

**T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARK KAYNAK İŞLEMİ SONUCU OLUŞAN KALINTI
GERİLMELERİN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR
SİMÜLASYONU İLE İNCELENMESİ**

**Samet ŞEN
(141103720060372)**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEKATRONİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Nihat AKKUŞ
Yrd. Doç. Dr. Hüseyin KURT**

İSTANBUL 2009

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında , robot otomasyonu kaynak işlemleri sonucu oluşan iç gerilmelerin ölçülmesi için yaygın olarak kullanılan deneysel metot ile yazılım teknolojisinin gelişmesi ile kullanılmaya başlanan simülasyon yönteminin uygulaması yapılmıştır.

Çalışmalarım süresince yardım ve fedakarlıklarını esirgemeyen, bilgi ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Nihat AKKUŞ' a ve Yrd. Doç. Dr. Hüseyin KURT' a teknik konularda katkıda bulunan Arş. Gör. Ersin TOPTAŞ ' a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca sabır ve desteğiyle her zaman yanımda olan çok değerli aileme ve yardımlarını esirgemeyen dönem arkadaşım Tuncay ATMACA' ya içten teşekkür ederim.

Haziran, 2009

Samet ŞEN

İÇİNDEKİLER

	<u>SAYFA</u>
ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
SEMBOLLER	vii
ŞEKİLLER	viii
TABLolar	xi
BÖLÜM I	1
I.1. GİRİŞ.....	1
I.2. AMAÇ	3
BÖLÜM II.....	4
II.1. KAYNAKLI PARÇALARDA MEYDANA GELEN GERİLMELER VE DİSTORSİYONLAR	4
II.1.1. Gerilme ve Distorsiyonların Esasları.....	4
II.1.2. Kaynak Gerilmelerinin ve Çarpılmalarının Meydana Gelmesine Tesir Eden Faktörler	5
II.1.2.1. Isıtma Gerilmeleri	5
II.1.2.2. Konstrüksiyonun Rijitliği	5
II.1.2.3. Malzemenin Metalürjik Özellikleri	6
II.1.3. Kaynak Gerilmeleri	6
II.1.3.1. Enine Gerilmeler.....	6
II.1.3.2. Boylamasına Gerilmeler	7
II.1.3.3. İç Köşe Dikişlerinde Kendini Çekme Gerilmeleri.....	7
II.1.4. Kendini Çekme Momenti	7
II.2. GERİLMELERİN SEBEPLERİ.....	8
II.2.1. Makroskopik ve Mikroskopik Ölçekteki Artık Gerilmeler	8
II.2.2. Kalıntı Gerilmelerin Oluşumu	9

II.2.2.1. Yapısal Uyuşmazlıktan Doğan Kalıntı Gerilmeler.....	10
II.2.2.2. Eşit Dağılmayan Plastik Şekil Değişimine Bağlı Kalıntı Gerilmeler.....	15
II.2.3. Kaynak Sırasında Oluşan Termal Gerilmeler ve Metal Hareketleri.....	15
II.3. ROBOTLAR İLE YAPILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	21
II.3.1. Nokta Direnç Kaynağı.....	21
II.3.2. Ark Kaynağı.....	23
II.3.2.1. Robotlarda Ark Kaynağı Donanımları.....	24
II.3.2.2. Ark Kaynağı Robotunda Olması Gereken Özellikler.....	25
II.3.3. Manuel ve Robotik Kaynağın Karşılaştırılması	26
II.4. KALINTI GERİLME ÖLÇME METOTLARI.....	27
II.4.1. Kalıcı Gerilme Ölçüm Metotlarının Sınıflandırılması.....	30
II.4.1.1. Mekaniksel Metotlar	31
II.4.1.2 Kesit Alma ve Katman Kaldırma Metotları.....	32
II.5. KALINTI GERİLMELERİN “ KÖR DELİK YÖNTEMİ ” İLE SAPTANMASI.....	33
II.5.1. Delik Delme Tekniğinin Gelişimi	33
II.5.2. Kör Delik Yönteminin Teorisi.....	34
II.5.3. Delme Kılavuzları.....	38
II.5.4. Kör Delik Metodunun Uygulanması	39
II.6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	45
II.6.1. Sonlu Elemanlar Analizi.....	45
II.6.2. Sonlu Elemanlar Metodunun (FEM&FEA) Tarihsel Gelişimi.....	45
II.7. KAYNAK İŞLEMİNİN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU.....	46
II.7.1. Isıl Model Analizi	46
II.7.2. Mekanik Model Analizi.....	48
BÖLÜM III.....	50
III.1. SICAKLIK DAĞILIMININ ÖLÇÜMÜ İÇİN MALZEME VE DENEYSEL KURULUM	50
III.1.1. Esas malzeme	51
III.1.2. İlave Metal (tel elektrod).....	51
III.1.3. Kullanılan Koruyucu Gazlar	52
III.1.4. Kullanılan Kaynak Robotu.....	52
III.1.5. Ark Kaynağı Bağlantı ve Uygulaması	52

III.1.6. Kullanılan Araç ve Gereçler.....	53
III.1.7. Kaynaklı Levhaların Görsel İncelenmesi.....	56
III.1.8. Deney Numunesi Çıkartma Esasları	57
III.2.TERMOKUPUL İLE SICAKLIK ÖLÇÜMÜNÜN	
DEĞERLENDİRİLMESİ.....	59
III.2.1. Sıcaklık Zaman Grafikleri.....	59
III.3. ARK KAYNAĞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE	
SİMÜLASYONU (FEM)	60
III.3.1. MSC. Marc’ da Kaynak Modellemesi İşlem Basamakları.....	60
III.3.2. Modelin Oluşturulması ve Ağ örülmesi.....	61
III.3.3. Geometri Özelliklerinin Belirlenmesi.....	61
III.3.4. Malzeme Özellikleri.....	62
III.3.5. Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	62
III.3.6. Sürtünme Modelini Oluşturma.....	63
III.4. FEM SİMÜLASYON SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	65
III.4.1. Sıcaklık Zaman Grafikleri.....	65
III.5. KALINTI GERİLMELERİN ÖLÇÜMÜ İÇİN DENEYSEL	
KURULUM.....	68
III.5.1. Strain Gage Uygulaması	68
III.5.2. Kullanılan Araç ve Gereçler.....	69
III.5.3. Kalıntı Gerilme Ölçümü Deneysel Uygulama	70
III.6. KÖR DELİK YÖNTEMİ İLE KALINTI GERİLME DENEY	
SONUÇLARI.....	76
III.6.1. 7 mm/sn Kaynak İlerleme Hızında Numune İçin Deney Sonuçları.....	76
III.6.2. 10 mm/sn Kaynak İlerleme Hızında Numune İçin Deney Sonuçları	78
BÖLÜM IV.VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	80
IV.1. ARK KAYNAK İŞLEMİ SONUCU OLUŞAN İÇ GERİLMELERİN	
DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER.....	80
KAYNAKLAR.....	82
EKLER.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	87

ÖZET

ARK KAYNAK İŞLEMİ SONUCU OLUŞAN KALINTI GERİLMELERİN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR SİMÜLASYONU İLE İNCELENMESİ

Günümüz sanayinde firmalar rekabet güçlerini arttırabilmek için robot otomasyon sistemlerini uygulamaya koymaktadırlar. Böylece robotik kaynak uygulamaları her geçen gün artan üretim miktarları ve kalite ihtiyacına bağlı olarak gelişmektedir. Kaynak esnasında yüksek ısı girdisi metalin genleşmesine sebebiyet verir ve soğumaya bırakılınca metal büzölmeye çalışır. Bu büzölme sıcaklığı daha az olan bölge tarafından engellenerek, kalıntı gerilmelerin oluşmasına neden olur. Kalıntı gerilmeler parçanın kullanılma esnasında hasar görmesine sebebiyet verebilmektedir.

Bu çalışmada, sabitlenmiş aynı malzemenin ve aynı ebatlardaki saclar robotlu kaynak sistemi kullanılarak 4 mm/sn, 7 mm/ sn ve 10 mm/sn hızlarında diğer parametreler sabit olacak şekilde kaynatılmıştır. Kaynak esnasında termokupul kullanılarak sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Kaynak işlemi sonrasında oda sıcaklığına kadar sacın soğuması beklenmiş ve ısı girdisine bağlı olarak oluşan kalıntı gerilmeler delik delme metodu kullanılarak incelenmiştir.

Aynı ark kaynağı için MSC. Marc Mentat 2007 yazılımı kullanılarak simülasyon modellemesi yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile 3 boyutlu modellemesi yapılan malzemenin üzerinden Von Mises gerilim değerleri, erişilen maksimum sıcaklık ve ısınma hızı incelenmiştir.

Deneyle neticesinde, düşük hızda yapılan kaynaklı birleştirme işleminde termokupul ile sıcaklık ölçümü sonucuna göre yüksek sıcaklık değeri elde edilmiştir. Kalıntı gerilme ölçüm deneyinde ise kaynak hızı arttıkça daha düşük gerilim ve kalıntı gerilme değerleri elde edildiği görölmüştür.

Deneysel yolla elde edilen değerler ile sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre kaynak hızı arttıkça ısı girdisi azalmaktadır. Kaynaklı birleştirmede ısı girdisi azaldıkça kalıntı gerilmede azalmaktadır.

Haziran, 2009

Samet ŞEN

ABSTRACT

AN INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESS OCCURRING AS A RESULT OF ARC WELDING OPERATION BY EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT SIMULATION METHODS

Recent years, firms have been applying robot automation system to increase their power in the competition. So, robotic welding applications have improved depending on amount of production and need for quality that is increasing day by day. During welding, high heat flux causes expansion of metal. And after metal is left for cooling, then it strives to shrink. Since that contraction is obstructed by the area that has less heat, residual stress occurs. Residual stress could cause damage on component during usage.

In this study, fixed sheet metal, which are made of same material and at the same dimensions, are welded with speeds of 4 mm/sn, 7 mm/sn and 10 mm/sn by using robotic welding system. During welding process, measurement of heat was done by using thermocouple. After welding process, it is waited for a while for cooling of sheet metal down to room temperature. And residual stress occurred due to heat flux was observed by using hole drilling method.

Simulation modelling for the same arc welding was done by Marc Mentat 2007 software. Von Mises stress values, reached maximum temperature and heat speed was observed via material whose 3-dimensional modelling is done by finite element method.

As a result of experiment, high temperature values were measured at welded combining operation that was done slower than the measurement results by the help of thermocouple. Depending on that when welding speed increase less stress and residual stress values are obtained in residual stress measurement experiment.

Finally, and values gathered by experimental way were compared with values gathered by finite element method. According to results, as welding speed increases, heat flux decreases. At the welded combining as heat flux decreases, residual stress decreases too.

SEMBOLLER

- a_F : Yüzeysel genleşme katsayısı ($\text{mm}^2 / ^\circ\text{C}$)
- a_L : Isıl uzama katsayısı ($\text{mm} / ^\circ\text{C}$)
- α : Isı genleşme katsayısı
- ΔF : Levhanın ısı etkisiyle yüzeysel genleşme miktarı (mm^2)
- Δl : Çubuğun uzama miktarı (mm)
- Δt : Başlangıç ve son sıcaklıklar arasındaki fark ($^\circ\text{C}$)
- C : Özgül ısı
- E : Elastisite Modülü
- ε : Birim şekil değiştirme
- F : Levhanın ısıtılmadan önceki alanı (mm^2)
- h_c : Konveksiyon ile ısı transferi katsayısı
- h_r : Radyasyon ile ısı transferi katsayısı
- l : Çubuğun ısıtılmadan önceki boyu (mm)
- p : Yoğunluk
- R : Gage merkezinin çapı
- R_o : Delinecek olan delik çapı
- R : Uygunluk değeri
- q_s : Sınır ısı akışı
- Q : İç ısı oranı
- T_∞ : Çevre sıcaklığı
- T_r : Radyasyon ısı kaynağı sıcaklığını tanımlamaktadır.
- v : Kaynak hızı
- ν : Poisson oranı
- σ : Gerilme Değeri

ŞEKİLLER

SAYFA

Şekil II.1. Metalik Bir Konstrüksiyonun Isının Etkisi İle Uzayıp Kısılması.....	4
Şekil II.2. Konstrüktif Tedbirler ile Rijiditenin Artırılması	6
Şekil II.3. Bir V-alın Birleştirmesinde Boylamasına ve Enlemesine Gerilmeler.....	6
Şekil II.4. Sıcaklık Dağılımına Bağlı Olarak Boylamasına Gerilme Dağılımı	7
Şekil II.5. İç Köşe Dikişlerinde Kendini Çekme Tesiri.....	7
Şekil II.6. Çeşitli Durumlarda Kendini Çekme Momentinin Değeri	8
Şekil II.7. Değişik Makroskopik Ölçekteki Kalıntı Gerilmeler [11].....	9
Şekil II.8. Farklı Uzunluktaki Çubukların Uç Bölgelerinden Birleştirilmeleri Sonucu Oluşan Artık Gerilmeler.....	10
Şekil II.9. Tespit Edilmiş Çubuğun Isıtılmasının Artık Gerilme Üzerine Etkisi [18]11	
Şekil II.10. Kalıntı Gerilmelerin Gözlendiği Değişik Parçalar [11].....	13
Şekil II.11. Bir Çelik Çubuğun Tespit Edilerek Isıtılıp Sonra Soğutulması	14
Şekil II.12. Köse Kaynağında Uzunlamasına ve Genişlemesine Gerilmeler	15
Şekil II.13. Kaynak Esnasında Sıcaklık ve Gerilim Dağılımı [12]	16
Şekil II.14 Tek Pasolu Alın Kaynak Birleştirilmesinde Kalıntı Gerilme Dağılımı [12]	19
Şekil II.15. Dikdörtgen Bir Levhanın Bir Ucundan Diğer Ucuna Hareket Eden Isı Kaynağı Tesiri İle Ters Yüzün Merkezinde Çarpılma Miktarı	20
Şekil II.16. Otomobil Karoserinde Yapılan Kaynak İşlemi [21]	21
Şekil II.17. Nokta Kaynağı Robotu [21]	22
Şekil II.18. KUKA Arc Kaynak Robotu [22].....	23
Şekil II.19. Ark Kaynak Robot Donatımı.....	24
Şekil II.20. Kör Delik Yönteminde Gerilme ve Birim Uzamalar [6].....	34
Şekil II.21. Delik Çevresindeki Birim Uzama Ölçerlerin Konumu [6].....	35
Şekil II.22 MTS 3000 Delik Delme Aracının Mikroskopla Odaklama Aparatlarının Montaj Resmi [14]	38
Şekil II.23. MTS 3000 Delik Delme Aracının Kontrol Ünitesi [14].....	39
Şekil II.24. Strain Gage (Gerinim ölçerin) Yapısı.....	40
Şekil II.25. Temel Ölçüm Tasarımı [23]	41

Şekil II.26. Sol Taraftaki Grafik UM ölçerin ve Sağ Taraftaki Grafik RE ve RK Ölçerlerin Genel Temsilidir. [23].....	42
Şekil II.27. Gerilim Ölçer Tiplerine Göre Gerilim Duyarlılığı Grafikleri [23].....	42
Şekil II.28. Tipik Delik Delme Rozet Tipleri [15]	43
Şekil II.29. Type A Delta Oryantasyon Type B Konfigürasyon (ASTM Tespiti) [16]	43
Şekil II.30. Tipik Delik Geometrilerinin Şematik Gösterimi	44
Şekil II.31. Tipik Ticari Delik Delme Donanımları	44
Şekil III.1. Deneye Ait Numune Boyutlar.....	51
Şekil III.2. Deney Malzemesinin Sabitlenmesi İçin Kullanılan Fikstürün Şematik Gösterimi	53
Şekil III.3. Deney Malzemesinin Sabitlenmesi İçin Bağlama Aparatı	54
Şekil III.4. Bağlama Aparatının Sabitlenmesi ve Malzemenin Bağlanmış Hali.....	54
Şekil III.5. Deney İçin Kullanılan Veri Toplama Cihazı ve Bilgisayar Bağlantısının Gösterimi	55
Şekil III.6. Termokupul İle Ölçümleri Yapılan Noktaların Kaynak Merkezinden Olan Uzaklıkları	55
Şekil III.7. Deney Malzemesi Üzerinde Termokupul Ölçüm İşleminin Yapılması. 56	
Şekil III.8. 4 mm/sn Hızında Kaynak İşlemi Yapılmış Numunenin Gösterimi	58
Şekil III.9. 7 mm/sn Hızında Kaynak İşlemi Yapılmış Numunenin Gösterimi	58
Şekil III.10. 10 mm/sn Hızında Kaynak İşlemi Yapılmış Numunenin Gösterimi ...	58
Şekil III.11. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki ($V=4$ mm/sn).....	59
Şekil III.12. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki ($V=7$ mm/sn).....	59
Şekil III.13. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki ($V=10$ mm/sn).....	59
Şekil III.14. Ark Kaynak İçin Modelin İki Boyutlu Görünüşü	61
Şekil III.16. Marc Mentat Sınır Şartlarının Ana Hatları	63
Şekil III.17. Kaynak İşlemi Sonrası Sıcaklık Ölçümü Yapılan Noktalar ($V=4$ mm/sn)	64
Şekil III.18. Kaynak İşlemi Sonrası Von Mises Ölçümü Hat 1 ($V=4$ mm/sn)	64
Şekil III.19. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki ($V=4$ mm/sn).....	65
Şekil III.20. Deney ile Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması ($V=4$ mm/sn)	65
Şekil III.21. Hat 1 Boyunca Ölçülen Equivalent Von Mises Değeri ($V=4$ mm/sn)	65
Şekil III.22. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki ($V=7$ mm/sn).....	66

Şekil III.23. Deneyle Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması ($V=7$ mm/sn)	66
Şekil III.24. Hat 1 Boyunca Ölçülen Equivalent Von Mises Değeri ($V=7$ mm/sn)	66
Şekil III.25. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki ($V=10$ mm/sn)	67
Şekil III.26. Deneyle Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması ($V=10$ mm/sn) ...	67
Şekil III.28. Numune Yüzeyinin Temizlenmesi	68
Şekil III.29. Strain Gage 'in Bant Üzerine Yerleştirilmesi ve Sökülmesi.....	68
Şekil III.30. Numuneye Strain Gage' in Bağlanması.....	69
Şekil III.31. Numune Üzerine Gerilme Ölçme Rozetinin Yapıştırılması	69
Şekil III.32. Numune Malzeme Üzerinde Strain Gage' lerin Konumu.....	70
Şekil III.33. Çeyrek Whestone Köprüsü Şematik Görünümü.....	71
Şekil III.34. Çeyrek Whestone Köprüsü Data Loger Yerleşimi	71
Şekil III.35. Terminal Çıkış Kablolarının Data Loger Üzerinde Bağlantısı	71
Şekil III.36. RS200 Kalıntı Gerilme Ölçme Aparatının Odaklama Ayar Resmi	72
Şekil III.37. RS200 Kalıntı Gerilme Ölçme Aparatının Sonlu Delme Ayar Resmi.	73
Şekil III.38. RS200 Kalıntı Gerilme Aparatının Hızlı Türbinin Montajı.....	73
Şekil III.39. Derinlik-Gerinim Arasındaki İlişki (7mm/sn - 1 nolu Gerinim)	76
Şekil III.40. Derinlik-Gerinim Arasındaki İlişki (7mm/sn - 2 nolu Gerinim)	76
Şekil III.41. Derinlik-Gerinim Arasındaki İlişki (7mm/sn - 3 nolu Gerinim)	77
Şekil III.42. Kaynağa Dik Konumdaki Derinlik-Kalıntı Gerilme Arasındaki İlişki.	77
Şekil III.43. Kaynağa Paralel Konumdaki Derinlik-Kalıntı Gerilme Arasındaki İlişki.....	77
Şekil III.44. Derinlik-Gerinim Arasındaki İlişki (10mm/sn - 1 nolu Gerinim)	78
Şekil III.45. Derinlik-Gerinim Arasındaki İlişki (10mm/sn - 2 nolu Gerinim)	78
Şekil III.46. Derinlik-Gerinim Arasındaki İlişki (10mm/sn - 3 nolu Gerinim)	79
Şekil III.47. Kaynağa Dik Konumdaki Derinlik-Kalıntı Gerilme Arasındaki İlişki.	79
Şekil III.48. Kaynağa Paralel Konumdaki Derinlik-Kalıntı Gerilme Arasındaki İlişki.....	79

TABLolar

Tablo II.1. Üretim Yöntemlerinin Parça Yüzeyindeki Kalıntı Gerilmeler [19].....	10
Tablo II.2. Kalıntı Gerilimini Ölçmede Kullanılan Yöntemler [13].....	28
Tablo II.3. Kaynaklı Yapılarda Kalıntı Gerilme Ölçümünde Kullanılan Gerilme- Gevşeme Tekniklerinin Uygulamaları, Avantaj ve Dezavantajları [12]	29
Tablo II.4. 90° lik (CEA-XX-062UM-120) Kalıntı Gerinim ölçme Rozeti Özellikleri [17]	40
Tablo II.5. A Tipi Rozet için Katsayılar ASTM E837-99 [23].....	41
Tablo III.1. Kullanılan Malzemenin Kimyasal Özellikleri [25]	51
Tablo III.2. Kullanılan Malzemenin Mekanik Özellikleri [25]	51
Tablo III.3. DeneYlerde kullanılan EN 440'a (DIN 8559) göre imal edilmiş tel elektrotların kimyasal bileşimi	52
Tablo III.4. DeneYlerde kullanılan EN 440' a (DIN 8559) göre imal edilmiş tel elektrotların Mekanik özellikleri	52
Tablo III.5. Kaynak Robotunun Teknik özellikleri [28].....	52
Tablo III.6. Alın Birleştirmede Kullanılan Kaynak Parametreleri	53
Tablo III.7. Kaynak akış ve hacim değerleri	62
Tablo III.8. H-Drill Programında kullanılan değerler.....	74
Tablo III.9. Kör delik yöntemi uygulamasında hesaplanan büyüklükler (7 mm/sn)	75
Tablo III.10. Kör delik yöntemi uygulamasında hesaplanan büyüklükler (10 mm/sn)	75

BÖLÜM I

GİRİŞ ve AMAÇ

I.1. GİRİŞ

Yapısal bir parçanın ömrü, genellikle parça içerisindeki bozukluklar parçanın maruz kaldığı dış gerilmeler ve kalıntı gerilmelerden etkilenir. Kalıntı gerilmeler üretim ve işlem sırasında oluşabildikleri gibi servis sırasında da oluşabilirler. Bu gerilmeler bir dış yük uygulaması olmaksızın üniform sıcaklık şartları altında parçanın içerisinde kalıntı olarak var olan ve kendi kendini dengeleyen gerilmeler olarak tanımlanabilirler. Hemen hemen üretilen tüm parçalar, malzeme özelliklerini ve şeklini değiştiren herhangi bir işlem tarafından oluşturulan, az da olsa kalıntı gerilmelere sahiptirler. Malzeme, işleme prosesi, montaj ve servis sırasında karşılaşılabilecek etkilerin karmaşık bir bileşimi ile oluşan bu gerilmeler önceden kolayca tahmin edilemezler. Ancak servis yükleri ile birleştikleri zaman malzemenin kırılmasına neden olacak aşırı bozukluklara yol açabilirler.

Kalıntı gerilme içeren bir iş parçası üzerinden gerilmeli bir bölge kaldırılırsa kalıntı gerilmeler yeni bir denge durumuna gelirler. Bu yeni denge durumunda iş parçası şekil değiştirir. Ayrıca akma noktası karakteristiğine sahip bir malzeme için kalıntı gerilmeler ön gerilme durumuna benzer etki ederler ve akma mukavemeti seviyesini değiştirirler. Sonuç olarak mukavemet oldukça değişir. Bu durum, değişken yükleme sırasında ortalama kalıntı gerilmedeki değişimle açıklanabilir. [1]

Aşağıdaki her biri ısı işlemlerde boyutsal değişiklikleri ve artık gerilme modellerini etkileyen beş adımı içerir.

- 1- Metal işleme, makine ile işleme ve diğer şekillendirme işlemleri
- 2- Bileşeni ısıtmak
- 3- Through-heating, çözültileştirme ve karbonlama ve nitritleme gibi ısı kimyasal işlemler için sıcaklıkta beklet
- 4- Yükseltilmiş sıcaklıktan soğutma
- 5- Sonraki soğutma ile sertleştirme veya olgunlaştırma işlemi

Bu beş sürecin içinde, boyut ve şekil değişikliklerine ve ısı işlem bileşenlerinde artık gerilimin gelişimine yol açan yedi tane önemli faktör vardır.

- Yapı ve malzeme bileşimindeki bileşen boyunca ortaya çıkan ve özelliklerde anizotropiye ve dönüşüm davranışına yol açan değişim.
- Öncelikli makine işleme ve oluşturma işlemlerinden oluşan artık gerilimin esnemesi, rahatlama nedeniyle hareket.
- Kendi ağırlığı altında veya bağlama sonucunda parçanın yükseltilmiş sıcaklıkta sürünmesi
- Bölüm boyutundaki ve malzemenin asimetrik dağılımındaki büyük farklılıklar, su verme boyunca yapılar diferansiyel ısıtma ve soğutmadan kaynaklanır.
- Faz dönüşümünün sebep olduğu hacim değişiklikleri
- Soğutma esnasında parçalardan heterojen ısı oluşumları
- Isıl genleşme

İkinci ve üçüncü faktörlerin dışındaki tüm faktörler bileşenler içindeki ısı ve dönüşüm indirgenmiş gerilme ile ilişkilendirilebilir. Diğer beş faktör bileşen dizaynıyla ve daha önemlisi dönüşüm ve bileşendeki heterojen sıcaklık dağılımı tarafından ortaya çıkan zorlama ile direk olarak ilgilidir. [2]

Boyutsal değişimlerin ana nedenlerinden biri, metalin soğuması sırasında meydana gelen gerilmelerdir. (örneğin termal gerilmeler). Diğer bir neden de, martensit dönüşümü sırasında oluşan dönüşüm gerilmeleridir. Termal gerilmeler; bir metal kitlesinin soğuması sırasında dış tabaka çok çabuk soğur ve daralır. Daha yumuşak olan iç kısımlar, küresel varsayılan bir şekle dönüşmeye çalışırlar ki bu deformasyon sürecinde en düşük direnci gösteren bir şekildir. Dönüşüm gerilmeleri; çeliğin ısıtılması ve soğutulması sırasında bir seri yapısal dönüşümler meydana gelir. Çeliğin yapısında mevcut olan çeşitli fazlar veya partiküller farklı yoğunluklara sahip olduklarından, bunların özgül hacimleri de farklı olmaktadır. [3] Kalıntı gerilmeler zaman, sıcaklık, deformasyon ve mikro yapı arasındaki etkileşimlerin bir sonucudur. [4] Kalıntı gerilme ölçüm teknikleri üzerinde 1900'lü yıllardan beri çalışmalar yapılmış ve birçok ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin en bilineni kör delik (delik açma) yöntemi, tabaka kaldırma yöntemi, plaka eğme yöntemi, indentasyon yöntemi, ultrasonik yöntemler, manyetik yöntemler, synchrotron

radasyon yöntemi, nötron kırınımı yöntemi, mikro-Raman, spektroskopisi yöntemi ve X-ışınları kırınımı (XRD) yöntemleridir. [5]

Kalıntı gerilmelerin, olumsuz etkilerini ortadan kaldıracak düzeye indirilmesini sağlamak gayesiyle, gerilim giderme tavlama, titreşimle gerilim giderme usulleri uygulanmaktadır. [6]

Artık gerilme; bir makine elemanı, iş parçası veya malzeme üzerine etki eden dış kuvvetlerin ve bu dış kuvvetleri oluşturan etkenlerin tamamen kaldırılması durumunda dahi bu elemanlarda mevcut olan gerilmelerdir. Artık gerilmeler terminoloji olarak; iç gerilmeler, dahili gerilmeler, reaksiyon gerilmeleri ve gizli gerilmeler olarak da isimlendirilmektedir. [7]

Artık gerilmelerin analitik metotlarla kesin olarak hesaplanması zordur. Bu yüzden artık gerilmeler genellikle çeşitli deneysel tekniklerle veya yaklaşık çözüm yöntemleriyle hesaplanabilir. Artık gerilmelerin hesaplanması nümerik bir çözüm yönetimi olan sonlu eleman yöntemiyle yapılabilir. [8]

İzotropik malzeme özelliğine sahip çift malzemeli bir diske parabolik ısı yükü verilerek elastik durumda radyal, teğetsel ve deplasman durumlarının sıcaklıkla etkisiyle değişimi incelenmiştir. Disk iki farklı malzemenin birleşiminden oluşmaktadır. Sonlu elemanlar paket programı kullanılarak nümerik çalışması da yapılmış, analitik ve nümerik sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. [9]

I.2. AMAÇ

Son zamanlarda bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişme ve bilgisayar sistem ve yazılımlarının sağladığı kolaylıklar, tasarım ve analiz için hazırlanan bilgisayar yazılımlarının kullanılmasını kaçınılmaz hale getirmiştir.

Bu tezin amacı, malzemelerde robotlu kaynak işlemi sonucu oluşan iç gerilimin ölçümünün yapılması daha sonra sonlu elemanlar analiz programı kullanarak simülasyonunun elde edilmesi ve deneysel ölçüm sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılmasıdır.

Simülasyon sonuçlarının güvenilirliğinin incelenmesinden sonra kaynak yapılmış olan parça üzerinde tasarım, kullanılan malzeme veya kaynak parametreleri gibi değişikliklere gidilebilecek. Böylece, bilgisayar destekli yazılım programı kullanılarak, deneme aşamasında robotlu kaynak işlemi sonucu oluşabilecek mali kayıplar en aza indirilebilecek hem de daha hızlı ve güvenilir bir şekilde sonuca ulaşılmış olacaktır.

BÖLÜM II.

GENEL BİLGİLER

II.1. KAYNAKLI PARÇALARDA MEYDANA GELEN GERİLMELER VE DİSTORSİYONLAR

II.1.1. Gerilme ve Distorsiyonların Esasları

Uzunluğu diğer boyutlarının yanında, çok büyük olan bir parça (çubuk) ısıtılırsa ve serbest olarak hareket edebiliyorsa boyu uzar. Soğuduğu zaman, tekrar eski uzunluğuna erişir. Buna 'serbest uzama ve kendini çekme' denir (şekil II.1.). Isı etkisi altında kalan bir çubuğun uzama miktar, şu formülle ifade edilir:

$$\Delta l = l \cdot \Delta t \cdot a_L$$

Δl : Çubuğun uzama miktar (mm)

l : Çubuğun ısıtılmadan önceki boyu (mm)

Δt : Çubuğun başlangıç ve son sıcaklıklar arasındaki fark ($^{\circ}\text{C}$)

a_L : Isıl uzama katsayısı ($\text{mm}/^{\circ}\text{C}$)

Genişlik ve uzunluklar arasındaki farkın büyük olmadığı parçalarda, ısı karşısında uzama ise:

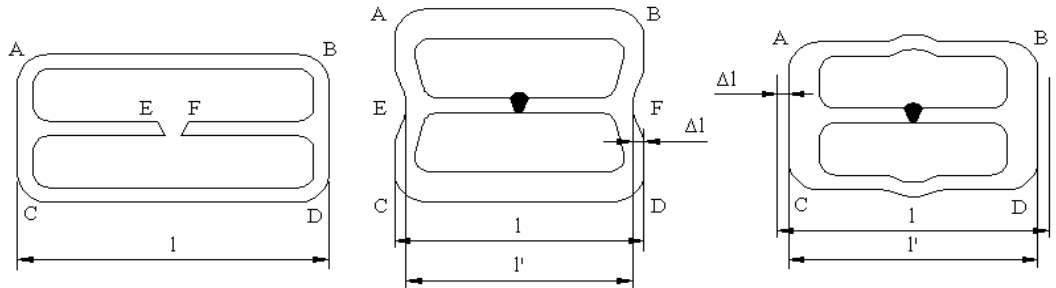
$$\Delta F = F \cdot \Delta t \cdot a_F$$

ΔF : Levhanın ısı etkisiyle yüzeyel genişleme miktar (mm^2)

F : Levhanın ısıtılmadan önceki alanı (mm^2)

Δt : Başlangıç ve son sıcaklıklar arasındaki fark ($^{\circ}\text{C}$)

a_F : Yüzeyel genişleme katsayısı ($\text{mm}^2 / ^{\circ}\text{C}$)



Şekil II.1. Metalik Bir Konstrüksiyonun Isının Etkisi İle Uzayıp Kısılması

Isı etkisi altında kalan bir parçanın, uzamasının ve kısılmasının tahdit edilmesi; parçada basma ve çekme gerilmelerinin meydana gelmesine sebep olur. Bu gerilmeler plâstik alanda ise, plâstik şekil değişimi (distorsiyon) ve gerilme kırılma değerini aşarsa, kırılmalar meydana gelir. Bu davranış gerilmenin değeri kadar, malzemenin sünek veya gevrek davranışına da bağlıdır. [10]

II.1.2. Kaynak Gerilmelerinin ve Çarpılmalarının Meydana Gelmesine Tesir Eden Faktörler

Kaynaklı parçalarda meydana gelen gerilmeler ve çarpılmaların sebepleri; ısıtma gerilmeleri, konstrüksiyonun rijitliği ve malzemenin metalürjik özellikleri adları altında toplanabilir: [10]

II.1.2.1. Isıtma Gerilmeleri

Yukarıda belirttiğimiz gibi; parçaların kaynak esnasında ısıtılmalar, çeşitli gerilmelerin teşekkülüne sebep olur. Bu gerilmelerin değeri şu faktörlere bağlıdır:

a-) Sıcaklık farkı

-Isı miktar

-Kaynak hızı

-Özgül ısı

-Isı iletme kabiliyeti

-Radyasyonla ısı yayılımı

-Parçanın hacmi ve formu




b-) Elâstiklik modülü

c-) Isıl uzama katsayısı

Sıcaklık farkının ve ısıl uzama katsayısının artmasıyla; tahdit edilmiş uzama ve kısılma gerilmeleri artmaktadır.

II.1.2.2. Konstrüksiyonun Rijitliği

Kaynak ısıl gerilmelerinin meydana getirdiği distorsiyon miktarı, konstrüksiyonun rijitliği ve levha kalınlığına bağlıdır. Alınacak tedbirlerle, konstrüksiyonun burkulma mukavemeti arttırılırsa; çarpılmalar azalır (Şekil II.2.). Rijiditenin düşük olması, çarpılmaları artırır.

	Sacların Burkulma mukavemeti σ [Kp/cm ²]	
	3 mm	4 mm
		
	6.7	123
	\leq 53.6 1840	984 3200

Şekil II.2. Konstrüktif Tedbirler ile Rijiditenin Artırılması

II.1.2.3. Malzemenin Metalürjik Özellikleri

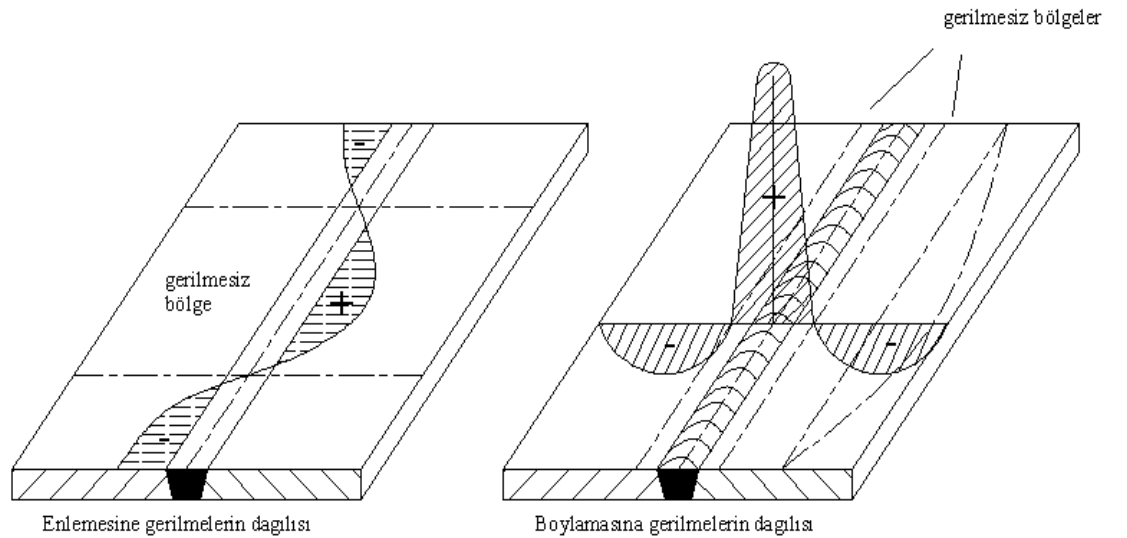
Kaynak ısısı sebebiyle parçaların yüksek sıcaklıklara ısıtılması ve soğutulması, iç yapı değişmelerine neden olur. Meselâ; çeliklerin kaynağında kaynak bölgesinde meydana gelen martenzitik yapı, şekil değiştirme kabiliyeti az olan bir iç yapıdır. Bu durum ise, çarpımlara karşı davranışlara tesir eder. İç yapıya bağlı olarak, malzeme kolay veya zor şekil değiştirir.

II.1.3. Kaynak Gerilmeleri

Kaynak esnasında parçaların bölgesel olarak ısıtılması, gerilmelerin ve distorsiyonların teşekkülüne sebep olmakta idi. Gerilmeler; bölgesel olarak ısıtılan parçaların uzama veya kısaltmalarının tahdit edilmesi neticesinde meydana gelir. Gerilmeler de enine, boyuna ve derinlemesine gerilmeler olarak tasnif edilirler. [10]

II.1.3.1. Enine Gerilmeler

Şekil II.3. ' de görüldüğü gibi; kaynak esnasında parçaların kaynak eksenine dik yöndeki hareketlerinin tahdit edilmesiyle, enine gerilmeler meydana gelir. Enine gerilmeler aynı zamanda, boylamasına kendini çekmelerin hasil ettiği enine gerilmelerle birleşirler.

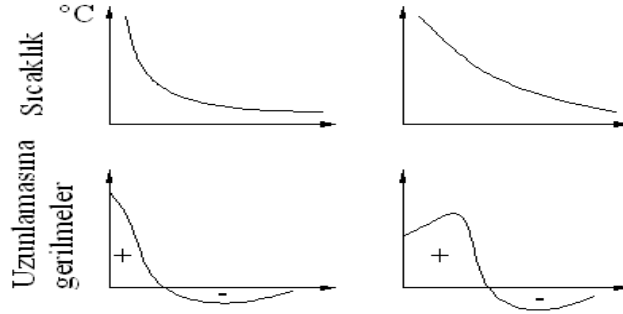


Şekil II.3. Bir V-alın Birleştirmesinde Boylamasına ve Enlemesine Gerilmeler

Sıçrayarak ve geri adım usulüyle kaynak, paso sayısının artırılması enine gerilmelerin azaltılmasını sağlar. Hızlı kaynak yapılması da, enine gerilmeleri azaltır.

II.1.3.2. Boylamasına Gerilmeler

Kaynak esnasında kaynak eksenini boyunca parçaların farklı sıcaklıklarda olmaları, boylamasına gerilmelerin teşekkülüne sebep olur. Sıcaklık dağılımındaki değişmeye bağlı olarak, gerilme dağılımındaki değişme Şekil II.4.'de görülmektedir.



Şekil II.4. Sıcaklık Dağılımına Bağlı Olarak Boylamasına Gerilme Dağılımı

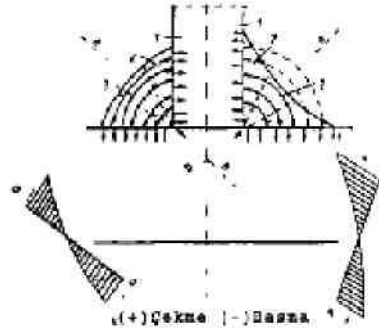
Kaynak hızı azaltılarak, ön tavlama tatbik edilerek veya uygun kaynak sıraları takip edilerek boylamasına gerilmeler azaltılabilir.

II.1.3.3. İç Köşe Dikişlerinde Kendini Çekme Gerilmeleri

İç köşe dikişlerinde kendini çekmeler sebebiyle meydana gelen gerilme dağılımı, Şekil II.5. 'de görüldüğü gibidir. Isınan bölgedeki genişleme ve kendini çekme, boylamasına ve enlemesine yönlere kuvvetli biçimde tahdit edilir. Böylece; büyük kısmı dikişte toplanan üç eksenli bir gerilme hali meydana gelir.

II.1.4. Kendini Çekme Momenti

Boylamasına kendini çekme gerilmelerinin sebep olduğu kendini çekme kuvvetleri, ağırlık merkezinden geçen eksenin dışında bir kendini çekme momenti meydana getirir (Şekil II.5.).



- 1- Isı iletme bölgesi
- 2- İlk katılma bölgesi
- 3- Son katılma bölgesi

Şekil II.5. İç Köşe Dikişlerinde Kendini Çekme Tesiri.

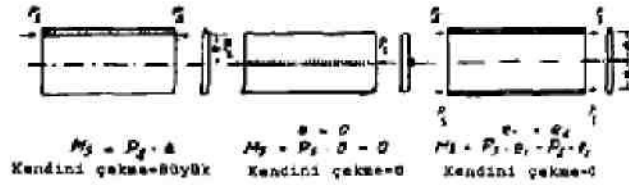
Bilhassa kaynaklar simetrik olmayan konstrüksiyonlarda, bu momentler çarpımlara sebep olurlar. Kendini çekme momenti şu formülle hesaplanır.:

$$M_s = P_s \cdot e$$

P_s : Kaynağın kendini çekme kuvveti

e : kaynağın, ağırlık merkezine olan uzaklık

Kaynak dikişlerinin konstrüksiyonun ağırlık merkezine getirilmesi veya dikişlerin ağırlık merkezine göre simetrik olarak yer alması, kendini çekme momentinin tesirini ortadan kaldırır. Aynı zamanda, simetrik dikişlerin aynı anda kaynak edilmesi gerekir (Şekil II.6.).



Şekil II.6. Çeşitli Durumlarda Kendini Çekme Momentinin Değeri

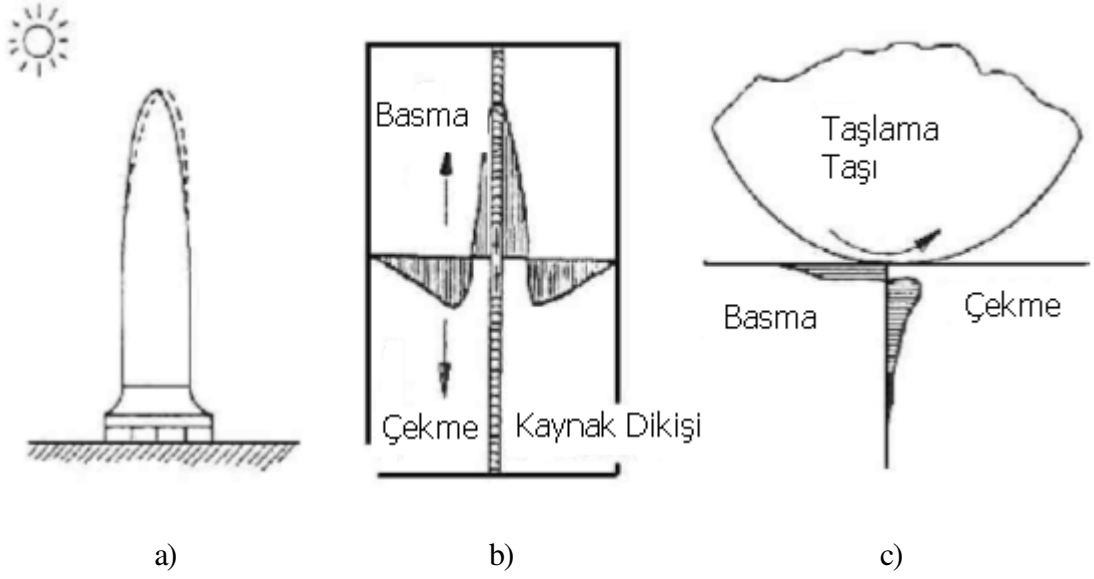
Kaynak dikişlerinin asimetrik biçimde tertip edilmesi halinde kendini çekme momentinin tesirini ortadan kaldırmak için, aksi yönde bir eğim vermek gerekir. [10]

II.2. GERİLMELERİN SEBEPLERİ

II.2.1. Makroskopik ve Mikroskopik Ölçekteki Artık Gerilmeler

Malzemede değişik nedenlerle oluşan artık gerilmeler bazı malzemenin büyük bir kısmında meydana gelirken bazı gerilmeler ise mikroskopik seviyelerde kalabilmektedir. Bunun nedeni kalıntı gerilimi oluşturan etkinin türü ve etki alanıdır. Oluşan kalıntı gerilmelerin örnekleri Şekil II.7.'de verilmiştir. Şekil II.7.a' da bir yapıda, güneş ışınlarının bir taraftan etkimesi sonucunda ısıl distorsiyonlar ve ısıl gerilmeler oluşur. Şekil II.7.b' de ise kaynaktan dolayı meydana gelen artık gerilmelerin dağılımı görülmektedir ve oluşan artık gerilmelerin kaynak dikişine yakın bölgelerde yoğunluk gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi ise ısıl dengesizliğin en çok olduğu kısmın buralar olmasındandır.

Şekil II.7.c' de ise taşlama sonucu oluşan artık gerilmeler gösterilmiştir. Taşlama sonucunda oluşan artık gerilmeler, yüzeye yakın ve ince bir tabakada yoğunlaşmıştır.



Şekil II.7. Değişik Makroskopik Ölçekteki Kalıntı Gerilmeler [11]

- a) Güneş ısısından dolayı bir yapıdaki distorsiyon b) Kaynaktan dolayı artık gerilmeler c) Taşlamadan dolayı artık gerilmeler

Kalıntı gerilmeler makroskopik olmanın haricinde mikroskobik ölçekte de kendini gösterebilir. Buna örnek verecek olursak, martenzitik dönüşüm düşük sıcaklıklarda olduğundan ve metalin genişmesine yol açtığından bu olay çelikte artık gerilmelere neden olur. Daha çok distorsiyon bölgesinin yanında oluşan artık gerilmeler ise atomik düzeydeki kalıntı gerilmelere örnek olarak verilebilir.

II.2.2. Kalıntı Gerilmelerin Oluşumu

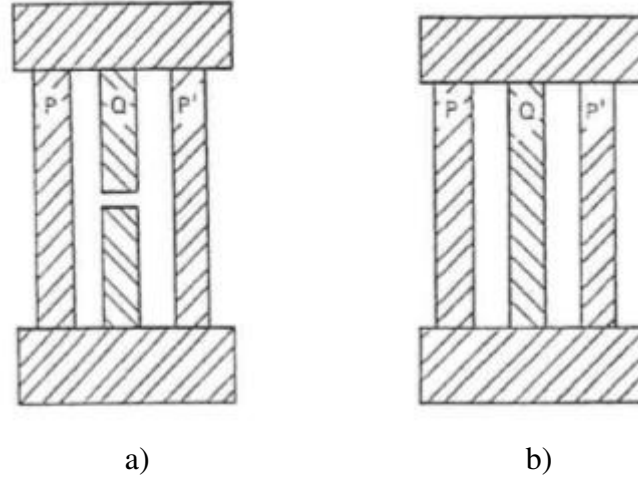
Kalıntı gerilmeler kendilerini meydana getiren mekanizmalara göre isimlendirilirler: üretim yöntemleri de değişik kalıntı gerilme türlerinin oluşumuna sebep olmaktadır. Üretim yöntemlerinin parça yüzeyinde oluşturduğu kalıntı gerilmeler Tablo II.1' de verilmiştir. Ayrıca aşağıda yapısal uyumsuzluk ve eşit dağılmayan plastik şekil verme ile teşekkül eden kalıntı gerilmeler detaylı bir şekilde açıklanmıştır .

Tablo II.1. Üretim Yöntemlerinin Parça Yüzeyindeki Kalıntı Gerilmeler [19]

ÇEKME GERİLMESİ	BASMA GERİLMESİ	İKİSİNDEN BİRİ
Kaynak	Nitrürleme	Karbürleme
Taşılama	Alev ve İndüksiyon ile yüzey sertleştirilmesi	Haddeleme
Temperhaddesi	Tek fazlı metallere su verilmesi	Döküm
Doğrultma	Kum püskürtme	Abrasiv metal kesme (genellikle çekme gerilmesi) Sertleşen çeliklere su verme

II.2.2.1. Yapısal Uyuşmazlıktan Doğan Kalıntı Gerilmeler

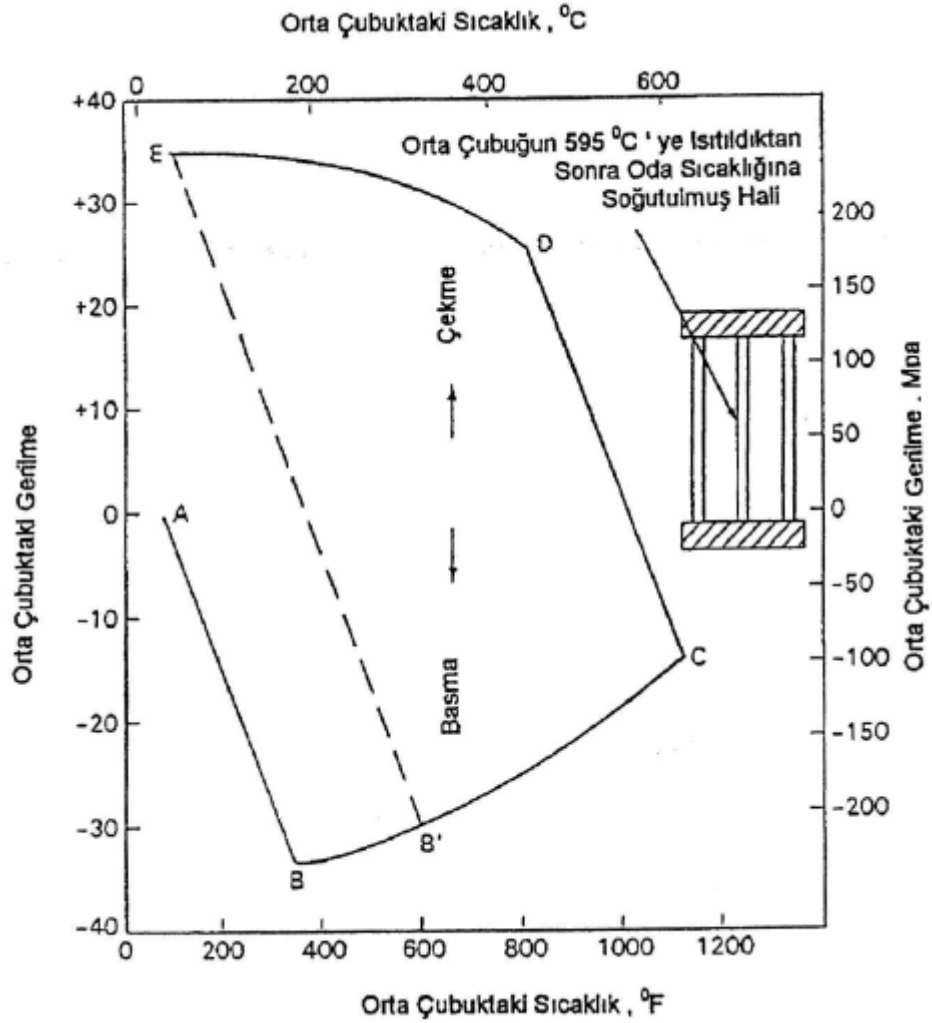
Yapısal uyumsuzluğa bağlı olarak kalıntı gerilme teşekkülünü açıklayacak örnek Şekil II.8' de görülmektedir. [11] İki rijit levha arasına takılmak üzere üç tane aynı boyutta çubuk atölyeye ısmarlanmıştır. Ancak çubuklar yerine takılırken ortadaki çubuğun kısa olduğu ortaya çıkmıştır. Buna rağmen çubuk çekilerek yerine takılmıştır. Böylece üç çubuk aynı boya getirilmiştir. Ancak çubuklara uygulanan şekil değişimleri kalıntı gerilme oluşturmuştur. Kısa çubukta Q çekme gerilmesi oluşurken uzun çubuklarda P ve P' basma gerilmeleri oluşur.



Şekil II.8. Farklı Uzunluktaki Çubukların Uç Bölgelerinden Birleştirilmeleri Sonucu Oluşan Artık Gerilmeler a) Serbest b) Tespit edilmiş hâl

Şekil II.9' da görülen üç çubuk aynı çubuktan kesilmiş ve gerilmersiz olarak iki rijit levha arasına monte edilmiştir. [12]

Çubuklar alaşımsız çelikten olup hepsi aynı uzunluktadır. Orta çubuk 595 °C ye kadar ısırtılıp ve oda sıcaklığına soğutulmuştur. Yandaki çubukların sıcaklığı deney süresince oda sıcaklığında sabit tutulmuştur. Üç çubuklu sistemde çubuklar rijit levha arasında bulduklarından çubuk boy uzunlukları sürekli eşit kalmıştır. Bu nedenle çubuklarda gerilme oluşmuştur. Isınma kademesinde çubuklardan sadece bir tanesi ısındığından, ısınan çubuk genişlemek isterken diğerleri büzülmeye çalışacaktır. Soğuma kademesinde ise ters yönde şekil değişimleri meydana gelecektir, orta çubuk büzülecektir. Bu şekil değişimleri çubuklarda çekme veya basma gerilmelerinin teşekkül etmesi sonucunda meydana gelmektedir.

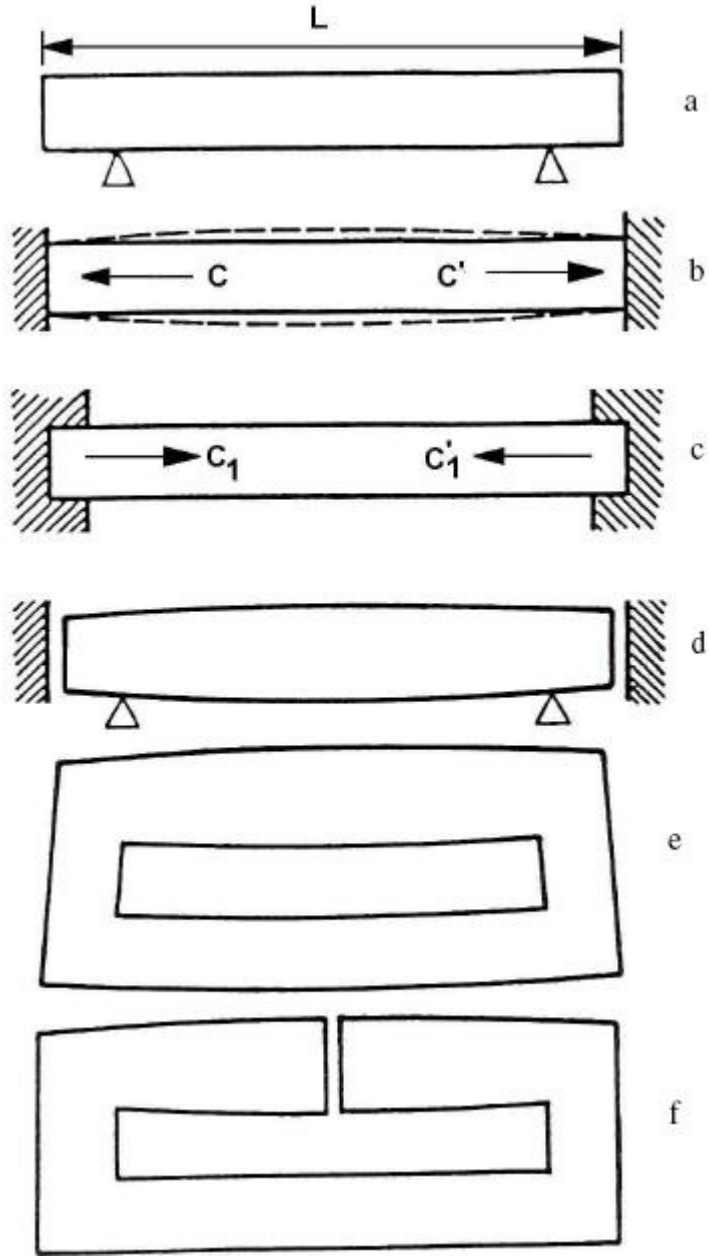


Şekil II.9. Tespit Edilmiş Çubuğun Isıtılmasının Artık Gerilme Üzerine Etkisi [18]

Şekil II.9' deki eğri, orta çubukta sıcaklığa bağlı olarak gerilme dağılımını göstermektedir. Çubuk oda sıcaklığında (A noktası) gerilme değeri sıfırdır. Çubuk sıcaklığı arttıkça çubukta basma gerilmesi meydana gelmektedir 170 °C ye kadar gerilme lineer olarak artmaktadır (B noktası). Bu noktada gerilme değeri

çubuk basma akma sınırına ulaşmıştır. Sıcaklık daha fazla arttırılınca orta çubukta meydana gelen gerilme çubuk akma gerilmesine bağlı olarak azalmaktadır. 595 °C ye kadar gerilme şiddeti B-C eğrisini takip ederek azalır. Orta çubuk 595 °C den oda sıcaklığına soğurken büzülme göstermek istemiştir. Çeliklerde mekanik özellikler sıcaklığa bağlı olarak değişir. Genel olarak çeliklerin sıcaklığı arttıkça akma mukavemeti ile elastisite modülü düşerken, genleşme katsayısı ile poisson oranı artmaktadır. Şekil II.9' da sıcaklığın 170 °C den 595 °C ye artması sırasında da akma mukavemeti azaldığından reaksiyon gerilme değeri azalmaktadır. 595 °C den itibaren soğuma başlayınca büzülme meydana geldiğinden gerilme C-D hattını takip eder. Çubuktaki basma gerilmesi azalır ve 538 °C de gerilme sıfır olur. Soğuma devam edince çubukta çekme gerilmesi oluşur. D noktasında gerilme akma sınırına dayanır. Sıcaklık daha da düşürülünce gerilme eğrisi D-E çizgisini, akma sınır değer eğrisini takip eder. Sıcaklık düştükçe gerilme azda olsa artar. Çubuk oda sıcaklığına soğutulduğunda çubuk akma mukavemetine eşit çekme kalıntı gerilmesi (E noktası) kalır. Yan çubuklarda ise bu gerilme değerinin yarısı değerinde basma gerilmesi oluşur. Orta çubuğun 315 °C' nin üzerine ısıtılması halinde, bu çubukta oda sıcaklığındaki akma gerilmesinin şiddetine eşit kalıntı gerilmesi meydana geleceğini B-E doğrusu göstermektedir. [12]

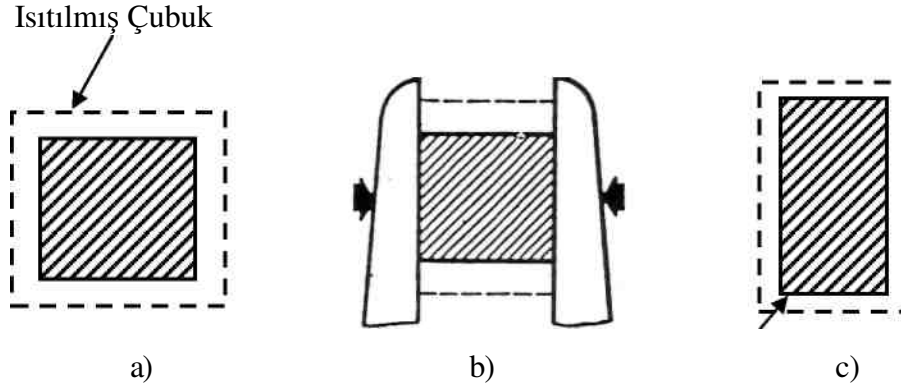
Gerilme konusunu daha iyi anlayabilmek için bazı uygulamalar yapılabilir. Örneğin, basitçe iki mesnet üzerine konmuş numune parçayı 650 °C' nin altında üniform olarak Şekil II.10.a' deki gibi ısıtırsak, parça oda sıcaklığına kadar soğuduğunda ilk boyutlarına döner. Buna karşılık, elastikiyet sınırının çok altında bir sıcaklığa kadar ısıtılan aynı numune parça, her iki ucundan sıkıca tespit edilecek olursa, Şekil II.10.b' deki gibi genleşmesine imkan verilmemiş olur. Geçici olarak elastik basma gerilmeleri (C-C) oluşacak ve sadece parçanın kesiti genleşme etkisine maruz kalacaktır. Soğuma esnasında parça yeniden başlangıçtaki kesitine dönecektir. Buna karşılık aynı parça Şekil II.10.c' deki gibi her iki ucundan tespit edilmiş olursa soğuma esnasında (C1 -C'1) çekme gerilmeleri oluşacaktır. Bu kez de şekil II.10.d' deki parça, 650 °C' nin oldukça üzerinde bir sıcaklığa ısıtılacak olursa metal, plastik deformasyona uğrayarak yanal olarak şekil değiştirir. Parça oda sıcaklığına kadar soğuduğunda uzunluğundan kaybetmiş olur, fakat uğradığı yanal şekil bozulmasını şekil II.10.d' de olduğu gibi muhafaza eder. Oluşan boyuna çekmenin miktarı 650 °C' nin üzerindeki sıcaklıkta tahditleme nedeniyle oluşan ezilmeye eşdeğerdir.



Şekil II.10. Kalıntı Gerilmelerin Gözlendiği Değişik Parçalar [11]

Geometrik şekle sahip Şekil II.10.e’ deki gibi bir parçanın, bir bölgesinin numune olarak ısıtıldığını düşünelim. Bu durumda parçanın tümü bir iç eğme zorlanmasına maruz kalarak şekil değiştirecektir. Numunenin ortadan testereyle kesilmesi halinde, ısıtılmış kısımlar ilk şekillerine dönme imkanı bulurlar ve böylece kalıntı gerilmeler Şekil II.10.f’ deki gibi serbest kalmış olur.

Çoğunlukla termal çekme gerilmeleri adıyla anılan bu gerilmeler ısıtma sıcaklığıyla orantılı olarak büyük değerlere ulaşabilirler. Sonuçta esas metalin dönüşüm bölgelerinde, metalin ergime bölgesinde, kaynağın kendisinde, genellikle sıcak iken veya soğuduktan sonra çatlaklar ortaya çıkmaktadır.



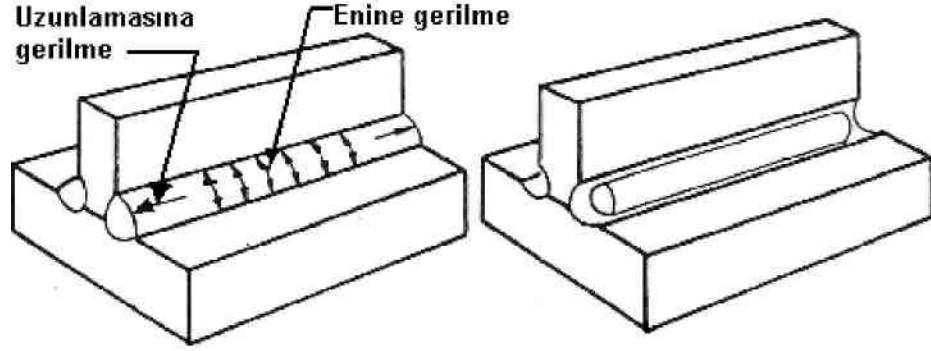
Şekil II.11. Bir Çelik Çubuğun Tespit Edilerek Isıtılıp Sonra Soğutulması

- a) Isıtmadan önce ve soğumadan sonra oda sıcaklığındaki çubuk b) Isıtma sırasında tespit edilmiş çubuk c) Soğumadan sonra tespit edilmiş çubuk

Bir metalin ısıtılma ve soğuması sırasında distorsiyonun nasıl ve neden oluştuğunun daha iyi anlaşılabilmesi için şu örnek verilebilir; Şekil II.11.'deki çelik çubuk, üniform olarak ısıtıldığında her yönde genişler.

Metal oda sıcaklığına soğuduğunda Şekil II.11.a'daki gibi yine üniform olarak ilk boyutlarına döner. Fakat çelik çubuk, ısıtıldığı sırada bir mengenenin çeneleri arasında tespit edilecek olursa yanıl genişleme oluşamaz (Şekil II.11.b). Bununla birlikte hacimsel genişleme oluşması kaçınılmaz olduğu için parça dikey yönde genişler. Şekil değiştirmiş parça oda sıcaklığına döndüğünde yine her yönde üniform olarak çeker (Şekil II.11.c). Parça artık daha dar, ama daha kalındır, yani deforme olmuştur. [11]

Şekil II.12.a'da görülen köşe kaynağında kaynak metali sıcakken enlemesine ve uzunlamasına basma gerilmesi oluşturarak özellikle kaynak metalini genişlemeye maruz bırakacak ve buda dolaylı olarak kaynatılan parça içerisinde de gerilmeler meydana getirecektir.



Şekil II.12. Köse Kaynağında Uzunlamasına ve Genişlemesine Gerilmeler

a) Kaynaktan sonra oluşan gerilmelerin yönleri b) Soğuma sonrası oluşan büzülme

Şekil II.12.b' deki gibi bir büzülmenin (şekilde anlaşılması kolay olsun diye abartılı olarak çizilmiştir) meydana geleceğini görürüz. [11]

II.2.2.2. Eşit Dağılmayan Plastik Şekil Değişimine Bağlı Kalıntı Gerilmeler

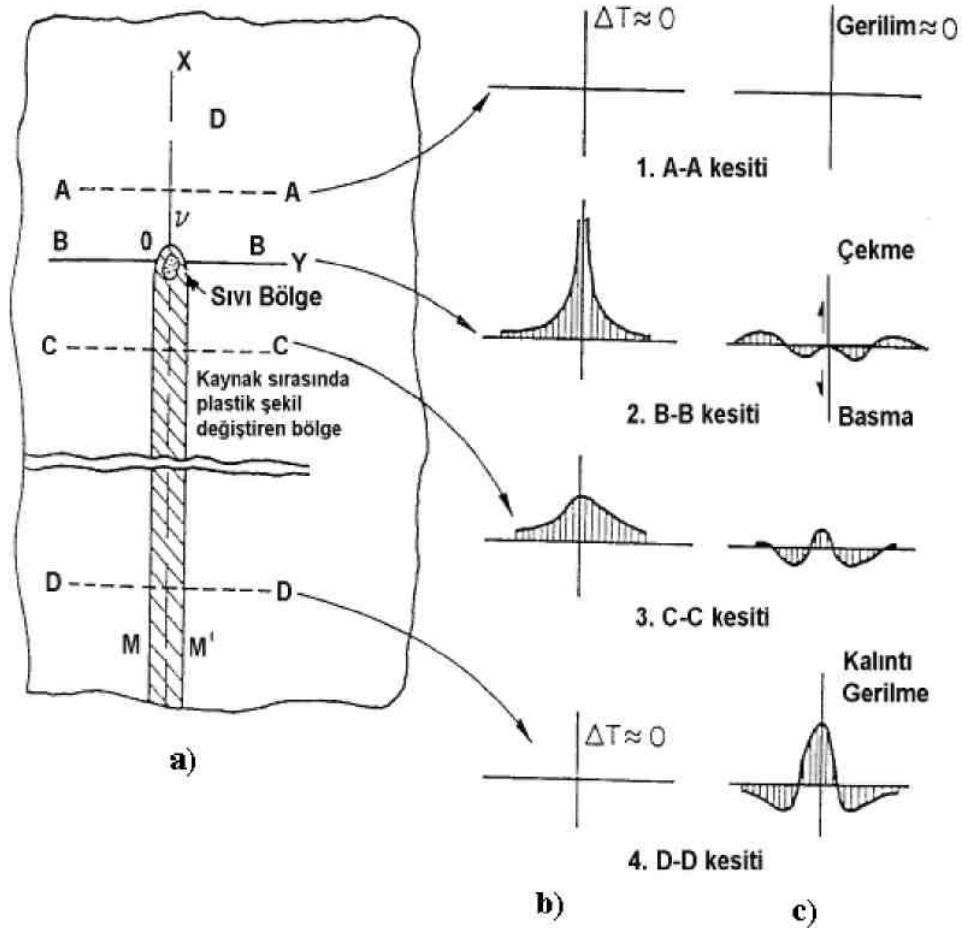
Malzemeler eşit dağılımlı bir şekilde ısıtılırsa o malzemedeki genişlemede dengeli ve homojen olur, malzemede de ısı girdisine bağlı olarak bir gerilme görülmez. Eğer bir malzeme üniform olmayan şekilde ısıtılırsa, sıcaklık farkı olan bölgelerde $\sigma = E.a.\Delta T$ formülüne uygun olarak ısı gerilme meydana gelir. Bu termal gerilmelerin sonunda lokal şekil değişimleri meydana gelir. Oluşan şekil değişimleri hem elastik hem de plastik olabilir. Bir cisme uygulanan dış kuvvetler de lokal plastik şekil değişimine yol açabilir. Mesela eğme momenti cismin dış yüzeyinde kalıcı şekil değişimine yol açabilir veya gerilme dağılımı gerçekleşen çentik etrafındaki noktalarda dış kuvvetler tesiri ile lokal plastik şekil değişimi meydana gelir. Bu lokal plastik şekil değişimleri cisim içerisinde kalıntı gerilme oluşumuna sebep olur. [11]

II.2.3. Kaynak Sırasında Oluşan Termal Gerilmeler ve Metal Hareketleri

Kaynak yapılırken kaynak ısısı ile iş parçası lokal olarak ısınır. Kaynak bölgesinde sıcaklık dağılımı homojen değildir. Kaynak işlemi devam ederken de kaynak bölgesinde sıcaklık dağılımı büyük farklılıklar gösterir. Kaynak termal çevrimi sırasında kaynak bölgesinde termal gerilmeler meydana gelir. Şekil II.13' de x eksenine doğrultusunda levha üzerine dikiş çekilen kaynakta sıcaklık değişimi ve buna bağlı olarak oluşan gerilmeleri görmekteyiz. [12]

Kaynak arkı V hızı ile ilerlemekte olup Şekil II.13' de O noktasında bulunmaktadır. Kaynağın sıvı kısmı şekilde görülmektedir. Kaynak termal çevirimi sırasında plastik şekil değişimine uğrayan bölge ($M-M'$) taralı alan ile gösterilmiştir. Taralı alanın dışında kalan kısımlarda elastik şekil değişimi meydana gelmektedir. Kaynak dikişinden alınan bazı kesitlerdeki sıcaklık ve gerilme dağılımı da Şekil II.13' de şematik olarak görülmektedir.

A-A kesiti arkın biraz önündeki kesit olmaktadır. Soğuk olan bu kesitte kaynağa bağlı sıcaklık değişimi yoktur. Kaynak arkını kesen B-B kesitinde ise çok keskin sıcaklık dağılımı vardır. Sıvı metalin sıcaklığı çok yüksek olmaktadır. Sıvı metalin tamamen katılaşmış olan C-C kesitinde ise soğuma bir miktar gerçekleştiğinden sıcaklık dağılımı çok keskin değişimi göstermez. Tamamen soğumuş olan D-D kesitinde ise sıcaklık dağılımı sıfır olmuştur.



Şekil II.13. Kaynak Esnasında Sıcaklık ve Gerilim Dağılımı [12]

a) Dikiş b) Sıcaklık değişimi c) Gerilim

Şekil II.13' de kesitlerde x eksenini doğrultusunda oluşan gerilmeler görülmektedir. A-A düzleminde gerilme oluşmamıştır. B-B kesitinde gerilme dağılımını büyük değişiklik gösterir. Kaynak arkının altındaki bölge sıvıdır. Sıvının yük taşıma kapasitesi olmadığından gerilme sıfır olur. Sıvıya komşu katı bölgede ise basma gerilmesi oluşur.

Bu katı bölgenin genişmesi sıvının diğer tarafında kalan daha soğuk bölgelerin genişmesine engel olduğu için basma gerilmesi oluşur. Bu bölgenin sıcaklığı çok yüksek ve akma gerilmesi de çok düşük olduğundan gerilme seviyesi düşüktür. Sıvı metalden uzaklaştıkça ITAB sıcaklığı düşerken akma mukavemeti arttığından basma gerilme değeri artar. Basma gerilmesi maksimum değeri ulaştıktan sonra azalmaya başlar.

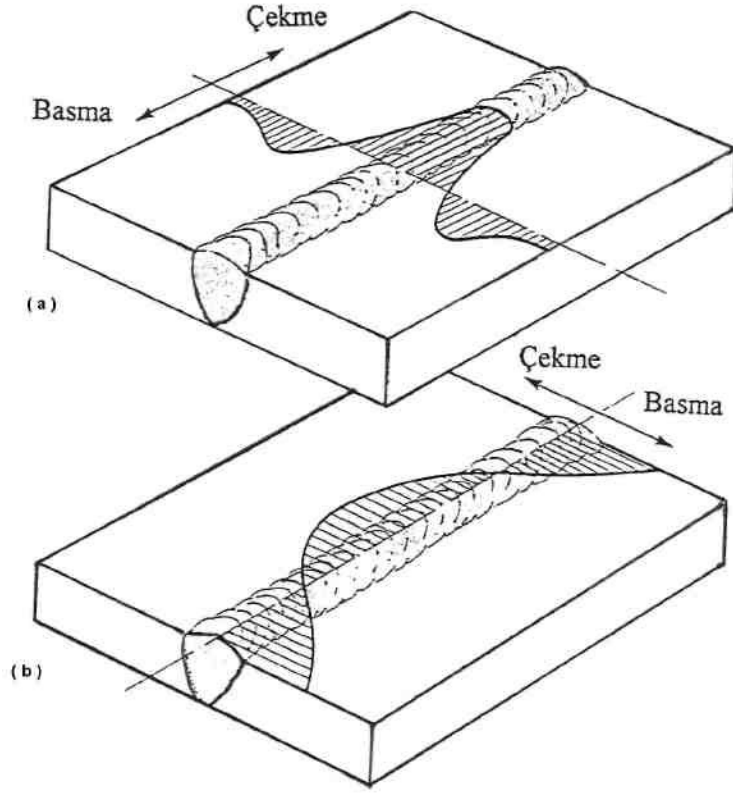
Kaynak havuzunun uzağında çekme gerilmesi teşekkül eder. Sıvı metalin yakınındaki katı metalin genişmesine engelleyen daha soğuk bölgede tepkisel olarak çekme gerilmesi oluşur. Çekme ve basma gerilmeleri denge halinde olur. Katılaştıkça ve soğumaya başlayan C-C kesitinde büzülme meydana geldiğinden çekme gerilmeleri oluşur. Soğuyan kısım büzülme ister ancak çevresindeki soğuk, sert ana metal bu büzülmenin bir kısmını engeller, büzülmenin engellenmesi bu bölgede çekme gerilmesinin doğmasına sebep olur. Kaynak metalinde çekme gerilmesi oluşurken, komşu kısımlarda basma gerilmesi oluşur. Soğuma arttıkça büzülme ve dolayısıyla çekme gerilmesinin değeri artar. Soğuma arttıkça metal akma mukavemeti arttığından çekme mukavemeti değeri artar. Tamamen soğumuş D-D kesitinde kaynak metali ve yakınında yüksek çekme gerilmesi oluşmuştur. Kaynak dikişinin uzağında basma gerilmeleri oluşmuştur. Böylece gerilmeler dengelenmiştir. Soğuma tamamlandıktan sonra yapıda kalan gerilmelere kaynak kalıntı gerilmeleri adını vermekteyiz.

Kaynak bölgesinde sadece kaynak dikişi ilerleme doğrultusunda değil diğer doğrultularda da gerilmeler oluşur. Kaynak bölgesinde σ_x , σ_y , σ_z , σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{zx} meydana gelir. Bu gerilmelerden kaynak doğrultusunda oluşan gerilmeler σ_x kaynak doğrultusu eninde oluşan gerilmeler σ_y ve kaynak düzlemine dik oluşan gerilmeler σ_z ile ifade edilmektedir. Şekil II.14' de tek pasolu alın kaynaklarında kesiti gösterilen düzlemlerinde boylamasına ve enlemesine teşekkül eden gerilmeler görülmektedir. [12] Bu gerilmeler içinde önemli olan kaynak doğrultusunda oluşan σ_x gerilmeleridir. Bu gerilmenin değeri diğerlerinden daha fazladır.

Kaynak sırasında kaynak bölgesi büzölmeye ve deformasyona (şekil değişimine) uğrar. Kaynak çizgisi kaynaklı yapının nötr ekseninden uzaklaştıkça deformasyon veya metal hareketi daha belirgin hale gelir; kaynaklı yapıda daha fazla bükölme meydana gelir. Şekil II.15' de dikdörtgen levha kenarının levha uzunluğunca hareket ısı kaynağı ile ısıtılması sonucunda levhada oluşan şekil değişimi görölmektedir.

Levhanın üst kısmı veya ısı kaynağına yakın olan bölge, ısı kaynağına uzak olan bölgeden daha yüksek sıcaklığa çıkar. Daha fazla ısınan kısım daha fazla genişir. Bu nedenle başlangıçta dümdüz olan levhada AB eğrisi ile gösterilen deformasyon meydana gelir. Eğer iş parçasında oluşan gerilmeler sonunda meydana gelen şekil değişimleri tamamen elastik olsa soğuma sırasındaki parçadaki çökme BCD' eğrisini takip edecektir. Yani parça soğurken, ısınma sırasında meydana gelen elastik şekil değişimi, sıcaklık düştükçe azalacak ve sonunda parça başlangıçtaki gibi düzleşecektir. Ama birçok malzeme de olay böyle olmamaktadır.

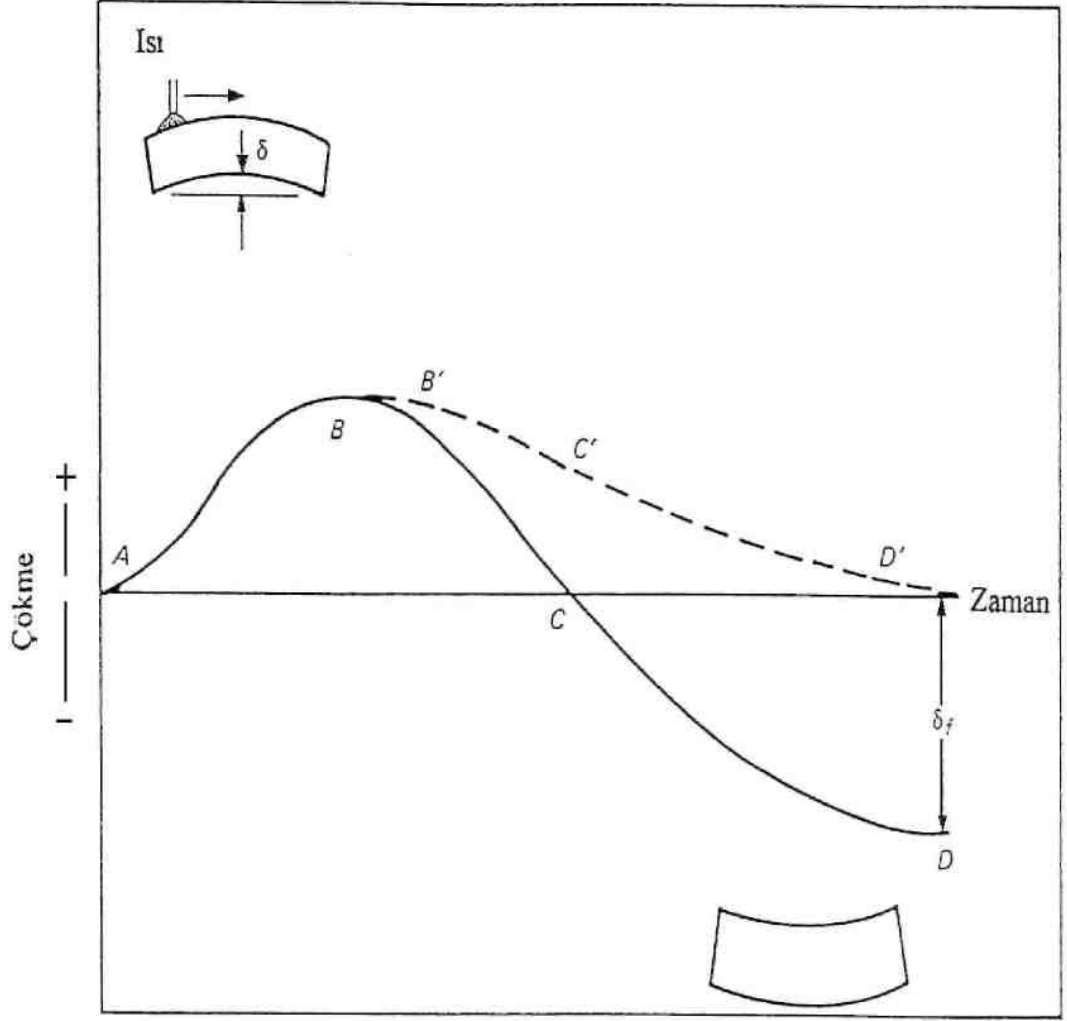
Parçanın yüksek sıcaklığa ısınan bölgesinde lokal plastik şekil verme meydana gelmektedir. Bu nedenle parça soğuduğu zaman ısınma sırasında oluşan termal gerilmeler yok olmakla ve kalıntı gerilmelere sebep olmaktadır. Yani parçanın termal çevirimi sırasında meydana gelen şekil değişimi şekil II.15' deki ABCD eğrisi şeklinde olmaktadır. Levha oda sıcaklığına soğuduğu zaman S_f çökmesi, kalıcı şekil değişimi olur. Bu şekil değişimine distorsiyon denir.



Şekil II.14 Tek Pasolu Alın Kaynak Birleştirilmesinde Kalıntı Gerilme Dağılımı [12]

Bir kaynak işleminin termal çevirimi sırasında kaynak bölgesinde elastik olmayan şekil değişimleri ve plastik şekil değişimleri meydana gelir. Termal çevirim sırasında parça lokal olarak ısındığı için gerilmeler oluşur. Ayrıca Ferit + Perlit mikro yapısının ostenite ve ostenitin diğer mikro yapılara dönülmesi ile de gerilmeler oluşur. [3]

Bütün bu gerilmeler parça tam soğuduğu zaman bile yok olmadan kalır. Gerilmeler kaynak çevriminin her safhasında elastik ve plastik değişimlerine, kalıcı şekil değişimlerine yol açar. Bu deformasyonlara bağlı olarak kaynaklı yapı içerisinde distorsiyon meydana gelir.



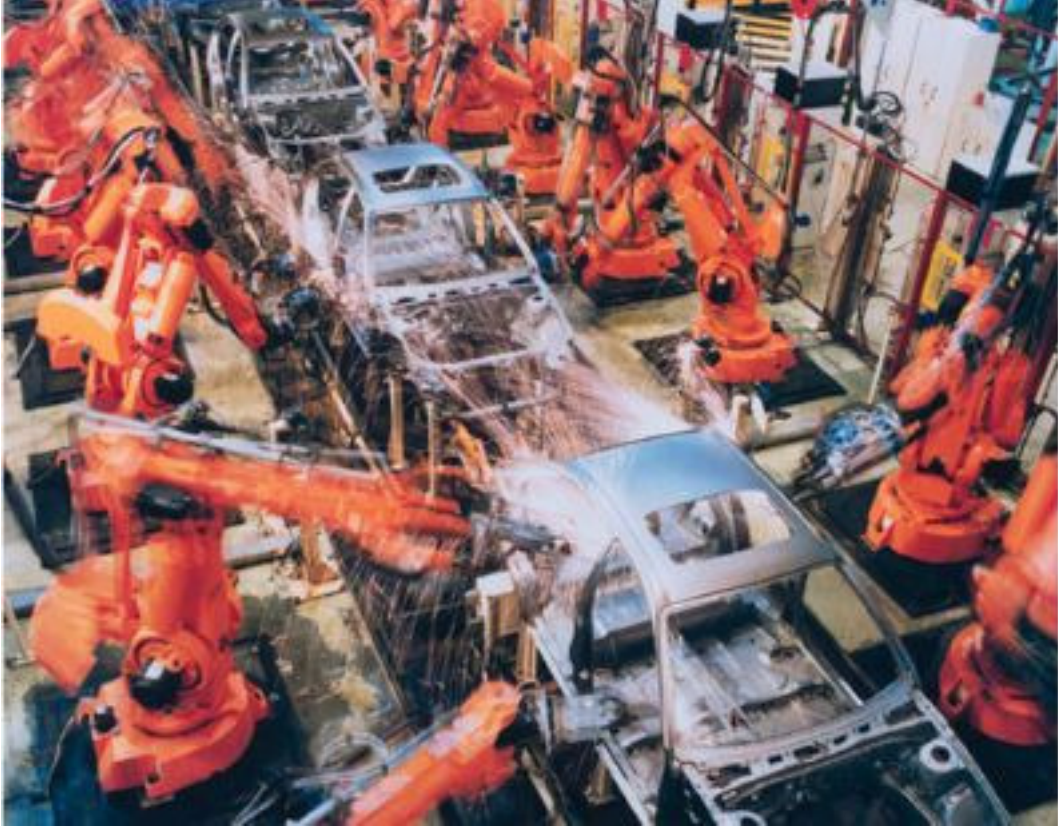
Şekil II.15. Dikdörtgen Bir Levhanın Bir Ucundan Diğer Ucuna Hareket Eden Isı Kaynağı Tesiri İle Ters Yüzün Merkezinde Çarpılma Miktarı [12]

Bir kaynaklı yapının üretimi sırasında meydana gelen kalıntı gerilmeler iki temele bağlıdır:

- 1- Hareketi serbest olan parçaların kaynağı sırasında meydana gelen kalıntı gerilmeler.
- 2- İş parçalarının büzülme hareketinin engellenmesine bağlı olarak oluşan reaksiyon gerilmeleri. [12]

II.3. ROBOTLAR İLE YAPILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

Başta nokta direnç kaynağı (punta kaynağı) olmak üzere, MIG/MAG, TIG ve plazma kaynak yöntemlerinde robotlar başarı ile kullanılmaktadırlar. [20]



Şekil II.16. Otomobil Karoserinde Yapılan Kaynak İşlemi [21]

II.3.1. Nokta Direnç Kaynağı

Endüstride robotların ilk yaygın kullanım alanı, nokta kaynağıdır. Otomobil üretiminde binek arabaların yapımı için yaklaşık 700 adet preslenmiş ve kesilmiş parça ile 400 adet talaş kaldırılarak işlenmiş parça kullanılır. Bu parçalar cıvata, perçin, kıvrırma, lehimleme, yapıştırma ile birleştirilmelerinin yanı sıra daha çok kaynak yolu ile birbirlerine bağlanmaktadır. Toplam kaynaklar; yaklaşık olarak 5000 nokta kaynağından, 30 metre kadar ark kaynağından, 1 metre elektron ışın kaynağından ve 15 adet de sürtünme kaynağından oluşmaktadır.

Nokta direnç kaynağında kullanılan robotlar, prosesi gerçekleştirmek için bazı yetenek ve özelliklere sahip olmalıdır. Çalışma hacmi, parçanın boyutuna uygun olmalıdır. Robot, parça üzerinde ulaşılması güç olan yerlerde kaynak tabancasını konumlayabilmeli ve oryante edebilmelidir. Bu ise serbestlik derecesinin sayısının artması ihtiyacını doğurur. Kontrolör hafızası, nokta direnç kaynak döngüsü için gerekli birçok konumlama adımlarını gerçekleştirebilecek kapasiteye sahip

olmalıdır. Bazı uygulamalarda, kaynak hattı, birçok farklı model ürünün üretimi için tasarlanabilir. Böylece, modeller değiştiğinde, robotlar bir programdan diğerine geçebilmelidir. Çok yönlü robotların bulunduğu kaynak hatları için, çeşitli kaynak istasyonlarında değişik modellerin izlenebilmesi ve iş istasyonlarındaki robotlara programların yüklenebilmesi için programlanabilir kontrolör kullanılır.

Robotlar aracılığıyla gerçekleştirilen nokta direnç kaynağı prosesinin otomasyonundan elde edilen faydalar, artırılmış ürün kalitesi, operatör güvenliği ve imalat operasyonuna daha fazla hakim olunmasıdır. Kalitenin artması, kaynak dikişlerinin daha tutarlı olması ve kaynakların konumundaki tekrarlanabilirliğin daha iyi olmasındandır. Göreceli olarak çok iyi bir tekrarlanabilirliğe sahip olmayan robotlar bile insanlara nazaran nokta kaynaklarını daha doğru bir şekilde konumlandırabilirler. Elektriksel şok ve yanık tehlikelerinin bulunduğu çalışma alanından insanın uzak tutulması ile güvenlik artırılmış olur. Nokta direnç kaynağı prosesini otomize etmek için robotların kullanılması, üretim planlama ve proses içi envanter kontrolü gibi alanlarda gelişmelere neden olacaktır. Robotların ve kaynak ekipmanının bakımı, nokta direnç kaynağı hattının otomizasyonunun başarıyla gerçekleştirilmesi için önemli bir faktördür. [20]



Şekil II.17. Nokta Kaynağı Robotu [21]

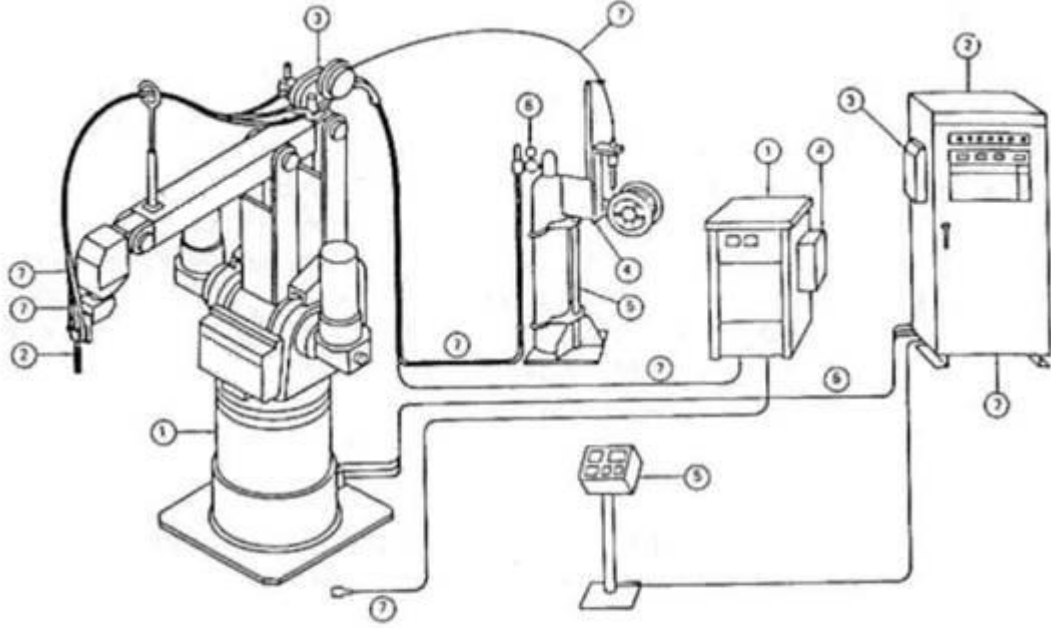
II.3.2. Ark Kaynağı

Ergitme esaslı kaynak yöntemleri içinde, MIG/MAG ve TIG (Tungsten Inert Gaz) yöntemlerinde robotlar çok kullanılmaktadırlar. Ancak ark kaynak yöntemlerinin uygulanmasında önemli teknik ve ekonomik problemlerle karşılaşmaktadır.

Sürekli ark kaynağındaki tehlikeler yüzünden, proste endüstriyel robotların kullanımı mantıklıdır. Bununla birlikte, robotların ark kaynağı için uygulanmasında karşılaşılan önemli teknik ve ekonomik problemler vardır. Sürekli ark kaynağı, düşük sayıda üretilen ve birçok komponentten oluşan ürünlerin imalatında sıklıkla kullanılır. Bu şartlar altında herhangi bir otomasyon şeklinin uygulanması zordur. Ark kaynağı, depoların içi, basınçlı kaplar ve gemi gövdeleri gibi ulaşmanın güç olduğu sıkışık alanlarda gerçekleştirildiği için bir problem teşkil eder. Bu tip alanlarda insanlar daha rahat çalışabilirler. [20]



Şekil II.18. KUKA Arc Kaynak Robotu [22]



Robot Donanımları :

- 1) Ark Kaynak Robotu
- 2) Robot Kontrol Ünitesi
- 3) Öğretme (Teaching) Kutusu
- 4) Kaynak Sinyal Ünitesi
- 5) Kontrol Ünitesi
- 6) Kablolar

Kaynak Makinası Donanımları :

- 1) Güç Ünitesi
- 2) Kaynak Torcu
- 3) Tel Besleme Ünitesi
- 4) Tel Kontrol Ünitesi
- 5) Koruyucu Gaz Ünitesi
- 6) Manometre
- 7) Kablo ve Hortumlar

Şekil II.19. Ark Kaynak Robot Donatımı

II.3.2.1. Robotlarda Ark Kaynağı Donanımları

Endüstride kullanılan bir robotik ark kaynağı donanımı aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır.

- 1- Manipülör (Robot kolu)
- 2- Kaynak torku
- 3- Güç ünitesi
- 4- Kontrol ünitesi
- 5- Tel sürme ünitesi
- 6- Tel kontrol ünitesi
- 7- Koruyucu gaz ünitesi
- 8- Öğretme (teaching) kutusu
- 9- Kaynak sinyal ünitesi

10- Manometre

11- Robot kontrol ünitesi

12- Kablo ve hortumlar

13- Pozisyoner

II.3.2.2. Ark Kaynağı Robotunda Olması Gereken Özellikler

Ark kaynağı gerçekleştiren endüstriyel robotun bazı özellik ve yeteneklere sahip olması gerekir. Ark kaynağı uygulamalarında göz önünde bulundurulmuş bazı teknik konular şunlardır:

a) Çalışma hacmi ve serbestlik dereceleri

Robotun çalışma hacmi, kaynak edilecek parçaların boyutlarına yetecek büyüklükte olmalıdır. Kaynak torcunun yeterli manipülasyonuna izin verilmelidir. Ayrıca, eğer iş istasyonunda iki parça tutucu varsa her iki tutucuda da hareket döngüsü gerçekleştirmek için robot uygun erişime sahip olmalıdır. Ark kaynağı robotları için genellikle beş veya altı serbestlik derecesi gerekir. Bu sayı, kaynak işinin karakteristiklerinden ve parça manipülatörünün hareket yeteneklerinden etkilenir. Eğer parça manipülatörü 2 serbestlik derecesine sahipse, robotun daha az serbestlik derecesine sahip olmasına izin verilebilir.

b) Hareket kontrol sistemi

Ark kaynağı için sürekli-yol kontrolü gereklidir. Kaynak dikişinin üniformitesini sağlamak için robot, pürüzsüz sürekli harekete sahip olmalıdır. Buna ilaveten, kaynak döngüsünde hareketin başlangıcında kaynak banyosunu oluşturmak için bir bekleme, hareketin sonunda da kaynağı bitirmek üzere bir bekleme gerçekleştirilmelidir.

c) Hareketin kesinliği

Robotun tamlığı ve tekrarlanabilirliği kaynak işinin kalitesini belirler. Kaynak işlerinin kesinlik gereksinimleri, boyut ve endüstrinin pratiğine bağlı olarak değişiklik gösterir ve en uygun robot seçilmeden önce her kullanıcı tarafından bu gereksinimler tanımlanmalıdır.

d) Diğer sistemlerle ara yüzleme

Robot, hücredeki diğer ekipmanlarla birlikte çalışabilmek için yeterli giriş/çıkış ve kontrol yeteneklerine sahip olmalıdır. Bu diğer ekipmanlar, kaynak ünitesi ve parça pozisyonerleridir. Hücre kontrolörü, robotun hızı ve yörüngesi ile parça manipülatörünün operasyonu ve tel besleme hızı gibi kaynak parametrelerini koordine etmelidir.

e) Programlama

Robotun sürekli ark kaynağı için programlanması dikkat gerektirir. Düzensiz şekillere sahip kaynak yolları için, robotun hareket yolu boyunca fiziksel olarak hareket ettirildiği gösterme ile programlama (walkthrough) metodunu kullanmak uygundur. Düz (doğrusal) kaynak yolları için robotun, uzaydaki iki nokta arasındaki interpolasyonu gerçekleştirecek yeteneğe sahip olması gereklidir. Bu, programcının kaynak başlangıç ve bitiş noktalarını belirlemesine ve robotun noktalar arasındaki düz çizgi yörüngeyi hesaplamasına izin verir. [20]

II.3.3. Manuel ve Robotik Kaynağın Karşılaştırılması

Ark kaynağı robotlar tarafından yapılacaksa, genellikle, parçaların tutturulduğu kısıkaçlarla donatılmış bir döner masa gerekir. Operatör, masanın bir tarafında, parçaları kısıkaçlara yerleştirir. Masanın öbür tarafında ise robot, parçalara gereken kaynağı yapar. Masanın iki tarafı bir pano ile ayrılmıştır ve operatör arkta rahatsız olmaz. Bu düzenleme özellikle bir parça üzerinde birçok kısa kaynak yapılacaksa verimli olmaktadır. insanın ancak dakikada 70 cm hızla kaynak yapabildiği parçayı robot hızlı ve düzgün hareket becerisiyle, daha yüksek akım kullanarak, dakikada 270 cm hızla kaynak edebilmektedir. Robotun kaynatılan ayrıtı düzgün izleyebilmesi için geliştirilen algılayıcılar, doğrusal tarama yapan ince bir kızılötesi ışın ile ayrıtın profilini algılayabilmektedir. Böylece bir ayrıtın tam ve düzgün kaynatılması için yalnızca başlangıç ve bitiş noktalarının 15 mm' lik toleransla programlanması yetmektedir.

New York'ta Dahlstrom firması bilgisayar şasesi üretmek için gereken 35-70 arası kaynağı, bir Cincinnati Milacron T3 robota yaptırmıştır. Kaynak teli makarası dahil kaynak makinasının büyük bölümü robot kola monte edilmiştir. Robot bu birimde, el ile 42 dakika süren, her biri 50 mm uzunluktaki 44 kaynağı yalnızca 12 dakikada bitirmektedir. [20]

II.4. KALINTI GERİLME ÖLÇME METOTLARI

Kalıcı gerilme ölçüm metotlarına bakıldığında üç grupta toplandığı tespit edilmiştir. Birinci grup, ya bileşenlerden kesit almayı yada bileşenlerden malzeme kaldırmayı gerektiren mekaniksel tahribatlı yada yarı tahribatlı metotları içermektedir. Bu metotlar, önceden var olan gerilmelerin etkilediği gerilimin ortaya çıkarılması esasına dayanan ölçümlerden yararlanmaktadır. Bu metotlardan en sık kullanılanı delik delme metodudur; adı geçen yöntemle kalıcı gerilmeler birkaç milimetrelik derinliklerde ölçülebilir. İkinci grup, tahribatsız olan X-ışını kırınımı metodudur. [12]

X-ışınları difraksiyon teknikleri ile malzemelerin kafes parametreleri ölçülür. Elastik şekil değişimine uğramamış malzemenin kafes parametreleri bilindiği için, elastik şekil değişimleri kolayca hesaplanır. Bu tekniklerin uygulanması sırasında iş parçasında kesme veya delme yapılmadığı için herhangi bir hasar meydana gelmez. X-ışınları difraksiyon teknikleri ile yüzeyden 0,003 mm' ye kadar olan derinliklerde bile kalıntı gerilmeler ölçülür. Talaş kaldırılmış veya taşlanmış yüzeylerde olan kalıntı gerilmeler veya bir dişlinin dişlerindeki ısıl işleminden doğan gerilmeler sadece bu yöntemle ölçülür. Bu yöntemlerin çalışma süresinin çok uzun olması ve deney neticelerinin hassas olmaması gibi dezavantajlar yüzünden uygulanması yaygınlaşmamıştır. [11]

Üçüncü grup ise, gerilmeli ve gerilmemiş durumlarda farklı değerlere sahip fiziksel özellikler gösteren bir malzemede ölçümlerin gerçekleştirildiği tahribatsız metotları içerir. Bu üçüncü grupta ultrases ve manyetik özellikler esasına dayalı alt bölümler yer almaktadır. Uygun metodun seçimi, araştırma için mi yoksa kalite kontrol için mi gerekli olduğuna yada sadece yüzey katmanlarında kalıcı gerilme bilgilerine ihtiyaç duyulup duyulmadığına bağlı olmaktadır. [12] Kalıntı gerilimini ölçmede kullanılan yöntemler Tablo II.2 ' de görülmektedir.

Kaynaklı birleştirmeler için kullanılan beş teknik Tablo II.3' de özetlenmiştir. [12] İlk ikisi levhalara, üçüncü ve dördüncü yöntemler ise üç boyutlu cisimlere uygulanır. Bu dört yöntemde birim uzama rozetleri ile ölçümler yapılmaktadır. Beşinci yöntem ise foto elastik kaplama yöntemi olup birim uzama rozetlerinden faydalanılmaz. [11]

Tablo II.2. Kalıntı Gerilimini Ölçmede Kullanılan Yöntemler [13]

A-1 Elektrikli ve Mekanik birim uzama rozeti kullanan gerilme – gevşeme yöntemleri	Sadece levhalara uygulanan yöntemler	1- Elektrikli birim uzama rozeti kullanan kısımlara bölme yöntemi 2- Gunnert yöntemi 3- Mathar - Soete delik delme yöntemi 4- Stablin peş peşe frezeleme yöntemi
	Sadece silindir ve borulara uygulanan teknikler	5- Heyn - Bauer peş peşe talaş kaldırma yöntemi 6- Mesnager – Sachs oyma tekniği
	Üç boyutlu parçalara uygulanan teknikler	7- Gunnert delme tekniği 8- Rosenthal - Norton kısımlara bölme tekniği
A-2 Birim uzama rozeti kullanmayan gerilme – gevşeme yöntemleri		9- Grid sistem bölümlenme tekniği 10- Gevrek kaplama –Delme tekniği 11- Foto elastik kaplama - delme tekniği
B X-Işınları difraksiyon yöntemleri		12- X-Işınları film yöntemi 13- X-Işınları difraktometre tekniği
C Gerilme hassasiyetinden faydalanan yöntemler	Ultrasonik yöntemler	14- Polarize ultrasonik dalga tekniği 15- Ultrasonik inceltme tekniği
		16- Sertlik tekniği
D Çatlama Teknikleri		17- Hidrojen teşvikli çatlama yöntemi 18- Gerilmeli korozyon çatlama tekniği

Tablo II.3. Kaynaklı Yapılarda Kalıntı Gerilme Ölçümünde Kullanılan Gerilme-
Gevşeme Tekniklerinin Uygulamaları, Avantaj ve Dezavantajları [12]

TEKNİK	UYGULAMA	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
1- Elektrikli birim uzama rozeti ile levha için kullanılan kısımlara bölme yöntemi	Her pozisyonda ve her mekanda (atölye ve laboratuvar) uygulanabilir.	Prensipleri basit, ölçüm sonuçları çok hassas, güvenilir bir yöntemdir.	Tahribat veren bir yöntemdir. İşparçasından ayrılan kısımlardaki ortalama gerilmeyi ölçtüğünden lokal konsantre gerilme ölçümüne uygun
2- Mathar-Soete Delik delme yöntemi	Her mekanda ölçüm yapılabilir. Ölçüm yapılacak yüzey tavan, düşey veya korniş pozisyonda olmalıdır.	Basit bir yöntemdir. İş parçasına çok az hasar verir.	Delme sırasında deliğin dış yüzeyinde şekil değişimi olursa sonuçlar hatalı çıkar. Delme işlemine büyük dikkat gösterilmelidir.
3- Gunnert Delme Tekniği	Her mekanda uygulanır. Parça yüzeyi korniş pozisyonda ve dayanıklı olmalıdır.	Yarı tahribatlı basit bir yöntemdir. Test edilen parçadaki hasar kolayca giderilebilir.	Levha mutlaka dayanıklı olarak sabitlenmelidir. Hareketi tamamen engellenmelidir. Kalifiye personel deneyi
4- Rosenthal-Norton kısımlara bölme tekniği	Laboratuvar da uygulanır	Ölçümler dikkatle yapılırsa çok hassas sonuçlar elde	Uzun süreli, zor ve tamamen tahribatlı bir yöntemdir
5- Fotoelastik Kaplama-Delme Tekniği	Esasen laboratuvar tekniğidir. Ancak belirli şartlar altında atölyede kullanılır.	Lokal gerilmeler ölçülebilir. Parçaya çok az hasar verir.	Delinen deliğin kenarında oluşabilen plastik şekil değişimlerine karşı hassastır.

II.4.1. Kalıcı Gerilme Ölçüm Metotlarının Sınıflandırılması

Kalıcı gerilme ölçüm metotlarının kavranabilmesi ve bu metotların karşılaştırılmasının daha rahat yapılabilmesini sağlamak amacıyla kalıcı gerilme ölçüm metotlarını aşağıdaki gibi üç ana grup içerisinde toplamak uygun olacaktır. [11]

- 1- Bunlardan ilki mekaniksel metotları içermektedir. Mekaniksel metotlar;
 - a) Delik Delme Metodu (Alt yüzeydeki gerilmeler, 0.1 ~ 10 mm derinlik)
 - b) Halka Delik Delme Metodu (Alt yüzeydeki gerilmeler, 0,1~10-mm derinlik)
 - c) Derin Delik Delme Metodu (Alt yüzeydeki gerilmeler, 10~100 mm derinlik)
 - d) Kesit Alma ve Katman Kaldırma Metodu (Alt yüzeydeki gerilmeler, 10~100 mm derinlik) şeklinde sıralanabilir.

Bu metotlar tahribatlı yada yarı tahribatlı olarak ta anılır ve bunlar dikkat gerektiren işlemler yardımıyla (delik delerek, kesitler çıkarılarak yada katmanlar kaldırarak) bileşenin geometrisinde oluşturulan değişime bağlıdır. Bu metotlarda gerilimdeki bileşke değişiklikler ölçülür ve ondan sonra orijinal gerilme üyeleri belirlenir. Genelde tahribatlı tekniklerin çoğunda bütün kalıcı gerilmeler hakkında elde edilebilir bir çok detaylı bilgiler vardır.

- 2- Kalıcı gerilmeleri belirlemenin ikinci metodu X-Ray ve Nötron Işınlının kullanıldığı metotlardır. Bu metotlar;
 - a) X-Ray metodu (Yüzeydeki gerilmeler, 0.001~0.01 mm derinlik)
 - b) Nötron Difraksiyon Metodu (Yüzeydeki gerilmeler, -1~10- mm derinlik) şeklinde sıralanabilir.

İnce bir yüzey katmanındaki kalıcı gerilmeyi belirlemek için kullanılan X-Ray' ler tahribatsızdır; X-Ray' ler derinliğe bağlı olarak değişen kalıcı gerilmelerin bir kopyasını elde etmek için art arda gelen katman kaldırma yöntemi ile birlikte de kullanılabilir, ancak bu durumda uygulanan yöntem tahribatlı olur. Kalıcı gerilmeleri ölçmek için numune yüzeyinin nötron bombardımanına maruz bırakıldığı, Nötron kırınım metotları da bu gruba dahil edilebilir.

3- Mevcut gerilmelerin etkili olduğu malzeme özelliklerine ait fiziksel parametrelerdeki değişikliklerin ölçüldüğü diğer ısın ve dalga metotları ise üçüncü grup ölçüm metotları arasında sayılabilir. Bu metotlar;

- a) Manyetik Metot (Yüzeydeki gerilmeler, 0.01~0.1 ' mm derinlik)
- b) Ultrasonik Metot (Yüzeydeki gerilmeler, 0.1~1' mm derinlik) şeklinde sıralanabilir. Bu metotlarda gerçek gerilme seviyeleri ile ölçülmüş değerlerin korelasyonu alınır.

Farklı ölçüm metotları mikro gerilmeleri yada makro gerilmeleri ölçer. Genelde mekaniksel metotlar sadece makro gerilmeleri ölçer. Mikro gerilmeler sadece X-Ray metodu ile ölçülebilir. Yinede X-Ray metodu mikro gerilmelerin ölçümü ile sınırlı değildir. Bu metodun makro gerilmelerin de ölçülmesi için çok geniş bir kullanımı vardır. [11]

II.4.1.1. Mekaniksel Metotlar

Adından da anlaşılacağı gibi malzeme üzerinde az yada çok tahribata neden olacak şekilde bir ölçme yöntemidir. Bu metotla kalıntı gerilme ölçmenin çeşitli ilkeleri vardır ve ölçüm yaparken bunlara dikkat edilmelidir. [12]

1. Numunelerin kesit alanlarının boyutları, kesit almaya ve ölçüm yapmaya elverişli olmalı.
2. Kalıntı gerilmelerin belirlenmesinde kullanılan Saint Venant kuralı, gerilmelerin mekaniksel yöntemlerle belirlenmesinde kullanılır. Yani aynı cismin sınırlı bir S yüzeyinde yayılmış arklı iki kuvvet sistemi statik olarak eş değerse, bu kuvvetlerin adı geçen bölgelerden yeterince uzak noktalarda oluşturduğu gerilmeler hemen hemen aynıdır.
3. İç gerilmesi olan bir cisim, bizi ilgilendiren herhangi bir kesit alanından ikiye ayırdığımızda, yeni oluşan yüzeyi eşit şiddetli ve zıt yönlü dış gerilmelerin etkilediğini düşünebiliriz.
4. İç gerilmelerini belirlediğimiz bir cisimde bu gerilmelerin eşit yayıldığını ve cismin malzemesinin nazik bir tabakada izotrop olduğunu yani tüm yöntemlerde mekaniksel niteliklerin aynı olduğunu, cisimden ince tabakalar kaldırıldığında oluşan deformasyonun malzemenin elastikiyet sınırını geçmediği kabul edilir.

5. Malzemenin kesit alanından üstteki tabakanın bir veya birkaç işlemde ve hangi sıra ile kaldırıldığında gerilmelerin yüzeyde oluşturduğu deformasyonu etkilemediği düşünülür.
6. Malzemedan gerilmeleri tespit için numune keserken ve tabakalar kaldırırken bu işlemlerin numunede artık gerilmeler oluşturmadığı kabul edilmektedir. Bu nedenle kullandığımız imal usullerini ve imal faktörlerini oluşturduğu gerilmelerin önemsiz bir değer olacak şekilde seçmeliyiz.
7. İç gerilmelerin olduğu bir cisim hayali olarak iki kısma ayırarak mekanikteki kuvvet kavramına dayanarak cisimde olan gerilmelerin aynı değer ve işaretle kesit alanını etkilediğini kabul ederiz.

II.4.1.2 Kesit Alma ve Katman Kaldırma Metotları

Bu yöntem numune üzerinden malzemenin art arda katmanların kaldırılmasını ve kaldırılan her bir katman ardından numunede arta kalan deformasyonun ölçülmesini içerir. Bu ölçümlerden numunedeki orijinal kalıcı gerilmeler hesaplanabilir.

Temel amaç, yorulma kırılmasının ve uygulanmış yükün doğrultusuyla tanımlanmış olan temel gerilmelerin meydana geldiği düzlemdeki kalıcı gerilmelerin mümkün olduğu kadar hassas ölçülmesidir. Kalıcı gerilme çoğu kez çok aşırı olduğu için, mümkün olduğu kadar küçük olarak kaldırılan art arda gelen katmanların kalınlığı önem arz etmektedir. [11] Kesit alma metotları tek, çift ve üç eksenli kalıcı gerilme durumlarını belirlemek için uygulanabilir. Bununla birlikte bu metotlar genel olarak tahribatlıdır. Gerçekleştirilmesi çok pahalıdır. [11]

Yüzey gerilmelerini belirlemek için kullanılan diğer metotlar bileşenden malzeme parçalarının kesilerek çıkartılmasını içerir; kesip çıkarılan parçadaki gerilim değişiklikleri, kesme işleminden önce parçanın kesilip çıkarılacak kısmına yapıştırılmış gerinim ölçerler yada ekstansometre yardımıyla ölçülebilir. [11]

Metal kaldırma prosesinde, ölçülmüş olan orijinal gerilmelere rağmen benzer önemde olan yeni kalıcı gerilmelerin kolayca ortaya çıkması mümkündür. Katman kaldırmak için kullanılacak yöntem parçada ilave gerilmeler oluşturmayacak yöntemlerden dikkatle seçilmelidir. [11]

II.5. KALINTI GERİLMELERİN “ KÖR DELİK YÖNTEMİ ” İLE SAPTANMASI

Bu yöntem teorisi J.Mathar tarafından ortaya konmuştur. Yöntem, kalıntı gerilmelerin bulunabileceği bölgeye çapı 1.5-2 veya 3 mm olan delik delinerek, deliğin çevresinde oluşan birim şekil değişikliklerini, birim uzama ölçerleriyle saptamaya ve saptanan bu değerlerden yararlanılarak, kalıntı gerilmelerin yönü, doğrultusu ve büyüklüklerinin hesaplanması esasına dayanır.

Malzemelerin belirli bölgesinde, iç kısımda oluşmuş kalıntı gerilmeler, delme esnasında değişikliğe uğrar ki, bu durum deliğin çevresinde yüzey değişikliğine yol açar. Yüzeyde oluşan bu değişikliklerin delikli birim uzama ölçerlerle belirlenmesi konunun özünü kapsar.

Delinen deliğin küçük çaplı oluşu, kalıntı gerilmeleri ölçülecek malzemeye zarar vermez ve fonksiyonunu olumsuz yönde etkilemez. Bunun için, bu yöntem, hadde ürünlerinde, kaynak konstrüksiyonlarında, döküm parçalarda veya montaj sırasında makine elemanlarında oluşan kalıntı gerilmelerin bulunmasında geniş bir şekilde uygulanmaktadır. [6]

II.5.1. Delik Delme Tekniğinin Gelişimi

Kirsch (1898) ; Tek eksenli gerilme alanı için, delik boyunca ampirik çözüm geliştirdi.

Mathar (1934) ; Mekanik bir ekstansometre uygulaması.

Soete & Voncrombrugge ; Gerilim ölçerlerin ilk uygulanması.

Kelsey (1956) ; Kör delik tekniğinin kullanımını derinlik ile RS' in değişimi.

Rendler ve Vigness (1966) ; Kör delik için ampirik analiz, standart rozet geometrisi geliştirildi.

Beaney ve Procter (1974) ; Hava aşındırıcı makinesi.

Bijak-Zachowski (1981) ; Üniform olmayan gerilmelerin hesaplanması.

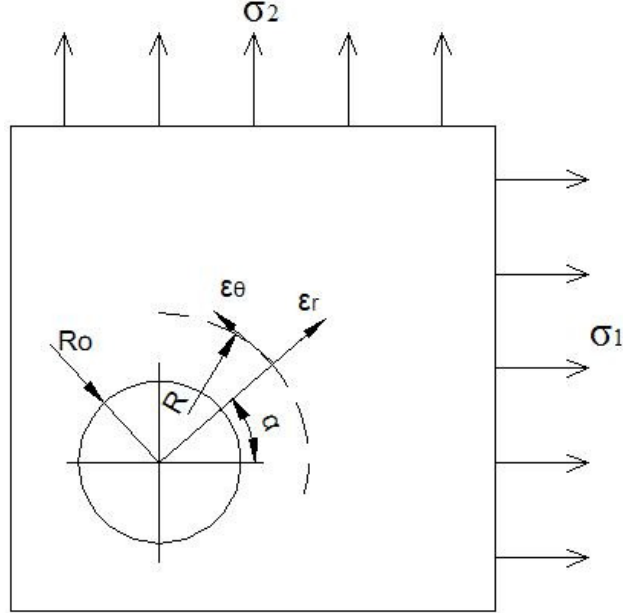
Schajer (1981) ; FEA kullanıldı, kalibrasyon katsayıları tablolandı.

Schajer (1988) ; Üniform olmayan gerilme alanları için katsayılar.

ASTM E837-99 ve Ölçüm Grup (Measurements Group) TN-503-3 [23]

II.5.2. Kör Delik Yönteminin Teorisi

Kalıntı gerilmeleri ölçeceğimiz bölgeye R_0 yarıçaplı bir delik delinirse, delik merkezinden R yarıçap kadar uzaklıkta bir P noktasında oluşacak birim uzama ϵ_r , σ_1 tek yönlü gerilmesi dikkate alınarak 2.6. nolu formül yazılabilir. Buradan $r = R/R_0$ olmaktadır.



Şekil II.20. Kör Delik Yönteminde Gerilme ve Birim Uzamalar [6]

$$\epsilon_r = -\sigma_1 \cdot \frac{1+\nu}{2E} \cdot \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cdot \cos 2\alpha + \frac{4}{1+\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \cos 2\alpha \right] \quad (2.6)$$

$$\epsilon_r = -\sigma_1 \cdot \frac{1+\nu}{2E} \cdot \frac{1}{r^2} + \sigma_1 \cdot \frac{1+\nu}{2E} \cdot \frac{3}{r^4} \cdot \cos 2\alpha - \sigma_1 \cdot \frac{1+\nu}{2E} \cdot \frac{4}{1+\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \cos 2\alpha$$

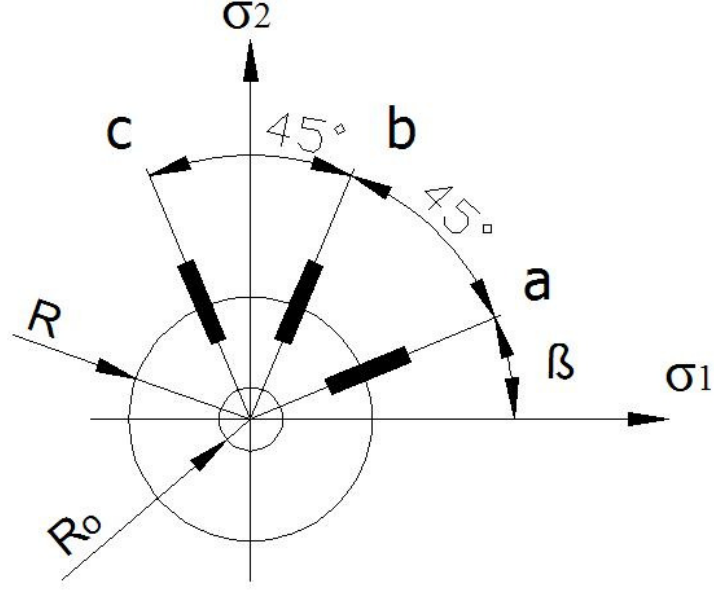
olur. Burada aşağıdaki gibi kısaltma yapılır.

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \cdot \frac{1}{r^2}; \quad B = -\frac{1+\nu}{2E} \cdot \left[\frac{4}{1+\nu} \cdot \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right] \quad (2.7)$$

$$\epsilon_r = \sigma_1 \cdot (A + B \cos 2\alpha)$$

olur. ve σ_2 gerilmeleri varsa

$$\epsilon_r = \sigma_1 \cdot (A + B \cos 2\alpha) + \sigma_2 [A + B \cdot \cos 2(\alpha + 90^\circ)] \quad \text{olur.} \quad (2.8)$$



Şekil II.21. Delik Çevresindeki Birim Uzama Ölçerlerin Konumu [6].

a,b ve c doğrultularındaki birim uzamaları bulmak için 2.8. nolu denklem esas alınarak ve

$\alpha = \beta$, $\alpha b = \beta + 45^\circ$ $\alpha c = \beta + 90^\circ$ olmak üzere ϵ_a , ϵ_b ve ϵ_c aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} \epsilon_a &= \sigma_1 \cdot (A + B \cdot \cos 2\beta) + \sigma_2 [A + B \cdot \cos 2(\beta + 90^\circ)] \\ \epsilon_a &= \sigma_1 \cdot (A + B \cdot \cos 2\beta) + \sigma_2 [A + B \cdot \cos(2\beta + 180^\circ)] \\ \epsilon_a &= \sigma_1 \cdot (A + B \cdot \cos 2\beta) + \sigma_2 [A - B \cdot \cos 2\beta] \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_b &= \sigma_1 \cdot [A + B \cdot \cos 2(\beta + 45^\circ)] + \sigma_2 [A + B \cdot \cos 2(\beta + 45^\circ + 90^\circ)] \\ \epsilon_b &= \sigma_1 \cdot [A + B \cdot \cos(2\beta + 90^\circ)] + \sigma_2 [A + B \cdot \cos(2\beta + 270^\circ)] \\ \epsilon_b &= \sigma_1 \cdot [A - B \cdot \sin 2\beta] + \sigma_2 [A + B \cdot \sin 2\beta] \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= \sigma_1 \cdot [A + B \cdot \cos 2(\beta + 90^\circ)] + \sigma_2 [A + B \cdot \cos 2(\beta + 90^\circ + 90^\circ)] \\ \epsilon_c &= \sigma_1 \cdot [A + B \cdot \cos(2\beta + 180^\circ)] + \sigma_2 [A + B \cdot \cos(2\beta + 360^\circ)] \\ \epsilon_c &= \sigma_1 \cdot [A - B \cdot \cos 2\beta] + \sigma_2 [A + B \cdot \cos 2\beta] \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.9 - 2.10 ve 2.11 nolu denklemlerden yararlanılarak σ_1 , σ_2 ve β bulunur.

σ_1 ' i bulmak için önce 2.11 nolu denklemde σ_2 yalnız bırakılır ve 2.9 nolu denklemde yerine konur.

2.11 nolu denklemden $\sigma_2 = \frac{\epsilon c - [A - B \cdot \cos 2\beta] \cdot \sigma_1}{A + B \cdot \cos 2\beta}$ bulunur.

2.9 nolu denklemde yerine konursa,

$$\epsilon a = \frac{[A + B \cdot \cos 2\beta]^2 \cdot \sigma_1 + [A - B \cdot \cos 2\beta] \cdot [\epsilon c - (A - B \cdot \cos 2\beta) \cdot \sigma_1]}{A + B \cdot \cos 2\beta}$$

$$\sigma_1 = \frac{\epsilon a(A + B \cdot \cos 2\beta) - \epsilon c(A - B \cdot \cos 2\beta)}{(A + B \cdot \cos 2\beta)^2 - (A - B \cdot \cos 2\beta)^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{\epsilon a(A + B \cdot \cos 2\beta) - \epsilon c(A - B \cdot \cos 2\beta)}{4AB \cos 2\beta} \quad \text{olur.} \quad (2.12)$$

σ_2 'de aynı yöntemle bulunur. 2.11 nolu denklemde σ_1 yalnız bırakılır. Bulunan σ_1 değeri 2.9 nolu denklemde yerine konarak gerekli işlemler yapılırsa,

$$\sigma_2 = \frac{\epsilon c(A + B \cdot \cos 2\beta) - \epsilon a(A - B \cdot \cos 2\beta)}{4AB \cdot \cos 2\beta} \quad \text{olur.} \quad (2.13)$$

$\tan 2\beta$ 'nin çıkışı 2.10 nolu denklemden $\sin 2\beta$, 2.11 nolu denklemden de $\cos 2\beta$ bulunur. Ve $\tan 2\beta = \frac{\sin 2\beta}{\cos 2\beta}$ formülünde yerlerine konarak sonuca gidilir.

$$\epsilon b = \sigma_1[A - B \cdot \sin 2\beta] + \sigma_2[A + B \cdot \sin 2\beta]$$

$$\sin 2\beta = \frac{\epsilon b - A(\sigma_1 + \sigma_2)}{B(\sigma_2 - \sigma_1)}$$

$$\epsilon c = \sigma_1[A - B \cdot \cos 2\beta] + \sigma_2[A + B \cdot \cos 2\beta]$$

$$\cos 2\beta = \frac{\epsilon c - A(\sigma_1 + \sigma_2)}{B(\sigma_2 - \sigma_1)}$$

$$\tan 2\beta = \frac{\epsilon b - A(\sigma_1 + \sigma_2)}{\epsilon c - A(\sigma_1 + \sigma_2)} \quad (2.14)$$

2.12 ve 2.13 nolu denklemlerdeki σ_1 ve σ_2 'nin karşılıkları 2.14 nolu denklemde yerine konarak gerekli işlemler yapılırsa

$$\tan 2\beta = \frac{\epsilon a - 2\epsilon b + \epsilon c}{\epsilon a - \epsilon c} \quad \text{olur.} \quad (2.15)$$

Uygulamada kolaylık sağlamak amacı ile 2.12 2.13 ve 2.14 nolu denklemlerde gerekli işlemler yapıldıktan sonra ve $\tan 2\beta$ aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma_1 = \frac{\epsilon a + \epsilon c}{4A} + \frac{\epsilon a - \epsilon c}{4B \cdot \cos 2\beta}$$

$$\sigma_2 = \frac{\epsilon a + \epsilon c}{4A} - \frac{\epsilon a - \epsilon c}{4B \cdot \cos 2\beta} \quad (2.16)$$

$$\tan 2\beta = \frac{\epsilon a + \epsilon c - 2\epsilon b}{\epsilon a - \epsilon c};$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \frac{\epsilon a + \epsilon c - 2\epsilon b}{\epsilon a - \epsilon c};$$

2.16 nolu denklemler incelendiğinde σ_1 , σ_2 ve $\tan 2\beta$ büyüklüklerinin bulunabilmesi için, ϵa , ϵc ve ϵb birim uzamaları ile A ve B değerlerinin bilinmesi gerekir.

ϵa , ϵb ve ϵc değerleri birim uzama ölçerlerle (strain-gages), A ve B değerleri ise 2.7 nolu formüllerden yararlanılarak bulunur ve 2.16 nolu formüllerde yerine konursa σ_1 , σ_2 ve $\tan 2\beta$ büyüklükleri tespit edilmiş olur.

Deneyler göstermiştir ki, kalıntı gerilmeler üniform bir dağılım durumunda iseler, yüzeysel şekil değişikliği ile delik derinliği doğru orantılı olarak değişmektedir.

Ancak, kalıntı gerilmeler karmaşık bir dağılıma sahipse, yüzeysel şekil değişikliğiyle delik derinliği arasında orantılı bir ilişki söz konusu değildir. Bu nedenle kalıntı gerilmelerin yönü, doğrultuları ve şiddetleri hakkında daha sağlıklı değerler elde edebilmek için, delik küçük artırımlarla delinir ve her artırım sonucu birim uzama ölçerlerde oluşan birim uzamalar (ϵa , ϵb , ϵc) belirlenir. [6]

II.5.3. Delme Kılavuzları

σ_1 , σ_2 ve β büyüklüklerinin sağlıklı belirlenebilmesi için, kalıntı gerilmeleri ölçülecek malzemenin ilgili bölgesine yapıştırılan delikli rozet birim uzama ölçerlerin delik merkezi ile malzeme üzerine delinecek delik merkezinin “ Çakışık ” olması gerekir. Bunu sağlamak amacıyla çeşitli delme kılavuzları yapılmıştır. [6] Şekil II.22 ’ de Hottinger Baldwin Messtechnik firması tarafından geliştirilen MTS 3000 özel kılavuz görülmektedir. Matkabın merkezde delebilmesi için “ Mıknatıslı altlık” kullanılmaktadır. Şekil II.23.’ de MTS 3000 delik delme aracının kontrol ünitesi görülmektedir. [14]

MTS 3000 sistemi:

- Optik-Mekanik sistem
- Elektronik Kontrol Ünitesi
- Delik delme işlemi ve kontrol yazılımı
- Yeniden işleme yazılımından meydana gelmektedir. [14]



Şekil II.22 MTS 3000 Delik Delme Aracının Mikroskopla Odaklama Aparatlarının Montaj Resmi [14]



Şekil II.23. MTS 3000 Delik Delme Aracının Kontrol Ünitesi [14]

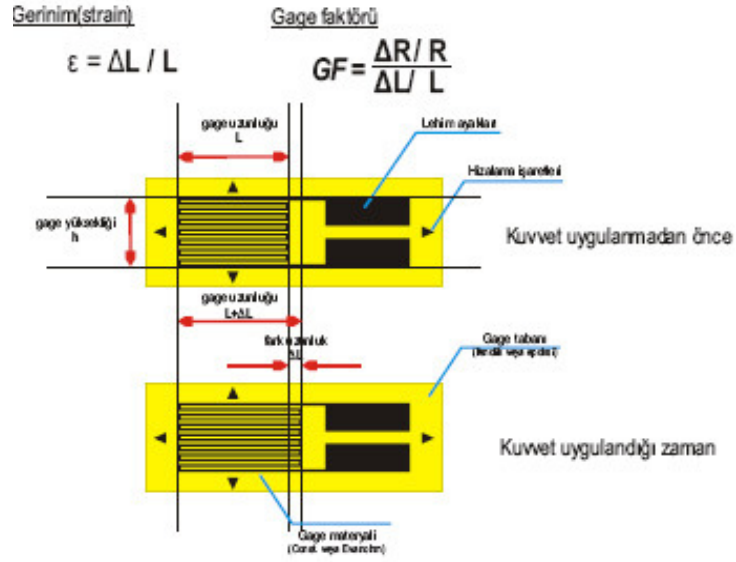
II.5.4. Kör Delik Metodunun Uygulanması

Kalıcı gerilme ölçmede kullanılan delik delme metodu bir bileşenin yüzeyine yapıştırılmış üç gerinim ölçer rozetin merkezinden bir deliğin delinmesi esasına dayanır. Ayrıca yukarıdaki bölümlerde serbest yüzeylere dik gerilmelerin bu serbest yüzeylerde daima sıfır olacağına dikkat çekilmiştir. Sonuç olarak, eğer gerilmeli bileşenin yüzeyinde bir delik meydana getirilirse, bu deliğin kenarındaki radyal gerilmeler sıfıra indirgenir. Gerilmelerin yeni bir dağılımı genel olarak deliğin etrafında meydana gelir. Deliğin yüzeyindeki radyal gerinim tamamen gevşeyecektir, fakat gerilimdeki bu değişimleri doğrudan ölçmek için deliğe yeterince yakın gerilim ölçer elemanlarını yerleştirmek uygulanabilir değildir.

Gerinim ölçerler rozetteki delikten yüzeye sınırlı bir mesafede yerleştirilmiş ve gerçek kalıcı gerilme hesaplanacağı zaman bu ofset mesafesi uygun toleranslar içinde olmalıdır. Gerinim ölçerler delinecek deliğin merkezi etrafında çevresel olarak 0° , 90° ve 225° lik açılarla değişmeyecek şekilde yerleştirilir ve rozetin merkezinden eşit aralıklarla çıkarılan bu açı uzantıları deliğin merkezi ile çakışacak şekildedir. [11]

Strain gerilim ölçerler Şekil II.24.' deki gibi iki tabaka kağıt yada plastik arasına yerleştirilen yaprak biçimli çok ince kalınlıklı levha/küçük çaplı telden oluşur. Genellikle 0.03 mm çaplı tel yada 0.003 mm kalınlıklı yaprak levha kullanılır. Ölçer pullar dış yüzeyden ölçüm yapılacak yüzeye yapıştırılırlar. Yük etkisi altında söz konusu yüzeyde şekil değişimi olduğunda tel ızgara yüzeyle birlikte uzar yada kısalır.

Bu boy değişimi ölçerin elektriksel direncinde değişime yol açar. Ölçerin uçlarına bağlanan bir akım köprüsü elektrik direncindeki değişimi uzunluk değişimine dönüştürür. Bu amaçla kullanılan akım köprüsüne Wheatstone köprüsü adı verilir. [11]

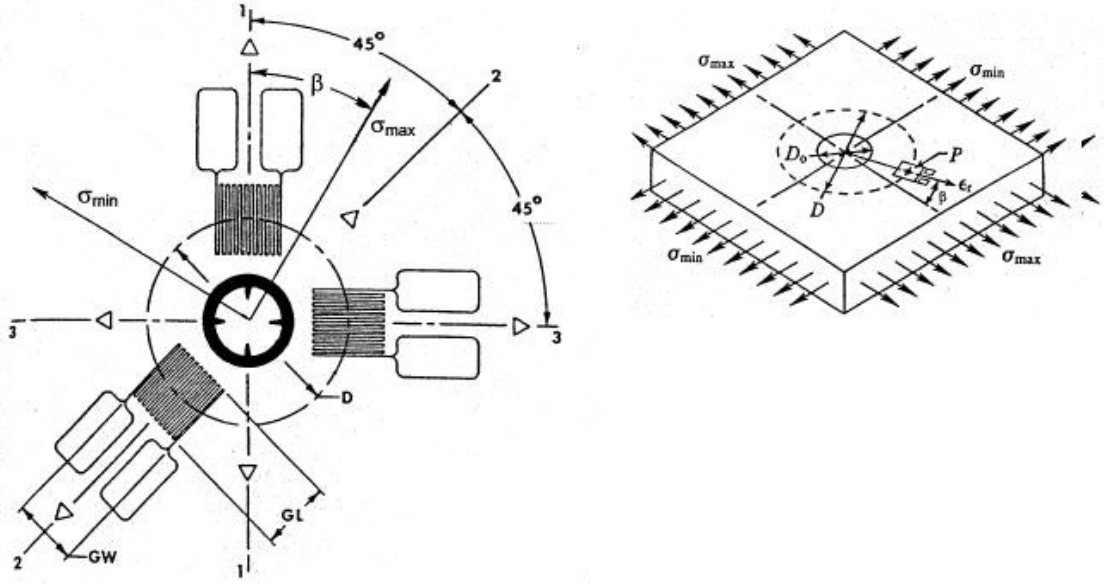


şekil II.24. Strain Gage (Gerinim ölçerin) Yapısı

Bu yöntemde normalde delik delindikten sonra gerilmeler ölçülür fakat buna rağmen delik delinirken de belirli aralıklarda da gerilimi ölçmek mümkündür. ASTM E837 standardına göre delik çapı $0.3 < D_o/D < 0.5$ arasında olmalıdır. [11] Burada kullanılan rozetin grid merkez çapına dikkat edilmelidir. şekil II.25' de kalıntı gerinim ölçme rozetinin delik çapı ve ölçüm çemberinin çapı görülmektedir. Delik çapı Tablo II.4.' de özellikleri verilen vishay firmasının CEA-XX-062UM-120 rozetine göre hesaplandığında 1.54 ile 2.6 arasında olmalıdır. Delik derinliği ise ASTM 837 standardında matkap çapının maksimum 1.2 katı olarak verilmektedir.

Tablo II.4. 90°' lik (CEA-XX-062UM-120) Kalıntı Gerinim Ölçme Rozeti Özellikleri [17]

Direnci Ω	ÖLÇÜLER					
	Gage uzunluğu	Grid Merkez Çapı	Normal Delik Çapı		Matrix	
			Minimum	Maksimum	Uzunluk	Genişlik
120±0.4%	0.062	0.202	0.06	0.08	0.38	0.48
	1.57	5.13	1.5	2.0	9.6	12.2



Şekil II.25. Temel Ölçüm Tasarımı [23]

D ölçüm çemberinin çapıdır.

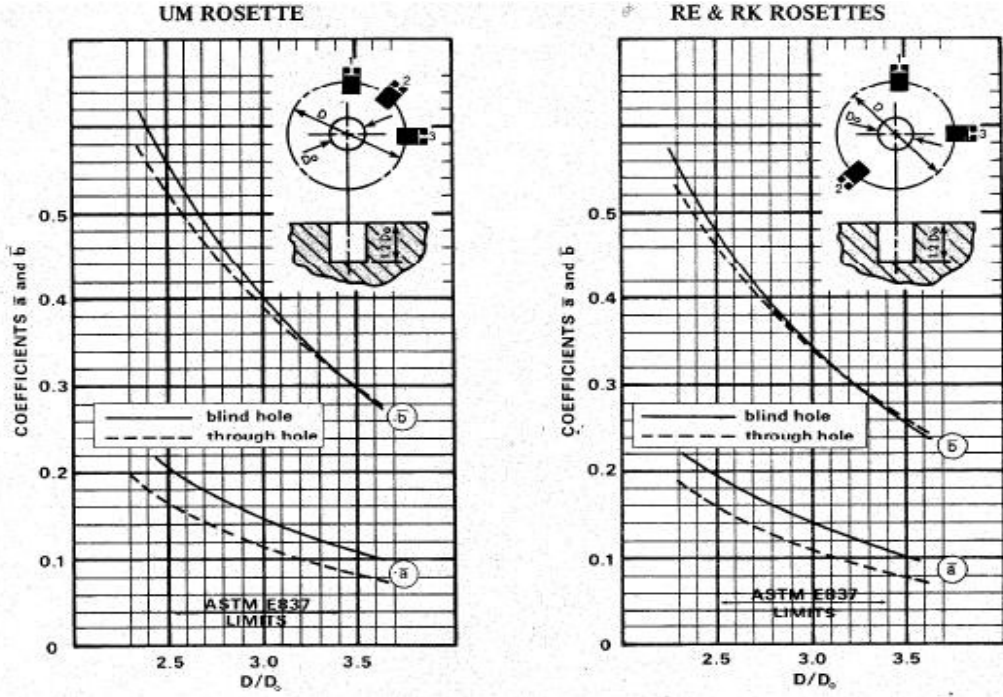
D_o delinen deliğin çapıdır.

Tablo II.5. A Tipi Rozet için Katsayılar ASTM E837-99 [23]

Rozet A	\bar{a}					\bar{b}				
	Delik Çapı, D _o /D					Delik Çapı, D _o /D				
Kör delik										
Derinlik / D	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.00	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
0.05	.027	.037	.049	.063	.080	.051	.069	.090	.113	.140
0.10	.059	.081	.108	.138	.176	.118	.159	.206	.255	.317
0.15	.085	.115	.151	.192	.238	.180	.239	.305	.375	.453
0.20	.101	.137	.177	.223	.273	.227	.299	.377	.459	.545
0.25	.110	.147	.190	.238	.288	.259	.339	.425	.513	.603
0.30	.113	.151	.195	.243	.293	.279	.364	.454	.546	.638
0.35	.113	.151	.195	.242	.292	.292	.379	.472	.566	.657
0.40	.111	.149	.192	.239	.289	.297	.387	.482	.576	.668
Direk Delik	.090	.122	.160	.203	.249	.288	.377	.470	.562	.651

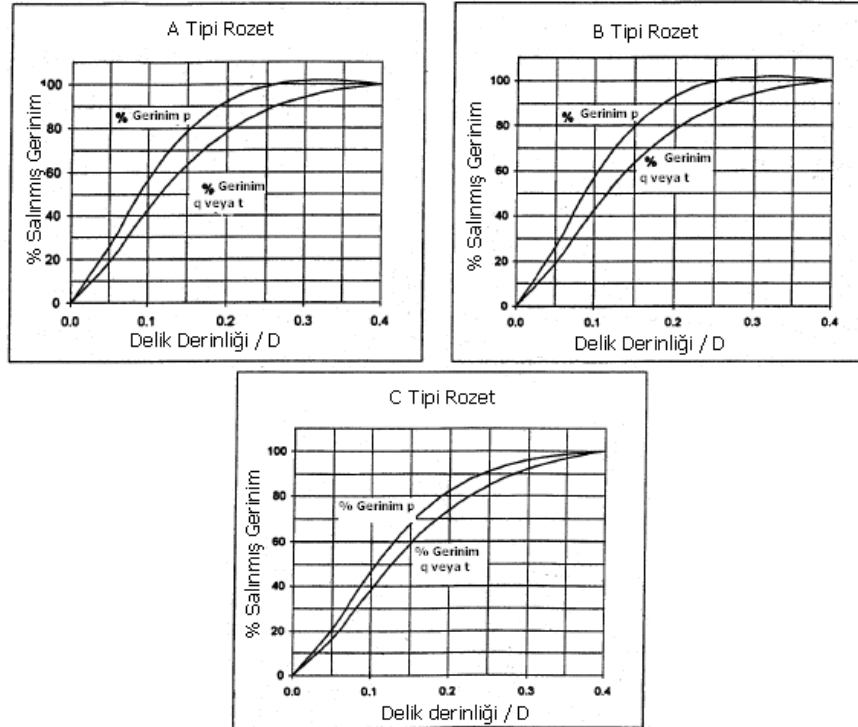
Şekil II.28. ' de 3 ana kalıntı gerilme ölçme rozet tipleri görülmektedir. 3 ana ölçer (gauge) tipi için gerinim değerlerinin gerilmeye dönüştürülmesinde kullanılmak üzere katsayılar ASTM E837-99' da gösterildiği gibi tablolaşmıştır.

- Artarak delme ve boydan boya delme
- Tipik artırım 0.05D
- Max. Derinlik kör delik için ~ 0.4D
- Bazı interpolasyonlar için gerekli olabilir.

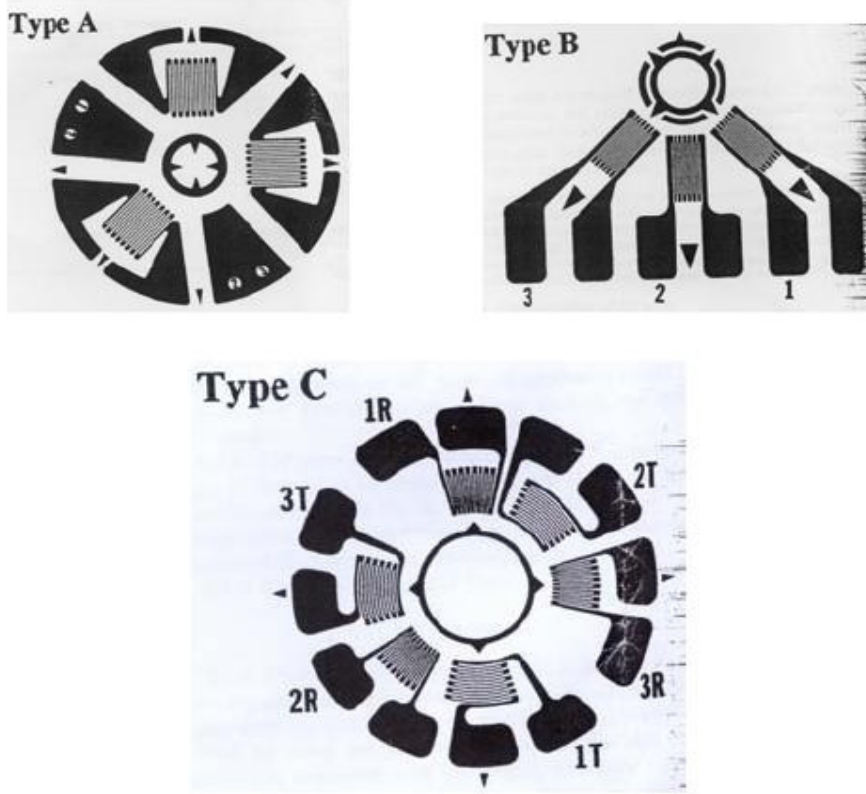


Şekil II.26. Sol Taraftaki Grafik UM ölçerin ve Sağ Taraftaki Grafik RE ve RK Ölçerlerin Genel Temsilidir. [23]

Kullanılan rozet tipine göre delik derinliğinin ölçüm çemberinin merkez çapına oranını hesaplayarak yüzde gerilim duyarlılığını Şekil II.27 'deki grafikleri kullanarak bulabiliriz. Burada gösterilen p hidrostatik gerilmeyi, q veya t ise x-y eksenleri boyunca kayma gerilmesini ifade etmektedir. [23]



Şekil II.27. Gerilim Ölçer Tiplerine Göre Gerilim Duyarlılığı Grafikleri [23]

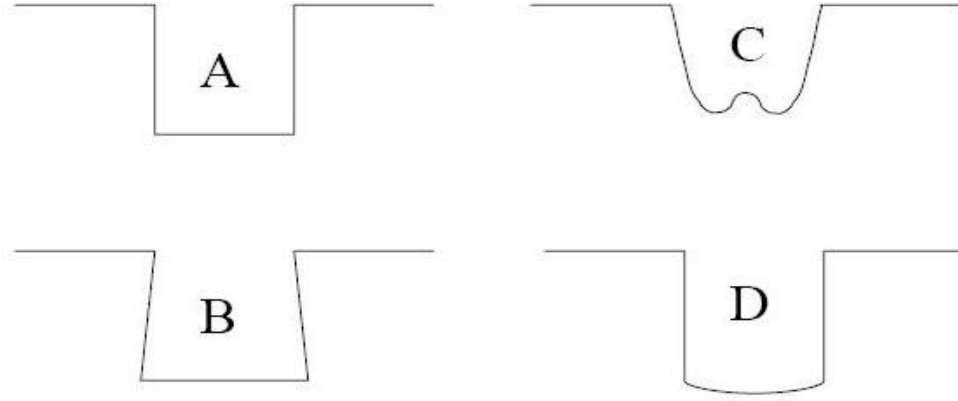


Şekil II.28. Tipik Delik Delme Rozet Tipleri [15]

- a) Üç elementli 120°'lik direnç ölçme rozeti
- b) Üç elementli 90°'lik direnç ölçme rozeti
- c) Altı elementli rozet



Şekil II.29. Type A Delta Oryantasyon Type B Konfigürasyon (ASTM Tespiti) [16]



Şekil II.30. Tipik Delik Geometrilerinin Şematik Gösterimi

A- Yüksek hızda delme **B-** Düşük hızda değiştirilmiş parmak frezeyle delme
C- Hava aşındırıcılı jet makinede işleyerek **D-** Elektro kimyasal frezeleme [15]

Kalıntı gerilme ölçümünde kullanılan delme yöntemine göre oluşan delik geometrileri Şekil II.30' da görülmektedir. Yüksek hızda delme metoduyla yapılan ölçüm işleminde düzgün bir geometri elde edildiği diğer metodlarla yapılan kıyaslamada görülmektedir. Günümüzde en çok kullanılan çeşitli firmaların üretmiş oldukları yüksek hızda deliciler Şekil II. 31' de verilmektedir.



Şekil II.31. Tipik Ticari Delik Delme Donanımları (Üst soldan saat dönüş yönünde Vishay Measurements Group, HBM, HYTEC Inc., Stresscraft Ltd) [15]

II.6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

II.6.1. Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizi öncelikle havacılık ve nükleer sistemlerde karmaşık problemlerin çözümü için 1960' lı yıllardan itibaren geliştirilmiş bir nümerik hesaplama yöntemidir. Özellikle gelişen bilgisayar teknolojisine bağlı olarak son zamanlarda çok zor ve karmaşık problemleri hızlı bir şekilde çözebilen yazılım ve donanımlar geliştirilmiştir. Buna bağlı olarak paket program olarak satılan ve çok sofistike problemleri çözebilen yazılımlar günümüzde kolayca ulaşılabilir olmuştur. FEA (Finite Elements Analysis) bir bilgisayar modelini ona ait bir malzeme tanımlamasını, modelin yüklemesini sağlayan bir yük uygulaması ve hesap sonucu oluşan sonuç dosyalarını kapsar. [25]

II.6.2. Sonlu Elemanlar Metodunun (FEM) Tarihsel Gelişimi

Sonlu elemanlar metodu ilk olarak yapı analizinde kullanılmaya başlandı. İlk çalışmalar Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından geliştirilen yarı analitik analiz metotlarıdır. Argyis ve Kelsey (1960) virtuel iş prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım metodu geliştirmiştir. Turner ve diğerleri (1956) bir üçgen eleman için rijitlik matrisini oluşturmuştur. "Sonlu Elemanlar" terimi ilk defa Clough (1960) tarafından çalışmasında telâffuz edilmiştir. Metodun üç boyutlu problemlere uygulanması iki boyutlu teoriden sonra kolayca gerçekleşmiştir (Argyis ,1964).

ilk gerçek kabuk elemanlar aksenal simetrik elemanlar olup Grafton ve Strome (1963), bunlar silindirik ve diğer kabuk elemanlar izlemiştir Gallagher (1969). Araştırmacılar 1960'li yılların başlarında non-lineer problemlerle ilgilenmeye başladılar. Turner ve diğerleri (1960) geometrik olarak non-lineer problemler için bir çözüm tekniği geliştirdi. Sonlu elemanlar metoduyla stabilite analizi ise ilk Martin (1965) tarafından tartışılmıştır.

Statik problemlerin yanısıra dinamik problemlerde sonlu elemanlar metoduyla incelenmeye başlandı (Zienkiewicz ve diğerleri (1966) ve Koenig ve Davids (1969)). 1943 yılında Courant bölgesel sürekli lineer yaklaşım kullanarak bir burulma problemi için çözüm üretmiştir.

Yapı alan dışındaki problemlerin sonlu elemanlar metoduyla çözümü 1960 'lı yıllarda başlamıştır. Örneğin Zienkiewicz ve Cheung (1965) sonlu elemanlar metodu ile Poisson denklemini çözmüştür. Doctors (1970) ise metodu potansiyel akışa

uygulamıştır. Sonlu elemanlar metodu geliştirilerek ısı transferi, yeraltı suların akışı, manyetik alan ve diğer bir çok alana uygulanmaktadır.

Genel amaçlı sonlu elemanlar paket programlar 1970' li yıllardan itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır. 1980' li yılların sonlarına doğru ise artık paket programlar mikro bilgisayarlar da kullanılmaya başlandı. 1990' yıllarının ortaları itibariyle sonlu elemanlar metodu ve uygulamalarıyla ilgili yaklaşık olarak 40.000 makale ve kitap yayınlanmıştır. [26]

II.7. KAYNAK İŞLEMİNİN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Marc/Mentat Sonlu Eleman Yazılımı; Marc: Sonlu eleman yöntemi ile çok çeşitli konularda yapısal, ısı transferi, akışkan ve birleşik analizlerin gerçekleştirilmesinde dünya çapında kullanılmaktadır. Doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin çözümünde mühendis için en önemli araçlardan biridir. Paralel işlem yapabilen ilk ve tek sonlu eleman yazılımıdır. Değişik problemlere özgü geniş eleman kütüphanesi ile ileri düzey analizlerin yapılabilmesine olanak sağlar.

Mentat: Sonlu eleman ağının otomatik olarak oluşturulmasında, sınır koşullarının uygulanmasında, malzeme özelliklerinin girilmesinde ve çözüm sonucunda elde edilen dağılımların, deforme olmuş geometrilerin ve çıktıların grafikler halinde elde edilmesinde kullanılan ileri düzey bir ön/son işlemcidir.

II.7.1. Isıl Model Analizi

Bir hacim, herhangi bir yüzey, S, tarafından sınırlanırsa, ısı akışının denge ilişkisi şu şekilde ifade edilir.

$$-\left(\frac{\partial R_x}{\partial x} + \frac{\partial R_y}{\partial y} + \frac{\partial R_z}{\partial z}\right) + Q(x, y, z, t) = pC \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \dots\dots\dots 2.17$$

R_x, R_y, R_z birim alandaki ısı akış oranları,

$T(x, y, z, t)$ geçerli olan sıcaklık,

$Q(x, y, z, t)$ iç ısı üretim oranı,

p yoğunluk,

C özgül ısı,

t ise süreyi ifade etmektedir. [32]

Model daha sonra Fourier ısı akış denklemini de dikkate alarak tamamlanır.

$$R_x = -k_x \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots 2.18a$$

$$R_y = -k_y \frac{dT}{dy} \dots\dots\dots 2.18b$$

$$R_z = -k_z \frac{dT}{dz} \dots\dots\dots 2.18c$$

k_x, k_y, k_z , x, y ve z eksenlerindeki ısı iletkenlikleri ifade etmektedir. [32]

Non-linear malzeme özelliklerini de dikkate alırsak, k_x, k_y, k_z, p, C parametreleri ısı'nın fonksiyonudur. 2.18a, 2.18b, 2.18.c, denklemlerini 2.17 denkleminde yerine yazarsak;

$$\frac{d}{dx} \left(k_x \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(k_y \frac{dT}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(k_z \frac{dT}{dz} \right) + Q = \rho C \frac{dT}{dt} \dots\dots\dots 2.19$$

2.19 denklemini ısı iletimini katı cisme çevrildiği diferansiyel denklemdir. Başlangıç ve sınır şartlarının kabulleri ile de genel çözüm sağlanabilir.

Başlangıç şartları;

$$T(x, y, z, 0) = T_o(x, y, z) \dots\dots\dots 2.20$$

Sınır şartları;

$$\left(k_x \frac{dT}{dx} N_x + k_y \frac{dT}{dy} N_y + k_z \frac{dT}{dz} N_z \right) + q_s + h_c(T - T_\infty) + h_r(T - T_r) = 0 \dots\dots\dots 2.21$$

N_x, N_y, N_z , sınıra normal çizilen harici kosinüs,

H_c , konveksiyon ile ısı transferi katsayısı,

H_r , radyasyon ile ısı transferi katsayısı,

q_s , sınır ısı akışı,

T_∞ , çevre sıcaklığı,

T_r , radyasyon ısı kaynağı sıcaklığını tanımlamaktadır. [32]

Radyasyon ısı transferi katsayısı da şu şekilde ifade edilir;

$$hr = \sigma \varepsilon F (T^2 + T_r^2) (T + T_r) \dots\dots\dots 2.22$$

σ , Stefan-Boltzmann sabiti,

ε , etkin yayılım,

F, konfigürasyon faktörünü ifade etmektedir.

Yüksek sıcaklık çevrimine dayalı kaynak işleminde, sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerini de göz önünde bulundurarak, geçici sıcaklık, iki zaman aralı öteleme yöntemi ile hesaplanır.

$$T(\tau) = T(t - \Delta t) + \frac{\tau}{\Delta t} [T(t - \Delta t) - T(t - 2\Delta t)] \dots\dots\dots 2.23$$

Sıcaklığa bağlı malzeme katsayısını g ile simgelersek, yani T(τ)' nin bir fonksiyonu olarak ifade edersek, t anındaki malzeme katsayısını şu şekilde tanımlayabiliriz. [32]

$$g = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t g[T(\tau)]d\tau \dots\dots\dots 2.24$$

II.7.2 Mekanik Model Analizi

Mekanik model ile ilişkili olarak iki adet basit denklemler seti vardır. Bunlar denge denklemleri ve yapı denklemleridir.

Denge denklemleri

$$\sigma_{ij} + pb_i = 0 \dots\dots\dots 2.25a$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \dots\dots\dots 2.25b$$

σ_{ij} , gerilme,

b_i , kütle kuvvetini simgeler.

Yapı Denklemleri (ısıl elasto - plastik malzemeler)

Termal elasto – plastik malzeme modeli, Von Mises elastikiyet kriteri ile izotropik uzama sabitleştirme kuralına dayanır. [32]

Gerilme – uzama ilişkileri;

$$[d\sigma] = [D^{ep}][d\varepsilon] - [C^{th}]dT \dots\dots\dots 2.26$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \dots\dots\dots 2.27$$

$[D^e]$, elastik rijitlik matrisi,

$[D^p]$, plastik rijitlik matrisi,

$[C^{th}]$, termal rijitlik matrisi,

$[d\sigma]$, gerilme artışı,

$[d\varepsilon]$, uzama artışı,

dT , sıcaklık artışını ifade etmektedir.

Termal elasto-plastik analiz, non-linear bir problem olduğundan dolayı, burada çoğalan hesaplama yöntemi kullanılır ve artan gerilimi Newton-Raphson metodu ile sağlayabiliriz. [32]

BÖLÜM III.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kaynak Sırasında kaynak bölgesinde oluşan gerilmeler buldukları noktanın akma dayanımını aşarsa o noktada lokal olarak plastik şekil değişimi olur. Bu lokal kalıcı şekil değişimleri distorsiyona, çarpımalara sebep olur. Kaynak işleminden sonrada bu distorsiyonlar devam eder: Kaynaklı yapıda boyutsal ve açısal değişiklikler meydana gelir. Kalıntı gerilmeler distorsiyondan başka çatlamalara da yol açabilir: Sıcak çatlama, soğuk çatlama, lameler yırtılma gibi çatlamlar olabilir. Kaynak bölgesinde oluşan yüksek kalıntı gerilmeler makroskopik hataya sebep vermemiş olsa bile kaynaklı yapının servis sırasında kısa zamanda çatlamasına yol açabilir.

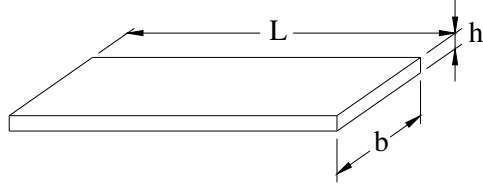
Bir kaynaklı yapıda kalıntı gerilme oluşumuna tamamen engel olmak imkansızdır. Ancak alınan tedbirler ile kalıntı gerilme seviyesinin düşük olması sağlanır. Ancak kabul edilemeyecek kadar fazla oluşan distorsiyonu düzeltmek çok pahalıya mal olur veya bazı kaynaklı parçalarda ise distorsiyonu düzeltmek ise imkansız olabilir.

Bu deneysel çalışmada amaç, kaynak işlemi sonucu oluşan kalıntı gerilmeleri ölçmektir ve deneysel ölçümü yapılan malzemenin sonlu elemanlar modellemesinin yapılarak sonlu elemanlar simülasyonunun elde edilmesidir. Deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması, sonuçlara göre optimizasyonun yapılması, optimizasyon sonucu elde edilen bilgilerin değerlendirilmesi ve yorumlanmasıdır.

Simülasyonun elde edilmesi ile kaynak işlemi neticesinde parçalarda oluşabilecek iç gerilmeler önceden tespit edilebilecek ve yukarıda belirtilen hatalara karşı tedbirler alınmış olacaktır.

III.1. Sıcaklık Dağılımının Ölçümü için Malzeme Ve Deneysel Kurulum

Yapılacak olan deneyler için kullanılan numunelere ait boyutlar aşağıdaki Şekil III.1.' de verilmektedir.



$$L= 100 \text{ mm}$$

$$b= 50 \text{ mm}$$

$$h= 4 \text{ mm}$$

Şekil III.1. Deneye Ait Numune Boyutlar

III.1.1. Esas malzeme

Bu çalışmada kullanılan malzeme Türkiye'nin en büyük yassı çelik üreticisi olan Erdemir Demir ve Çelik A.Ş.'nin 4 mm kalınlığındaki DIN EN 10111 Erdemir kalite No. 6224 olan çeliktir. Malzeme testi bilgi kartı malzeme ile gelmiştir. Otomotiv endüstrisinde kaynak operasyonlarında geniş çapta kullanılan levha türüdür. Bu malzemeyi seçmenin ana nedeni bütün çalışmaların hepsinde olduğu gibi otomotiv endüstrisindeki standartlar dikkate alınmıştır. Malzeme soğuk şekillendirmeye uygun düşük karbonlu sıcak haddelenmiş yassı çeliktir. Temperlenmiş ve yüzeyi asit ile temizlenmiştir. Malzemenin tüm kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo III.1 ve III.2' de verilmiştir.

Tablo III.1. Kullanılan Malzemenin Kimyasal Özellikleri [25]

Standart karşılığı	Kalite	Kimyasal Bileşimi %				
		C	Mn	P	S	B
DIN EN 10111	DD 13	max.	max.	max.	max.	max.
		0.08	0.40	0.030	0.030	-
		0.06	0.30	0.015	0.015	0.006

Tablo III.2. Kullanılan Malzemenin Mekanik Özellikleri [25]

Standart karşılığı	Kalite	Mekanik özellikler			
		Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama	Katlama
DIN EN 10111	DD 13	Re	Rm	A	180°
		MPa	MPa	%	
		170-310	400	47	0

III.1.2. İlave Metal (tel elektrod)

Deneylerde Tablo III.3.' de kimyasal bileşimi ile Tablo III.4.' de mekanik özellikleri verilen 1 mm çaplı G3si1 (SG2) teli kullanılmıştır. Çelik kontrüksiyon ve makina yapımında, gemi, kazan, tank ve boru kaynaklarında, ince taneli çeliklerin kaynağında, ince sac, çelik mobilya, kaporta, egzost ve karoseri kaynaklarında kullanılır. [26]

Tablo III.3. Deneylerde kullanılan EN 440'a (DIN 8559) göre imal edilmiş tel elektrotların kimyasal bileşimi

Simge	Kimyasal Bileşimi %		
	C	Si	Mn
SG 2	0.08	0.85	1.45

Tablo III.4. Deneylerde kullanılan EN 440' a (DIN 8559) göre imal edilmiş tel elektrotların Mekanik özellikleri

Akma Dayanımı MPa	Çekme Dayanımı MPa	Çentik Dayanımı (ISO-V/ -30 °C)	Uzama % (Lo=5do)
min. 420	500-640	min. 47 J	min. 22

III.1.3. Kullanılan Koruyucu Gazlar

Bu çalışmada, karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin kaynağına uygun olabileceği saptanan ve daha önce yapılmış olan araştırmaların sonuçları ve literatüre göre Ar, CO₂ ve O₂ karışımı gazlar kullanılmıştır. [27]

III.1.4. Kullanılan Kaynak Robotu

Deneylerde kullanılan kaynak robotu ABB firmasının IRB 2400L ark kaynağı modelidir. Geniş çalışma alanına ve ince kol ve bileğe sahiptir. Kaynak robotunun teknik özellikleri Tablo III.5.' de verilmiştir.

Tablo III.5. Kaynak Robotunun Teknik özellikleri [28]

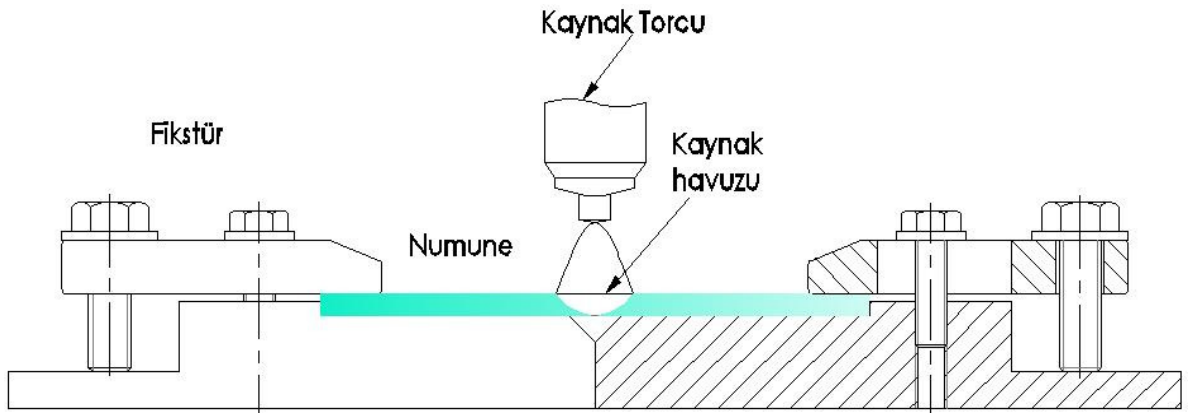
Model	Taşıma Kapasitesi	Erişim Mesafesi	Erişim Yük Ofseti
IRB 2400L	5-7 kg	1800 mm	92- 85 mm
Trafo Gücü	4 kVA		

III.1.5. Ark Kaynağı Bağlantı ve Uygulaması

Deneylerde Şekil III.1 de verilen ölçülerde 18 adet kesilip 9 adet kaynaklı bağlantı işlemi yapılmıştır. Ark kaynak robotuyla yapılan bu deneylerde kaynak hızları sırasıyla 4 , 7 ve 10 mm/sn olacak şekilde 3 er adet numune alınmıştır. Diğer kaynak parametreleri ise Tablo III.6. gösterildiği şekilde sabit tutulmuştur.

Tablo III.6. Alın Birleştirmede Kullanılan Kaynak Parametreleri

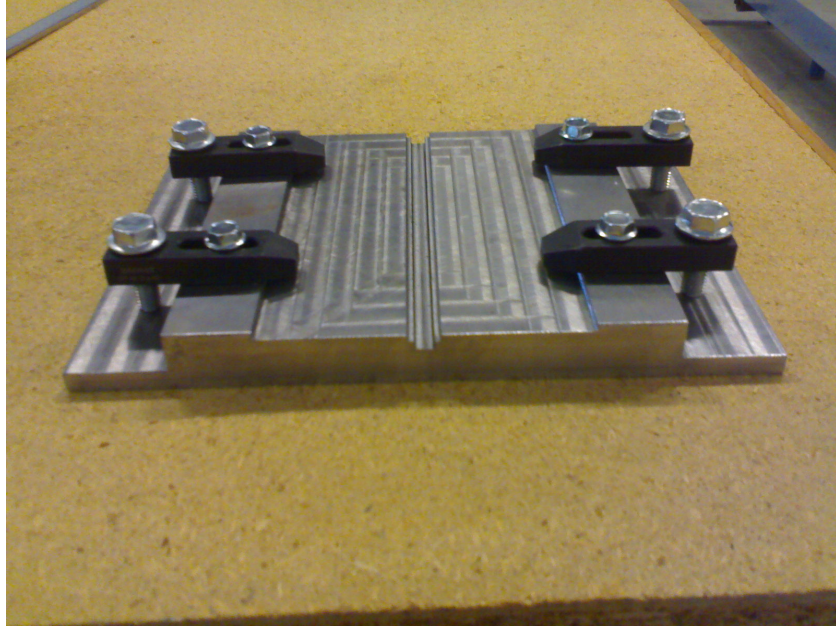
Akım şiddeti (Amper)	145
Tel apı (Ø)	1
Tel besleme hızı (m/dk)	6
Gerilim (Volt)	24
Kaynak hızları (mm/sn)	4, 7, 10
Tel elektrotun simgesi	SG2



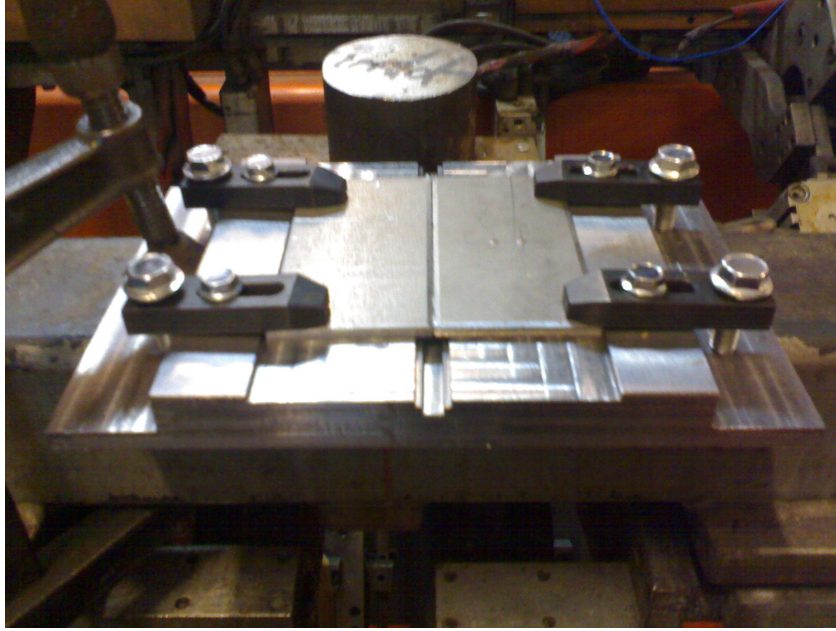
Şekil III.2. Deney Malzemesinin Sabitlenmesi İçin Kullanılan Fikstürün Şematik Gösterimi

III.1.6. Kullanılan Araç ve Gereçler: Bilgisayar, Data logger (veri toplama cihazı), Kaynak Robotu , Bağlama aparatı, Termokupul' dır.

Malzemenin kaynak esnasında distorsiyona uğramasını önlemek amacıyla Şekil III.2' de gösterilen aparat st37 malzemedan yapılacak şekilde tasarlanmış ve asgari seviyede distorsiyon oluşması sağlanmıştır. Şekil III.3' de gösterilen bağlama aparatı bir işkence yardımı ile kaynak robotu tablasına sabitlenmiştir ve numune malzeme kaynak boşluğu yaklaşık 2 mm olacak şekilde pabuçlar vasıtasıyla aparata Şekil III.4' deki gibi bağlanmıştır. Kaynak robotuna kaynak parametreleri Tablo III.6' da verilen değerler elle kontrol kutusu (Teaching Box) vasıtasıyla girilmiştir.

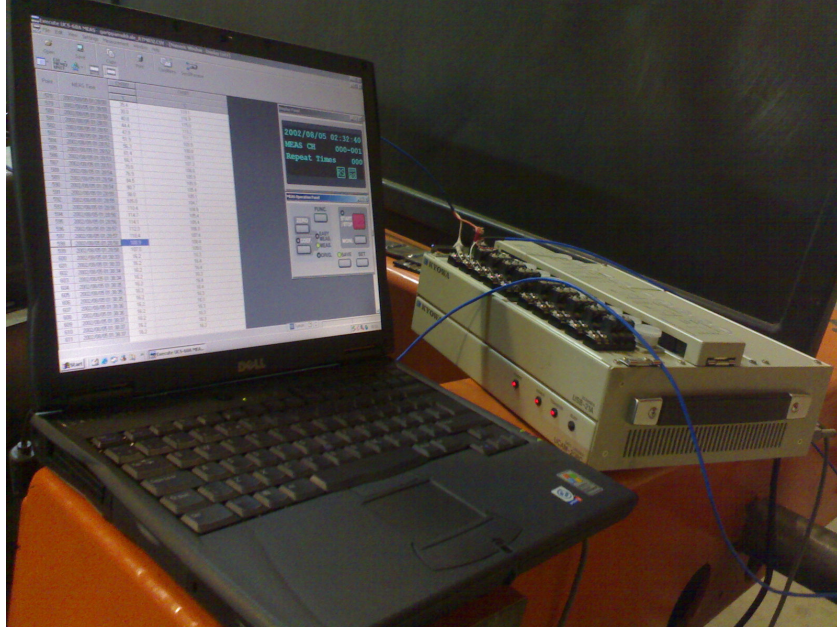


Şekil III.3. Deney Malzemesinin Sabitlenmesi İçin Bağlama Aparatı

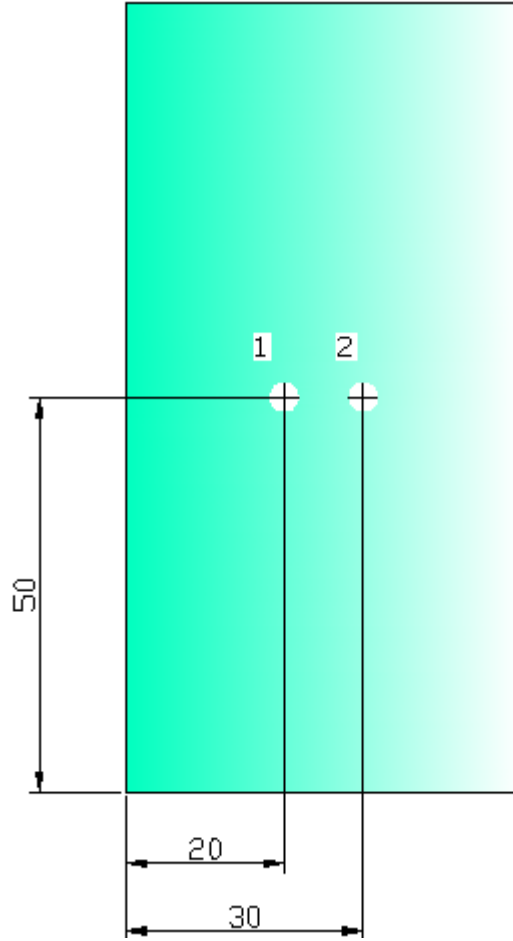


Şekil III.4. Bağlama Aparatının Sabitlenmesi ve Malzemenin Bağlanmış Hali

Kaynak robotuna gerekli parametreler girildikten ve kaynak yolu tanımlandıktan sonra kaynak esnasında sıcaklık dağılımı ölçümünün yapılabilmesi için deney düzeneği kurulmuştur. Farklı 2 noktadan sıcaklık ölçümünün yapılarak sıcaklık dağılımının görülebilmesi için 2 adet termokupul kullanılmıştır.



Şekil III.5. Deney İçin Kullanılan Veri Toplama Cihazı ve Bilgisayar Bağlantısının Gösterimi



Şekil III.6. Termokupul İle Ölçümleri Yapılan Noktaların Kaynak Merkezinden Olan Uzaklıkları

Termokupul ile istenen noktalar dan hassas ölçümün yapılması için numune parça kaynatılmadan önce mehengir ile Şekil III.6’ daki ölçülere göre markalama işlemi yapıp noktalanmıştır.



Şekil III.7. Deney Malzemesi Üzerinde Termokupul Ölçüm İşleminin Yapılması

Malzeme üzerinde gerekli markalama işlemleri yapıldıktan sonra termokupul uçları Şekil III.7.’ deki gibi malzeme’ ye dik olacak şekilde elle tutularak ölçüm yapmaya hazır hale gelinilir. Kaynak robotuna önceden hazırlanmış olduğumuz değerler girilip kaynak işlemi yapılır . Kaynak esnasında termokupulun dış etkilerden dolayı farklı değerler vermemesi için gerekli ortam şartları hazırlanmıştır. Kaynak robotu kapalı bir kabin içerisindedir. Kaynak esnasında alınan değerler termokupullar vasıtasıyla (data logger) veri toplama cihazı’ na aktarılmıştır. Veri toplama cihazındaki değerler ise Şekil III.5’ de olduğu gibi bilgisayarda görüntülenmiştir. Değerler kaynak işleminin ilk anından itibaren okunup, kaynak işlemi bittikten sonra 5-10 sn kadar beklenip kaydedilmiştir.

III.1.7. Kaynaklı Levhaların Görsel İncelenmesi

Deney numunelerinin hazırlanacağı bağlantılarda uygulanan kaynak işlemi sonrası görülebilecek yüzeysel hataları saptamak amacı ile görsel muayene yapılmıştır. Bu muayenede “ ANSI/AWS D9.1-90 Sheet metal welding code ” esas alınmıştır. [29]

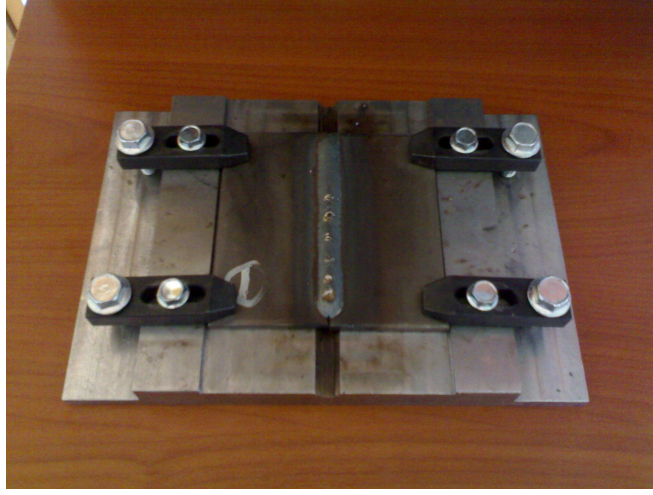
Kaynak işlemleri sonrası 4mm/sn , 7mm/sn ve 10 mm/sn hızında yapılan deney numuneleri Şekil III.8, Şekil III.9 ve Şekil III.10' da görülmektedir. Kaynak sonrası oluşan dikiş yüksekliği, dikişlerin üzerinde oluşan tırtırlarda, yanma olukları, sıçramalar ve dikiş kök sarkmasının yanı sıra dikiş genişliği, kökte oluşabilen yetersiz ergime bölgeleri görsel olarak detaylı incelenmiş olup, sıçramaların ve diğer hususların kabul sınırları içinde olduğu görülmüştür. Ancak, hataların kriterleri aştığı kısımlar ıskartaya ayrılacak biçimde deney numunesi plana göre çıkarılmıştır.

III.1.8. Deney Numunesi Çıkartma Esasları

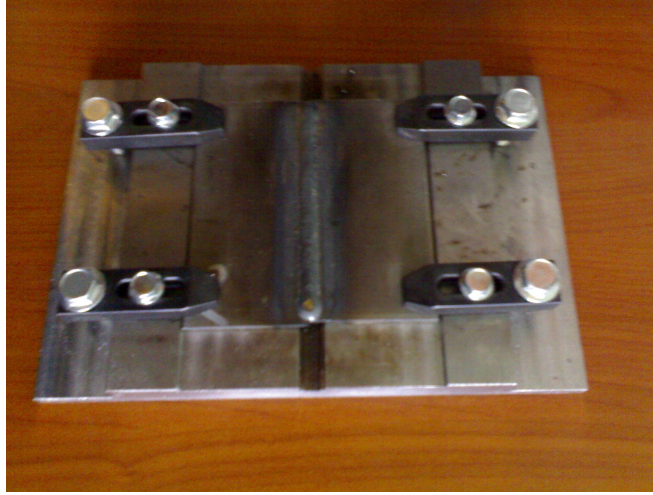
Kaynak işlemlerinden sonra numune ile ilgili standartlarda olduğu gibi normal soğumaya bırakılmıştır. Görsel muayeneden geçen bu levhalardan yapılacak deney planına göre EN-288-3' e uygun deney numuneleri hazırlanmıştır. [30] Parça boylarının kısa tutulmasındaki amaç kaynak ısı girdisi nedeni ile parçalarda oluşabilecek çekme çarpılmalarını azaltmaktır. [31]

Bu çalışmada akım şiddeti , kaynak robotu tel ilerleme hızı, gerilim, tel çapı sabit tutulup kaynak hızları değiştirilmiştir. Üç farklı kaynak hızı kullanılarak kaynak işlemleri yapılmıştır. Kaynak hızlarının sıcaklık üzerine ve malzemede oluşan iç gerilmeler üzerine etkisi incelenecektir. Bundan dolayı kaynak esnasında sıcaklık geçişlerinin dağılım üzerine termal etkisinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

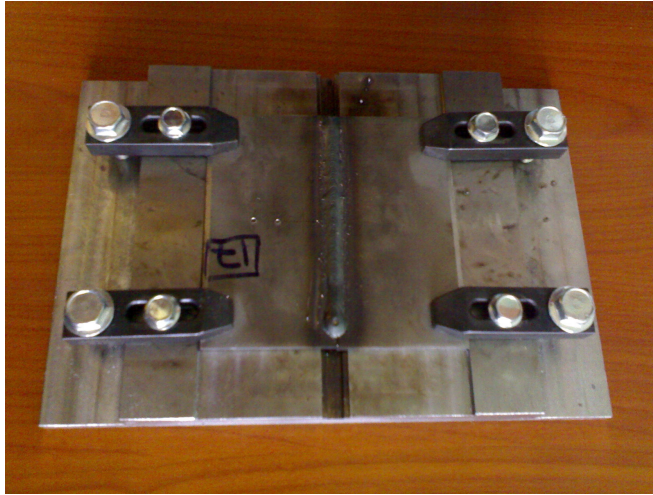
Termokupul ile sıcaklık ölçümü deneyinde ; 4 mm/sn kaynak ilerleme hızında yapılan deneyde 1.noktadan ve 2. noktadan ölçülen sonuçlar Şekil III.11' de sıcaklık zaman grafiği olarak verilmiştir. 7 mm /sn kaynak ilerleme hızında yapılan deneyde 1. noktadan ve 2. noktadan ölçülen sonuçlar Şekil III.12' de sıcaklık zaman grafiği olarak verilmiştir. 10 mm/sn kaynak ilerleme hızında yapılan deney sonucunda 1. ve 2. noktadan ölçülen sonuçlar Şekil III.13' de sıcaklık zaman grafiği olarak verildi. Sıcaklık ölçüm deneyinde elde edilen sonuçlara göre kaynak ilerleme hızı arttıkça sıcaklık değerlerinin düştüğü görülmektedir. Literatürde kaynak ilerleme hızı arttıkça ısı girdisi azaldığı bilinmektedir.



Şekil III.8. 4 mm/sn Hızında Kaynak İşlemi Yapılmış Numunenin Gösterimi



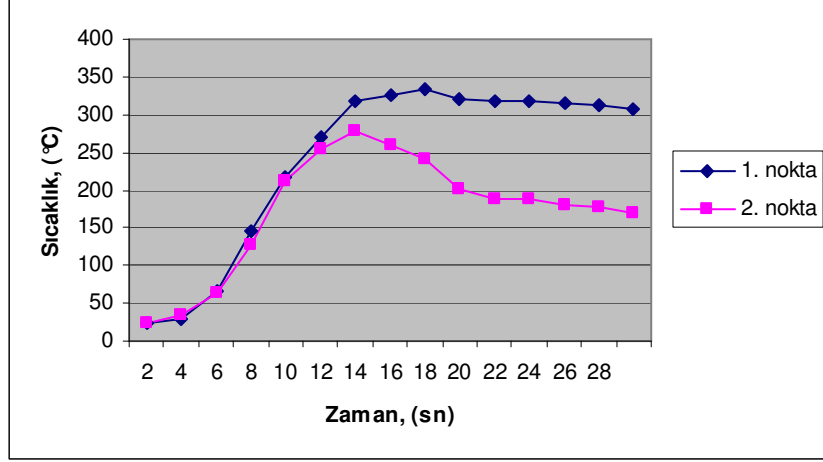
Şekil III.9. 7 mm/sn Hızında Kaynak İşlemi Yapılmış Numunenin Gösterimi



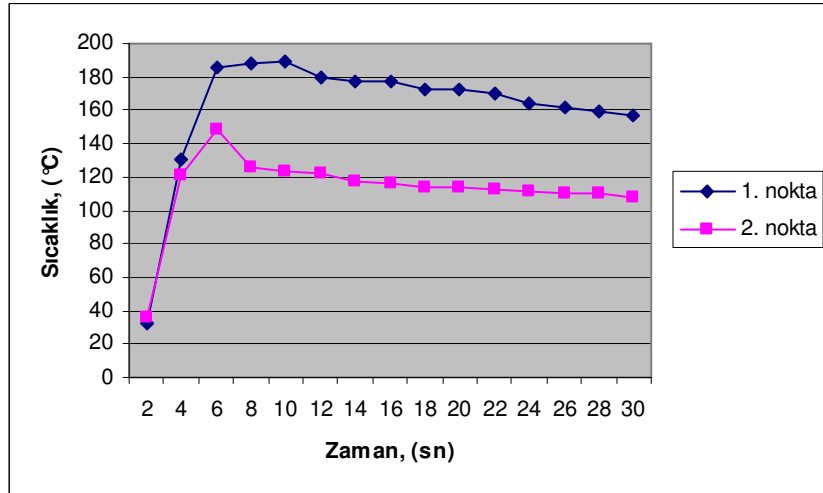
Şekil III.10. 10 mm/sn Hızında Kaynak İşlemi Yapılmış Numunenin Gösterimi

III.2.TERMOKUPUL İLE SICAKLIK ÖLÇÜMÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

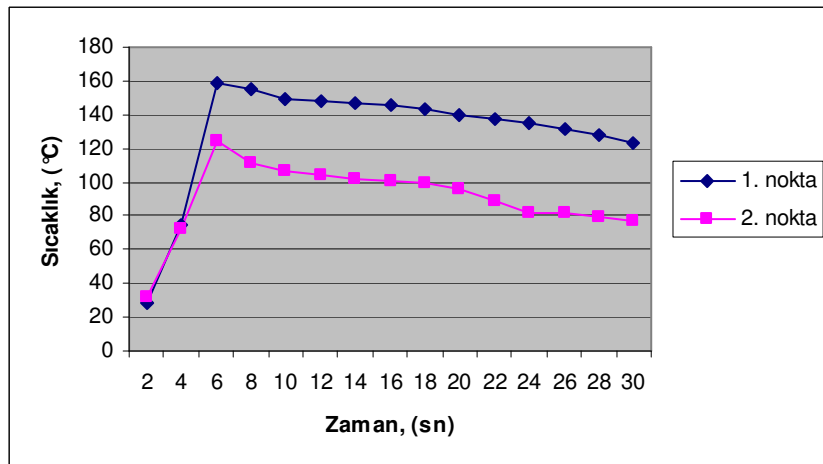
III.2.1. Sıcaklık Zaman Grafikleri



Şekil III.11. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki (V=4 mm/sn)



Şekil III.12. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki (V=7 mm/sn)



Şekil III.13. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki (V=10 mm/sn)

III.3. ARK KAYNAĞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SİMÜLASYONU (FEM)

Ark kaynağı işleminin sayısal modelinin oluşturulması için Marc Mentat FEM kodu kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan modelleme için aynı yazılımın arabirimi kullanılmıştır. Modelin oluşturulmasından sonuçların elde edilmesine kadar olan işlemler alt bölümlerde ele alınmıştır. Farklı hız parametrelerinde sıcaklık ve iç gerilme değerlerinin malzeme özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Kaynak işleminde ısının etkisi altındaki bölgenin özelliklerini önceden tahmin edebilmek ve uygulanan sıcaklığın çelik malzemenin özelliklerine etkilerini inceleyebilmek açısından kaynak esnasında parçalara uygulanan ısıl çevrim (ısınma ve soğuma) bilinmelidir. Malzemeye uygulanan ısıl çevrimlerinin, malzeme özelliklerinde meydana getireceği değişiklikleri saptayabilmek için; ısınma hızı, erişilen maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklıkta kalma süresi ve soğuma hızı kavramlarının bilinmesi gerekmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile 3 boyutlu modellemesi yapılan malzemenin üzerinden ısınma hızı , erişilen maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklıkta kalma süresi ve soğuma hızı simülasyon ortamında görülebilecek böylece kaynak işleminin malzeme özelliklerine etkisini incelenmiş olacaktır.

III.3.1. MSC. Marc' da Kaynak Modellemesi İşlem Basamakları

PREPROCESSING

- ❖ Mesh Generation (Ağ oluşturma)
- ❖ Geometrik Properties (Geometri Özellikleri)
- ❖ Material Properties (Malzeme Özellikleri)
- ❖ Modelling Tools
 - Weld Paths (Kaynak yolu)
 - Weld Fillers (Kaynak dolgusu ve kaynak başlangıç sıcaklığı)
- ❖ Contact (Kaynak ve iş parçası arasındaki bağlantı)
- ❖ Initial Conditions (Başlangıç şartları)
- ❖ Boundary Conditions (Sınır şartları)

ANLYSIS

- ❖ Load cases (Kaynak süresinin belirlenmesi)
- ❖ Jobs (Sonuç parametrelerinin belirlenmesi)

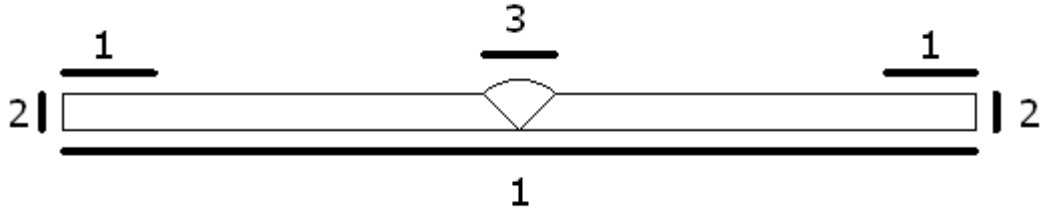
POSTPROCESSING

- ❖ Results (Sonuçların alınması)

III.3.4. Malzeme Özellikleri

Malzeme modelinin oluşturulmasında Elastik-Plastik deformasyon modeli ve ısı transfer modülünde Isotropic tip tercih edilmiştir. Esas malzeme için DIN EN 10111 çeliği ilave metal için de DIN 8559 standardına göre imal edilmiş tel elektrot kullanılmıştır. Bu malzemelerin kimyasal ve mekanik özellikler Tablo III.1, III.2, III.3 ve III.4 ' de verilmiştir. Malzeme özellikleri esas malzeme için 3980 element seçilerek ilave metal içinde 210 element seçilerek girilmiştir. Esas malzeme için başlangıç sıcaklığı 20 °C ilave malzeme içinde 1600 °C kabul edilmiştir.

III.3.5. Sınır Şartlarının Belirlenmesi

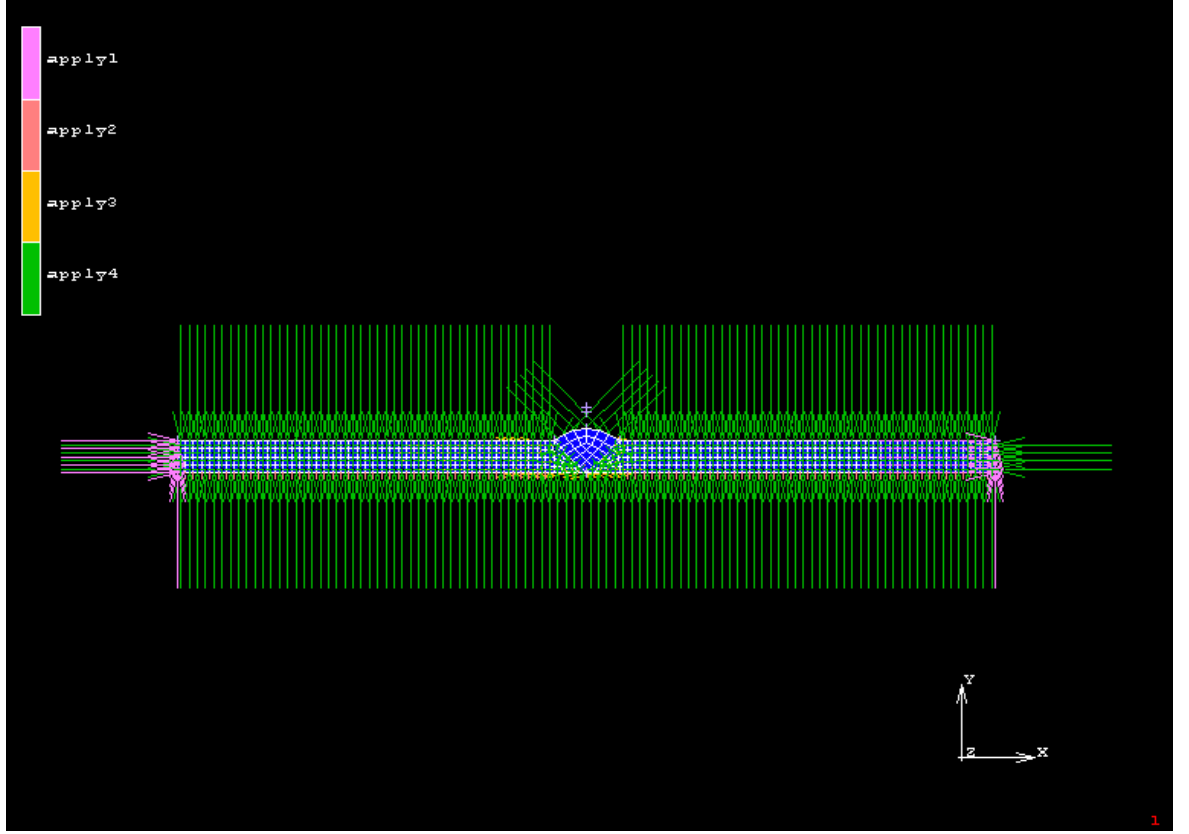


Şekil III.15. FEA Modelinde Sınır Şartlarının Ana Hatları

Sınır şartlarının oluşturulmasında deney ortamındaki değerler ve sınırlamalar dikkate alınarak yapılmıştır. Kaynak esnasında minimum çarpılma oluşacak şekilde sabitleme yapılmıştır. Şekil III.15 ' de ana hatlar gösterilmiştir. Burada 1 ve 2 nolu hatlar esas malzemenin şartları 3 ise kaynak malzemesinin sınır şartıdır. Bunlara ek olarak da tüm yüzeye etki eden oda sıcaklığının girildiği 4 nolu bir şart daha atanır. Sınır şartlarında Şekil III.16' da gösterildiği gibi 1 ve 2 nolu mekanik 3 ve 4 nolu ise termal sınır şartları sınıflandırması (boundary conditions class) dır. Kaynak sınır şartının oluşturulmasında kaynak genişliği, derinliği, hızı daha önceden oluşturulan kaynak yolu ve dolgusu girilir. Tablo III.7' de gösterilen değerlerde kaynak ağız genişliği ve derinliği kumpas ile ölçülerek yaklaşık olarak elde edilmiştir.

Tablo III.7. Kaynak akış ve hacim değerleri

Kaynak Hızı (mm/Sn)	Kaynak Genişliği (mm)	Kaynak Derinliği (mm)	Kaynak süresi (sn)
4	11	4	30
7	8	3.5	20
10	7	3	15



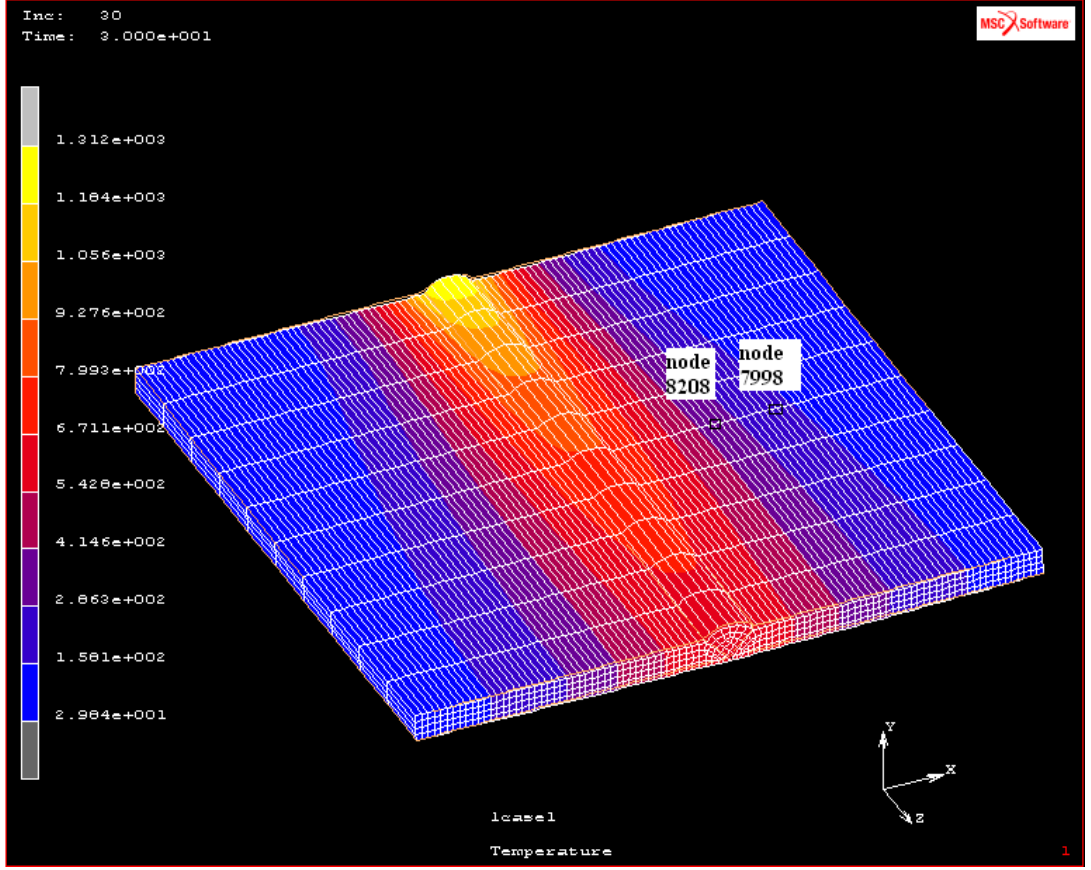
Şekil III.16. Marc Mentat Sınır Şartlarının Ana Hatları

III.3.6. Sürtünme Modelini Oluşturma

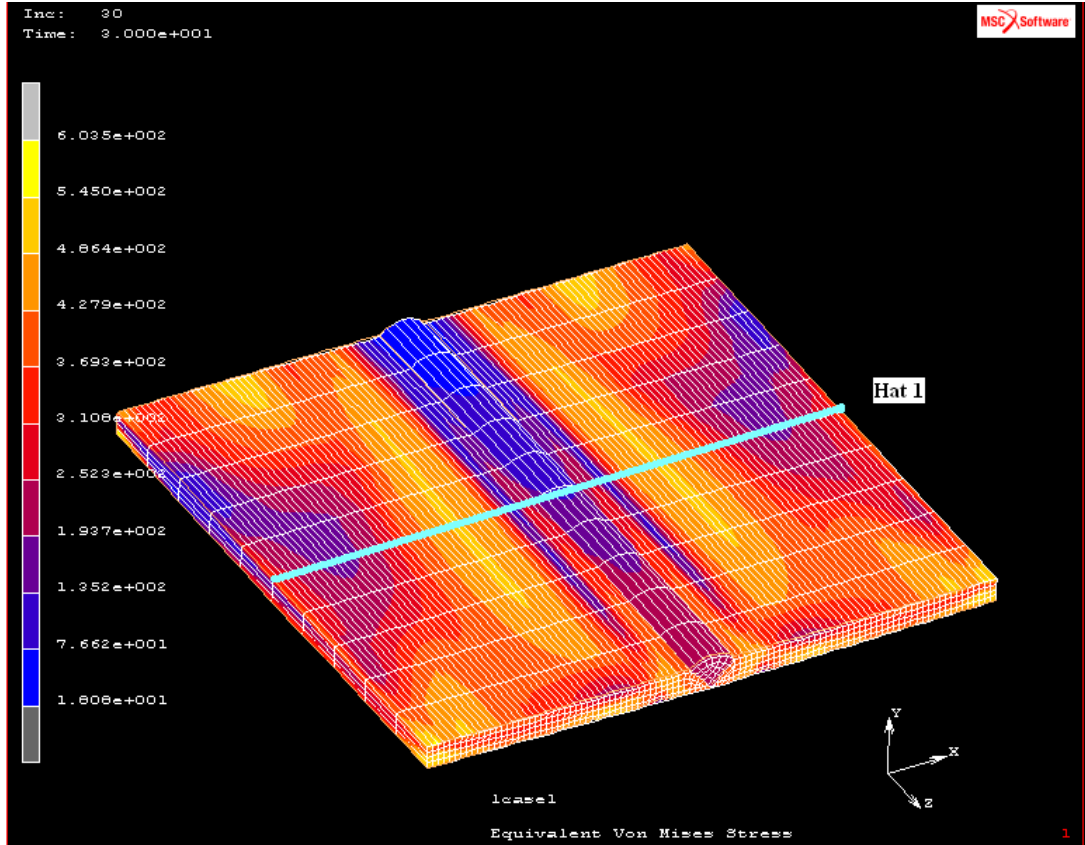
Bu çalışmada esas malzeme ile ilave metal arasında sürtünme modeli oluşturulmuştur. Sürtünme modelinde yüzey-yüzey kontak modeli kullanılmıştır. Esas malzeme ve ilave metal için deforme edilebilir kontak gövdeleri seçilmiştir.

Msc. Marc programı kullanılarak kaynak simülasyonunun oluşturulmasında kaynak modellemesi işlem basamaklarına göre önce parça 3 boyutlu modellenip deneyde kullanılan malzeme ve parametreler girildikten sonra program koşturulur ve open post file (results menü) tıklanarak simülasyon çalışmaya uygun hale gelir. Bu menüde ne tür sonuç alacağımız seçilir ve simülasyon çalıştırılır.

Şekil III.17' de 4 mm/sn hızında kaynak işlemi sonrası sıcaklık ölçümü yapılan noktalar görülmektedir. Burada termokupul ile ölçümü yapılan noktalar simülasyonda belirlenip sıcaklık değerleri zamana göre ölçülüp grafik halinde her nokta için ayrı ayrı alınıp kaydedilmiştir. Şekil III.18' de ise (result) menüsünde Von mises gerilmesi seçilerek programın çalıştırılmış hali görülmektedir. Numune parçanın orta noktasından enine gerilme dağılımı hat 1 boyunca seçilip ölçülmüştür. 4 ,7 ve 10 mm/sn hızlarında yapılan çalışmalarda elde edilen Von Mises Gerilme değerleri Şekil III.21, Şekil III.24 ve Şekil III.27 de gösterilmiştir.



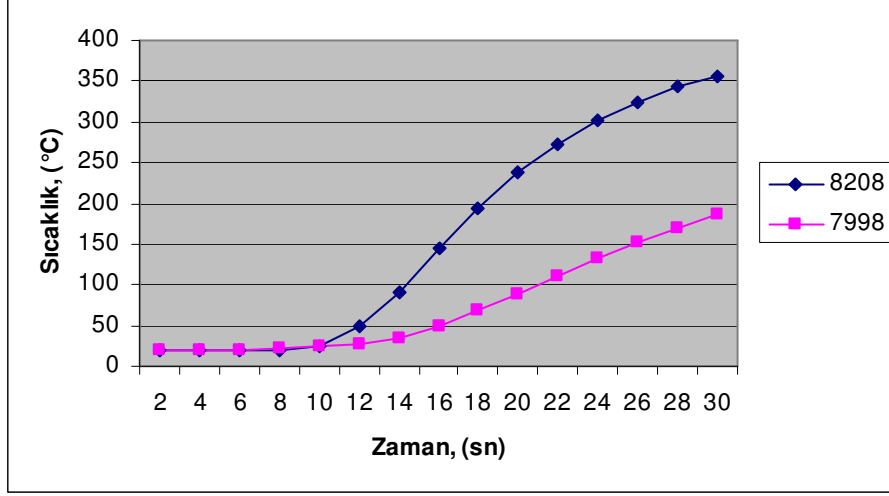
Şekil III.17. Kaynak İşlemi Sonrası Sıcaklık Ölçümü Yapılan Noktalar (V=4 mm/sn)



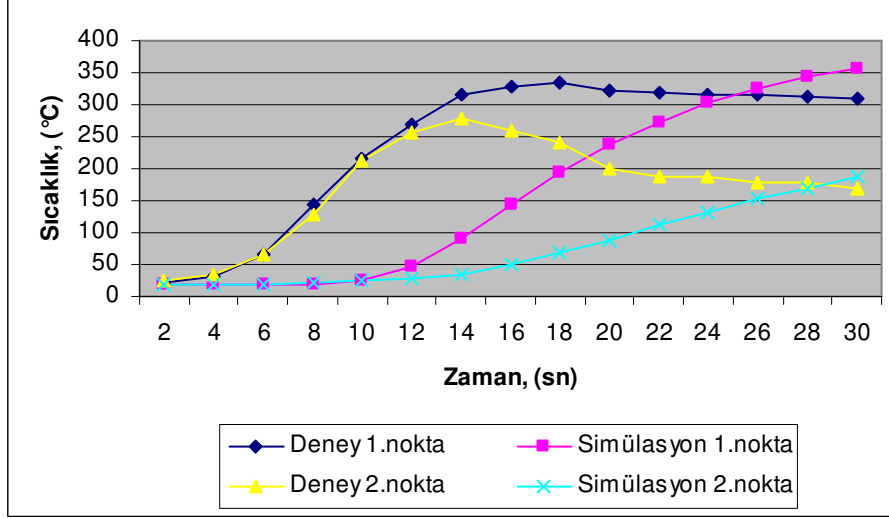
Şekil III.18. Kaynak İşlemi Sonrası Von Mises Ölçümü Hat 1 (V=4 mm/sn)

III.4. FEM SİMÜLASYON SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

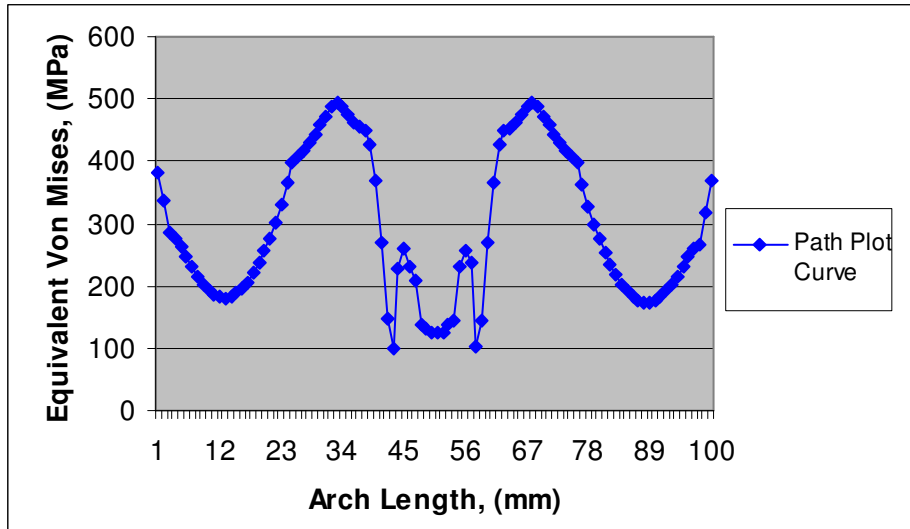
III.4.1. Sıcaklık Zaman Grafikleri



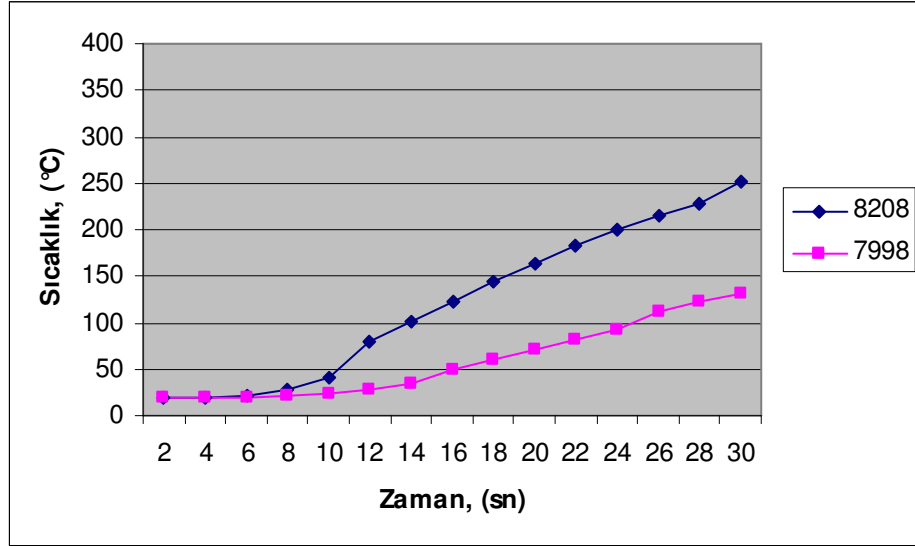
Şekil III.19. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki (V=4 mm/sn)



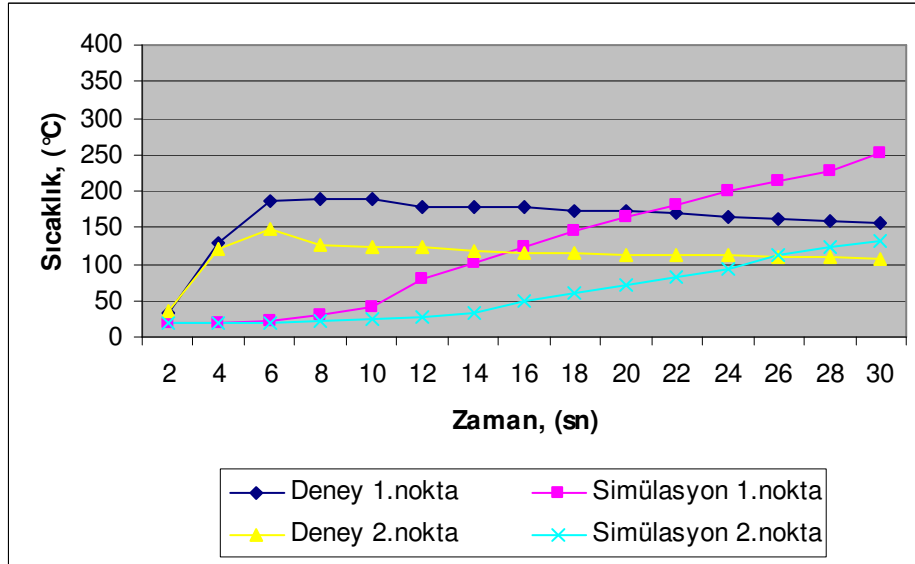
Şekil III.20. Deney ile Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması (V=4 mm/sn)



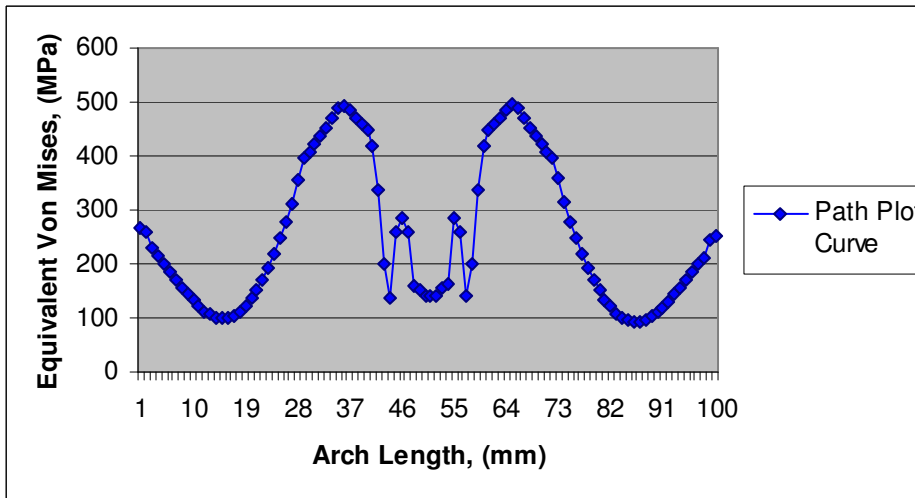
Şekil III.21. Hat 1 Boyunca Ölçülen Equivalent Von Mises Değeri (V=4 mm/sn)



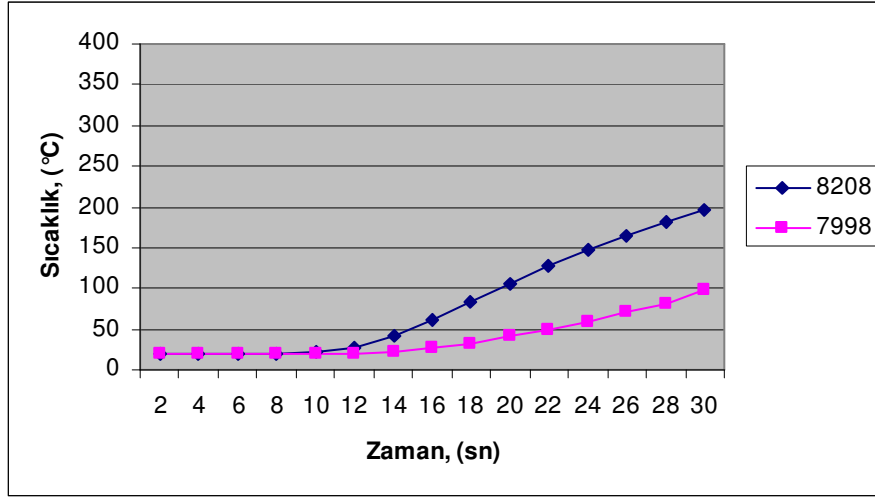
Şekil III.22. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki (V=7 mm/sn)



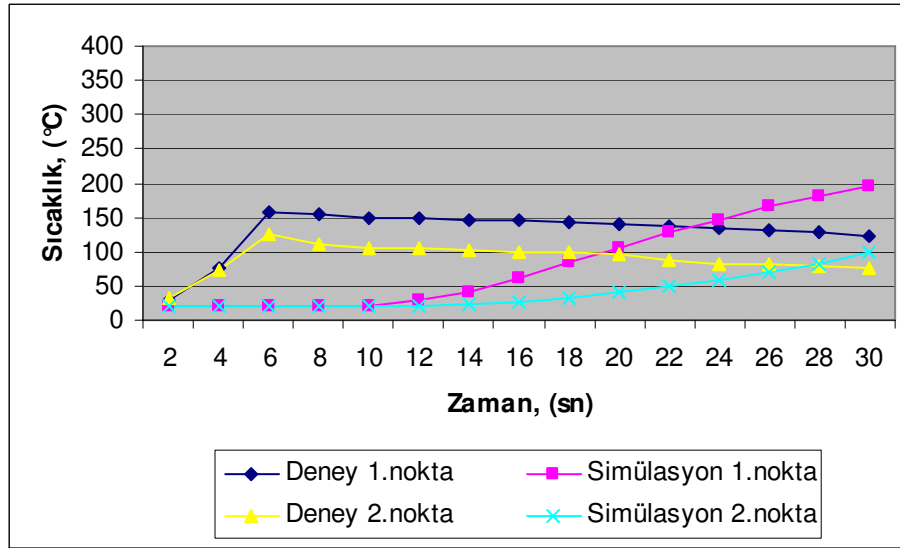
Şekil III.23. Deneysel ile Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması (V=7 mm/sn)



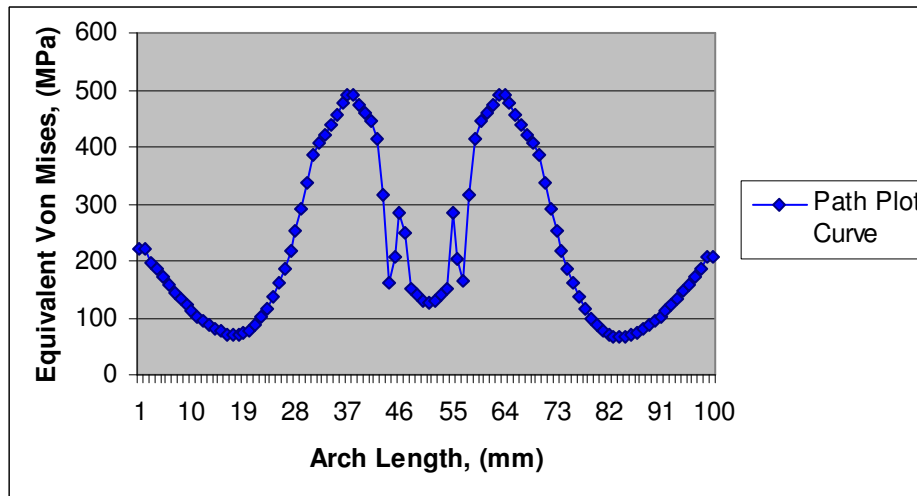
Şekil III.24. Hat 1 Boyunca Ölçülen Equivalent Von Mises Değeri (V=7 mm/sn)



Şekil III.25. Sıcaklık – Zaman Arasındaki İlişki (V=10 mm/sn)



Şekil III.26. Deneysel ile Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması (V=10 mm/sn)



Şekil III.27. Hat1 Boyunca Ölçülen Equivalent Von Mises Değeri (V=10 mm/sn)

III.5. KALINTI GERİLMELERİN ÖLÇÜMÜ İÇİN DENEYSEL KURULUM

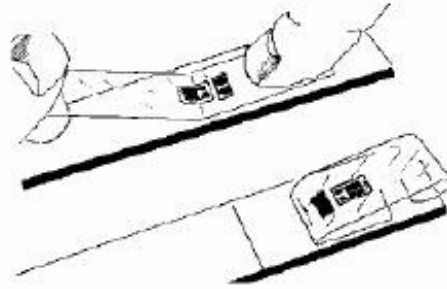
Deneyde 2 farklı parametre kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynak amper değerleri sabit tutulmuştur. Kaynak ilerleme hızları ise 7 ve 10 mm/sn olarak farklı değerler kullanılmıştır. Kaynak yapılan malzemelerin herhangi bir çarpılmaya maruz kalmaması için numune malzemeler Şekil III.3’ de gösterilen aparat ile sabitlenmiştir. Kaynak işlemi yapıldıktan sonra numune malzeme oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir ve numune üzerine birim deformasyon ölçer (strain gage) yapıştırılmıştır.

III.5.1. Strain Gage Uygulaması ; [24] Mikro düzeyde ölçüm yapılacağından dolayı yüzeyi düz bir hale getirmek için zımparalanır. Numune yüzeyi zımpara ile zımparalandıktan sonra özel degreaser ile yüzeyi temizlenip Şekil III.28’ de gösterildiği gibi strain gage yapıştırmaya hazır hale getirilir.



Şekil III.28. Numune Yüzeyinin Temizlenmesi

İkinci aşama olarak strain gage temizlenen bir düzlem yüzeyine yerleştirilir üzerine özel bir bant yapıştırılır. Daha sonra üzerine hafifçe bastırılır ve bant sökülür bu esnada strain gage de Şekil III.29’ daki gibi bant üzerindedir.

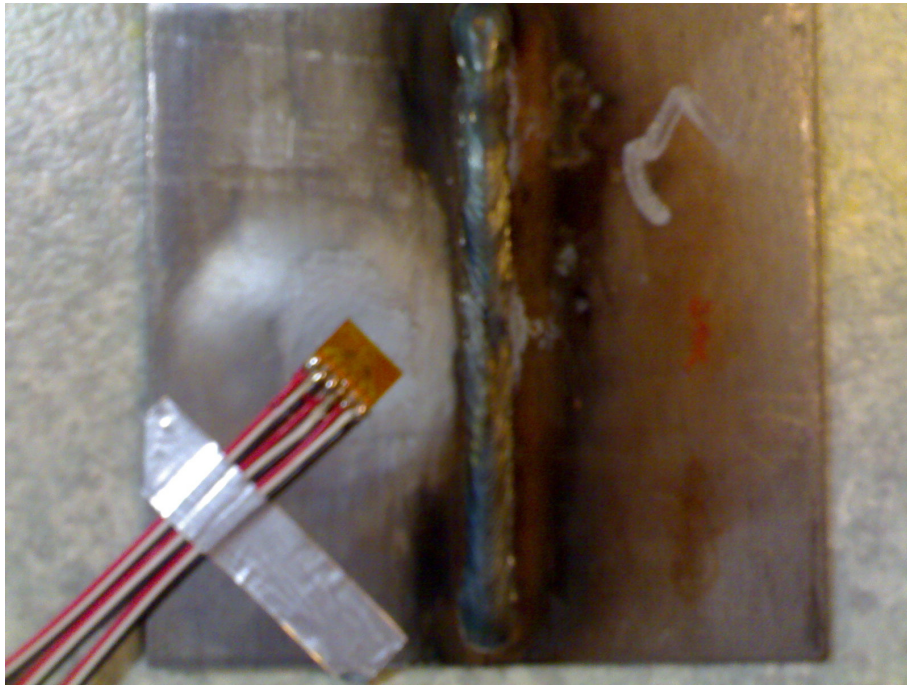


Şekil III.29. Strain Gage ‘in Bant Üzerine Yerleştirilmesi ve Sökülmesi

Son olarak bant daha önceden degreaser ile yüzeyi temizlenmiş olan numune üzerine 1 nolu strain gage kaynağa dik olacak şekilde ve 3 nolu strain gage de paralel olacak şekilde yapıştırılır. Bant yarıya kadar açılıp strain gage' in arka yüzeyine strain gage yapıştırıcısı sürülür. Strain gage yapıştırıldıktan sonra üzerine Şekil III.30' da gösterildiği gibi belli bir süre baskı uygulanıp strain gage' in tam yapışması sağlanır. Daha sonra bant sökülür ve strain gage numune üzerine Şekil III.31' deki gibi yapıştırılmış olur.



Şekil III.30. Numuneye Strain Gage' in Bağlanması



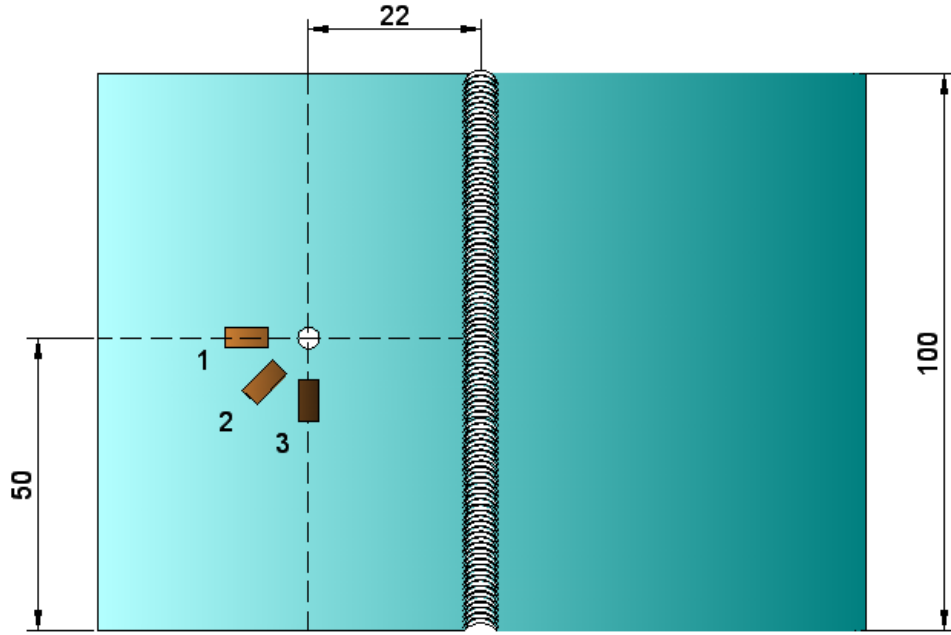
Şekil III.31. Numune Üzerine Gerilme Ölçme Rozetinin Yapıştırılması

III.5.2. Kullanılan Araç ve Gereçler

Kullanılan araç ve gereçler ; Bilgisayar, Strain gage (gerinim ölçer), Lehim, özel bant ve yapıştırıcı, Data logger (veri toplama cihazı), Vishay RS- 200, Avometre' dir.

III.5.3. Kalıntı Gerilme Ölçümü Deneysel Uygulama

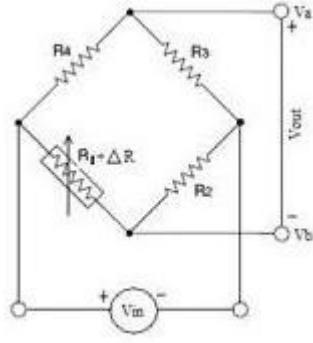
Kalıntı gerilme ölçmek için kullanılan strain gage Vishay Micro-Measurements firmasının kalıntı gerilme ölçme strain gage'lerinden CEA-XX-062 UM-120 tipidir. Gage uzunluğu 1.57 mm, grid merkez hattı çapı 5.13 mm, delik çapı minimum 1.5 mm maksimum 2.0 mm' dir. 120 Ω ' luk gerilime sahip ve 90° lik gerilim ölçme rozeti kullanılmıştır. Kalıntı gerilme ölçme rozeti Şekil III.32' de gösterildiği gibi kaynak merkezinden 22 mm mesafede olacak şekilde yapıştırılmıştır.



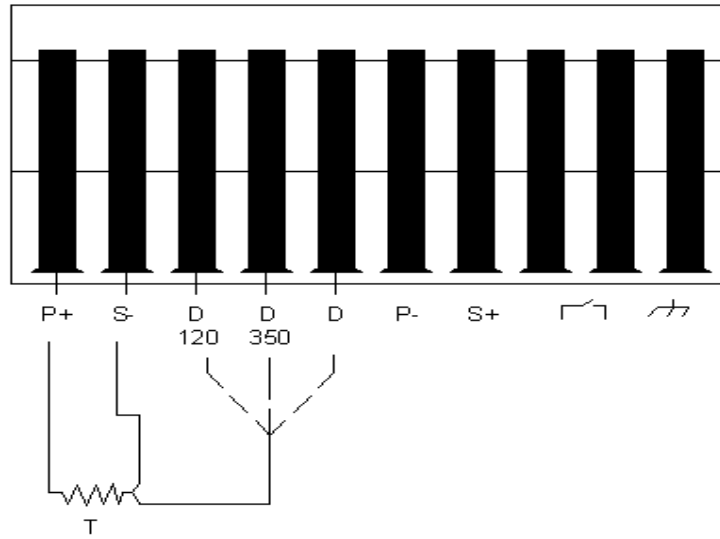
Şekil III.32. Numune Malzeme Üzerinde Strain Gage' lerin Konumu

Strain gage malzeme üzerine yapıştırıldıktan sonra terminal çıkışlarına kablolar lehimlenir. Lehimleme işleminde 1. terminalde 2 adet kablo çıkışı , 2. terminalde ise 1 adet kablo çıkışı olacak şekilde lehimleme yapılır. 1. ve 2. terminal çıkışları avometre ile ölçülür. Avometreden 119.6 Ω değeri okunur Bu 3 terminal içinde geçerlidir. Bu değer lehimleme işleminde herhangi bir hata olmadığını gösterir.

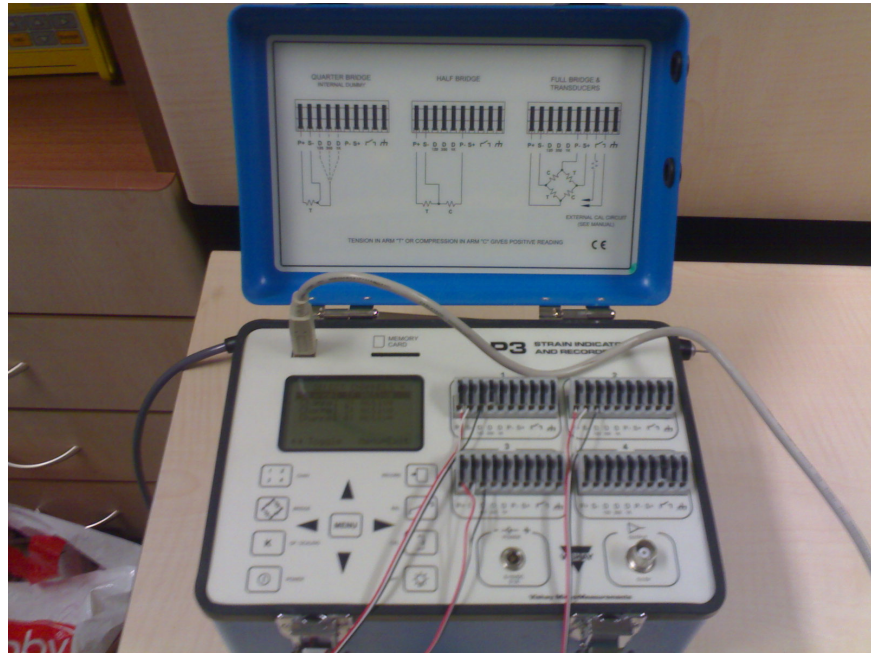
Gerilim ölçme rozetlerinin uçları birbirinden bağımsız olarak çeyrek whestone köprüsü kullanılarak bağlanmıştır. Çeyrek köprü yapımında Şekil III.33' de gösterildiği gibi üç adet 120 Ω luk sabit direnç kullanılmıştır. Dördüncü aktif direnç olarak da numune üzerine yapıştırılan strain gage kullanılmıştır. [11] Şekil III.34' de (data logger) veri toplama cihazının çeyrek whestone köprüsü yerleşimi görülmektedir.



Şekil III.33. Çeyrek Whestone Köprüsü Şematik Görünümü



Şekil III.34. Çeyrek Whestone Köprüsü Data Loger Yerleşimi

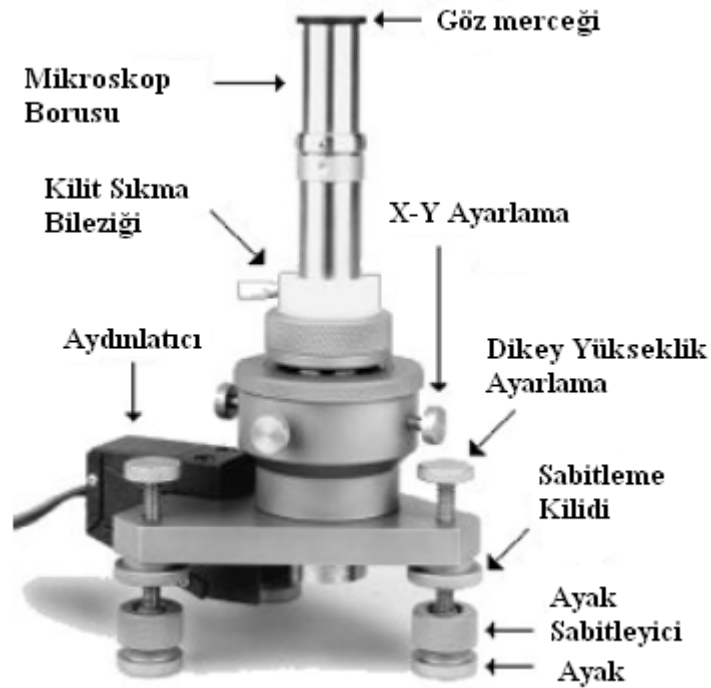


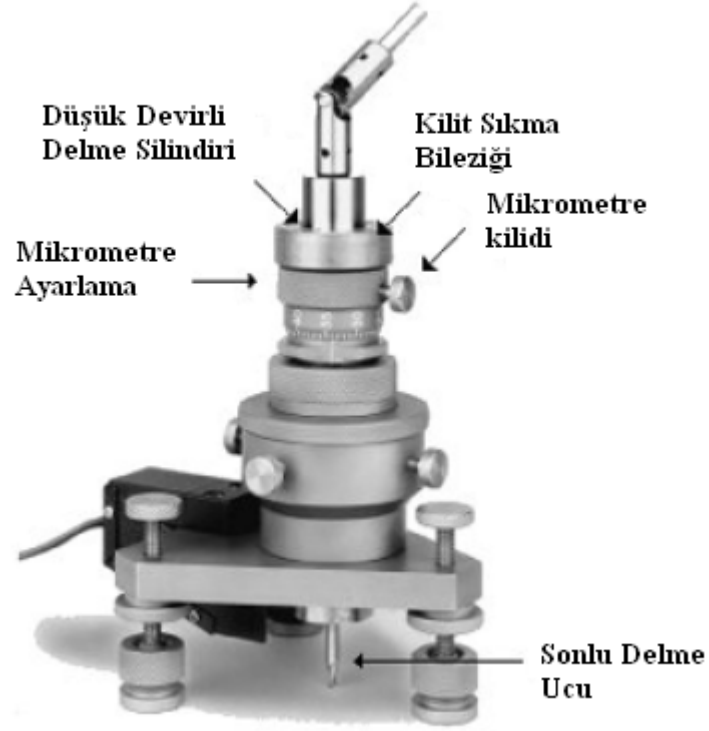
Şekil III.35. Terminal Çıkış Kablolarının Data Loger Üzerinde Bağlantısı

Kalıntı gerilme rozeti üzerindeki 1. strain gage' in kırmızı kablolu çıkışı P+, beyaz çıkış kablosu S-, siyah kablo ise D 120 Ω girişine Şekil III.35' de gösterildiği gibi bağlanır. Kör delik delme yöntemine göre kalıntı gerilme ölçümünde kullanılan RS200 odaklama merceği, sonlu delme aparatı ve yüksek hızda delme aparatı takılarak 3 yöntem sonunda delme işlemi uygulanmaktadır. RS200 marka pnömatik delme ekipmanı hava kompresörü basıncı tam olmadığından dolayı ~ 300.000 Rpm' lik bir dönme hızında delme işlemi gerçekleştirilmiştir.

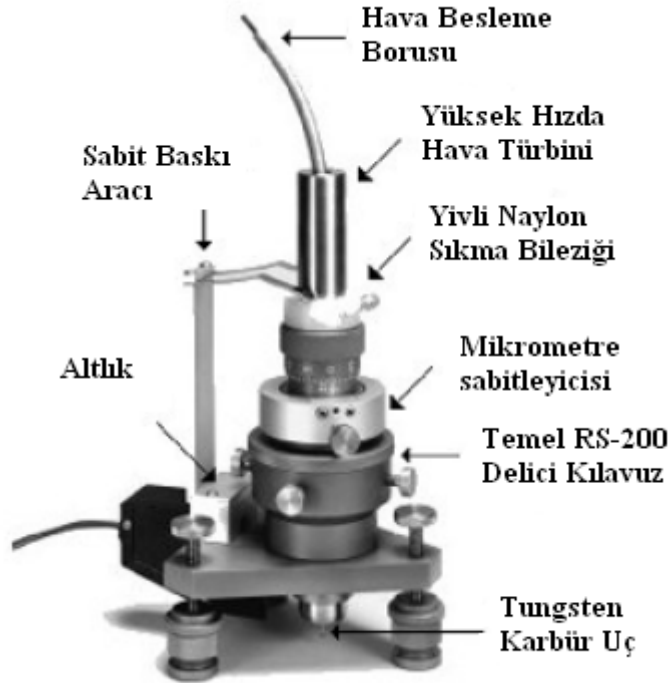
Kalıntı gerilme ölçme prosedürüne göre;

Numune ölçümü yapılacak olan malzeme Japon yapıştırıcısı ile bir plate üzerine sabitlenir. RS200 ayaklıkları şablon vasıtasıyla malzeme üzerine yapıştırılır. Daha sonra RS ekipmanı vishay mikro ölçüm kataloğuna uygun bir şekilde montajı yapılır. Ayaklar sabitlenip RS200 ekipmanı montajı yapıldıktan sonra göz merceği Şekil III.36' daki gibi takılır ve mikroskop vasıtasıyla rozetin tam merkezinden delinecek şekilde X-Y eksenlerinde ayar vidaları kullanılarak odaklama işlemi yapılır. Odaklama işlemine dikkat edilmesi gerekmektedir ve rozetlerin merkez noktasından delinecek şekilde delme işlemi yapılması gerekmektedir aksi takdirde okunan değerler hatalı olacaktır.





Şekil III.37. RS200 Kalıntı Gerilme Ölçme Aparatının Sonlu Delme Ayar Resmi



Şekil III.38. RS200 Kalıntı Gerilme Aparatının Hızlı Türbinin Montajı

Numune üzerinde odaklama işlemi yapıldıktan sonra göz merceği çıkartılır ve yerine Şekil III.37' de olduğu gibi sonlu delme ucu takılır. Sonlu delme ucu hafif baskı yapılacak şekilde el ile birkaç tur atarak gerilme ölçme rozetinin katmanı kaldırılır. Katmanın kaldırılmasından sonra sonlu delme ucu çıkartılır ve yerine Şekil III.38 ' de gösterildiği gibi basınçlı hava ile çalışan yüksek hızda hava türbini takılır.

Delme işlemi için ATC-200-031D kodlu 1.6 mm çapında tungsten karbür uç kullanılmıştır. Kesici uç metalin yüzeyine değene kadar ilerlenir ve mikrometre sabitleyicisi ile sabitlendikten sonra sabit baskı aracı ile baskı uygulanır. Kalıntı gerilme ölçmek için kullanılan CEA-XX-062UM-120 tipi strain gage ASTM E837 standartına göre 1 mm' ye kadar 10 kademedede delik delmek için uygundur. Kalıntı gerilme ölçümünde 1 mm' ye kadar delik delinmiştir ve her 0.1 mm' de delme işlemi durdurulmuştur veri toplama cihazının durağan hale gelmesi sağlanmıştır. Veri toplama cihazında okunan strain değerleri her kademe için ayrı ayrı kaydedilmiştir.

Deneyler göstermiştir ki, kalıntı gerilmeler üniform bir dağılım durumun da iseler, yüzeysel şekil değişikliği ile delik derinliği doğru orantılı olarak değişmektedir. Ancak, kalıntı gerilmeler karmaşık bir dağılıma sahipse, yüzeysel şekil değişikliğiyle delik derinliği arasında orantılı bir ilişki söz konusu değildir. Bu nedenle kalıntı gerilmelerin yönü, doğrultuları ve şiddetleri hakkında daha sağlıklı değerler elde edebilmek için, delik küçük artırımlarla delinir ve her artırım sonucu birim uzama ölçerlerde oluşan birim uzamalar (ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3) belirlenir. Kalıntı gerilme ölçüm deneyi sonucunda gerinim (birim şekil değiştirme) değerleri kaydedilmiştir. Kaydedilen gerinim değerleri H-Drill programına aktarılarak asal gerilmeler, yüzde gerinimler, maksimum kayma gerilmesi, gerinim değerleri, power, integral, uniform olarak hem sayısal hem de grafik olarak okunmaktadır.

Kalıntı gerilmelerin grafiklerinin elde edilmesinde Gary Schajer tarafından 2006 yılında geliştirilen kalıntı gerilme ölçme programı H-Drill version 3.01 kullanılmıştır . Programa girilen parametreler Tablo III.8' de verilmiştir. Elastisite modülü 190 MPa ve Akma dayanımı 285 MPa [25] kabul edilmiştir. Kalıntı gerilme deneyine ait sonuçlar Tablo III.9 ve Tablo III.10' da verildi.

Tablo III.8. H-Drill Programında kullanılan değerler

Elastisite Modülü [MPa]	Akma Dayanımı MPa	Young Modülü	Hata Payı %
190	285	0.3	5

Tablo III.9. Kör delik yöntemi uygulamasında hesaplanan büyüklükler (7 mm/sn)

Delik Derinliği (mm)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
A (10 ⁻⁶)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
B (10 ⁻⁶)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
β°	-22,5	-14,3	-8,39	-8,31	-8,67	-8,42	-8,44	-8,47	-8,24	-8,18
$\frac{\epsilon a + \epsilon c}{4A}$	0	0	-5,55	-2,22	1,11	1,11	5	4,44	3,33	3,88
$\frac{\epsilon a - \epsilon c}{4B \cdot \cos 2\beta}$	-1,17	-10,4	-23,1	-33,5	-48,9	-61,8	-78,2	-91,46	-101,2	-110,1
σ_1 MPa	-1,17	-10,4	-28,6	-35,7	-47,8	-60,7	-73,1	-87,02	-97,91	-106,2
σ_2 MPa	1,17	10,44	17,51	31,28	49,99	62,92	83,15	95,9	104,57	113,96

Tablo III.10. Kör delik yöntemi uygulamasında hesaplanan büyüklükler (10 mm/sn)

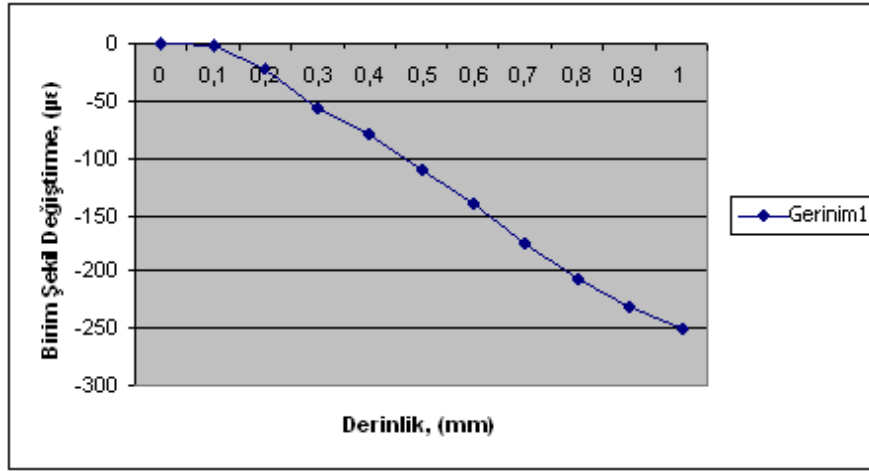
Delik Derinliği (mm)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
A (10 ⁻⁶)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
B (10 ⁻⁶)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
β°	-16,8	-14,3	-14,9	-13,3	-12,5	-10,9	-11,0	-10,86	-10,87	-11,05
$\frac{\epsilon a + \epsilon c}{4A}$	-1,11	5,55	6,66	12,77	15,55	13,33	17,77	21,66	20	25
$\frac{\epsilon a - \epsilon c}{4B \cdot \cos 2\beta}$	-1,50	-10,4	-23,5	-37,5	-51,1	-65,1	-73,2	-82,74	-88,81	-92,41
σ_1 MPa	-2,61	-4,89	-16,8	-24,8	-35,5	-51,7	-55,5	-61,08	-68,81	-67,41
σ_2 MPa	0,39	15,99	30,16	50,31	66,62	78,4	91,04	104,4	108,81	117,41

III.6. KÖR DELİK YÖNTEMİ İLE KALINTI GERİLME DENEY SONUÇLARI

III.6.1. 7 mm/sn Kaynak İlerleme Hızında Numune İçin Deneysel Sonuçları

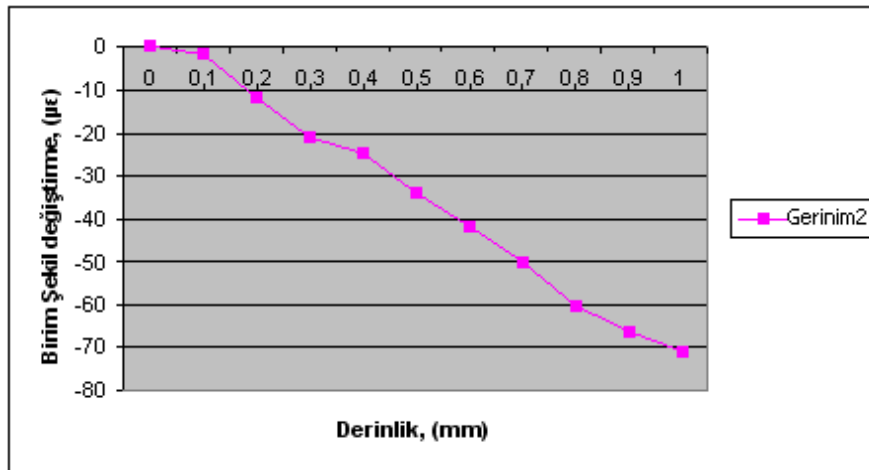
Kalıntı gerilme ölçme rozeti kaynak metaline dik ve paralel olacak şekilde Şekil III.32’ de gösterildiği yerleştirilmiştir. Kademeli olarak 1 mm’ ye kadar delme işlemi sonrası elde edilen grafikler ayrı ayrı verilmektedir.

Kaynak metaline dik konumda -106,2 MPa değerinde bir çekme gerilmesi görülürken, paralel konumda 113,96 MPa değerinde bir basma gerilmesi ölçülmüştür.



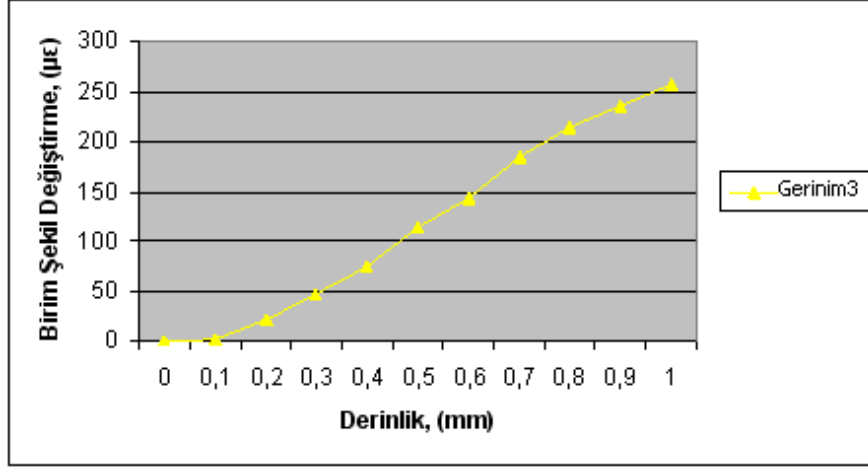
Şekil III.39. Derinlik-Gerinim Arasındaki İlişki (7mm/sn - 1 nolu Gerinim)

Şekil III.39’ da gerilim ölçerinin kaynak metaline dik konumda ölçümü yapılmaktadır. Sonuçların negatif olması o bölgenin çekme kuvvetine maruz kaldığını göstermektedir.



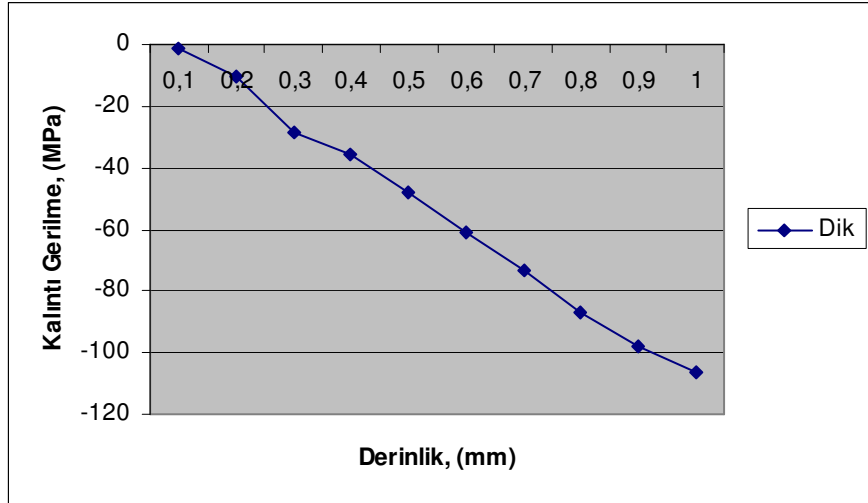
Şekil III.40. Derinlik-Gerinim Arasındaki İlişki (7mm/sn - 2 nolu Gerinim)

Şekil III.40’ da ise dik konumdaki gerilim ölçerine 45°’ deki 2 nolu gerilim ölçerinin ölçüm sonucu verilmektedir.

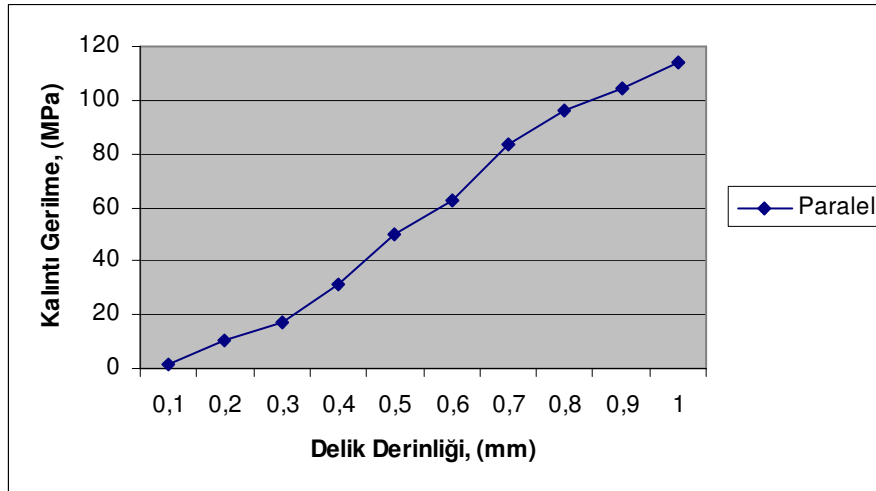


Şekil III.41. Derinlik-Gerilim Arasındaki İlişki (7mm/sn - 3 nolu Gerilim)

Şekil III.41’ de gerilim ölçerin kaynak metaline paralel konumda ölçümü yapılmaktadır. Sonuçların pozitif olması o bölgenin basma kuvvetine maruz kaldığını göstermektedir.



Şekil III.42. Kaynağa Dik Konumdaki Derinlik-Kalıntı Gerilme Arasındaki İlişki

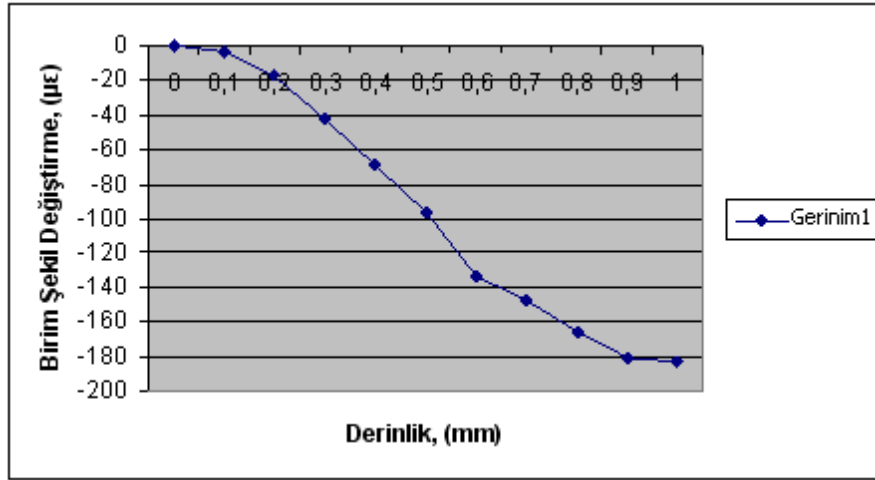


Şekil III.43. Kaynağa Paralel Konumdaki Derinlik-Kalıntı Gerilme Arasındaki İlişki

III.6.2. 10 mm/sn Kaynak İlerleme Hızında Numune İçin Deney Sonuçları

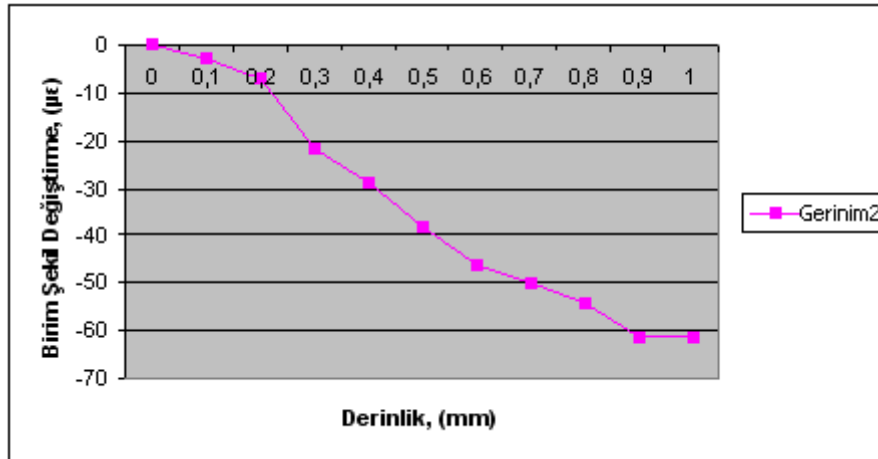
10 mm/sn kaynak ilerleme hızında kaynatılan numunede kaynak metaline dik ve paralel kalıntı gerilme değerleri ölçülmüştür. Kaynak metaline dik konumda -67.41 MPa değerinde kalıntı gerilme görülürken, paralel konumda ise 117.41 MPa değerinde kalıntı gerilme görülmektedir.

Genel olarak bakıldığında 10 mm/sn kaynak ilerleme hızında kaynatılan numunede kaynak metaline dik olan gerilim ölçerde, kaynak bölgesine aktarılan ısı miktarının az olmasından dolayı daha az bir kalıntı gerilme oluşur.



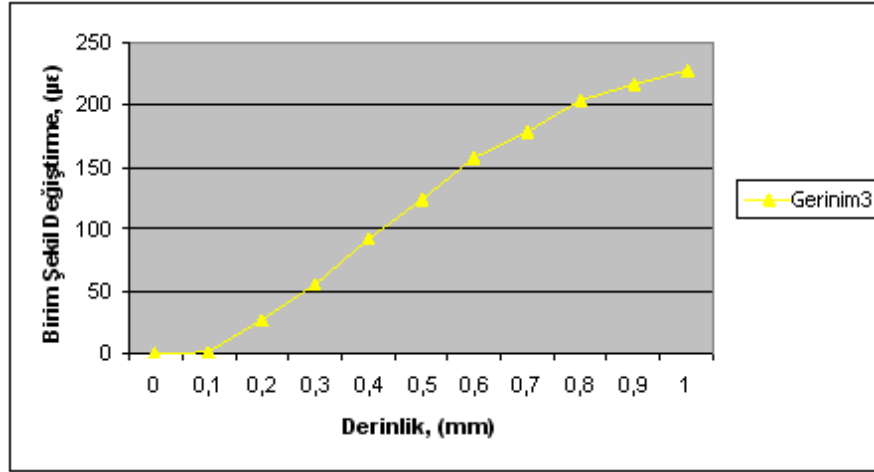
Şekil III.44. Derinlik-Gerinim Arasındaki İlişki (10mm/sn-1 nolu Gerinim)

Şekil III.44' de gerilim ölçerin kaynak metaline dik konumda ölçümü yapılmaktadır.



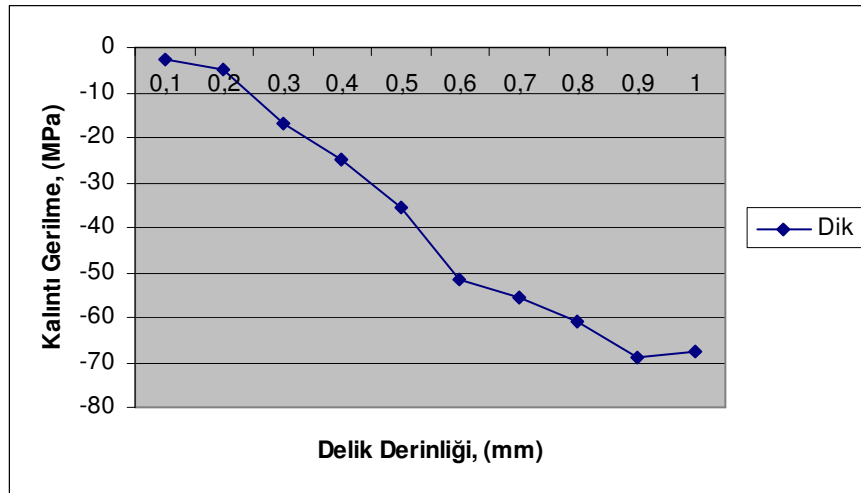
Şekil III.45. Derinlik-Gerinim Arasındaki İlişki (10mm/sn-2 nolu Gerinim)

Şekil III.45' de dik konumdaki gerilim ölçere 45° de 2 nolu gerilim ölçerin ölçüm sonucu verilmektedir. Birim şekil değiştirme değerlerinin negatif olması o bölgenin çekme kuvvetine maruz kaldığını göstermektedir.

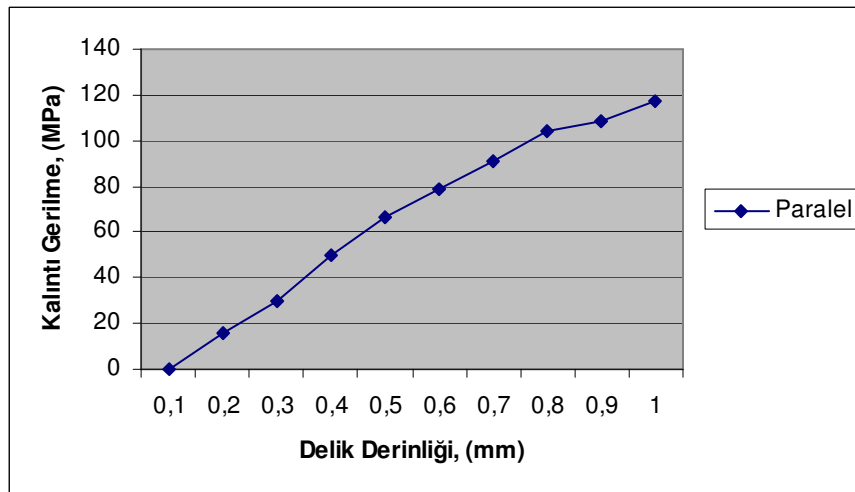


Şekil III.46. Derinlik-Gerinim Arasındaki İlişki (10mm/sn-3 nolu Gerinim)

Şekil III.46’ da gerilim ölçerin kaynak metaline paralel konumda ölçümü yapılmaktadır. Burada ölçüm sonuçlarının pozitif çıkması o bölgede basma gerilmesi olduğunu göstermektedir.



Şekil III.47. Kaynağa Dik Konumdaki Derinlik-Kalıntı Gerilme Arasındaki İlişki



Şekil III.48. Kaynağa Paralel Konumdaki Derinlik-Kalıntı Gerilme Arasındaki İlişki

BÖLÜM IV.

VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

IV.1. ARK KAYNAK İŞLEMİ SONUCU OLUŞAN İÇ GERİLMELERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

Robot ark kaynak yöntemi ile sabit hale getirilmiş standart çelik üzerinde amper değeri sabit tutularak farklı ilerleme hızlarında kaynaklı birleştirme yapılmıştır. Kalıntı gerilmelerin deneysel olarak ve sonlu elemanlar analizi yapılarak incelenmesi sonucu aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Delik delme metodu ile yapılan kalıntı gerilme ölçüm deneyinde, 7 mm/sn ve 10 mm/sn hızında kaynaklı birleştirme parametreleri kullanılmıştır. Alınan ölçümler sonucunda 7 mm/sn hızında kaynatılan numunede kaynak metaline dik gerilim ölçerinde , 10 mm/sn hızında kaynatılan numunedeki kaynak metaline dik gerilim ölçere nazaran daha fazla gerilim boşalması olmuştur. 7 mm/sn hızında kaynatılan numunede kaynak metaline dik gerilim ölçerinde -106,2 MPa çekme gerilmesi görülmektedir. 10 mm/sn hızında kaynatılan numunede dik gerilim ölçerinde ise -67,41 MPa çekme gerilmesi görülmektedir. Bunun sebebi literatürde ısı girdisi teorisinden de yararlanılarak açıklanabilir. Kaynak ilerleme hızı arttıkça kaynatılan malzemeye aktarılan ısı girdisinin azalmasıdır. Isı girdisinin azalması ile malzemedeki oluşan gerilmelerde azaldığı görülmüştür. Yapılan deneysel çalışma ile literatür paralellik göstermektedir.

Kalıntı gerilme ölçüm deneyinde kaynak metalinden 22 mm uzaklıkta paralel ve dik gerilmelerin ölçümü yapılmıştır. 7 mm/sn hızında yapılan kaynaklı birleştirmede dik gerilim ölçerinde çekme gerilmesi, paralel gerilim ölçerinde ise basma gerilmesi olduğu görülmüştür. 10 mm/sn hızında yapılan kaynaklı birleştirmede de dik gerilim ölçerinde çekme gerilmesi, paralel gerilme ölçerinde ise basma gerilmesi elde edilmiştir.

Termokupul ile yapılan sıcaklık ölçüm deneyinde 4 mm/sn , 7 mm/sn ve 10 mm/sn hızlarında kaynak işlemi yapılmış ve kaynak esnasında sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Bu sonuçlara göre 4 mm/sn ilerleme hızında kaynatılan numunede

kaynağa yakın olan 1. noktada en yüksek 334.7 °C , 2. noktada ise 277.7 °C sıcaklık ölçümü yapılmıştır. 7 mm/sn hızında kaynatılan numunede 1. noktada en yüksek 189.4 ° C, 2. noktada ise 148.7 °C ölçüm yapılmıştır. 10 mm/sn hızında kaynatılan numune de ise 1. noktada en yüksek 158.1 °C, 2. noktada ise 124.3 °C sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu sonuçlara dayalı olarak kaynak ilerleme hızı arttıkça kaynak metalinde ölçülen sıcaklık değeri de azalmaktadır. Böylece deneysel çalışmalar incelendiğinde daha yüksek ilerleme hızında yapılan kaynaklı birleştirmede daha az kalıntı gerilme oluştuğu görülmüştür.

Sonlu elemanlar analizi neticesinde sıcaklık dağılımının ve Von Mises gerilme değerlerinin nasıl gerçekleştiği görülmüştür. 4 mm/sn hızında kaynatılan numune de 1 .noktada yaklaşık olarak en yüksek sıcaklık değeri 357 °C, 2. noktada ise 186 °C' dir. 7 mm/sn hızında ise 1. noktada 251 °C, 2. noktada ise 132 °C ölçümü yapılmıştır. 10 mm/sn hızında kaynatılan numune de ise 1. noktada en yüksek 196 °C, 2. noktada ise 98 °C ölçüm sonucu alınmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizde kaynak ilerleme hızının artmasıyla sıcaklık değerinin ve Von Mises değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Sonuç olarak deneysel çalışmalardan elde edilen ölçüm değerleri ile sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerler birbirine benzerlikler göstermektedir. Farklı parametrelere göre incelendiğinde her ikisinde de kaynak ilerleme hızı arttıkça sıcaklık değerlerinin ve gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir.

Sabit hale getirilmiş standart çeliklerin kaynaklı birleştirilmesinde kaynak bölgesine aktarılan ısı miktarının, kalıntı gerilme oluşumunu önemli ölçüde etkilediği literatüre de uygun olarak ortaya konmuştur. Düşük kaynak hızlarında daha yüksek kalıntı gerilme oluşmaktadır bu da parçanın çalışma sırasında hasar görmesine sebebiyet verebilmektedir. Bunu önlemek amacıyla kaynaklı birleştirmede optimum kaynak ilerleme hızları tercih edilmesi önerilmektedir.

Yüksek kaynak hızlarında daha az kalıntı gerilme görülmektedir. Ancak yüksek kaynak hızlarında nüfusiyet azalmakta ve dikiş kenarlarında yanma oyukları meydana gelmektedir. Bundan dolayı kaliteli bir kaynak işlemi için kaynaklı birleştirmelerde optimum kaynak hızları kullanılmalıdır. Kaynaklı birleştirme işlemini gerçekleştirmeden önce sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tasarım aşamasında kalıntı gerilme ve çarpımların kabul edilebilir düzeyde olabilmesi sağlanabilmekte ve önerilmektedir.

KAYNAKLAR

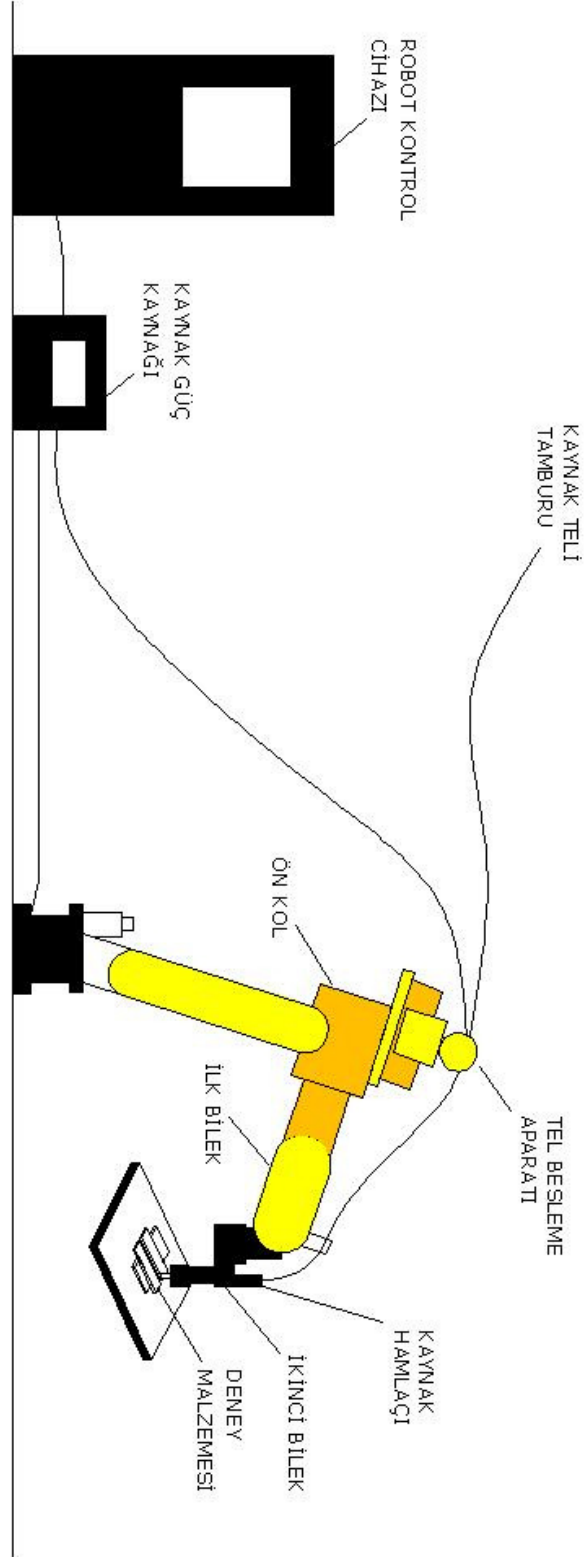
- [1] Dr. YİĞİT , O. , Mak. Yük. Müh. , DİLMEÇ , M. , Dr. HALKACI , S. , “ Tabaka Kaldırma Yöntemi ile Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi Ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması ” , Mühendis ve Makine , Cilt : 49 , Sayı: 579, Nisan, (2008).
- [2] Metals Handbook Desk Edition 2nd Edition (Metals Handbook) by J.R.Davis.
- [3] TEKİN , Adnan. , “Çelik Ve Isıl İşlemi ” , Hakan Ofset, (1984).
- [4] Bhadeshia, H. K. D. H., “Handbook of Residual Stress And Deformation of Steel; Material Factors” , University of Cambridge, ASM international, 3-9, (2002).
- [5] DEMİRLER, U., TAPTIK, Y., “Substrate effects on residual stress of PVD TiN Coatings” , İTÜ Dergisi Mühendislik , Cilt:4, Sayı:1, 95-102, Şubat, (2005).
- [6] BİNİCİ , İ., Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , “Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi Ve Giderilmesinde Yeni Bir Yaklaşım ” , Yöneticisi, YEREBAKAN , M., İSTANBUL, (1992).
- [7] UÇAR, M., DEMİRER, H., SALMAN, S., “ Residual Stresses in Ceramic Coatings” , TMMOB Denizli Şubesi, Bilim Günleri, 5-6-7 Mayıs, (1999).
- [8] ÖZEL, A., ŞEN, S., BELEVİ, M., “ Effects of Residual Stresses Caused by Different Types of Loading on Silent Chain Strength” , Tr. J. of Engineering and Environmental Science, TÜBİTAK, 22, 461-470, (1998).
- [9] ÇALLIOĞLU , H., KARAKAYA , Ş., “Tabakalı Bir Diskin Termal Gerilme Analizi” , Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 61-68, (2008) (1).
- [10] Prof. Dr. ANIK S., Gedik Eğitim Vakfı, Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, “ Kaynak Tekniği El Kitabı ” , İSTANBUL, (1991).
- [11] BUZLUK, M., Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, “ Elektrik Ve Gazaltı Ark Kaynağında Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi ” , Tez Danışmanı, Prof. Dr. KURT, A., ANKARA, (2007).

- [12] Çanacık, A., “ Çeliklerin Kaynağında Açısal Distorsiyon ”, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Danışmanı, Prof. Dr. YÜKLER, İ., İSTANBUL, (1998).
- [13] Metals Handbook, ““ Welding and Brazing ” , American Society for Metals, Ninth Edition, Metals Park, Ohio, (1983).
- [14] “ Residual Stress Measurement by the Hole-Drilling Method ”, <http://www.hbm.com/en/menu/applications/experimental-stress-analysis/application-reports/experimental-stress-analysis-detail/datum/2008/06/24/residual-stress-measurement-by-the-hole-drilling-method/>, 03.11.(2008).
- [15] “ The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique ” , P. V. Grant, J. D. Lord, and P.S. Whitehead, National Physical Laboratory, Teddington, United Kingdom, August, (2002).
- [16] Katharyn Gallagher, “ Experimental Methods for Measuring the Dead Load Stress in Steel Girder Bridges ” , Department of Civil and Environmental Engineering, Rowan University, Glassboro, NJ, August, (2003).
- [17] Vishay Micro Measurements, “ Special Use Sensors – Residual Stress Strain Gages ” , <http://www.vishay.com/docs/11516/resstr.pdf> , 05.06.(2009).
- [18] Welding Handbook, Volume 1, Seventh Edition, American Welding Society, Miami, (1981).
- [19] Avner, S.H., Introduction to Physical Metallurgy, McGraw-Hill, Auckland, (1984).
- [20] YUMURTACI, S. , TOLGA, M. , “ Robotik Kaynak sistemleri ve Gelişim İstikametleri ”, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, Kocaeli, 25 Ekim, (2003).
- [21] <http://www.robot-welding.com/>, Erişim Tarihi, 03.02.(2009).
- [22] KUKA Arc Welding, Brochure, <http://www.kuka-robotics.com/en/products/> Erişim Tarihi, 03.02.(2009).
- [23] Lord, J. , “ Hole Drilling Techniques ”, The NPL Materials centre, BCA Structural Materials workshop, 12 september, (2000).
- [24] Poerner, N. , W. , “ An Investigation of variability Among Residual Stress Measurement Techniques and Prediction of Machining Induced Distortion ”, Texas Tech University , December, (2007).
- [25] Erdemir ürün kataloğu Ereğli demir ve çelik Fab., T.A.Ş., İstanbul, (2000).

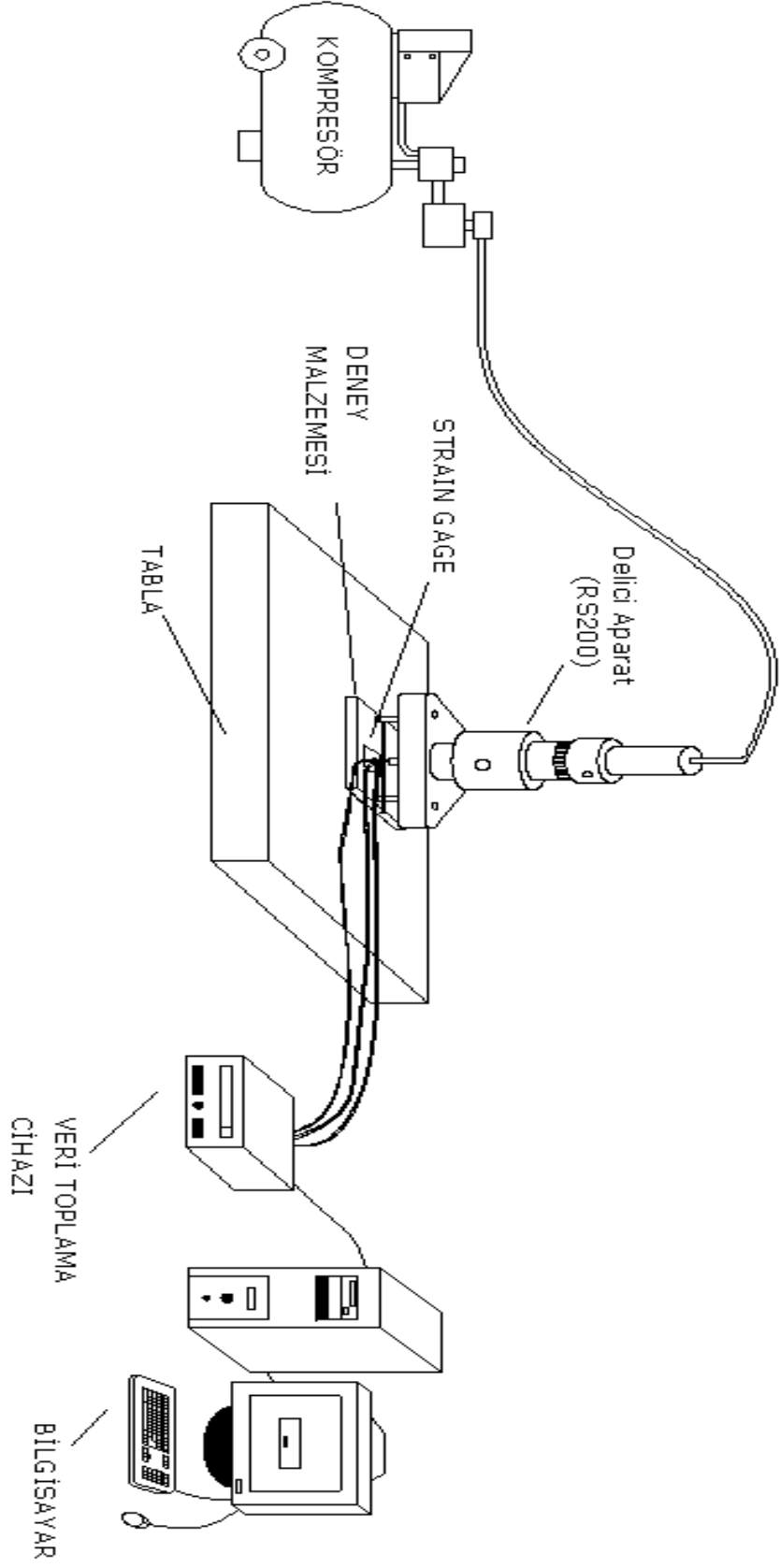
- [26] <http://www.gedikwelding.com/TR/Categories.php?CatId=8&SubId=1> ,
Erişim tarihi: 17. 05. (2009).
- [27] EN 439, “ Kaynak sarf malzemeleri - Ark kaynağı ve Kesme için koruyucu Gazlar ” , Ankara, (1995).
- [28] http://www.abrotech.com.tr/urun.php?urun_no=3 , Erişim tarihi: 01.05.2009.
- [29] EN 25817 “ eliklerde Ark Kaynaklı Birleştirmeler – Kusurlar İçin Kalite Seviyeleri Kılavuzu” , EQV, (1992).
- [30] EN 288-3 “ Specification and Approval of Welding Procedures For Metalik Materials ” , Europen Standard, (1997).
- [31] ŐIK, Aydın, Trakya Univ. J. Sci., 7(1):, “ Yapı eliğinin (St52-3) Mig/ Mag Kaynağında Gaz Karışımlarının ekme Dayanımı zelliklerine Etkisi ” , 9-15, (2006).
- [32] BENLİ, Serkan, “ Kaynaklı Parçalarda Oluşan Artık Gerilmelerin İncelenmesi ” , Dokuz Eylöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tez Danışmanı ; Yrd. Doç. Dr. Serdar KARAOĞLU, İzmir, (2004).

EKLER

EK I Deney Düzeneklerinin Şematik Gösterimi



EK I-Şekil 1. Kaynak Robot Otomasyonu İle Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi



EK I-Şekil 2. Delik Delme Yöntemiyle Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi için Kullanılan Deneş Düzeyi Şematik Gösterimi

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Adana’ da doğdu. İlk öğrenimine Ağrı Cumhuriyet ilkokulu’ nda başladı ve ortaokul öğrenimini İstanbul Bağcılar ilçesinde Hoca Ahmet Yesevi İlköğretim okulunda tamamladı. Lise Öğrenimini İstanbul Bağcılar A. ve N. Bilimli Teknik Lisesi Makine Bölümü’ nde 2001 yılında tamamlayarak mezun oldu. 2002 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünü kazandı ve 2006 yılında Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Teknolojisi programını üçüncülükle bitirdi. 2006 eylül ayında Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik yüksek lisans programına başladı. Halen lisansüstü öğrenimine devam etmektedir.

Samet ŞEN