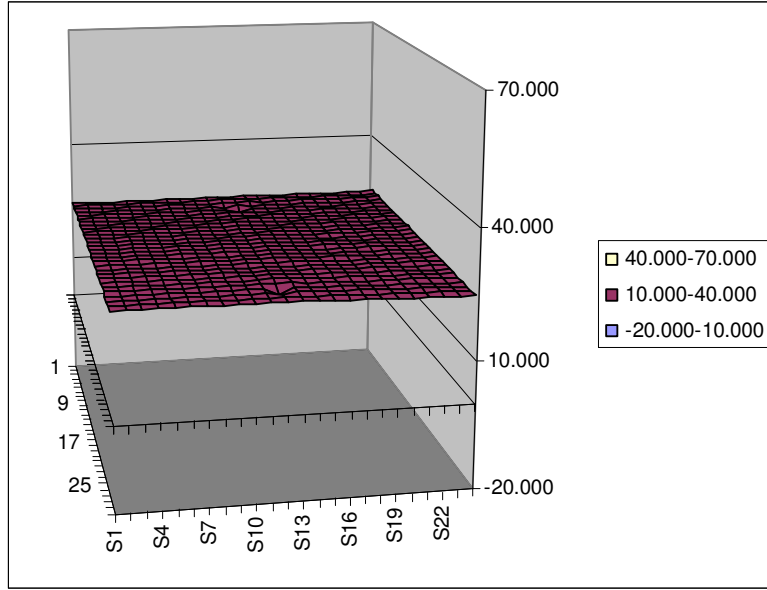
Şekil B.2: 2 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü



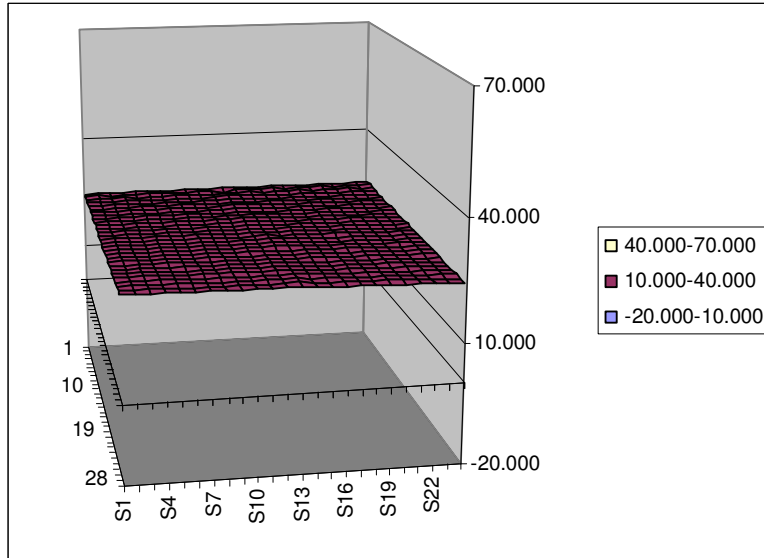
Şekil B.3: 3 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü



Şekil B.4: 4 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü

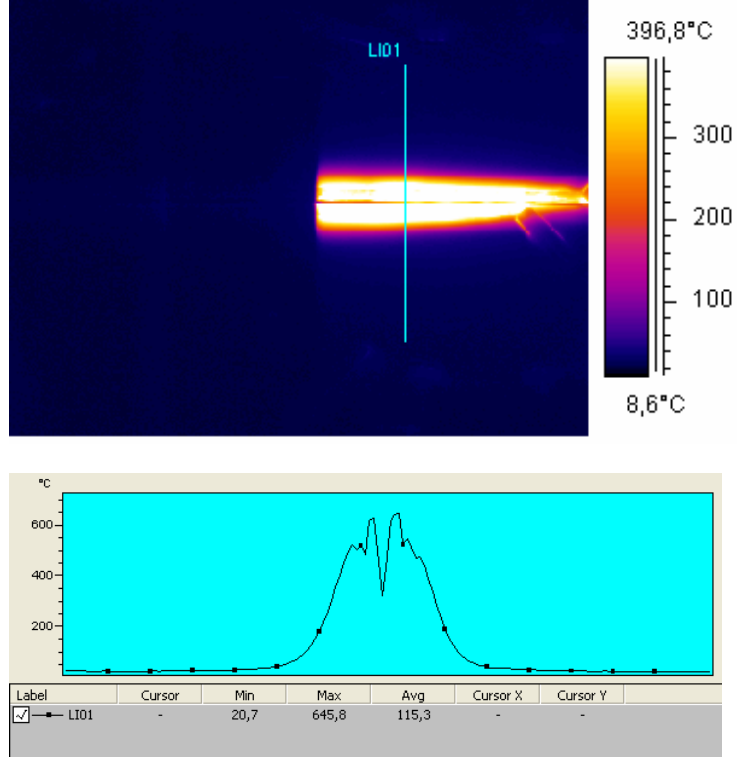


Şekil B.5: 5 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü

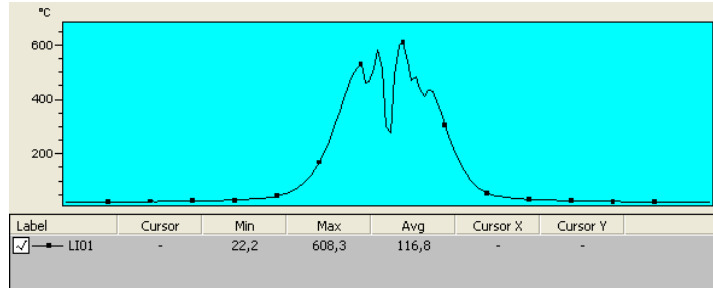
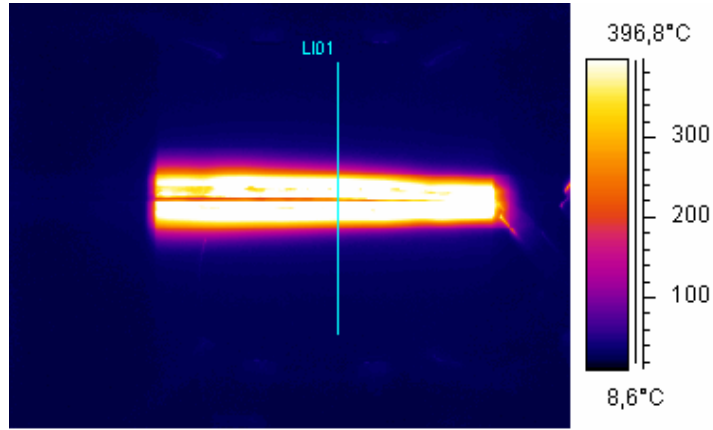


Şekil B.6: 6 numaralı parçanın kaynak öncesi lazer cihazıyla yüzey ölçümü

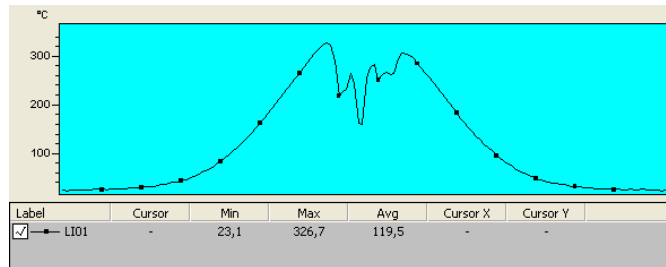
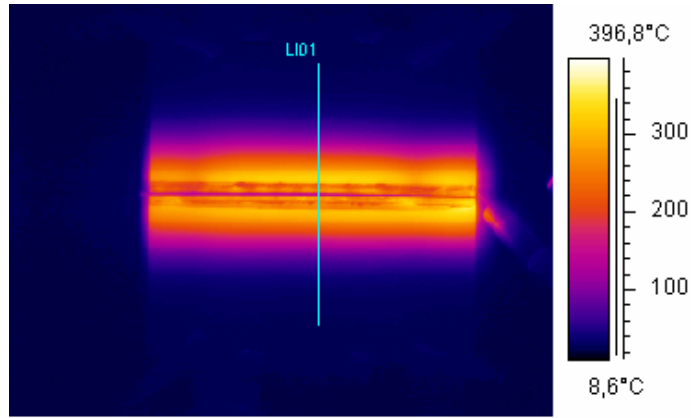
EK-C



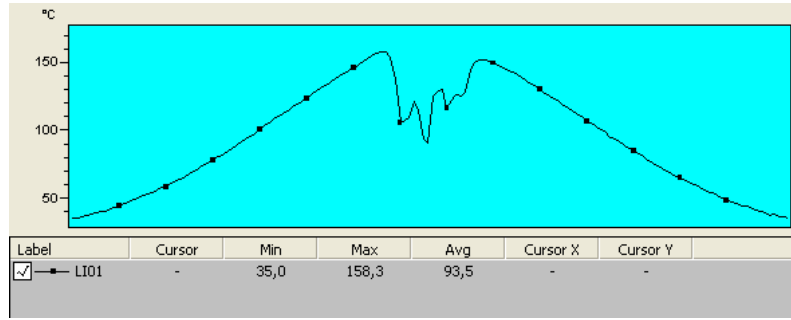
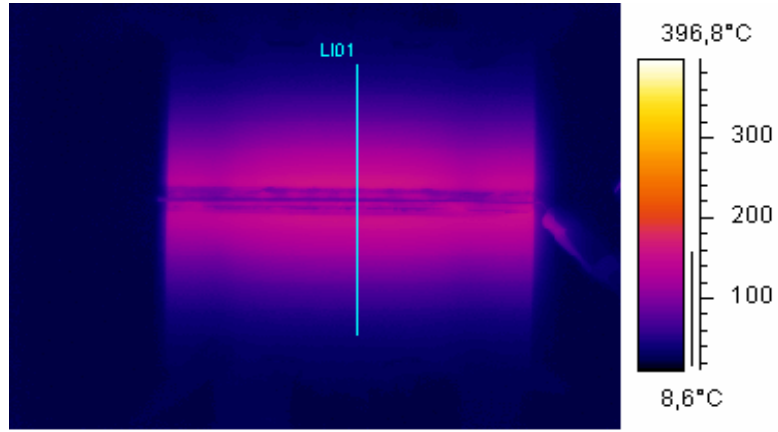
Şekil C.1: 1 numaralı deneyin kaynak esnasında LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



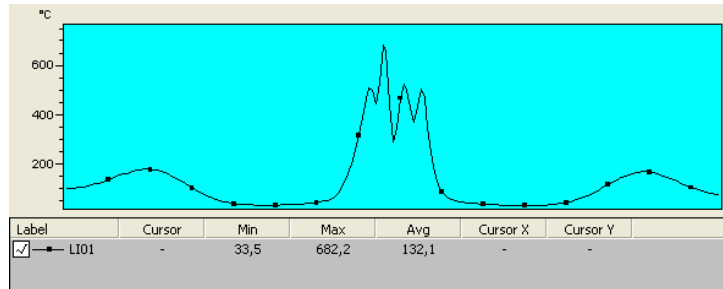
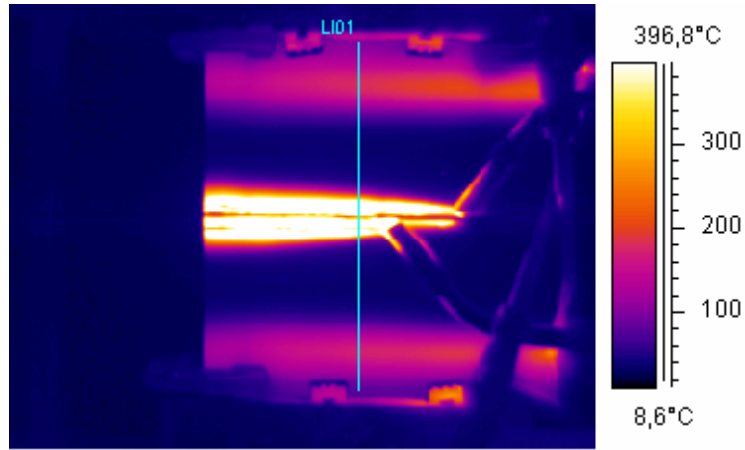
Şekil C.2: 1 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



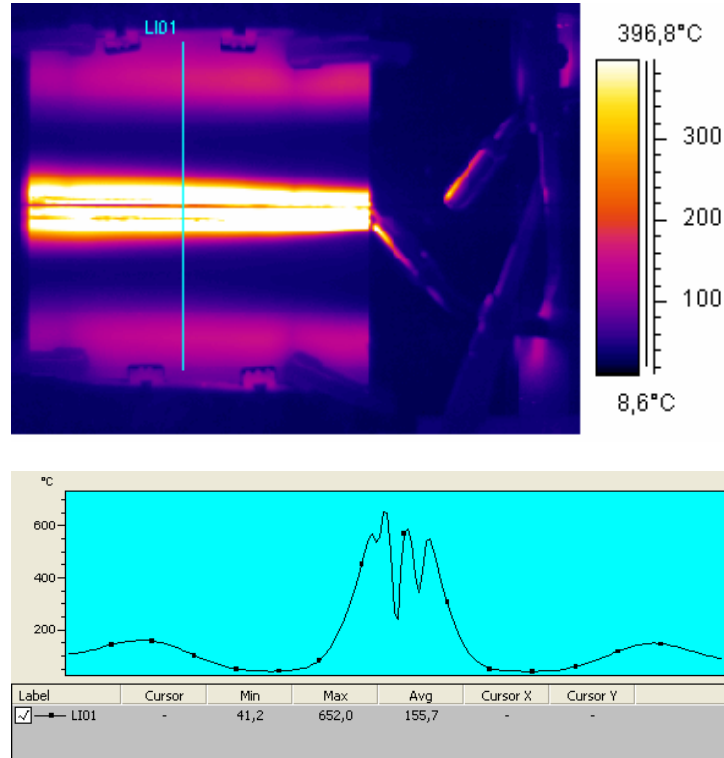
Şekil C.3: 1 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



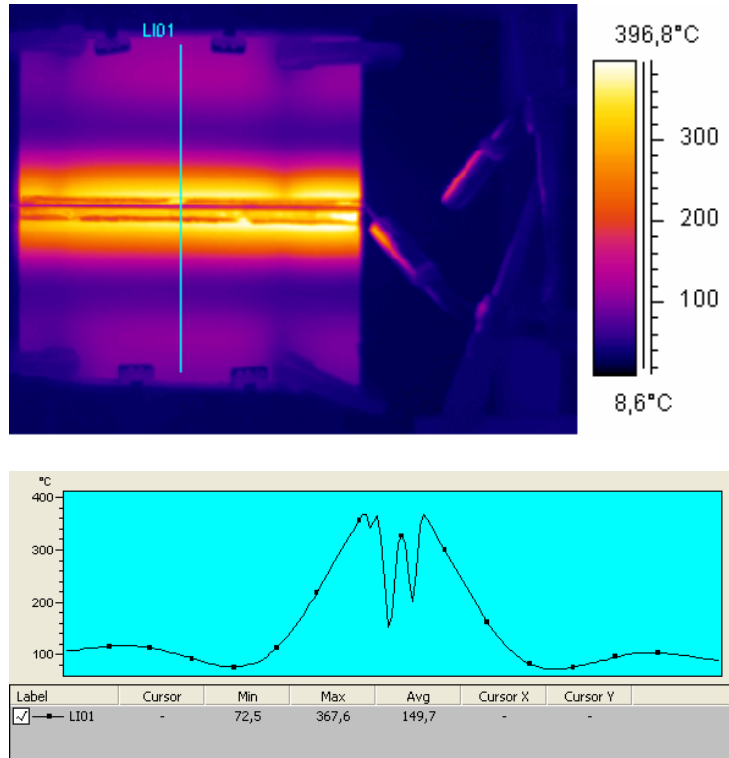
Şekil C.4: 1 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



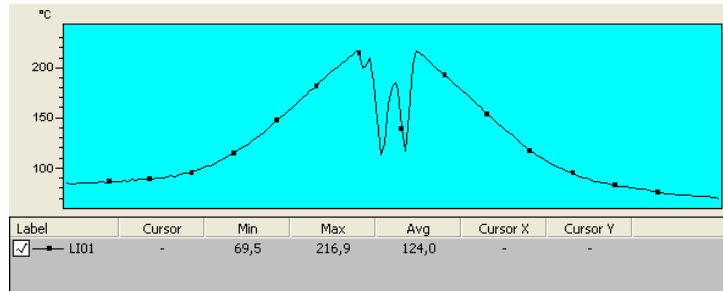
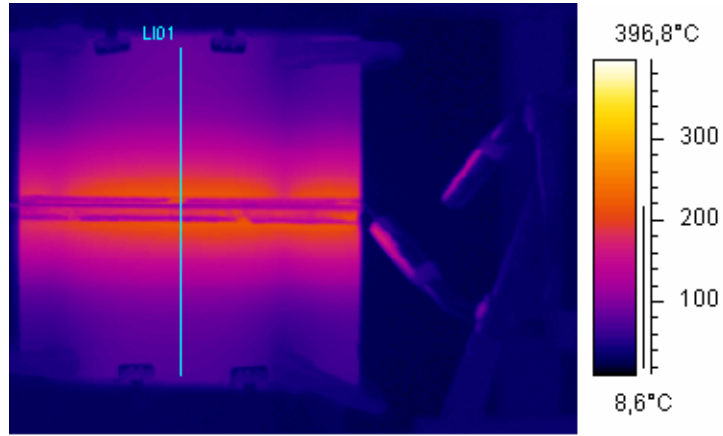
Şekil C.5: 3 numaralı deneyin kaynak esnasında LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



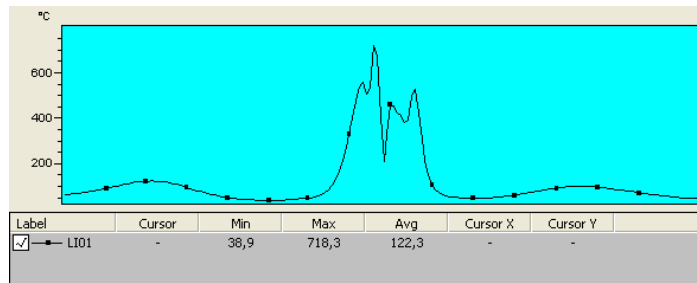
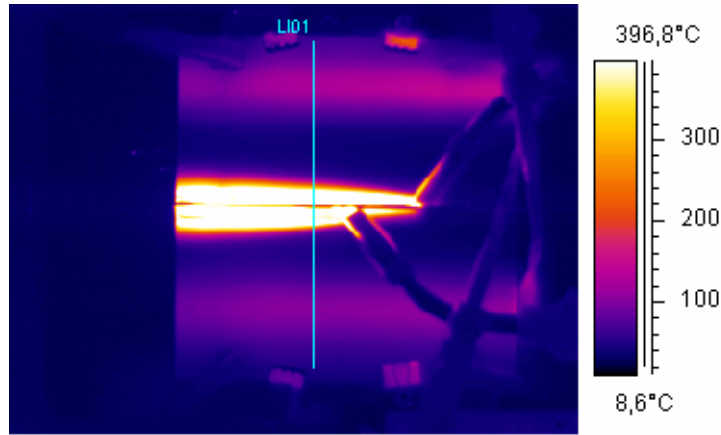
Şekil C.6: 3 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



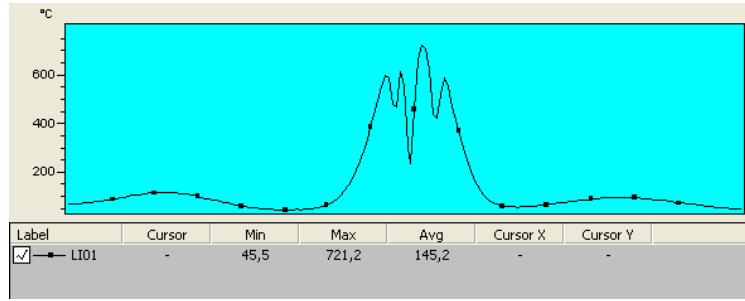
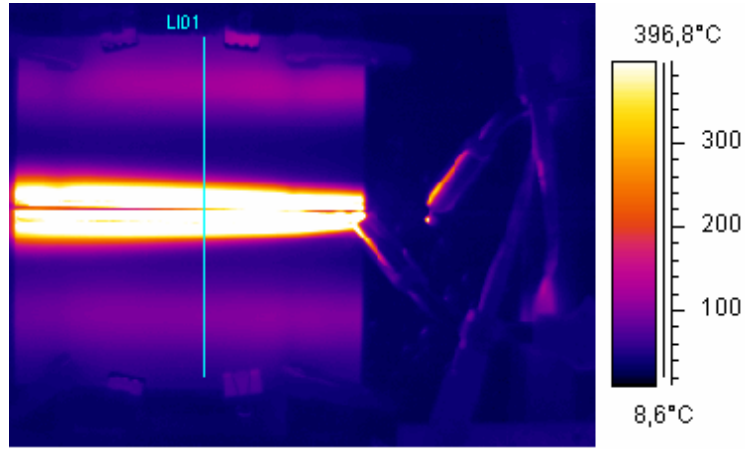
Şekil C.7: 3 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



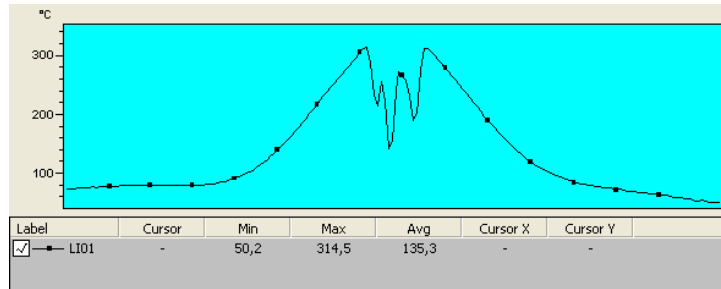
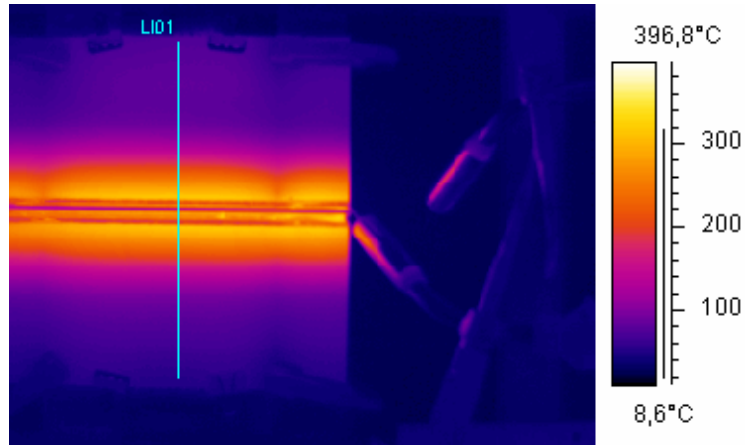
Şekil C.8: 3 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



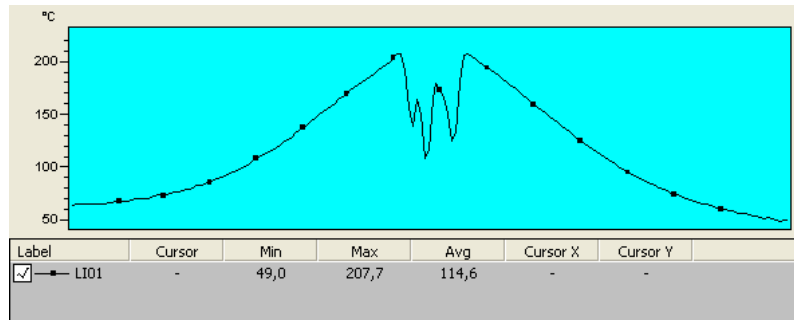
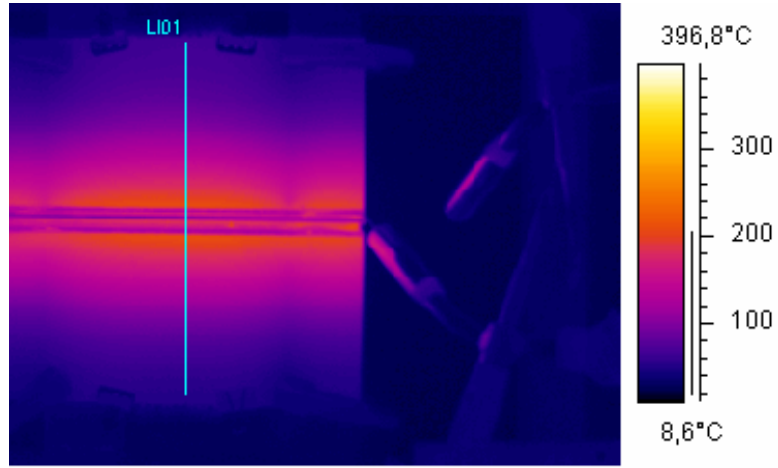
Şekil C.9: 5 numaralı deneyin kaynak esnasında LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



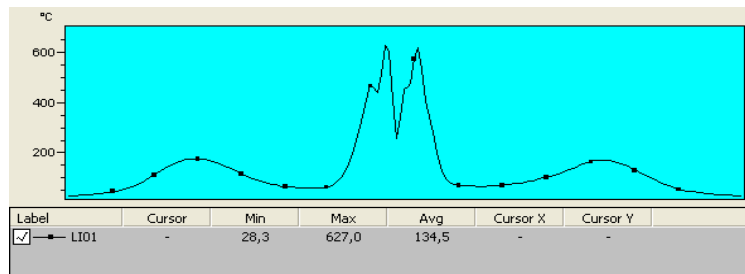
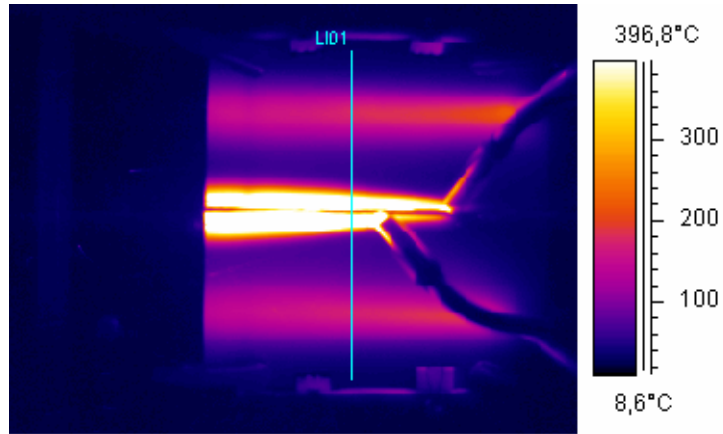
Şekil C.10: 5 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



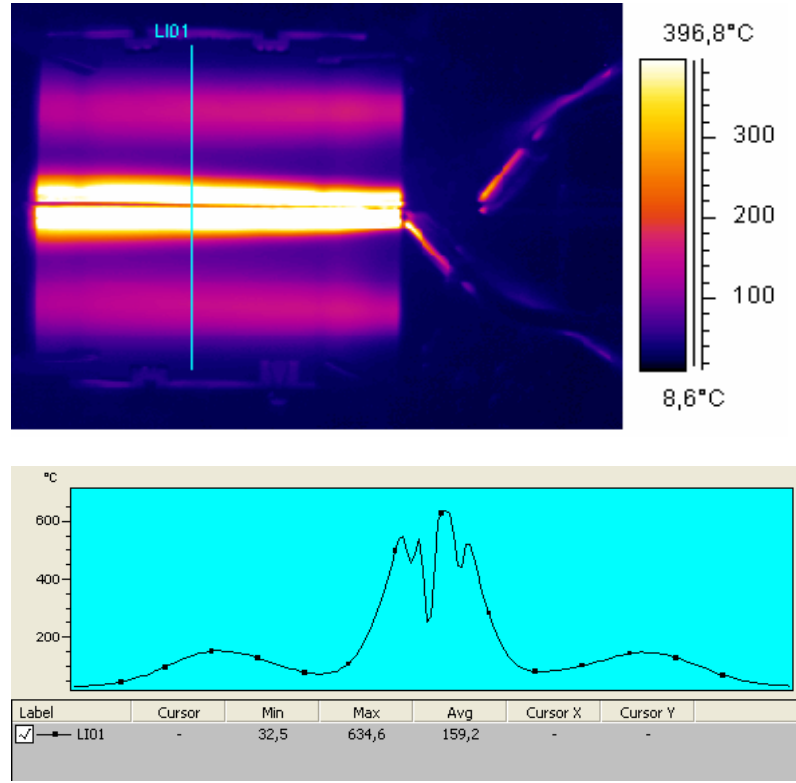
Şekil C.11: 5 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



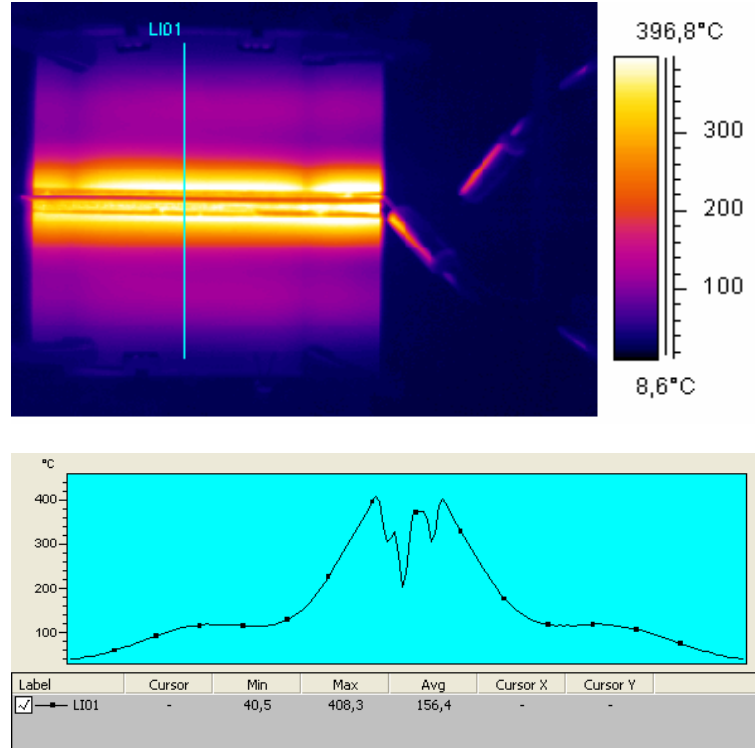
Şekil C.12: 5 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



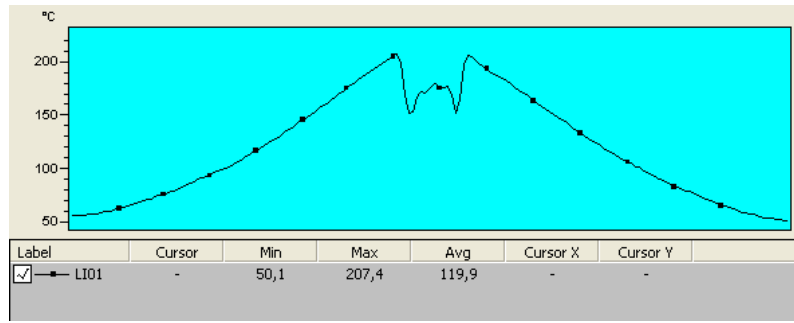
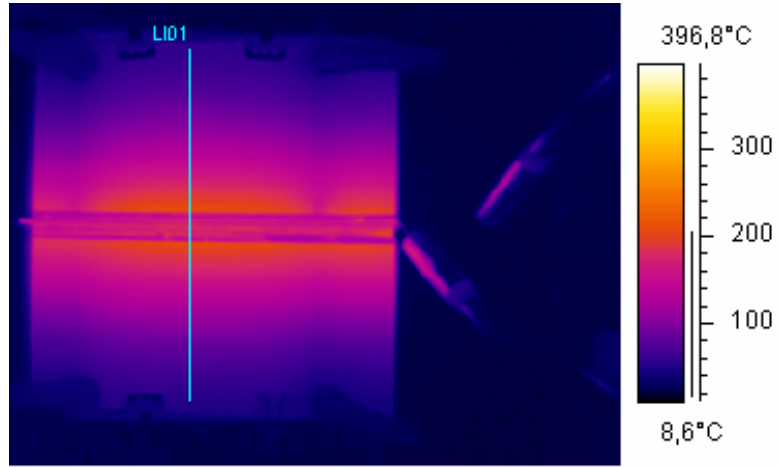
Şekil C.13: 6 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



Şekil C.14: 6 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



Şekil C.15: 6 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı



Şekil C.16: 6 numaralı deneyin kaynak sonrası soğuma periyodunda LI01 kesiti boyunca sıcaklık dağılımı

ÖZGEÇMİŞ

Murat İhsan YILMAZ, 1973 yılında Ankara’da doğmuştur. İlk, orta ve lise tahsilini İzmir’de tamamladıktan sonra, 1991 yılında girdiği 9 Eylül Üniversitesi Denizli Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 1995 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Pamukkale üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Konstrüksiyon ve İmalat bölümünde yüksek lisans çalışmasına başlamış ve bir yıl süre ile özel sektörde çalışmıştır. 1996 yılında, Pamukkale Üniversitesinde Konstrüksiyon ve İmalat bölümünde araştırma görevlisi olarak yüksek lisans çalışmasına devam ettikten sonra, 1997 yılında, yüksek lisans çalışmasını bitirerek anılan araştırma görevlisi kadrosundan ayrılmış ve akabinde Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı’nda teğmen rütbesiyle muvazzaf subay olarak göreve başlamıştır. Sırasıyla Gölcük Tersanesi, İzmir Sahil Güvenlik Onarım Destek Komutanlığı ve İstanbul Deniz Harp Okulu Komutanlığı’nda görev yaptıktan sonra, 2002 yılında atandığı Marmaris Aksaz Deniz Üssü’ndeki görevine, yüzbaşı rütbesinde devam etmektedir. Murat İhsan YILMAZ, evli olup bir kız çocuk babasıdır.