

55275

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAYNAKLI YAPILARDA ÇEKME, ÇARPILMA VE BUNLARI**  
**AZALTMA ÖNLEMLERİ**

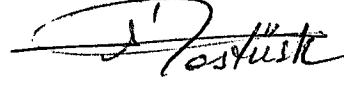
**Mustafa Kemal KÜLEKÇİ**

**Yüksek Lisans Tezi**  
**MAKİNA EĞİTİMİ**

55275

**1996**  
**ANKARA**

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Yrd.Doç.Dr. İbrahim ERTÜRK

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makina Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

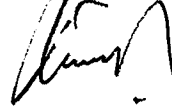
Başkan : Prof. Dr. Ali Yücel UYAREL



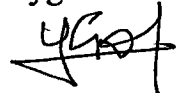
Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim ERTÜRK



Üye : Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENG



Bu tez Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



## ÖZET

Bu çalışmada kaynaklı yapı veya yapı elemanın kaynak bölgesinde (ITAB) üniform olmayan ısınma ve soğumanın neden olduğu distorsiyon incelenmiştir. Kaynak işlemine daima bir miktar distorsiyon ve kalıntı gerilimi eşlik eder. Çalışmada distorsiyon miktarına etki eden faktörler verilmiştir. Bazı kaynaklı yapılarda meydana gelen distorsiyon gözardı edilebilecek kadar küçük iken, diğerlerinde meydana gelen distorsiyon kaynak işlemi öncesinde, kaynak işlemi esnasında veya işlem sonrası birtakım özel tedbirlerin alınmasını gerektirecek kadar büyük olabilir. Çalışmada geniş olarak verilen bu önlemler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Kaynak işleminden önce yapılardaki gerilmeleri giderme. Açısız çarpılmaya neden olan çoklu pasolarda kaynak paso sıralarının tespiti. Geriye doğru ilerleyen veya sıra atlayarak yapılan kaynak yönteminin kullanılmasıyla daha büyük rijitlik elde edilirken distorsiyon miktarının düşürülmesi. Kaynaklı yapının sıcak halde iken çekişilmesiyle, kalıntı gerilmelerinin, distorsiyonun ve kapanmanın azaltılması. kaynak yönü seçimi, kaynak hızının değişmesi, paralel birleştirmelerde ters kaynak yönleri, kalıntı gerilmelerinin dengelenmesi, kaynak işlemi öncesi ve işlem sonrası ısıtma işlemleri.

**ANAHTAR KELİMELER:** Distorsiyon, çarpılma, enine çekme, boyuna çekme, açısız çekme, kalıntı gerilmeleri, gerilim giderme, kaynak gerilmeleri, kaynak çekmesi.

## ABSTRACT

In this article distortions, which come out in welding of any structure or member by nonuniform heating and cooling at the point of welding, researched. Welding is always accompanied by some distortion, and some unbalanced residual stress remains. The Factors which effect the amount of distortion explained. In some weldments, distortion may be so slight that it may be disregarded, while in others it may be so great that special precautions must be taken before and during welding, or straightening must be done after welding. These precautions may be summed as follow.

Stresses relieving of the structures before welding. On multiple-pass welds, the sequence of weld passes which effect angular distortion. Using backstep sequence or wandering (skip) sequence technics, it is possible to get greater rigidity and reduce the rate of distortion. Clamping of weldment structures. Peening the weld metal while it is hot so reduce residual stresses and minimize distortion or warping. Taking welding direction away from the point of greatest restraint. Changing the speed of welding. Welding of paralel joints in opposite directions. Balancing residual stresses. Preheating and post heating technics, etc.

**KEY WORDS :** Distortion, contraction, transverse shrinkage, longitudinal shrinkage, angular shrinkage, residual stresses, stress relieving, welding stresses, welding shrinkage.

## TEŞEKKÜR

"Kaynaklı yapılarda çekme, çarpılma ve bunları azaltma önlemleri" isimli tez konumun belirlenmesinde, gerekli kaynakların sağlanmasında, büyük katkıları olan, yoğun çalışmaları arasında zaman ayırarak rehberlik eden ve beni yönlendiren Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Teknoloji Eğitimi Bölümü öğretim Üyesi danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr.İbrahim ERTÜRK'e öncelikle teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımın yapılması aşamasında imkan sağlayarak deneylerin yapılmasına katkıda bulunan Pi MAKİNA SAN. A.Ş. Genel Müdürü Gündoğan GÜLTEKİN'e ve Makina Mühendisi Cevat KAYA'ya; NACE MAKİNA SAN A.Ş. İmalat Müdürü Osman İNCE'ye; Dikmen Endüstri Meslek Lisesi Metal İşleri Bölümü öğretmeni Erkan DOĞAN'a; Tezimin hazırlanmasında katkıları olan bölüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

**TABLULARIN LİSTESİ**

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
1.1. Seçilmiş metallerin fiziksel özellikleri (Richard, 1973) .....	3
1.2. Seçilmiş metallerin fiziksel özellikleri (Richard, 1973) .....	10
2.1. 0 ile t°C arasında demir ve çeliğin ortalama özgül ısıları (Anık, 1983) .....	39
2.2. Sıcaklık- Elastikiyet modülü bağıntısı (Anık, 1983) .....	40
4.1. Kaynak işlemi sonrası ölçülen değerler (mm).....	102



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
1.1. Hacimsel çekilme (Richard, 1973) .....	7
1.2. Denge diyagramının elde edilişi (Richard, 1973) .....	7
1.3. Ötektik denge diyagramının elde edilişi (Richard, 1973).....	8
1.4. Metal eriyikleri a) Katı eriyik (ötektoid metal) b) asıl metal arti ötektik karışım (American Welding Society, 1981).....	9
1.5. Demir karbon denge diyagramı (Materials Engineering, 1983).....	12
1.6. Zaman- Sıcaklık- Dönüşüm Diyagramı (Materials Engineering, 1983).....	15
1.7. Soğutulan Çeliklerde Tane Büyüklüğünün Yapı Üzerindeki etkisi (Materials Engineering, 1983) .....	16
1.8. Gerilme testi a) Numuneye kademeli olarak uygulanan kuvvet, b) Gerilme uzama eğrisi (Anderson, 1990).....	17
1.9. Atomlararası Mesafeye Uygulanmış Atomlar Arası Kuvvet Diyagramı (Anderson, 1990) .....	20
1.10. Düşük Alaşımli Çelikte Sıcaklığın Elastikiyet Modülüne Etkisi (Materials Engineering, 1983).....	21
1.11. Değişik Malzemelerin Elastik Sınır İçerisindeki Gerilme-Şekil Bozulma Eğrileri (Oğuz, 1989).....	22
1.12. Gerilme ve Plastik Dönüşüm Arasındaki Bağını (Materials Engineering, 1983).....	24
1.13. Çelik Levha için Yük-Uzama Eğrisi (American Society For Metal, 1990).....	25
1.14. Gerilme ( $\sigma$ )- N diyagramı (Oğuz, 1989).....	28

2.1. Rijit İki Tutulan Parçanın Kaynağında Sıfıra Yakın Çarpılmaya Karşılıklı Yapıdaki Gerilmeler Büyüktür (Raymond, 1990). .....	31
2.2. Çekme Gerilmesi İçermeyen Ancak Aşırı Çarpılmış Kaynaklı Birleştirme (American Welding Society 1981).....	31
2.3. İnce Cidarlı Borunun Çevre Kaynağı Esnasındaki, Optimum Isı Girişi Hesap Örneği (Anderson, 1994). .....	33
2.4. Kaynak gerilmeleri ve çarpılma arasındaki ters orantı (ODTÜ Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992).....	35
2.5. Metalik bir konstrüksiyonun kaynak ısısının etkisiyle uzayıp kısılması (Anık, 1991). .....	36
2.6. Karbon oranının çekme ve uzamaya etkisi (ODTÜ Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992).....	41
2.7. Kaynak esnasında kaynak bölgesinin uzaması ve kendini çekmesi .	42
2.8. Kaynak sırasında ısı tesiri altındaki bölge (Anık, 1991). .....	43
2.9. Bir alın kaynağındaki kanti gerilmelerinin dağılımı (American Welding Society, 1981). .....	44
2.10. Üç elektrik dirençli gerinim ölçer (Topuz, 1984).....	47
2.11. Değişik çekme ve çarpılma şekilleri .....	49
2.12. Kaynaklı yapılarda görülen çekme ve çarpılmalar (ODTÜ kaynak Teknolojisi Birimi, 1992).....	51
2.13. Boyuna çekme; kesik çizgiler kaynaktan önceki konumu gösterirken, sürekli çizgiler ise kaynaktan sonraki konumu göstermektedir (Gourd, 1986). .....	52
2.14. st 37 çeliğinin kalın örtülü elektrotla yapılan ark kaynağında, çeşitli birleştirme şekillerinde oluşan F: Boylamasına özgül kendini çekme kuvvetleri, Q: toplam kesit alanı (Anık, 1983).....	52

- 2.15. Enine çekme; Kesik çizgiler kaynaktan önceki konumu, sürekli çizgiler ise kaynak işlemi sırasında konumu göstermektedir (American Society for metal, 1990). .....54
- 2.16. Alından yapılan kaynaklı birleştirmede, alın dikişinde meydana gelen enine çekme (ODTÜ Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992). ....55
- 2.17. St 37 ve St 42 çeliklerinde değişik ağız formlarına göre alın birleştirmelerinde meydana gelen enine çekme miktarları (ODTÜ Kaynak Teknolojisi, 1990).....56
- 2.18. St 37 ve St 42 çeliklerinin örtülü elektrotla yapılan iç köşe kaynaklarındaki enine çekme miktarı (Anık, 1983). .....58
- 2.19. Doldurma kaynağındaki çekme hem boyuna hem enine gerilmelere neden olur (Raymond, 1990). .....58
- 2.20. Kaynağın T birleştirmelere etkisi. Kesik çizgiler orijinal konumu, sürekli çizgiler ise kaynaktan sonraki konumu göstermektedir (Gourd, 1986). .....59
- 2.21 St 37 ve st 42 çeliklerin alın kaynağında meydana gelen açısız çarpılma miktarları (ODTÜ Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992). ....60
- 2.22. Plaka kalınlığının v-alın dikişlerinde açısız çarpılmaya etkisi (Anık, 1991) .....61
- 2.23. St 37 çeliğinin çeşitli iç köşe birleştirmelerinde meydana gelen çarpılma miktarları (Raymond, 1990). .....61
- 2.24. Tek taraftan orta rutil bir elektrodla kaynak yapılan iç köşe birleştirmelerinde çekilen paso sayısının açısız çarpılmaya etkisi (ODTÜ Kaynak Teknolojisi, 1992). .....63
- 2.25. Kaynak sonrasında oluşan bükülme. Kesik çizgiler orijinal konumu sürekli çizgiler kaynak sonrası konumu göstermektedir (Raymond, 1990). .....64

3.1. V Kaynak ağızı ile X kaynak ağızı için gerekli kaynak metalinin karşılaştırılması (American Society For Metal, 1990). .....	71
3.2. Doğru kenar hazırlığı ve düzenleme (Raymond, 1990).....	72
3.3. Parçaların önceden gerilmesi ve tespit edilmesi (Raymond, 1990). 73	
3.4. Kaynak işleminden önce, çarpılmayı önlemek için parçaların konumlanması (Raymond, 1990). .....	75
3.5. T birleştirmenin 90° den kaçık (eğik) olarak konumlanması. Kaynakta meydana gelen çekme plakaya dik duruma getirecektir (Ertürk, 1989).....	75
3.6. Kısa ve uzun kaynak dikişi için puntalama, punta sayısı kaynak dikiş uzunluğuna bağlıdır (Raymond, 1990).....	76
3.7. Kaynak sonarsı konuma göre önceden konumlanmış parçalar (Gourd, 1986).....	77
3.8. Enine çekmeye olanak verirken açısal distorsiyonu önlemek için hazırlanmış kenetleme düzeneği (American Welding Society, 1981).....	78
3.9. Taşıyıcı kirişlerde yatay parçaya önceden verilen sehim miktarı (Anık, 1980). .....	78
3.10. Açısal değişimin elastik germe ile azaltılması (American Welding Society). .....	79
3.11. Doldurma kaynaklarının düzenlenmesi (Raymond, 1990). .....	80
3.12. Geriye doğru adım adım ilerleyen kaynak yönteminde kaynak aralığı ve işlem örneği (Gourd, 1986).....	81
3.13. Geriye doğru adım adım sıra atlayarak ilerleyen kaynak yönteminde kaynak aralığı ve işlem örneği (Gopurd, 1986). .....	82
3.14. X alın birleştirmelerinde distorsiyona karşı tavsiye edilen kaynak sıraları (Anık, 1980).....	83

- 3.15. kanal açılmış boru plakası kaynak esnasında boruyla arasındaki ısı farkını minimize eder (American Society For Metal, 1990). ....84
- 3.16. Bir bakır bloğunun soğutucu olarak kullanılması, ısı dağılım farkını minimize eder (American Society For Metal, 1990).....85
- 3.17. İnce bir sac konstrüksiyonunun takviyelerle tespiti (Anık, 1991)..86
- 3.18. ince sac plakaların takviye edilmesi ( O.D.T.Ü Kaynak teknolojisi Birimi,1992 ).....86
- 3-19. Sac alanları kaynağında işlem sırası (O.D.T.Ü Kaynak Teknolojisi Birimi 1992 ).....87
- 3.20. Sac alanları kaynağında işlem sırası (O.D.T.Ü Kaynak Teknolojisi Birimi 1992 ).....87
- 3.21. İnce sac plakaların kaynağında dalgalanmalara karşı bakır blokların kullanılması .....87
- 3.22 Alevin çekirdeği ile parça arasındaki mesafenin yanlış ve doğru konumları ( Anık, 1991 ).....89
- 3.23. Bir kaynak dikişinin yarıklı demirci baskısı ile düzeltilmesi (Anık, 1991) .....90
- 3.24. Kaynaklı konstrüksiyonlara uygulanan farklı alevle düzeltme yöntemleri (O.D.T.Ü. Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992). ....91
- 3.25 Distorsiyona uğramış elemanların mekanik yöntemle düzeltilmesi (Anık, 1991) .....92
- 3.26. Bir küre tankının gerilim giderme düzenegi.(1) şebeke bağlantısı (2) kontrol odası, (3) fan için elektrik bağlantısı (4) yüksek hızlı yakıcı (5) propan tankı (6) küre çıkışı (7) genleşme göstergesi (8) ayaklara kaynatılmış kaldırma kulakları, (9) hidrolik kriko ( Macun, 1983).....94
- 3.27. Ring destek geometrisi (Makhnenko, et al., 1994). ....97

3.28. Bir ring desteğinin basit bir modele uyarlanmasıyla basitleştirilmesi (makhnenko, et al., 1994). .....	99
4.1. Kaynak işlemine tabi tutulacak parçaların boyutları ve konumu. ....	101
4.2. Kaynak işlemi tamamlanmış parçaların kaynak sonrası durumları..	102
4.3. Kaynaklı yapıda tarafsız eksenler.....	103
4.4. Parçaların puntalanarak emniyete alınması.....	107
4.5. Kaynak işlemi sonrası soğumayla bırakılan parçalar. ....	107
4.6. Kaynak işlemi tamamlanmış parçasının son durumu. ....	108
4.7. Parçaların kaynağa hazırlanışı.....	108
4.8. Bir kaynakçı ile tek taraftan yapılan kaynak .....	109
4.9. İki kaynakçı ile iki taraftan yapılan kaynak .....	110
4.10. Kalıba alınmak suretiyle kaynak edilmiş giriş. ....	111
4.11. T kaynaklı birleştirme .....	112

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
TABLoların LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	v
1. METALLER VE ÖZELLİKLER	
1.1. Metaller .....	1
1.2. Fiziksel Özellikler.....	2
1.2.1. Yoğunluk .....	2
1.2.2. Isı iletkenliği .....	3
1.2.3. Elektrik iletkenliği.....	4
1.2.4. Isıl genleşme katsayısı.....	4
1.2.5. Korozyon dayanımı.....	5
1.2.6. Hacimsel (volümetrik)çekilme .....	6
1.3. Kimyasal Özellikler .....	9
1.4. Termal Özellikler.....	11
1.5. Mekanik Özellikler .....	16
1.5.1. Gerilme uzama eğrisi .....	16
1.5.2. Elastik deformasyon.....	18
1.5.3. Elastikiyet modülü .....	20
1.5.4. Plastik deformasyon.....	22
1.5.5. Akma noktası .....	25
1.5.6. Sertlik .....	26
1.5.7. Dayanma sınırı.....	27

1.5.8. Darbe mukevemeti .....	28
2. ÇEKME VE ÇARPILMLAR.....	30
2.1. Temel Metal Füzyon Olayı .....	32
2.2. Çekme ve Çarpılmaların Fiziksel Esasları .....	33
2.2.1. Kaynak işleminde sıcaklık farkı .....	38
2.2.2. Kaynak hızı.....	38
2.2.3. Çekme, çarpılmalar ve özgül ısı bağıntısı .....	38
2.2.4. Isı iletme kabiliyetinin çekme ve çarpılmaya etkisi.....	39
2.2.5. Isıl uzama katsayısı .....	39
2.2.6. Elastiklik modülü-sıcaklık ilişkisi.....	40
2.2.7. Parçanın hacmi ve formu.....	40
2.3. Kaynak Gerilmeleri.....	43
2.4. Çekme ve Çarpılmalara Neden Olan Artık Isıl Gerilmelerin Ölçülmesi .....	45
2.4.1. Kördelik yöntemi ile artık ısıl gerilmelerin ölçülmesi.....	46
2.4.1.1. Elektrik dirençli gerinim ölçeri ile asal artık gerilme büyüklükleri ve yönlerinin bulunması. ....	47
2.5. Kaynaklı Yapılardaki Çekme ve Çarpılma Türleri.....	49
2.5.1 Boyuna çekme (boyuna kısalma).....	50
2.5.2. Enine çekme (enine kısalma).....	53
2.5.3. Açısal çarpılma .....	57
2.5.4. Kaynaklı yapılda açısal çarpılmaya etki eden faktörler.....	62
2.5.5. Kaynaklı yapılardaki bükülme (kaynak çekmesi).....	62
2.5.6. İnce kesitli yapılarda çekme ve çarpılma (Distorsiyon).....	64
2.5.7. Kalın kesitli yapılarda çekme ve çarpılma (Distorsiyon).....	64
2.5.8. Düz kaynaklarda çekme ve çarpılmalara etki eden faktörler .....	64

2.5.9. Dolgu kaynaklarında çekme ve çarpılmaya etki eden faktörler ....	65
<b>3. ÇEKME VE ÇARPILMALARI AZALTMA ÖNLEMLERİ .....</b>	<b>66</b>
3.1. Çekme ve Çarpılmaya Neden Olan Gerilmelerin Kontrol	
Altına Alınması.....	67
3.1.1. Ön ısıtma .....	67
3.1.2. Kayna işleminden sonra ısıtma.....	68
3.1.3. Gerilim giderme, yumuşatma tavı (annealing) .....	69
3.1.4. Soğuk çekiçleme .....	69
3.1.5. Mekanik yükleme.....	70
3.1.6. Kaynak tekniği ile gerilim düşürme.....	70
3.2. Kaynak İşleminden Önce Çekme ve Çarpılmayı	
Azaltma Önlemleri.....	71
3.2.1. Kaynak işlemi ve donanımının seçimi .....	73
3.2.2. Ön germe .....	73
3.2.3. Parçaların arasında boşluk bırakarak konumlama .....	74
3.2.4. Bağlama tertibatları ve donanımları.....	74
3.2.5. Enine Kirişler.....	74
3.3. Kaynak Esnasında Çekme Çarpılmanın Kontrol Altına Alınması ...	75
3.3.1. Kaynak sırasının planlamasıyla çekme ve çarpılmaların	
önlenmesi .....	79
3.3.2. Kesit kalınlığı eşit olmayan parçaların kaynağı .....	83
3.3.3. İnce kesitli plakalarda çekme ve çarpılmaları azaltma önlemleri..	85
3.4. Kaynak İşlemi Sonrasında Çekme ve Çarpılmaları Azaltma	
Önlemleri.....	88
3.4.1. Alevle düzeltme .....	88
3.4.2. Mekanik düzeltme.....	90

3.4.3. Kaynağı tamamlanmış yapıların komple ısıl işlemi.....	92
3.5. Desteklenmiş (Berkiştirilmiş) Ringlerdeki Distorsiyonların Modellenmesi .....	93
3.5.1. Kaynağı yapılmış ring desteği simülasyonu.....	96
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	101
4.1. Bindirmeli Kaynakta Çekme ve Çarpılmaların Tespiti .....	101
4.1.1. Boyuna çarpılma (yapıdaki kabarma-sehim).....	102
4.1.2 Boyuna çekme hesabı.....	103
4.1.3. Enine çekme .....	105
4.2. T- Kirişindeki Çekme ve Çarpılma.....	106
4.2.1. Çekme ve çarpılmaların hesabı.....	111
4.2.1.1. Çekme hesabı.....	113
4.2.1.2. Sehim hesabı.....	113
5. SONUÇ ÖNERİLER .....	114
5.1. Sonuç.....	114
5.2. Öneriler .....	114
KAYNAKLAR.....	116

# 1. METALLER VE ÖZELLİKLERİ

## 1.1. Metaller

Doğada tabii olarak bulunan elementlerin çoğunluğunu metaller teşkil etmektedir. Metalleri metal olmayan elementlerden ayıran ortak özellikleri; Temiz ve pürüzsüz yüzeylerin metalik parlaklığının oluşu, kristal ince yapılı, ısı iletme kabiliyeti, soğuk haldeki şekil değiştirme kabiliyetidir.

Bu metal özelliklerini göstermelerinin esas sebebi, metallerin kristal bir yapıya sahip olmalarıdır. metal olmayan bazı elementlerde (kükürt, arsenik, karbon v.b) kristal yapı gösterirler; ancak amorf (şekilsiz) olarak da tabiatta bulunurlar. Kristallerin düzgün yüzeyli şekiller göstermelerinin nedeni, en küçük parçalarının dahi, düzenli dizilişe sahip olmalarıdır. Atomların bu düzenli dizilişleri kristal kafesi oluşturur. Kafes oluşumunun nedeni, atomların mümkün olduğu kadar birbirlerine yaklaşmak istemeleridir.

Kristal kafesinde atomları sakin olmayan kürecikler olarak düşünebiliriz. Atomlar kafes yapısı içerisinde, yer aldıkları noktalar etrafında, belirli bir titreşim yaparlar. Bu hareket, ısısının artması ile kuvvetlenir ve daha geniş bir hacim içerisinde meydana gelir. Metallerin ısınma esnasında gösterdikleri genleşme bu esasa dayanır.

Metalik malzemelerin kullanıldığı her türlü konstrüksiyon, makina ve alet yapımında en önemli konu malzeme seçimidir. Malzeme seçimi yaparken mukavemet, elektrik, ısı iletkenliği, yoğunluk ve diğer özellikleri gözönünde tutulmalıdır. Aynı zamanda üretim ve kullanım süresince malzemenin durumu, şekillenme, talaşlı imalat kabiliyeti, elektrik ve kimyasal kararlılığı, radyasyon

özellikleri ile fiyat ve piyasada bulunma durumlarında düşünölmelidir (weissavach, 1993).

## 1.2. Fiziksel Özellikler

Bir metalin fiziksel özellikleri, metale herhangi bir etki olmaksızın metalde varolan özelliklerdir. Bu özellikleri ergime noktasını, kaynama noktasını yoğunluğu, ısı iletkenliğini, elektriğe olan direncini, ısı genleşme katsayısını, volümetrik (hacimsel) çekilmeyi, manyetik özellikleri ve spesifik ısıyı içerir. Diğer-fiziksel özellikler; korozyon direnci, nükleer radyasyon karakteristikleri ve yansıtmadır. Tablo 1.1'de seçilmiş metal elementlerin fiziksel özellikleri, dışardan uygulanan basınç veya alüminyumun ergime sıcaklığı, ergitme için kullanılan enerjinin türüne bağı olmaksızın 1220°F ta sabit bir sıcaklıktır. Aynı durum metalin elektriksel direnci veya diğer fiziksel özellikleri içinde aynıdır.

### 1.2.1. Yoğunluk

Metalin birim hacmi kullanılarak belirlenir. Özgöl ağırlığı, metalin birim hacminin ağırlığının aynı hacimdeki suyun yoğunluğu arasındaki orandır. Ark kaynak işleminde kaynak edilen metalin yoğunluğunun bilinmesi önemlidir. Çünkü kaynakçanın iki farklı metalin karıştırılmasıyla sonucun ne olacağını bilmesi ve anlaması gerekir. Eğer metallerden birisi diğerinden daha yüksek yoğunluğa sahip ise, daha hafif olan veya daha az yoğunluğa sahip olan metal muhtemelen, homojen bir şekilde karışmadan daha ağır olan metalin yüzeyinde kalacaktır (American Society For Metal, 1990).

Tablo 1.1. Seçilmiş metallerin fiziksel özellikleri (Richard, 1973)

Element	Ergime Noktası		Kaynama Noktası,		Yoğunluk 68 °F ta PSI	Isı İletkenliği 68° FTA CALI (cm2) (cm) (SEC) (°C)	Elektrk Direnci μΩ/cm	Isı Genleşme Katsayısı 68°F TA μ.IN/(IN) (°F)	% Hacim Çekmesi
	°F	°C	°F	°C					
Alüminyum	1220	660	4442	2450	0.0975	0.53	2.7	13.1	-6.4
Bakır	1981	1083	4703	2595	0.324	0.94	1.7	9.2	-4.2
Altın	1945	1063	5380	2971	0.698	0.71	2.4	7.9	-5.2
Demir	2798	1537	5430	2999	0.284	0.18	9.7	6.5	-2.8
Kurşun	621	327	3137	1725	0.4097	0.08	20.6	16.3	-3.5
Nikel	2647	1453	4950	2732	0.3221	0.022	6.8	7.4	NA
Gümüş	1761	960	4010	2210	0.379	1.00	1.6	10.9	-5.0
Kalay	449	232	4120	2271	0.2637	0.15	11.0	13.0	-2.8
Tungsten	6170	3410	10706	5930	0.697	0.40	5.6	2.6	NA
Çinko	787	420	1663	906	0.258	0.27	5.9	22.0	-4.2

### 1.2.2. Isı iletkenliği

Isı iletkenliği bir metalden kondüksiyon yoluyla ısı aktarma oranıdır. ısı iletkenliğinin miktarı, ilgili metalin kaynaklı birleştirilmesinde ihtiyaç duyulan ısı miktarını belirler. Örneğin bakır, yüksek bir ısı iletkenliğine sahip olması dolayısıyla, birleştirmesi yapılacak bakır yapının ergiyik haline getirilmesi için büyük bir ısı kaynağı gerektirir. Bir metalin ısı iletkenliği, ısı iletkenlik katsayısı 1.00 olan gümüşle karşılaştırma suretiyle açıklanır. İltkenlik olayını açıklamak için üç teori geliştirilmiştir:

- Elektron transfer teorisi.
- Moleküler transfer teorisi.
- Kafes titreşim teorisi.

Isı iletkenliği arı metallerde daima yüksektir, bu nedenle, bir metalin alaşımını elde etmek metalin ısı iletkenliğini düşürür. Aynı zamanda ısı iletkenliği sıcaklıkla ters orantılıdır, bu nedenle bir metalin sıcaklığı yükseldikçe ısı iletkenliği düşer (Richard, 1973).

### 1.2.3. Elektrik İletkenliği

Bir metalin elektrik iletkenliği sıcaklığından etkilenir. Metalin sıcaklığı düştükçe elektrik iletkenliği artar. Metaller aşırı düşük sıcaklıklarda veya yaklaşık  $0K^{\circ}$  (sıfır kelvin) de elektrik akımını dirençsiz olarak geçirebilme durumuna gelirler, çünkü valans elektronları soğuk metalde çok daha kolay akar. Elektronlar voltajla belli bir yönde ivmelendirilmediğinde, akışa karşı bir direnç yoksa sabit bir şekilde aktıkları tespit edilmiştir. Elektronu hareket ettiren kuvvet, başka bir kuvvet tarafından karşı konulmadıkça, hareket halinde kalacaktır. Bu elektronu hareket ettiren kuvvete, karşı koyan kuvvet elektrik direnci olarak adlandırılır. Elektrik iletimi elektron akışına bağlıdır. Metal atomları valans elektronlarını kaybettiklerinde pozitif metal iyonlarına dönüşür. Bu metal iyonları elektron akışını engelleyerek elektron hareketini düşürmek suretiyle ileticide bir dirence neden olur. Her nekadard bir elektron akışı ve elektron akışına karşı bir iyon direnci olsada, temel (ana) metalin kütlesinde bir değişme yoktur. Elektron akışı, elektrik direncinin santimetre başına mikroohm olarak ölçen standart lçme yöntemiyle ölçülebilir (American Society for metal, 1990).

### 1.2.4. Isılgenleşme katsayısı

Kaynak işlemlerinde ısıl genleşme katsayısının bilinmesinin büyük önemi vardır. Çünkü bu bilgi bize bir metale ısı uygulandığında veya metalden ısı alındığında, metalden beklenen genleşme veya çekilme hakkında bilgi verir.

Verilen ısı oranına bağılı olarak metal ne kadar ısıtılırsa o oranda genişmesi daha büyük olacaktır. Aynı zamanda bir metal soğuduğunda veya soğutma işlemine tabi tutulduğunda oluşacak metal çekmesi, ısıl genişleme katsayısı ile tanımlanır. Örneğin alüminyumun ısıl genişleme katsayısı 13.1 dir. Bu ifade, alüminyumun, her bir inch'lik boyda ve  $68^{\circ}$  F tın üzerinde, bir inch'lik bir uzunluğun bir milyonda 13.1'i kadar genişlediğini gösterir. Bu nedenle bir inch uzunluğundaki bir alüminyumun sıcaklığı  $68^{\circ}$  F'tan  $70^{\circ}$  F'ta çıkarıldığında genişleme miktarı birim uzunluk başına bir milyonda 26'dır. Öyleyse bir metalin çekmesi ve genişmesi, metale uygulanan ısının miktarı ile belirlenebilir. Isı etkisiyle metaldeki genişleme, kaynak sonrasında temel (esas) metalde meydana gelen çarpılmalara yol açan gerilimlerin bünyede kilitlemesine neden olur. Lineer ısıl genişleme katsayısı arttıkça kaynakçı, bu özel metali kaynatma işlemine daha büyük dikkat gösterilmelidir (Richard, 1973).

#### **1.2.5. Korozyon dayanımı**

Metallerin korozyon dayanım özellikleri net olarak veya sayısal olarak ifade edilememiştir. Bununla birlikte korozyona karşı en hassas malzemeler; magnezyum, çinko, alüminyum gibi en aktif olan malzemelerdir. Korozyona en az duyarlı olan ise platin gibi en az aktif olanlardır. Demir cinsi metaller hızlı şekilde korozyona uğrar ve nikel içeren alaşımlar, gümüşten, altından ve platinden daha yüksek korozyon direncine sahiptir. Platin korozyona karşı en fazla direnç gösteren veya en az aktif olarak tanımlanır. Tüm kıymetli metaller anodiktir ve galvanik bir koruma özellik göstermek suretiyle, katodik metaller için koruma sağlarlar. Örneğin demir veya diğer katodik metaller bir tuz eriyiğine maruz kaldıklarında özelliklerini korumaları için önlem alınmalıdır. Ancak kıymetli metaller böyle bir korumaya ihtiyaç göstermezler. (American Society For Metal, 1990).

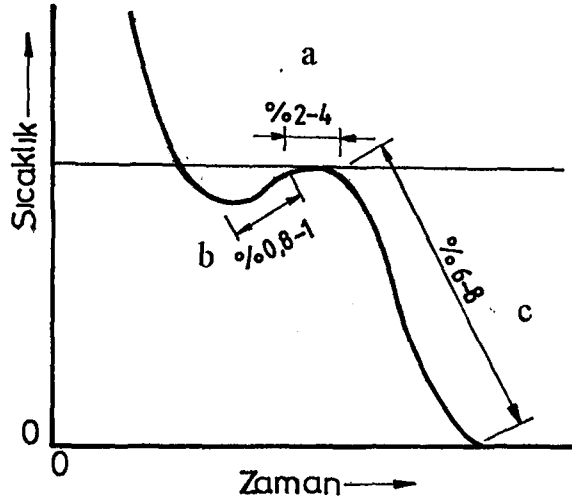
### 1.2.6. Hacimsel (volümetrik) çekilme

Metal çekmesi, veya büzülmesi metalin sıvı halden katı hale geçmesi esnasında da meydana gelir. Çekilme sıcaklık oranına bağlı olarak üç safhaya ayrılır.

- Sıvı çekilme
- Katılaşma başlangıç hali çekilme
- Katı çekilme

Bir metaldeki sıcaklık safhası değişimi veya sıcaklık kaybolması durumunda, metalin orijinal hacmi düşer. Bu hacimsel çekilme, metal sıvı- katı duruma soğurken veya katılaşma başlarken sıvı durumda meydana gelir. Sıvı hal ile, özlülük hali arasındaki çekilme gözardı edilmiş ve ölçülmemiştir. Bununla beraber katılaşma başlangıç hali esnasındaki çekilme ölçülmüştür. Metalin kritik sıcaklık sınırı altındaki her 100°C sıcaklık için toplam hacmin yüzde 0.8'i ile % 1'i arasında olduğu ölçülmüştür. Metal katılaşmaya devam ederken katılaşma başlangıç halinde hacimde yüzde 2 den 4'e kadar ek bir hacim düşüşü olur. Çekilme nedeniyle en büyük hacimsel çekilme, metalin tamamen katılaştığı ve oda sıcaklığına gelmesiyle toplam hacimde meydana gelen yüzde 6 ile 8 arasındaki çekilmedir. Ortalama hacimsel çekilmeler, temel bir zaman-sıcaklık grafiği üzerinde görülebilir. Böylece çekilmeleri karşılaştırmaya olanak verilir (şekil 1.1).

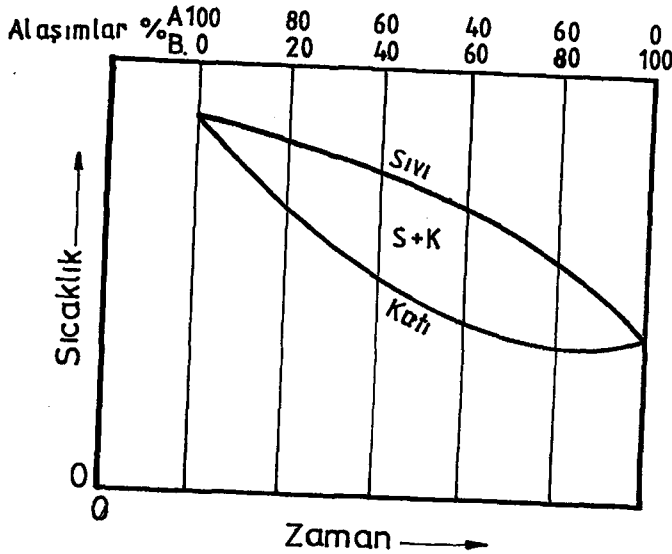
Metallerin zaman-sıcaklık ilişkileri üzerine yapılan çalışmalar, metallerin ve alaşımlarının ergime noktalarını ve katılaşma noktalarını içeren ve denge diyagramları olarak isimlendirilen zaman-sıcaklık grafiklerinin çıkarılmasına olanak vermiştir (şekil 1.2). Örneğin, iki metal karıştırıldığında,



Şekil 1.1. Hacimsel çekilme (Richard, 1973).

a) Kritik sıcaklık altı b) Katılaşma başlangıcı c) Tam katı halinde

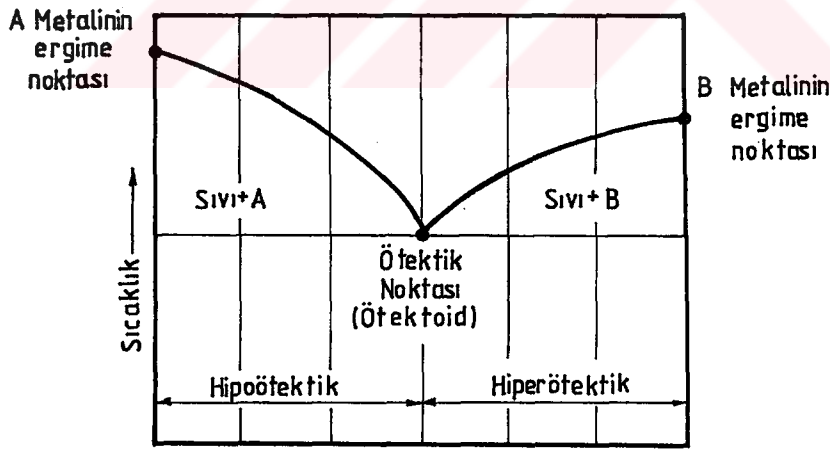
alaşımındaki her iki metalinde, zaman-sıcaklık grafiğinde farklı bir zaman-sıcaklık eğrisi elde edilecektir. Eğer bir alaşımda, B alaşımın yüzde 60'ını ve A ise yüzde 40'ını oluşturuyorsa, bu karışımın ergime ve katılaşma noktaları alaşım elemanlarınınkinden farklı olacaktır (Şekil 1.3). Denge diyagramlarında, alaşımların ergime ve katılaşma noktaları çizgilerin kesişmesiyle oluşan alan içerisinde kalır. Bu nedenle böyle bir denge diyagramı, alaşımdaki metallerin bağımsız zaman sıcaklık grafiği olarak kullanılamaz.



Şekil 1.2. Denge diyagramının elde edilişi (Richard, 1973).

Genellikle alaşım oluşturan iki metalin ergime noktaları birbirinden farklıdır. Bu metaller bir alaşım elde etmek üzere karıştırıldıklarında, alaşımın ergime noktası, alaşımı oluşturan her iki metalinde sıvı halde oldukları noktadır.

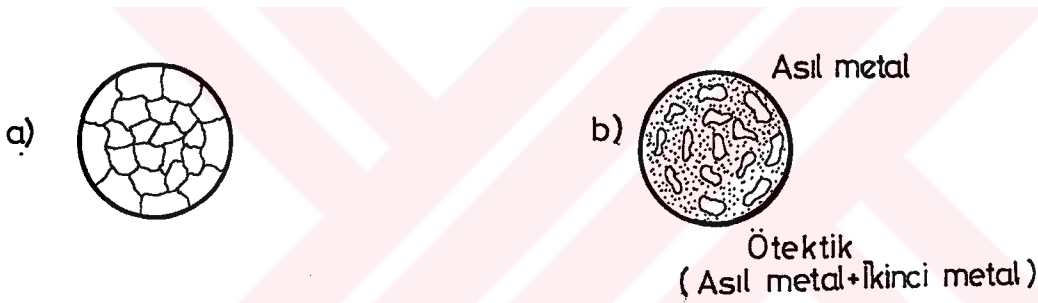
Karıştırılmış metallerin denge halindeki ergime noktası (alaşımı oluşturan her iki metalinde ergime noktasından düşük olabilir) ötektik nokta olarak adlandırılır (şekil 1.3). Alaşımdaki oranı % 60 olan A ve % 40 olan B'nin denge noktasını göstermektedir. Ötektik noktası aynı zamanda farklı alaşımları tanımada yardımcı olur. Bir hiperötektik alaşım katı B metalinin çoğunu, artı ötektik bir karışıma sahip iken, hipoötektik bir metal veya ötektik noktası altı alaşımı, A alaşımının çoğunu, artı ötektik bir karışımdan oluşur (şekil 1.3). Bu nedenle bir hipoötektik metalin özellikleri, hiper ötektik alaşımınkinden farklı olacaktır. Hipoötektik alaşım, A alaşımının birçok fiziksel



Şekil 1.3. Ötektik denge diyagramının elde edilişi (Richard, 1973).

ve mekaniksel özelliklerini gösterirken, hiperötektik alaşım, B alaşımının birçok özelliklerini gösterecektir. Ötektik noktasıyla tanınan bir alaşımın, katma kristal halinde olduğu söylenir. Katma kristal terimi; bir sıvı içerisinde çözünmemiş veya, bir A alaşımının başka bir B alaşımı içerisinde

ayrıştırılmayacak tarzda karışımıyla oluşan homojen bir karışımdır (şekil 1.4). Bununla beraber, metallerin çoğu ve bunların alaşımları, uygulamaların çoğunda farklı bir durum gösterirler. Eğer iki metal birbirine karıştırılırsa, A alaşımı veya B alaşımı, temel olarak, karışımda baskın çıkacaktır. Bu durumda ne B alaşımının tamamı absorbe edilecektir ne de B alaşımı A alaşımının tamamını absorbe edebilecektir. Bir alaşım, alaşım maddesinin belirli bir miktarını absorbe edebilir. Bu miktarın üzerindeki madde çözünmeme den olduğu gibi kalır. Bir metal absorbe edebileceği maksimum miktarına eriştiğinde, ötektik noktaya veya maksimum doygunluk noktasına ulaşmış demektir. Geriye kalan metal olduğu gibi, alaşımın kristal durumu içerisinde kalacaktır. Geriye kalan metal taneleri ötektik karışım tarafından çevrelenir (şekil 1.4).



Şekil 1.4. Metal eriyikleri a) Katı eriyik (ötektoid metal) b) Asıl metal artı ötektik karışım (American Welding Society, 1981).

### 1.3. Kimyasal Özellikleri

Metallerin kimyasal özellikleri kaynakçıyı doğrudan ilgilendirmemekle birlikte kaynak alanında araştırma yapan araştırmacılar için önemi büyüktür. Bir metalin kimyasal özellikleri, metalin kimyasal sembollerini, kristal yapısını, atom ağırlığını, atom numarasını, elektron enerjisinin seviyesini veya kuantum sayısını içerir. Metaller; uranyum gibi doğada nadir bulunan metaller, nikel ve demir gibi geçiş metalleri, gümüş, bakır ve altın gibi değerli metaller, kurşun ve germanyum gibi yarı iletken metaller, bizmut ve antimon gibi yarı metaller olarak gruplandırılabilirler. Yarı metaller, fülorda olduğu gibi, tuz yapan

halojenlere benzer tarzda, kompleks kristaloğrafik yapıya sahiptirler. Metalik ve metalik olmayan tüm elementlerin sembolleri ihtiyari olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, kristal yapısı, atom numarası, atom ağırlığı, sabırlı ve metodik araştırmalar sonucu belirlenmiştir. Bütün elementler atom numaralarına göre periyodik bir tabloya yerleştirilmiştir. İlki 1869 yılında D.I. Mendeleev tarafından yapılan tabloya, daha sonra (orijinal tabloya) birçok element eklenmiştir. Bir elementin atom numarası çekirdeğindeki protonlarla belirlenir. Proton sayısı çekirdeği çevreleyen kabuklarda yer alan elektron sayısına eşittir. Atom numarası atomun kimyasal özelliklerini belirler. Bir elementin atom ağırlığı, çekirdekte yer alan protonlarla nötronların toplamıyla belirlenir. Bir elementin atom ağırlığı karbonla karşılaştırılmak suretiyle elde edilir. Karbonun atom ağırlığı 12.01 atomik kütle birimi (atomik mass units) olarak tespit edilmiştir ve diğer tüm elementlerin atom ağırlıklarını bulmada temel alınmıştır. (Tablo 1.2).

Tablo 1.2. Seçilmiş metallerin fiziksel özellikleri (Richard, 1973).

Element	Sembol	Oda Sıcaklığında Kristal Yapısı	Atom Numarası	Atom Ağırlığı
Alüminyum	Al	Ymk	13	26.98
Bakır	Cu	Ymk	29	63.54
Altın	Au	Ymk	79	197.00
Demir	Fe	Hmk	26	55.85
Kurşun	Pb	Ymk	82	207.21
Nikel	Ni	Ymk	28	58.69
Gümüş	Ag	Ymk	47	107.88
Kalay	Sn	Tet	50	118.70
Tungsten	w	Hmk	74	183.92
Çinko	Zn	Hky	30	65.38

Ymk: Yüzey merkezli kübik

Hmk: Hacim merkezli kübik

Tet: Tetragonal

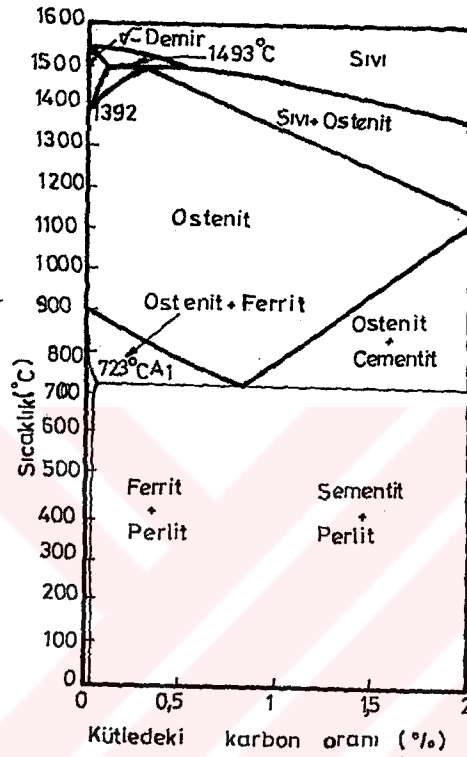
Hky: Hegzagonal kapalı yapı

#### 1.4. Termal Özellikler

Soğutma işleminin amacı malzemede, mekanik özelliklere olumlu yönde etki eden, tam dengeli krsital yapı elde etmektir. Daha yavaş soğuma oranıyla elde edilecek yapı, tam dengeli yapı kadar olumlu etki göstermez. Çeliklerde tam dengeli yapı, demirin yüksek sıcaklıktaki yüzey merkezli kübik yapıya sahip ve ostenit olarak isimlendirilen yapısından hızlı soğumaıyla elde edilen ve hacim merkezli tetragonal bir yapı olan martenzittir. Ostenitin yavaş soğutulmasıyla, demirin hacim merkezli fazı olan, ferit ile sementit ve ( $Fe_3C$ ) ayrışır. Soğuma durumundaki reaksiyonları içeren denge diyagramı şekil 1.5'de gösterilmektedir. Bu durum her ne kadar belirli bir oranı olmayan ağır ağır soğutma oranı için uygun olsada, değişik oranlarda soğutma sağlayan durumlarda oluşan reaksiyonlar içinde bilgi verir. Bu oranlar çeliğin kompozisyonuna bağlıdır. şekil 1.5'de gösterilen diyagram  $723^{\circ}C$ 'deki demir karbon alaşımlarında, ostenitin, ferrit ve sementite dönüştüğü, ötektoid bir reaksiyonu göstermektedir. Bu reaksiyonla elde edilen ötektoid yapı Perlit olarak isimlendirilir. Her ne kadar ikiside ferrit ve sementit karışımı olsalarda, ikisinin oluşma tarzları ve morfolojileri nedeniyle aralarındaki fark gözetilmelidir.

Perlit, meydana geldiği sıcaklığa bağlı olarak, iç kısımlarda katmanlar halinde lameller yapı içerir. Ötektoid yapı ve matris yapı iç yüzeyleri arasında meydana gelen atomik hareketin oluşturduğu difüzyon işlemi özlülenmeye ve iyileşmeye neden olur. Bu işlem aşağıda açıklanan difüzyonel reaksiyonların kinetik karakteristiklerine sahiptir. Perlit kolonilerinin ayrı ayrı oluşması matris ostenitin tane sınırında meydana gelir. Bu yapı  $723^{\circ}C$  ile yaklaşık  $450^{\circ}C$  arasında oluşur. Bu yapıyı içeren bir malzemede elde edilen süneklik hernekadar yüksek olsada dayanımı düşüktür. Sadece %0.87 karbondan oluşan ikili alaşım tamamıyla perlit içerecektir. Diğer tüm kompozisyonlarda ötektoid

ferrit veya sementit görülecektir. Bunlardan ferrit yapı, oda sıcaklığında diğer adi karbonlu çelik içinde yeralan yapılardan daha düşük bir dayanıma sahiptir. Sonuç olarak bir alaşımdaki karbon içeriği yükseldikçe, karışımdaki ferrit miktarı düşerken, sementit miktarı yükselir.



Şekil 1.5. Demir karbon dengeli diyagramı (Materials Engineering, 1983).

Bainit, bünyesinde ferrit oluşumunu içeren, değişik ferrit ve karpit karışımından meydana gelir. Buradaki ikili faz karışımı, difüzyon-kontrol işlemiyle elde edilir. Ferrit partikülündeki büyüklük artışı, karbonun karpit oluşumu nedeniyle, ostenitten uzaklaşmasını gerektirir. Ferrit partikülü büyürken henüz yeni yeni iki fazlı karışım oluşturan karpiti çevreler. Farklı sıcaklıklarda bu işlemin detaylarındaki değişiklikler, Ferrite bağlı karpitlerin büyüklüğünde, yönünde ve dağılımında bazı değişikliklere neden olur. Bu durum bainitin mekanik özelliklerindeki birtakım değişikliklerle birleşince meydana gelen yapının dayanımı perlit ve marteziit arasındaki yapı dayanım

değerine yakın olabilir. Dönüşümün meydana geldiği sıcaklık düştükçe bainitin sertliği yükselir.

Perlit ve bainit dönüşümlerinin kinetiği zaman-sıcaklık-dönüşüm (Z.S.D) diyagramı ile gösterilebilir. (Şekil 1.6). Bu diyagram, bir numunenin dönüşüm sıcaklığında, kararlı bir şekilde ostenit ortamında hızlı soğutulmasıyla elde edilmiştir. Dönüşüm izotermal şartlarda belirlenen bir zaman aralığında gerçekleştirilir, bundan sonra numune oda sıcaklığına soğutulur. Z-S-D diyagramı, dönüşüm, zaman, sıcaklık ve son soğutma işleminden hemen önceki yapı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 1.6 ostenitin perlit veya bainite parçalanmaya başlamadan önce meydana gelen işlem periodunu göstermektedir. İşlem periodunun süresi, dönüşümün başlangıcını ve sonunu gösteren C eğrilerinin karakteristiklerini yükselten sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bu eğrilerin hassas pozisyonu alaşım kompozisyonlarının bir fonksiyonu olarak elde edilir. Bir çok durumda herbir reaksiyon için ayrı eğriler elde etmek mümkün olmaz bu nedenle dönüşümlerin başlangıç ve bitişi için tek eğri gösterilmiştir. (Materials Engineering, 1983).

Diffüzyonel işlemlerin başlamasından önce bir işlem periodunun olması, ostenit sıcaklığından itibaren hızlı bir soğutma oranının kullanılmasıyla bu dönüşümlerin durdurulabilmesine olanak verir. Bu şartlar altında karbon veya düşük alaşımlı çeliklerin içerisindeki ostenit faz, dengeli martenzit faza dönüşür. Bu bileşiğin gövde merkezli birim hücresi, ferritin stabil yapısında olduğu gibi (şekil 1.5), oldukça sınırlı çözünbilme kabiliyetine sahip karbonla birleşir. Bununla birlikte yüksek sıcaklıktaki faz şekil 1.5'de gösterildiği gibi çok daha büyük karbon miktarının çözünmesine izin verir. Martenzite dönüşüm esnasında oluşan yüzey merkezli den hacim merkezliye geçiş difüzyonsuz meydana gelir ve ostenit içerisinde kararlı olarak çözülmüş karbonun demir kafesinden ayrılmasını içermez. Böylece martenzit faz, karbonla tetragonal

çarpılmaya uğramış faz dönüşümü oluncaya kadar karbonla aşırı doyurulur. Bu yapının satıl oranı, karışımın sertliğinde olduğu gibi karbon içeriğinin bir fonksiyonudur.

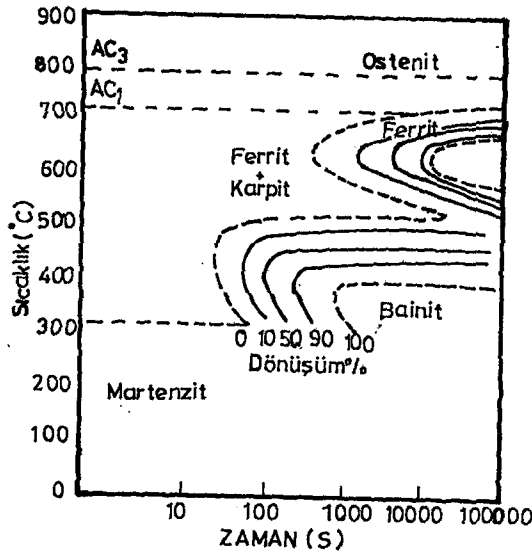
Ostenitten martenzitin elde edildiği difüzyonsuz işlem beraberinde daima bir dönüşüm işleminde içerir. Bu kompleks işlem aşağıdaki gibi özetlenebilir. (Materials Engineering, 1983).

-Değişmez bir kemiyet olan kesme, düzgün yapıdaki ostenitten yeni bir yapının oluşmasına olanak verir.

-Martenzit kafesinin oluşumunu sağlayan, değişmez kesme kemiyetine ters yöndeki kesmedir. Bu işlem, düzenlenmiş ideal nokta hariç değişmezliğin azalmasına neden olur.

Ters yöndeki kesme etkisi yüzeyler arasındaki geçişle veya iki kristalin birleşmesiyle meydana gelir. İşlemin hassasiyeti, daha sonra yüksek karbonlu malzeme ile birleşen, karbon içeriğine bağlıdır.

Martenzit yapının morfolojisi, alaşımın kompozisyonuna bağlı olarak, tabakalar veya plakalar halindedir. Ürün ile matris arasındaki, kristalografik ve karışımın giydirilmiş sathilişkisi, alaşım kompozisyonunun bir fonksiyonudur. Plakaların oluşumu ie birleşen kesme işlemi, serbest bir yüzeyde ürün fazının ortaya çıktığı noktada ve malzemeyi çevrelemede düşük oranda gerilim alanının oluşumuna neden olur. Bu mikro gerilmelere ek olarak, martenzit oluşumu nedeniyle ortaya çıkan genişlemenin neden olduğu bir makro gerilim vardır. Bunlardan sonuncu gerilim bir makro ölçek üzerinde önceden tespit edildiğinden gözardı edilir.



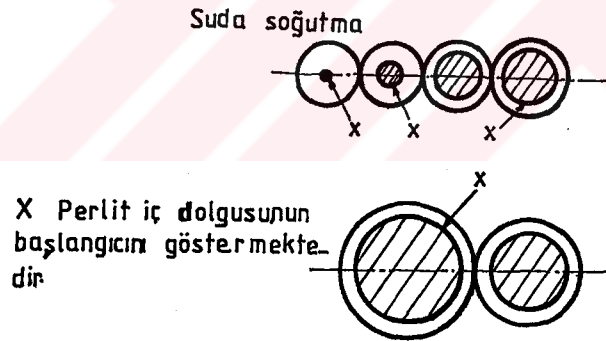
Şekil 1.6. Zaman- sıcaklık-dönüşüm diyagramı (Materials Engineering, 1983).

Soğuma esnasında çok küçük bir numunede bile bir sıcaklığın olması aynı numunenin farklı kısımlarında değişik yapıların oluşmasına neden olur. Bu durum kütle etisi olarak isimlendirilir. Aynı işlem büyük numunelerin soğuması sonunda iç bünyelerindeki yavaş soğuma etkisine bağlı olarak ortaya çıkar. Böylece soğuma sonunda büyük bir numune, merkezinde ferrit artı karpit içeren bir yapıya sahip olurken, aynı çeliğe ait daha küçük bir numune, aynı sıvı ile soğutulduğunda, daha büyük bir soğutma oranının sonucu martenzit bir yapıya sahip olabilir. Tek bir numunede bile, yüksek soğuma oranı, soğutulan numunenin, merkezine doğru daha büyük dönüşüm kabiliyetine sahip olmasına rağmen numunenin yüzeyinde martenzit oluşturma eğilimi gösterir. Soğutulan çelik çubuğun çapı düşürüldükçe, çapa bağlı olarak iç dolgusunun büyüklüğüde düşmektedir. (Şekil 1.7). Belli bir kritik çapta, çeliğin ve soğutma kompozisyonunun karakteristiğine bağlı olarak çubuk tamamen martenzite dönüşebilir. (Materials Engineering, 1983).

Kritik çap, alaşımın kompozisyonunun bir fonksiyonu olması sonucu, farklı çeliklerin soğutma işlemi esnasında martenzite dönüşüm yoluyla

sertleştirilebileceği ortamın belirlenmesinde kullanılabilir. Bu vasıf özel bir soğutma işlemine tabi tutulan çeliğin sertleştirilebilirliğini belirler. Çünkü kritik çap, soğutma işleminin, soğutma gücünün bir fonksiyonudur ve sadece soğutma gücü sabit iken çeliğin farklı kompozisyonlarını karşılaştırmada kullanılabilir. (Kritik çap %100 martenzitin olabildiği çaptır.)

Yapılacak ısı işlemlerin büyük çoğunluğunun amacı, tamamen martenzit bir yapı elde etmek olacaktır. Bununla birlikte bazı durumlarda martenzit yapı, iç dolgusu daha yumuşak ve daha sünek yapıya sahip kesitin yüzeyinde oldukça sert bir kabuk olarak yer alır. Bu etkiyi oldukça sık tekrarlayan yüzey sertleştirme işlemleri, ferrit artı karpit durumunu içeren martenzit bir çember oluşumunu içerirler. Burada bazen yapının karbon içeriği önceden belirlenen oranda yükseltilir.



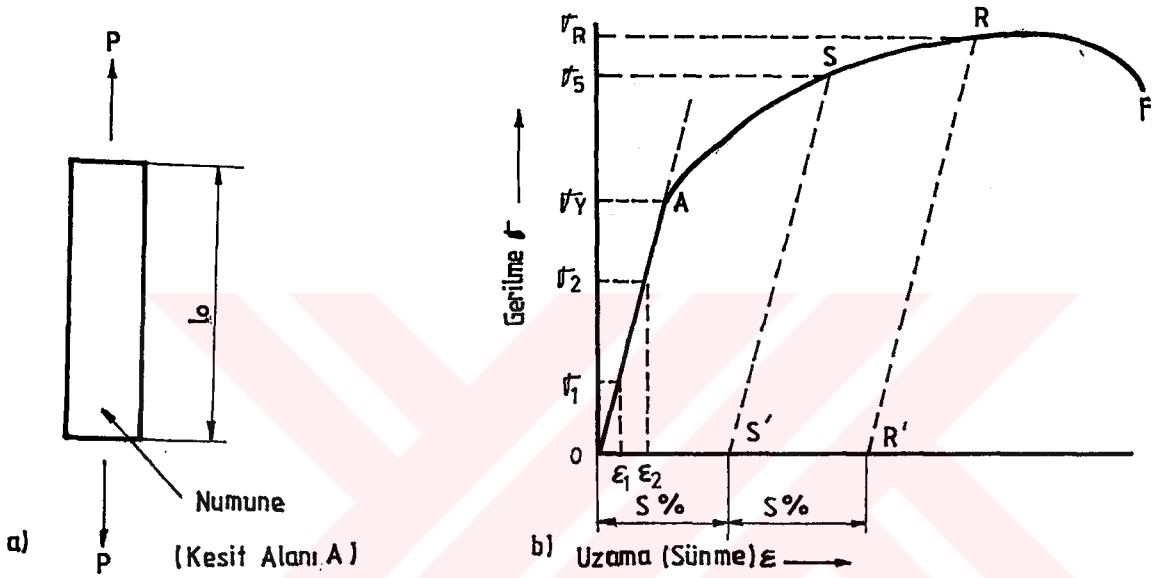
Şekil 1.7. Soğutulan çeliklerde tane büyüklüğünün yapı üzerindeki etkisi (Materials Engineering, 1983).

## 1.5. Mekanik Özellikler

### 1.5.1. Gerilme uzama eğrisi

Gerilim nedeniyle metalde oluşan değişiklikleri test etmenin en kolay yolu örnek bir numuneye arttırılarak uygulanan gerilim kuvveti neticesinde

metalin boyunda meydana gelen uzamayı kaydetmektedir. Bu deneyin yapıldığı en basit mekanik testte, test numunesine uygulanan kuvvet kademeli olarak artırılır. Numunenin boyunda meydana gelen değişiklikler kaydedilir (şekil 1.8-a). gerilim,  $\sigma$ , numunenin kesit alanına gelen kuvvet olarak tanımlanır. Böylece uygulanan kuvvet p newton ve numunenin kesit alanı A metre kare ise; gerilim  $\sigma = P / A$ ,  $N / m^2$ 'dir. (1)



Şekil 1.8. Gerilme testi: a. Numuneye kademeli olarak arttırılmak suretiyle uygulanan kuvvet; b. Gerilme uzama eğirisi (Anderson, 1990).

pratikte  $N/m^2$  gerilim değeri olarak çok küçük bir değer olduğundan  $MN/m^2$  daha sık kullanılır. Şekil bozulması  $\epsilon$  numunenin boyundaki kısmi değişim olarak adlandırılır.  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ , burada  $l_0$  ilk uzunluk ve  $\Delta l$  ise uzunluktaki değişimdir.

Testin başlangıcında malzeme elastik olarak uzar. Burada kuvvetle uzama arasında doğrudan bir orantı vardır. Gerilimin ortadan kalkmasıyla numune orijinal uzunluğuna döner. Elastik limitin dışında uygulanan gerilim kalıcı plastik deformasyona neden olur. Neticede uygulanan kuvvetin

kaldırılmasından sonra kalıcı bir uzama meydana gelir. Orijinal kesit alanına uygulanan yükün oranı, teknik gerilim olarak adlandırılır ve bu gerilim en büyük gerilim kuvvetine veya gerilim dayanımına (maksimum yük/orijinal kesit alanı) ulaşınca kadar yükselmeye devam eder. Bu noktaya ulaşıldığında numunenin uzunluğu boyunca bir boğaz oluşmaya başlar ve bölgede plastik deformasyon oluşur. Boğaz oluşmaya başladıktan sonra boğazdaki minimum kesit alanı noktasına ulaşınca ve yapıda kırılmalar meydana gelinceye kadar nominal gerilim düşer. Testin bu kısmında çok az miktarda dikkate değer bilgi elde edilebilmektedir. Teknik gerilimin tersine teknik uzama, test makinasından doğrudan alınan (kaydedilen) orijinal yük-uzama eğrisine benzer tarzdadır (Anderson, 1990).

### 1.5.2. Elastik Deformasyon

Şekil 1.8'de O-A bölgesi olarak belirtilen bölgede gerilim ve uzama birbirleriyle orantılıdır. Burada elastik deformasyon bir eşitlikle tanımlanır.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2)$$

Burada E Elastiklik modülü olarak isimlendirilen bir sabittir. Eşitlik Hook kanunu olarak bilinmekle beraber Hook Orijinal olarak bunu  $\Delta\alpha_p$  olarak tanımlamıştır. Bir malzeme gerilim etkisiyle elastik deformasyona uğrarken gerilim ile uzama arasındaki bu lineer ilişki, malzemenin başka şartlar altında gerilime tabi tutulmasında da görülür. Basit makas geriliminde durum

$$T = G\gamma \text{ dir.} \quad (3)$$

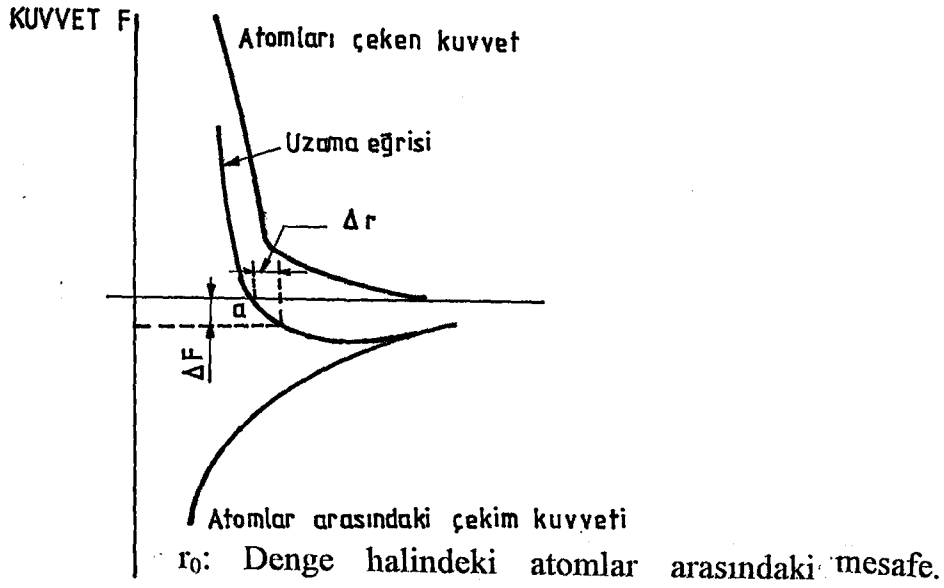
Burada T ve  $\gamma$  sırasıyla makas gerilimi ve uzamadır. G ise makas modülüdür. Bir numuneye pH hidrostatik basıncı uygulandığında numune

hacmi ( $v$ ) elastik olarak bir miktar ( $\Delta V$ ) değişir. Böylece bir hacim modülü belirlenebilir.

$$p_h = K \Delta V / V \quad (4)$$

Elastik deformasyon anlıktır. Bu nedenle gerilimi aniden  $\sigma_1$ 'den  $\sigma_2$ 'ye yükseltirsek uzama derhal  $\epsilon_1$  den  $\epsilon_2$ 'ye değişir. Elastik deformasyon tamamen tersine çevrilebilir, eğer gerilim önceki değeri olan  $\sigma_1$ 'e düşürülürse uzama tekrar  $\epsilon_1$ 'e düşecektir. Eğer numune yükten arındırılırsa ( $\sigma=0$ ) numune orijinal büyüklük ve şekline derhal döner (Anderson, 1990).

Elastik deformasyonunun önemli karakteristikleri kısa süreli ve tersine çevrilebilir olması. Gerilim ile uzamanın birbirleriyle lineer orantılı olmasıdır. Kristal bir  $l_0$  uzunluğuna dışardan bir gerilim kuvveti uygulandığında, kristalin atomları derhal çekilecektir. Atomlar arasında elastik uzama olarak isimlendirilen ve  $\Delta L$  değerine eğit bir uzama meydana gelecektir. Şekil 1.9'da atomlar arasındaki mesafeye etki eden bir kuvvet uygulanmıştır. Burada atomlar denge halindeki pozisyonlarına , uygulanan kuvvet, atomlar arasındaki çekim kuvveti  $\Delta F$  tarafından dengeleninceye kadar çekilirler. Kristalin elastik uzaması  $\Delta l/l_0$  dır ve bu değer  $\Delta r/r_0$ 'a eğittir. Burada  $\Delta r$  atomların denge halindeki pozisyonlarına göre yer değiştirme mesafesidir.  $r_0$  ise atomlar denge halinde iken atomlar arasındaki mesafedir. Dış kuvvetin ortadan kalkmasıyla, atomlar arasındaki çekim kuvvetinin etkisiyle atomlar denge halindeki pozisyonlarına geri dönerler. Bu nedenle elastik deformasyon tersine çevrilebilir. Şekil 1.9 incelenecek olursa kuvvet- yer değiştirme (uzama) eğrisi,  $r$  nin küçük değişimleri için,  $r_0$ ' a yakın kısımda yaklaşık olarak lineer kabul edilebilir. Bu şartlar altında bir malzemeyi elastik deformasyona zorlayan dış kuvvet, atomlar arasındaki yerdeğişimle orantılı lineer değişim gösterecektir. Böylece gerilim, uzamayla lineer orantılıdır (Hook kanunu).



Şekil 1.9. Atomlararası mesafeye uygulanmış atomlar arası kuvvet diyagramı  
(Anderson, 1990).

Konstrüksiyon elemanlarının tasarımında yükleme gerilimlerinin elastik alanda kalması esastır. Malzemenin akma mukavemetine çok yakın olan elastik sınır aşılacak olursa, plastik akış dolayısıyla sürekli şekil değiştirme meydana gelir. Bu durumda malzeme şekil bozulma sertleşmesine uğrar ve bundan dolayı da daha yüksek bir fiili elastik sınır ve daha yüksek bir akma mukavemetine haiz olur (Anderson, 1990).

### 1.5.3. Elastikiyet modülü

Elastikiyet modülü, elastik bölgede gerilimin şekil bozulmasına oranıdır. Elastikiyet modülü, bir kristaldeki elastik deformasyon esnasında bir çift atoma etki eden atomlar arası kuvvetten bulunabilir.

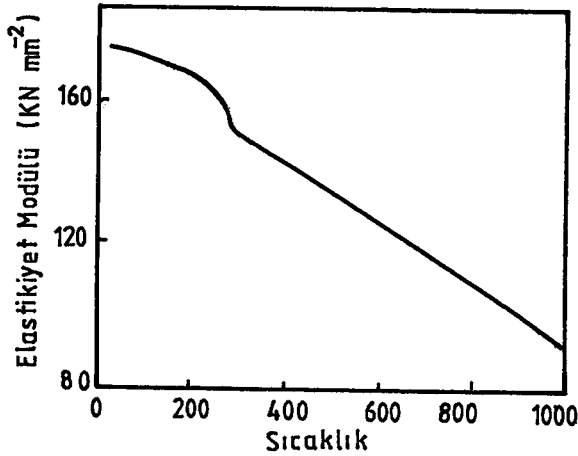
$$\sigma = \frac{\Delta F}{r^2}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta r}{r_0}$$
(5)

Elastikiyet modülü; gerilme/ şekil bozulmasına eşittir.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$
(6)

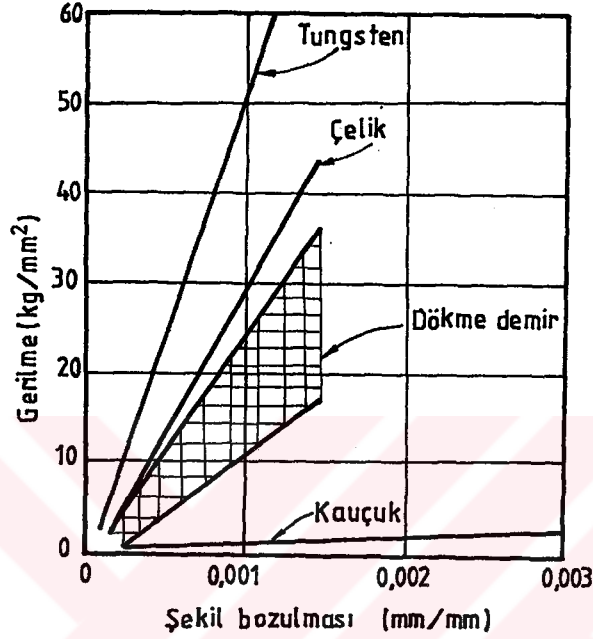
Çelik kompozisyonlarının bir çoğunda elastikiyet modülü ile sıcaklık arasında etkin bir ilişki vardır. Sıcaklık mevcut olandan 850°C'ye yükseltildiğinde elastikiyet modülü, ısı yükselirken, istikrarlı düşüş oranıyla 0.5 lik bir faktörle yarıya iner. Şekil 1.10 Elastikiyet modülü ile sıcaklık arasındaki bağıntıyı göstermektedir. Burada verilen bilgilerin tamamı statik metotla bulunmuştur.



Şekil 1.10. Düşük alaşımlı çelikte sıcaklığın elastikiyet modülüne etkisi

(Materials Engineering, 1989).

Bir gerilme-şekil bozulma diyagramında elastikiyet modülü, eğrinin, gerilmenin şekil bozulmasıyla doğru orantılı olduğu yerde, doğru kısmıyla temsil edilir. Eğri ne denli dik olursa, elastikiyet modülü o denli yüksek ve malzeme o denli katı olur.



Şekil 1.11. Değişik malzemelerinin elastik sınır içerisindeki gerilme-şekil bozulma eğrileri (Oğuz, 1989).

#### 1.5.4. Plastik deformasyon

Plastik deformasyonun karakteristiklerinin uzun zamandan beri bilinmesine rağmen, ısı uygulamaları esnasında, oluşan gerilim işlemleri için matematik modüllerinin çıkarılması çok yakın geçmişe dayanır.

Aşağıdaki sıralanan plastik deformasyon esnasında olagelen durumlardır.

- Bazı hallerde malzemenin dayanımı, dönüşüm esnasında, yeni oluşan kafes nedeniyle atomların orijinal pozisyonlarından ayrılarak hareket etmelerinin bir sonucu olarak düşer.
- Uygulanan gerilim ile, dönüşümün açığa çıkardığı iç gerilimlerin oluşturduğu kombinasyon, malzemenin yapısı içinde bazı noktalarda, değer olarak malzemenin kopma noktasından geçen gerilim konsantrasyonlarına neden olurlar.
- Meydana gelen şekil değişikliğinin nedeni, fazlar arasındaki iç yüzey kaymalarıdır.
- Malzemeye uygulanan gerilim arzu edilen ürün fazının belirli kısımlarında anormal derecede yüksek gerilime neden olur.
- Dönüşümün neden olduğu hacim değişiklikleri, uzama oranını arttıran deformasyonun oluşmasına neden olur (Materials Engineering, 1989).

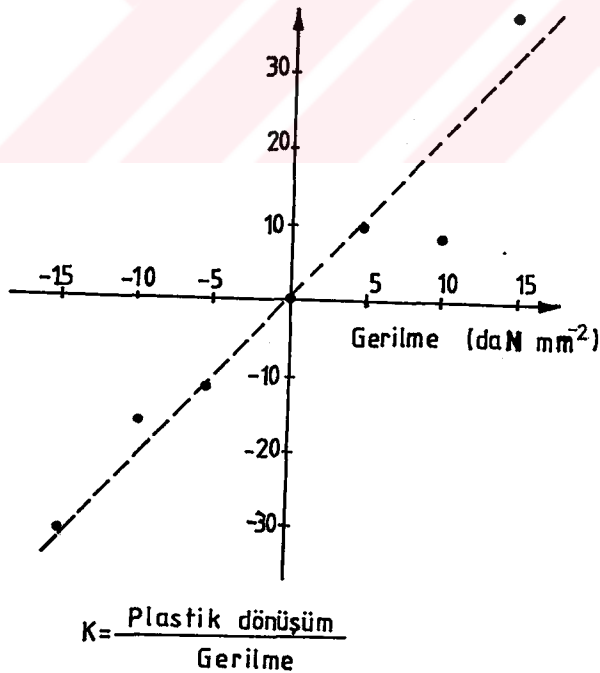
Gözlenen bütün durumlarda, dönüşüme yönlendiren etkiler toplam uzamaya göre oldukça küçüktür, böylece Greenwood ve Johnson plastik dönüşümü yaklaşık olarak aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$\varepsilon = \frac{5\sigma}{6Y} \left( \frac{\Delta V}{V} \right) \quad (7)$$

Burada  $\Delta V$  hacimdeki genişleme,  $Y$  zayıf olan fazın akma gerilmesi ve  $\sigma$  ise tek eksene uygulanan kuvvettir.

Greenwood ve Johnson, faz sınırı hareket halindeyken yapıda olagelen deformasyon nedeniyle iç yüzeylerde meydana gelen kaymaların şekil değişikliğinin asıl nedeni olduğunu tartışmışlardır. Bu araştırmacıların krom nikel çeliklerde, 1MPa'lık bir gerilimle yapıdaki  $Y \rightarrow \alpha$  dönüşümün üzerine elde ettikleri deneysel bulguları otoriteler tarafından kabul edilmiştir. Aynı zamanda

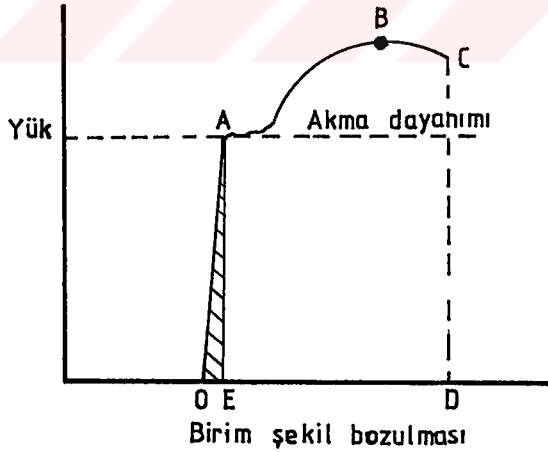
etkinin büyüklüğünün malzemenin akma gerilimiyle tersine orantılı olduğunu bulmuşlardır. Yapıdaki yerdeğiştirme yoğunluğu ve akma dayanımı, ostenitten arındırma işleminde zaman ve sıcaklık değişimine bağlı olarak bulunmuştur. Fe-%20 Nikelli çelikle 200 MPa'nın altındaki gerilimlerde, gerilim ile plastik dönüşüm arasında lineer bir bağıntı vardır. Bu nedenle uzamanın oranı gerilimle orantılı olarak değişir. Şekil 1.12. Buradaki K ve alaşımın cinsine bağlı olarak bir gerilim ölçeğinden kaydedilen, dönüşüm oranı ve gerilim arasındaki fonksiyonel ilişki sabiteleri deneysel olarak bulunmuştur (Materials Engineering, 1989).



Şekil 1.12. Gerilim ve Plastik dönüşüm arasındaki bağıntı (Materials Engineering, 1989).

### 1.5.5. Akma noktası

Çekme deneyinde elastik sınırdan sonra, eğrinin eğimi hızla değişir ve bir noktada eğrinin yataya paralel olduğu görülür. Denenmekte olan numuneye uygulanan gerilim arttırılmadığı halde numunenin uzamaya devam ettiği görülür (Şekil 1.13). Gerilim uzama eğrisinde beirtilen A noktası akma sınırırır. Uygulanan gerilim B noktasından sonra arttırılmasada numune kopacaktır. Malzemenin koptuğu bu noktaya ise kopma sınırı ve bu noktadaki gerilime ise kopma gerilimi adı verilir. Kopmadan sonra kopan parçalar bir araya getirilerek üzerlerinde önceden markalanan kısımlardan uzunluğu ölçülür. Böylece hesaplanan uzama, genellikle 50 mm olarak alınan örnek uzunlukla oranlanır ve yüzde olarak hesaplanan değere toplam uzama denir. (% uzama =  $\frac{l_0 - l_1}{l_0} \times 100$ , formül ile bulunur). Akma dayanımı akma noktasındaki uzama esnasında ölçülen gerilimin ortalamasıdır. (American Society For Metal, 1990).



A: Akma dayanımı B: Çekme dayanımı C: Kopma noktası

Şekil 1.13. Çelik levha için yük-uzama eğrisi

(American Society For Metal, 1990).

## 15.6. Sertlik

Metallerde sertlik, metalin aşınmaya ya da penetrasyona karşı koyma kabiliyetidir. Sertlik bir metalin talaş kaldırma, delme ve doldurma işlemlerine yada diğer deformasyon türlerine karşı gösterdiği direnç olarak düşünülebilir. Metalin sertliği, karşılaştırmalı olarak hazırlanmış skalalara göre tespit edilmiştir. Metalleri organik malzemelerle karşılaştıran ilk sertlik skalası Moh skalasıdır. Moh skalası genellikle kayaların ve minerallerin sertliğini tespit etmekte kullanılmaktadır. Bu sertlik ölçme yönteminde bazı malzemeler için tespit edilen sertlik değeri aşağıda verilmiştir.

Talk için	1
Alçıtaşı için	2
Kuvars için	7
Topaz için	8
Safir için	9
Elmas için	10 dur.

Bir metalin sertliği metale ısı işlem uygulanmasıyla değişebilir. Örneğin, bir keski ota karbonlu çelikten yapılıp ısı işleme tabi tutulduğunda, keski yapılmış olduğu malzemedan daha sert metali kesebilir. Sertlik aynı zamanda metalin kırılgenliğini de belirler. Genelde bir metalin sertlik değeri arttıkça kırılgenlikte orantılı olarak artar. Bununla birlikte metalin sertliği, metalin sertleştirilebilirliğini doğrudan tanımlamaz.

Metallerin sertleştirilebilme kabiliyeti, metalin merkezinden, yüzeylerine doğru ne derece sertleştiğini belirlemeye yarayan Jominy testi ile belirlenir. Bir çok metal, iç bünyesi sertleşmeden kalırken sadece yüzeyden sertleştirilebilir. Bu nedenle bu metaller düşük sertleşebilme kabiliyetine sahip

metaller olarak tanımlanırken, bütün yapısı sertleşebilen metaller ise yüksek sertleşebilme kabiliyetine sahip metaller olarak tanımlanır (Richard, 1973).

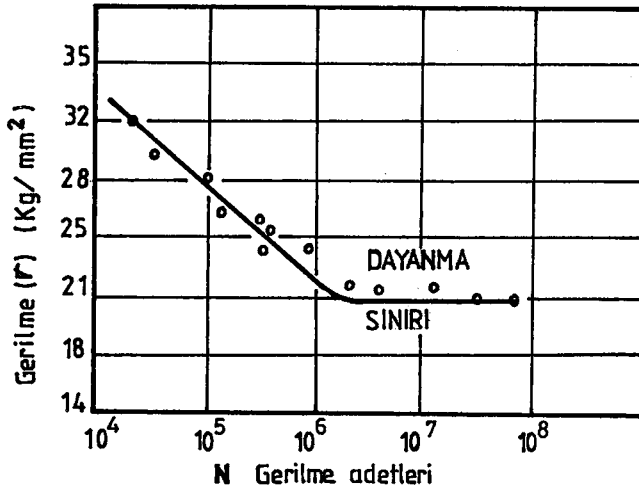
Metallerin sertliklerini ölçmede alışlagelmiş sertlik ölçme yöntemi Brinell ve Rockwell yöntemleridir. Her iki yöntemde sırasıyla sert bir küre (bilya) veya elmas uçlu bir penetrometre kullanılır. Bu penetrometre malzeme standard bir yük altında uygulanır, yük kaldırılır ve penetrasyon miktarı ölçülür. Elde edilen ölçü miktarına sayısal bir değer verilir. Yine elmas uçlu penetrometre prensibine göre Wickers sertlik ölçme yönteminde aynı prensibe dayanır. Bunların dışında yine sertlik ölçme işleminde Shore Skleroskopu yöntemi, belli bir mesafeden düşen bir elmas uçlu çekicinin geri sıçırma yüksekliğinin ölçülmesi esasına dayanır. Poldi çekici yöntemide bu prensibe dayanmakla birlikte hassasiyeti fazla değildir (Richard, 1973).

### 1.5.7. Dayanma Sınırı

Malzemenin sınırsız bir çalışma ömrü için tabii tutulabileceği azami gerilmedir. Her ne kadar standartlar çeşitli malzeme tipleri ve değişik endüstri ürünleri için farklı ise de, belli bir yükün bir kaç milyon alternatif gerilme için taşınması, yükün sınırsız bir süre içinde taşınabileceğini gösterir. Kuramsal olarak, deney numunesi üzerindeki yük (şekil 1.14) sözkonusu malzeme üzerindeki yükle aynı tipte olacaktır.

Yapının geometrisi dolayısıyla, yerel yüksek gerilme yoğunlaşma alanlarının varlığı ile malzemenin gerçek yorulma mukavemeti üzerinde önemli etkisi bulunup deney parçası olarak en güvenilir bilgi, yapının ya da kesitinin prototipinden elde edilir. Yerel yüksek gerilme yoğunlaşması alanları, gerilme yükselticileri tarafından hasıl edilir. Bunlar çentikler, oluklar, çatlaklar, alet

çziikleri, yivler, keskin iç köşeler veya herhangi bir ani kesit değişmesidir. Bu gerilme yükselticileri yapının ömrünü azaltır (Oğuz, 1989).



Şekil 1.14. gerilme ( $\sigma$ )-N diyagramı (Oğuz, 1989).

### 1.5.8. Darbe Mukavemeti

Bir metalin, kendisine hızla uygulanmış bir yükün enerjisini özümseme kabiliyetidir. Metalin, statik yük altında iyi bir çekme mukavemeti ile iyi bir süneklığe sahip olması, yüksek hızla uygulanan darbeye kırılmasına engel teşkil etmez. Malzemenin darbe yüklenmesine mukavemetini gösteren en önemli iki niteliği, gerilme şekil değiştirme eğrisinden elde edilir (Bkz. Ş. 1.13). Bunların ilki, malzemenin elastik sınır veya akma noktasını geçen bir gerilmeye tabi tutulmadığı zaman enerjiyi ne kadar iyi özümselediği (absorbe ettiği) nin bir ölçüsü olan ( $u$ ) rezilyans (yaylanma) modülü olup, malzemenin darbe yüklenmesinden dolayı şekil değiştirmeye mukavemetini gösterir. ( $u$ ) rezilyans modülü gerilme şekil değiştirme eğrisinin altında OAE üçgen alanı olup üçgenin tepesi elastik sınırdır. Burada akma mukavemetini ( $\sigma_y$ ) dik üçgenin yüksekliği ve meydana gelen şekil bozulmasını ( $\epsilon_y$ ) da bunun kaidesi olarak alalım. Bu durumda

$$u = \frac{\sigma_y \cdot \epsilon_y}{2}, \quad E = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y}, \quad \epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \text{ olur.} \quad (8), (9), (10)$$

Burada sırasıyla;

- E = Elastikiyet modülü
- $\sigma_y$  = Akma mukavemeti
- $\epsilon_y$  = Akma şekil bozulması
- U = Rezilyans modülü'dür.

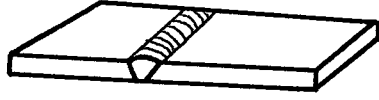
Enerjinin özümsemesi gerçekte bir hacimsel nitelik olduğundan, rezilyans modülü kg.cm/cm<sup>2</sup> olarak ifade edilir.

Darbe yüklemesinin malzemenin elastik sınırını (veya akma mukavemetini) aşması halinde malzemenin rezilyansı yerine tokluğu sözkonusu olur. Metalin darbe yüklemesi altında kırılmaya, dayanma kabiliyeti olan tokluk, en yüksek enerji mukavemeti (Uu) ile gösterilir. Bu malzemenin enerjisi, kırılmadan ne denli iyi özümsemediğinin bir ölçüsü olmaktadır. En yüksek enerji mukavemeti (Uu) gerilme-şekil bozulması eğrisinin altındaki OACD alanıdır (Bkz ş1.13). Metallerin darbe mukavemetini saptamak için geliştirilmiş deneyler, çoğu kez yanlış yola götüren sonuçlar vermektedir. Az çok bütün deneyler çentikli numuneler üzerinde yapılır. Bu tür deneyler çentik tokluğunu (çentik darbe mukavemetini) ifade eden sonuçlar verirler. İki standart deney izod ve charpy deneyleridir. Bu çentik darbe mukavemeti deneylerinde deney parçası bir örse sıkıştırılır ve ağır bir pandül ile, standart yükseklikten salınarak parçaya çarptırılır. Deney makinası, deney parçasını kırmak için gerekli enerji miktarını kg.cm olarak verir. Bazı çelikler düşük sıcaklıklarda önemli çentik darbe mukavemeti kaybına uğramaktadır. Bu nedenle deneyler farklı sıcaklıklarda yapılır (Oğuz, 1989).

## 2. ÇEKME VE ÇARPILMALAR

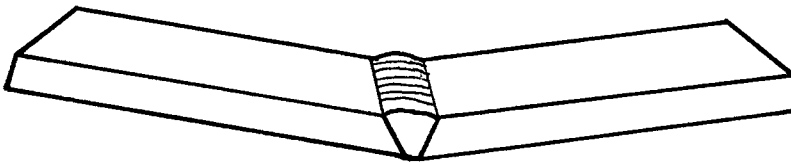
Bütün metaller ısıtıldıklarında uzayacak (genleşecek) soğuduklarında kısılacaklardır (büzüleceklerdir). Bu durum kaynak işleminde deformasyona ya da gerilimlerin artmasına neden olur. Kaynak esnasında alevin ısısı ya da elektrik arkının oluşturduğu sıcaklık farkının büyüklüğüne bağlı olarak gerilimler de büyük olur. Sıcaklık farkı da paraçaya verilen ısı miktarına bağlıdır. Kaynak yapılan malzemenin erime noktasının yüksekliğine bağlı olarak, gerekli ısı miktarı ve kendini çekme azalır. Bir gram erimiş kaynak metalinin taşıdığı ısı miktarı, kaynak yöntemi, ilave metal (elektrod ve kaynak teli) ve kaynak koşullarına bağlıdır (Welding International, 1994). Isı metalin genişlemesine neden olur. Bu durum kaynak yapılan malzemede bir zorlama meydana getirir. Metal ısı etkisiyle genişler. Ancak iş bağlama tertibatları, dikiş teyelleriyle (puntaları), yapıdaki diğer kaynaklar nedeniyle, hareket serbestisi olmadığından hareket edemez. Metal soğuduğunda çeker. Metal bünyesinde ısınmasıyla meydana gelen genişleme (yayılma), soğumayla oluşan çekilme ve tahdit şartlarından oluşan kombinasyon her kaynak işleminde mevcuttur. Bu kombinasyon kaynağın yapılması esnasında kaynakta gerilime neden olur.

Bütün kaynak türlerinde çarpılma ve gerilme olmak üzere, kısılmaya etki eden iki faktör vardır. Büzülme olarak adlandırılan çarpıklık, kaynak edilecek parçaların kaynak işleminden önceki konumlanmasıyla, kaynak işleminden sonraki konumu arasındaki farktır. Diğer taraftan gerilim ise giderilmedikçe çarpılmaya neden olan bir kuvvettir. Örneğin kaynak işlemi esnasında rijit tutulan iki parça arasında yapılan bir kaynakta çarpılma sifıra yakındır. Ancak çekilmeye çalışma nedeniyle yapıdaki gerilimler büyüktür (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Rijit tutulan iki parçanın kaynağında sıfıra yakın çarpılmaya karşılıklı yapıdaki gerilmeler büyüktür (Raymond, 1990).

Kaynak işlemi esnasında meydana gelen çarpılma ve gerilim, kaynak edilen kısımlar soğuyarak normal sıcaklığa geldiklerinde kaynağı etkilerler. Kalıntı gerilimi olarak adlandırılan bu gerilim malzeme bünyesinden giderilmezse, kaynakta veya kaynak edilen plakada kırılma veya çatlaklara neden olur. Kaynak işlemi esnasında hareket serbestisi olan iki parça arasında yapılan kaynakta, gerilim giderilerek en aza indirilsede çarpılma büyük olabilir. Şekil 2.1'deki birleştirmede gerilimler çok yüksek olmasına rağmen, çarpılma yok iken Şekil 2.2'deki birleştirme çok küçük gerilim içerirken, gözle görülür çarpılma meydana gelmiştir. Gerilim ve çarpılmalar; kaynak edilen parçaların fiziksel özellikleri, kaynak işlemi ve operatörün kaynak tekniğinden etkilenir. Gerilme ve şekil değiştirmeler kaynak sırasında meydana gelen ısı heterojenlikler tarafından hasıl edildiklerinden, temel metaldeki füzyon olayına değinilecektir (Raymond, 1990).



Şekil 2.2. Çekme gerilmesi içermeyen ancak aşırı çarpılmış kaynaklı birleştirme (American Welding Society 1981).

## 2.1. Temel Metal Füzyon Olayı

Ark kaynağı esnasında, temel metaldeki füzyon olayının etkin şekilde anlaşılması ısı kondüksiyon teorisi yolu ile sağlanır. Füzyon olayının etkin şekilde anlaşılması için hareket halindeki ısı kaynağının analizinin yapılması gerekir. Wells (1980), hareket halindeki ısı kaynağının  $Q_0$  yoğunluğunda ısı girişi ile füzyon (kaynak)genişliği  $WB$  arasında aşağıdaki basit ilişkinin kurulabileceğini göstermiştir (Anık, 1983).

$$Q_0 = 8KT_m \left( \frac{1}{5} + \frac{vWB}{4k} \right) \quad (1)$$

Burada;

$Q_0$  = Isı yoğunluğu (W veya J/sn)

$T_m$  = Ergime noktası

$k$  = Termal yayılma gücü  $\left( k = \frac{K}{cp} \right)$

$C_p$  = Hacimsel ısıl kabiliyeti ( $J/m^3 \text{ } ^\circ C$ )

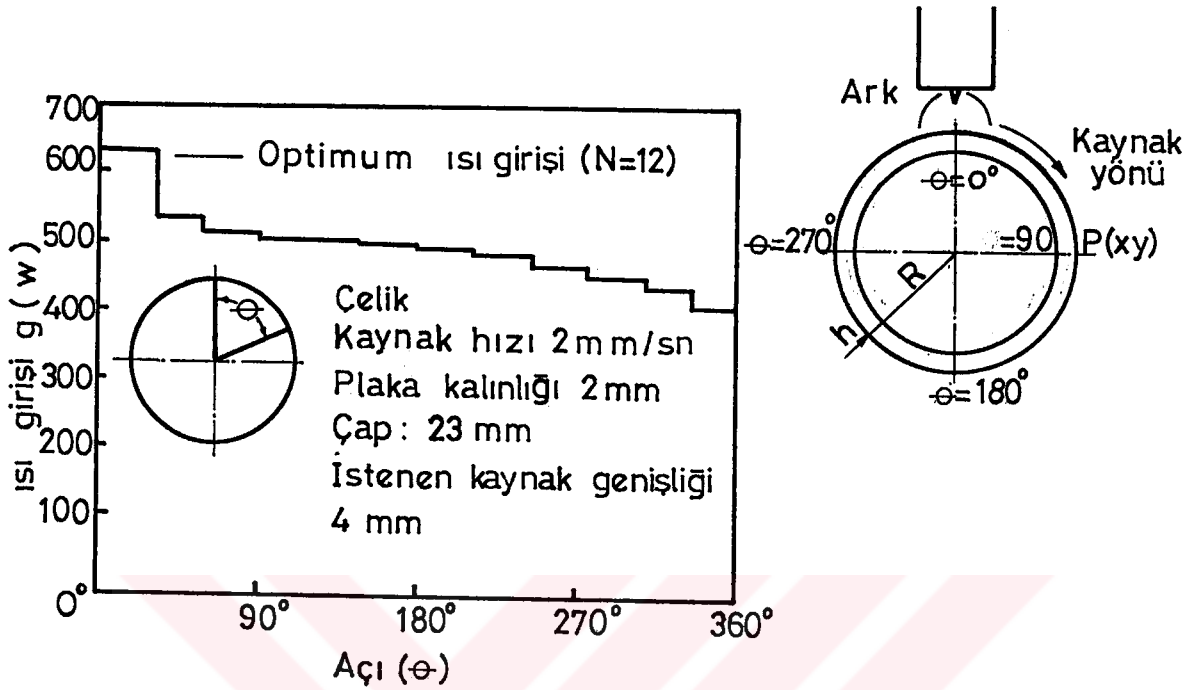
$K$  = Termal kondüktivite

$V$  = Kaynak hızı (m)

$WB$  = Füzyon genişliği.

Isı kaynak teorisi ve ark nedeniyle temel metaldeki füzyon olayı önceden tahmin edilebilir. Araştırmacılar bu perspektifle, ısı kondüksiyon teorisi yardımı ile kaynak koşullarını önceden tahmin ederek kontrol altına almaya çalışmışlardır. Şekil 2.3'de gösterilen borunun çevresel kaynağında (GTA) optimum ısı girişinin hesaplama sonuçları verilmektedir. Deneysel olarak elde edilen diyagram, kararlı bir füzyon genişliği için gerekli ısı giriş değerini belirler. Yapılan işlemde boruların çevre kaynağı esnasında boruların

malzemesi, cidar kalınlığı ve boru çapına bağılı olarak uygun ısı giriş kontrolü gerekir (Anderson, 1990).



Şekil 2.3. İnce cidarlı borunun çevre kaynağı esnasındaki, optimum ısı girişi hesap örneği (Anderson, 1994).

## 2.2. Çekme ve çarpılmaların fiziksel esasları

Çekme metaldeki ısınma ve soğuma sonucu ortaya çıkar. Isı metallerin fiziksel niteliklerini değiştirir. Metallerdeki bu değişikliklerin çekme ve çarpılmaya doğrudan etkisi vardır. Bir metalin kaynak işlemi esnasında fiziksel özellikleri aşağıdaki şekilde değişir.

- Kapma nokası düşer.
- Elastiklik modülü düşer.
- Isı yayılma kasayısı düşer.
- Isı iletkenliği düşer.
- Özgöl ısı yükselir (Raymond, 1990).

Metallerin fiziksel özelliklerinde meydana gelen bu değişiklikler, çekme, çarpılma ve metal bünyesindeki gerilimlerin miktarını etkiler.

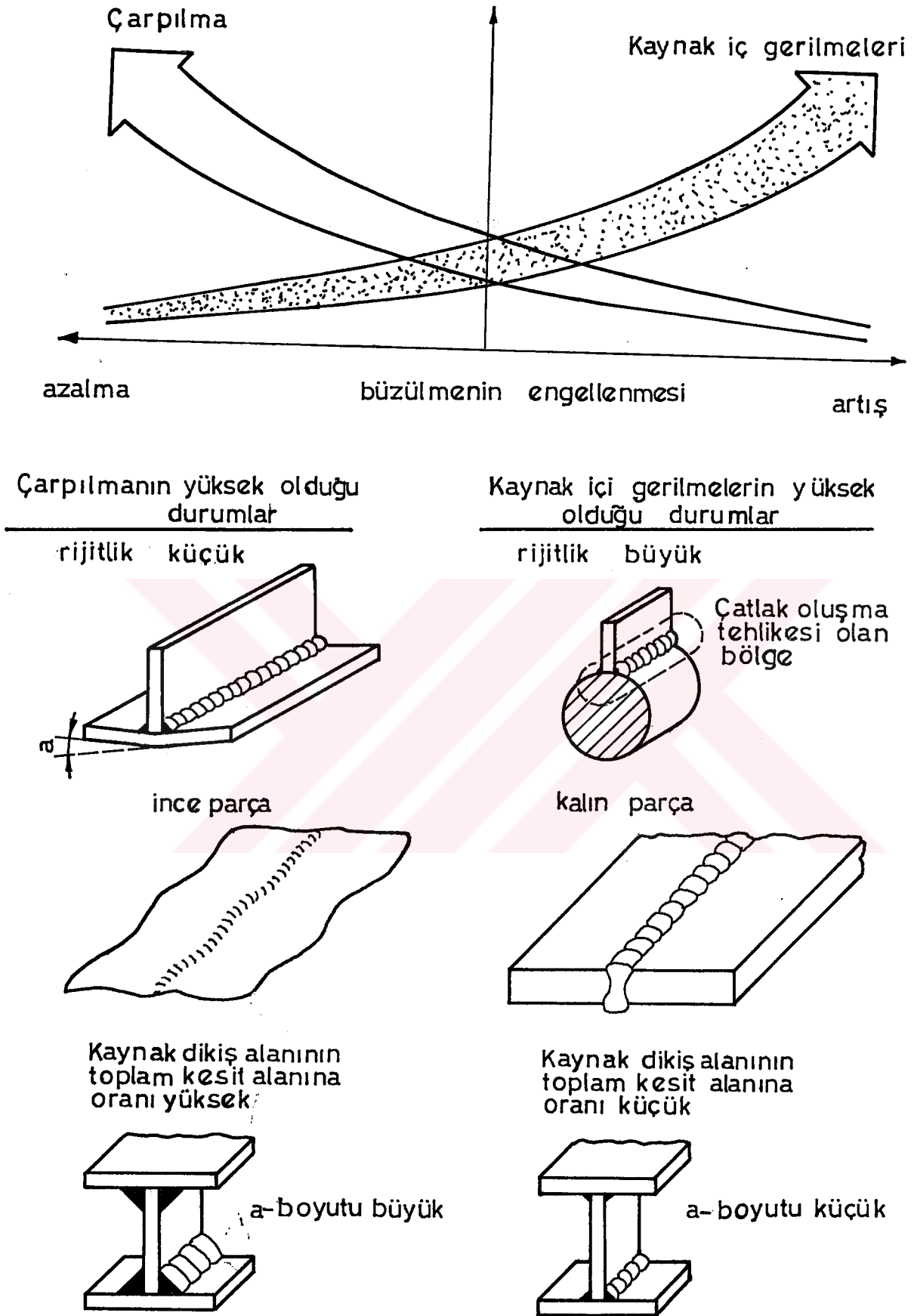
Kaynak malzemesinin ve kaynak edilen malzemenin kopma noktası ne kadar yüksek olursa çarpılmaya neden olan kalıntı gerilimi o denli yüksek olur. Kopma noktası değeri düştükçe, bölgesel gerilim de düşer.

Diğer taraftan elastiklik modülü bir metalin nisbi sertlik değeridir. Eğer elastiklik modülü büyük ise malzeme çarpılmaya karşı daha dayanıklı olur.

Sıcaklık yayılma katsayısı, bir metalin ısıtılmasıyla metalin maruz kaldığı genişleme ve soğuduğunda meydana gelen çekme-çarpılma miktarıdır. Metaller kaynak edildiklerinde boylarında bir değişiklik meydana gelmiyorsa, kaynak edilen metal veya metallerde çarpılma ve çekilme (büzülme) meydana getirecektir. Yüksek bir sıcaklık katsayısı kaynak malzemesinin ve kaynak edilen malzemenin kaynak bölgesindeki çekilme oranını yükseltme eğilimi gösterir. Buda kaynakta meydana gelecek çarpılmaya arttırır (Şekil 2.4).

Aynı zamanda bir metal, sıcaklığın daha büyük bir bölgeye yapılmasına neden olan yüksek bir ısı iletkenliğine sahip ise meydana gelecek çarpılma problemleri büyüktür.

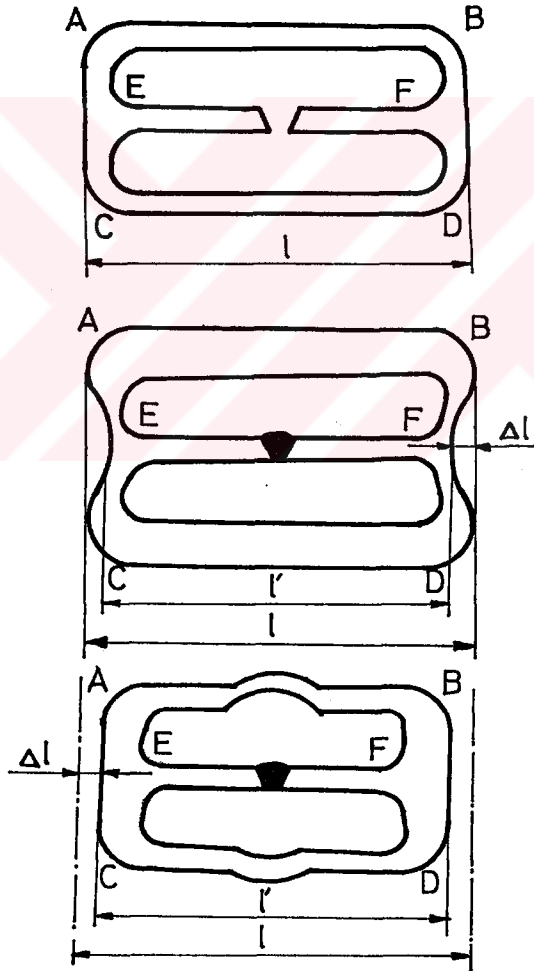
Isı iletkenliği bir metaldeki ısı akış değeridir. Düşük sıcaklık iletkenliği olan bir metal kaynaktaki ısı akışının hızını keser. Bu durum kaynak bölgesinde bir ısı konsantrasyonuna neden olur. Buda kaynakta ve kaynağa yakın kısımda (ITAB) çekilmeyi arttırır.



Şekil 2.4 Kaynak gerilmeleri ve çarpılma arasındaki ters orantı

(ODTÜ Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992).

Bir metalik çubuk önce ısıtılıp sonrada ilk başlangıçtaki sıcaklığına kadar soğutulursa, düzgün serbest bir uzama ve kendini çekme meydana gelir. Uzama ve kendini çekme miktarı aynıdır. Bu fiziksel kural, yalnız hacim bakımından serbest hareket edebilen ve düzenli ısıtılıp soğuyan parçalar sözkonusu olmadığından, kendini çekme ve büzülme problemleri ortaya çıkar (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Metalik bir konstrüksiyonun kaynak ısısının etkisiyle uzayıp kısılması (Anık, 1991).

l boyundaki metalik bir çubuk ısıtıldıktan sonra  $\Delta l$  kadar serbest uzar ve soğuması sırasında da bu durum tespit edilirse, çubukta çekme zorlamaları (kuvvetleri) meydana gelir. Çubuk, çekme zorlaması altında, soğuduğu zaman yani ilk sıcaklığına eriştiğinde bir  $\Delta l$  boyu kadar uzamış olur. Çubukta oluşan bu çekme zorlamaları, sünek malzemede akma sınırını aştığında plastik alanda uzama ve büzülme meydana getirir. Kopma mukevemetini aştığında ise çatlama ve kırılma meydana gelir. Gevrek malzemede ise parça şekil değıştirmeden kırılır.

l boyundaki metalik çubuğun ısıtılması sırasında, uzaması sınırlanırsa, çubukta basma zorlamaları oluşur ve zorlama akma sınırını aştığı anda yığılma meydana gelir, yani çubuğun kesiti büyür ve boyu da soğuduğu zaman  $\Delta l$  kadar kısalır. Kaynak işlemleri sırasında oluşan kaynak gerilmelerinin, çarpılmaların ve kendini çekmelerin meydana gelmesini etkileyen başlıca üç ana faktör vardır. Bunlar; ısıtma veya tavlama gerilmeleri, konstrüksiyonun rijitliği ve malzemenin metalurjik özellikleridir (Makhnenko, et al., 1994).

"Bir parçanın bölgesel olarak ısıtılması sırasında uzamanın sınırlandırılması ile oluşan gerilimlere ısıtma gerilmeleri denir ve bu da;

- Sıcaklık farkına,
- Kaynak hızına,
- Özgül ısıya,
- Isı iletme kabiliyetine,
- Isıl uzama katsayısına,
- Elastik modülüne,
- Parçanın hacmi ve formu faktörlerine bağlıdır (Anık, 1983).

### 2.2.1. Kaynak işleminde sıcaklık farkı

Kaynak işleminde kaynak edilecek parçanın kaynak yerindeki sıcaklık farkının büyüklüğüne göre, oluşan gerilmelerde değişecektir. Sıcaklık farkı ise parçaya verilen ısının miktarına bağlıdır. Kaynak yapılacak metalin erime noktasının yüksekliğine bağlı olarak, gerekli ısı miktarı ve kendini çekme azalır. Ergimiş kaynak metalinin taşıdığı ısı miktarı; kaynak yöntemi, ilave metal (elektrod ve kaynak teli) ve kaynak koşullarına bağlıdır (Ertürk, 1989).

### 2.2.2. Kaynak hızı

Kaynak işleminde ısı kaynağının ilerleme hızıdır. Aynı ark gücünde kaynak hızı yükselirse, parçaya verilen ısı miktarı da azalır. Tavlanan bölgenin darlığı nedeniyle kendini çekme miktarı küçülür ve dikişte büyük gerilme uçları oluşur. Parçaya verilen ısı miktarına Q dersek, bunu kaynak hızına bağlı olarak elektrik ark kaynağında şöyle ifade ederiz.

$$Q = \frac{u \cdot I \cdot \eta}{v} \text{ (j/cm)} \quad (2)$$

u= Ark gerilimi (volt)

I= Kaynak akımı şiddeti (Amper)

$\eta$ =Isının etkinlik derecesi (verim)

Normal ark kaynağında,  $\eta = \% 0.75-0.85$

Tozaltı Kaynağında,  $\eta = \% 0.80-0.95$  (Ertürk, 1989)

### 2.2.3. Çekme, çarpılmalar ve özgül ısı bağıntısı

1 gram kütle için sıcaklığını 1°C yükseltmek için gerekli ısı miktarı olarak tanımlanan özgül ısı büyüdükçe, kaynak esnasında parçaya verilen ısı miktarında

artar ve dolayısıyla da ısı genleşmeler, yığılmalar, kendini çekmeler, çarpılmalar ve gerilmeler meydana gelir. Sıcaklık etkisiyle özgül ısının aldığı değerler Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. 0 ile t°C arasında demir ve çeliğin ortalama özgül ısıları  
(Anık, 1983)

t (°C)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1400
C (J/g°C)	0.483	0.504	0.529	0.550	0.575	0.596	0.668	0.714	0.714	0.706	0.701	0.701

#### 2.2.4. Isı iletme kabiliyetinin çekme-çarpılmaya etkisi

Bir metalin ısı iletme kabiliyeti küçüldükçe, kaynak yerine verilen ısının parçadaki yayılma hızı da azalır ve erime noktasına daha çabuk erişilir. Dolayısıyla da kendini çekme miktarı düşer. Alaşım elemanı genel olarak ısı iletme kabiliyetini azaltır. Örneğin, çelikte ısı iletme kabiliyetini karbon, manganez, silisyum ve krom gibi elemanlar azaltmasına rağmen, çeliğin sertleşmesiyle de bu kabiliyet yükselir. Bunun için alaşımlı çeliklerde dikişteki bölgesel sıcaklık, alaşımsız çeliklerden çok daha yüksektir. Böylece bu kısımlarda, konstrüksiyonun rijitliğine göre, parçada gerilmeler veya çarpılmalar oluşturularak kuvvetli kendini çekme gerilimleri meydana getirir (Anık, 1983).

#### 2.2.5. Isıl uzama katsayısı

Isıl uzama katsayısı malzemenin içerisindeki, alaşım elemanlarına ve sıcaklığa bağlı bir değerdir. Çelikte alaşım elemanlarının uzama katsayısına etkisi oldukça azdır. karbon ve krom ısı uzama katsayısını bir miktar

düşürürken, ısı işlemle bu katsayı bir miktar artar (Şekil 2.6) (American society for Metal, 1990).

### 2.2.6. Elastiklik modülü-sıcaklık ilişkisi

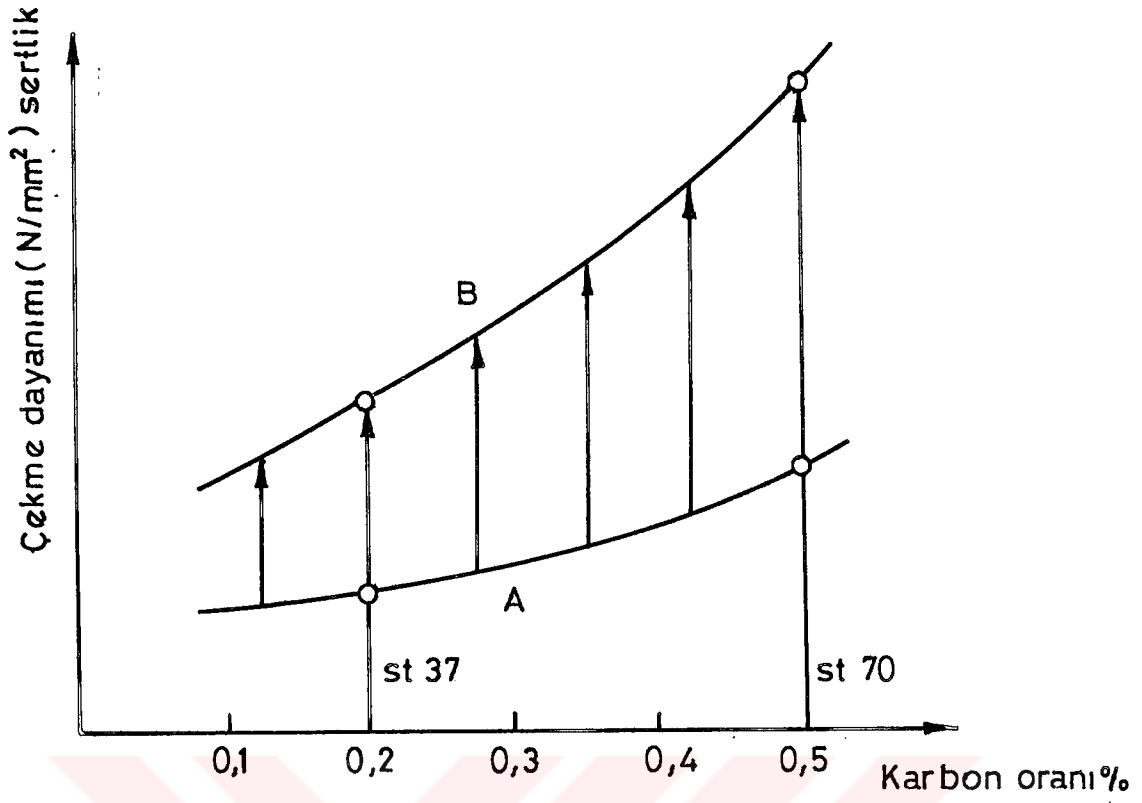
Kaynak işleminde ark sıcaklığının etkisiyle kaynak işlemine tabi tutulan metalde genleşme artacaktır. Elastik sınır sıcaklığından sonra çelik plastik hale gelir, kalıcı deformasyonlara (şekil değiştirmelerine) uğrar. Bu sınır sıcaklığının altında deformasyonlar elastik karakteristikleri korurlar. Çeliğin sıcaklık etkisiyle elastiklik modülünün değişimi Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Sıcaklık-Elastiklik modülü bağıntısı (Anık, 1983)

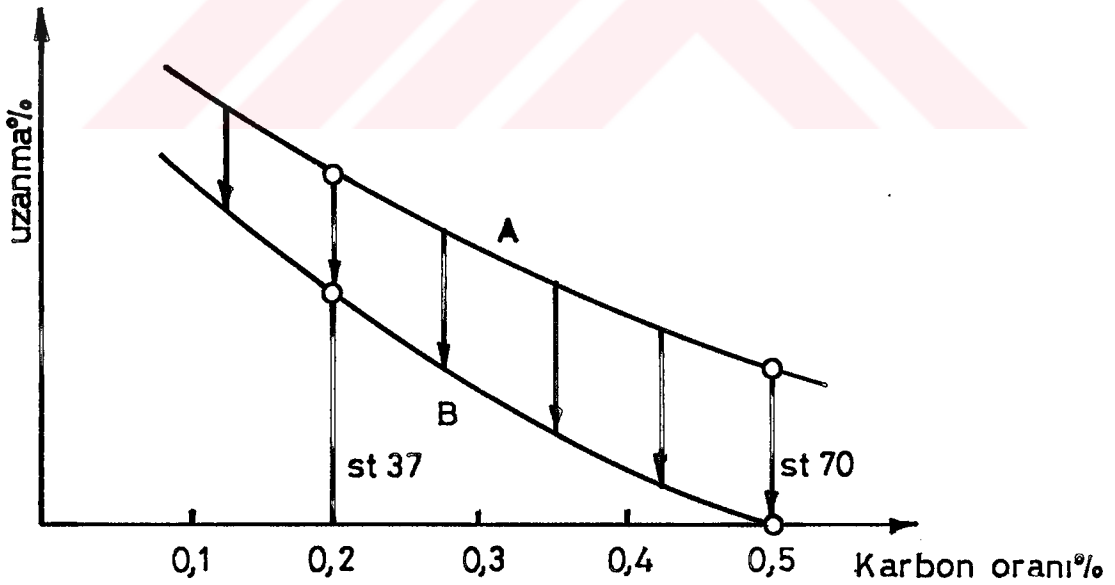
t (°C)	20	300	400	500	600
E (N/mm <sup>2</sup> )	210.000	181.000	171.000	162.000	152.000

### 2.2.7. Parçanın hacmi ve formu

Kaynak yapılan parçanın kalınlığı, ağız formu ve dikiş ölçüleri verilecek ısı miktarı ve ısı dağılışı üzerinde önemli etkisi vardır. İnce saclarda, sarf edilen ısı miktarının kesitte yayılan ısıya oranı daima fena olduğundan, bu ısı yığılması nedeniyle kuvvetli kendini çekme ve çarpılmalar meydana gelir. Elektriksel verilerin büyütülmesi, kaynak hızının düşürülmesi çarpılmaları arttıracaktır. Diğer taraftan konstrüksiyonun formu özellikle kaynak dikişlerinin oluşturulma biçimi, kaynak sırası ve bağlama (puntalama) durumu ile meydana gelecek kendini çekme ve çarpılmalar arasında büyük bir bağlantı



a- Karbon- Çekme dayanımı - Sertlik ilişkisi



b. Karbon-Uzama İlişkisi

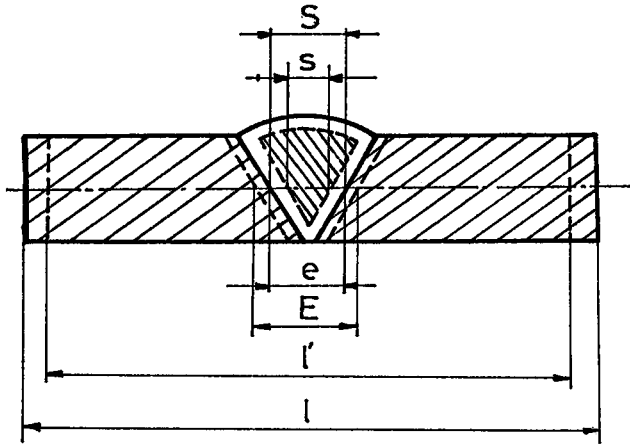
A: Karbon oranının etkisi

B: Isıtma ve ani soğumanın, malezme özelliklerine etkisi.

Şekil 2.6. Karbon oranının çekme ve uzamaya etkisi

(ODTÜ Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992).

vardır. Kaynaktaki ısı etkisiyle kaynak bölgesindeki uzama ve kendini çekme Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



$$l-l' = (E-e) + (S-s)$$

$$R_3 = R_1 \quad R_2$$

$$l-l = R_3; \quad E-e = R_1; \quad S-s = R_2$$

Şekil 2.7. Kaynak esnasında kaynak bölgesinin uzama ve kendini çekmesi(ODTÜ Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992).

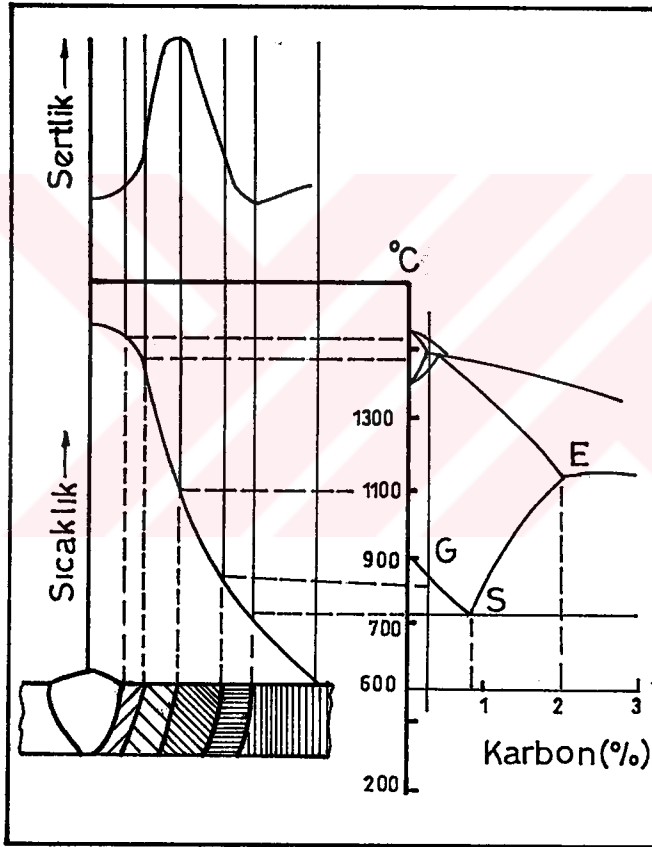
Kaynak esnasında meydana gelen ısı gerilmeler dengeli olmayan soğuma nedeniyle konstrüksiyonda basma kuvvetleri (tepki kuvvetleri) oluşturur. Konstrüksiyonun rijitliğine göre, bu basma kuvvetleri bir takım çarpılma veya kabarmalar meydana getirir. Burkulmaya karşı rijitlik derecesi, konstrüksiyonun formuna bağlı olduğu gibi, özellikle sac konstrüksiyonlarında tespit derecesine de bağlıdır. Düzgün olmayan haller çarpılmaya karşı rijitliği düşürür. Bunun için ince sac konstrüksiyonlar burkulma mukavemetini yükseltecek bazı takviyelerle desteklenir.

Kaynak dikişinin soğuması sırasında kaynak tesiri altındaki bölgede çeşitli iç yapılar oluşur (Şekil 2.8). Soğumanın yavaş olması halinde, ostenitik yapı, tamamen perlitik yapıya dönüşür. Çabuk soğumadada dikişin yakınındaki bölgede metalin karbon içeriğine veya alaşım derecesine göre, ara yapılar veyahutta en istenmeyen durum olan martenizitik bir iç yapı meydana gelebilir. Geçiş bölgesindeki bu yapılar, dikişin şekil değiştirme kabiliyetini azalttığı gibi, iç gerilmelerin oluşmasına da sebebiyet verir. Bunun için bilhassa, alaşımli ve

yüksek karbonlu çeliklerde kalın kesitli parçalara büyük önem vermek gerekir (American Welding Society, 1981; Anık, 1991).

### 2.3. Çekme ve Çarpılmayı Etkileyen Artık Isıl Gerilmeler

Kaynak yaparken metalin bölgesel olarak yumuşayınca kadar tavlanması, soğumayı izleyen gerilmelerin ortaya çıkmasına neden olur. Oluşan bu gerilmelerin başlıcaları şunlardır.



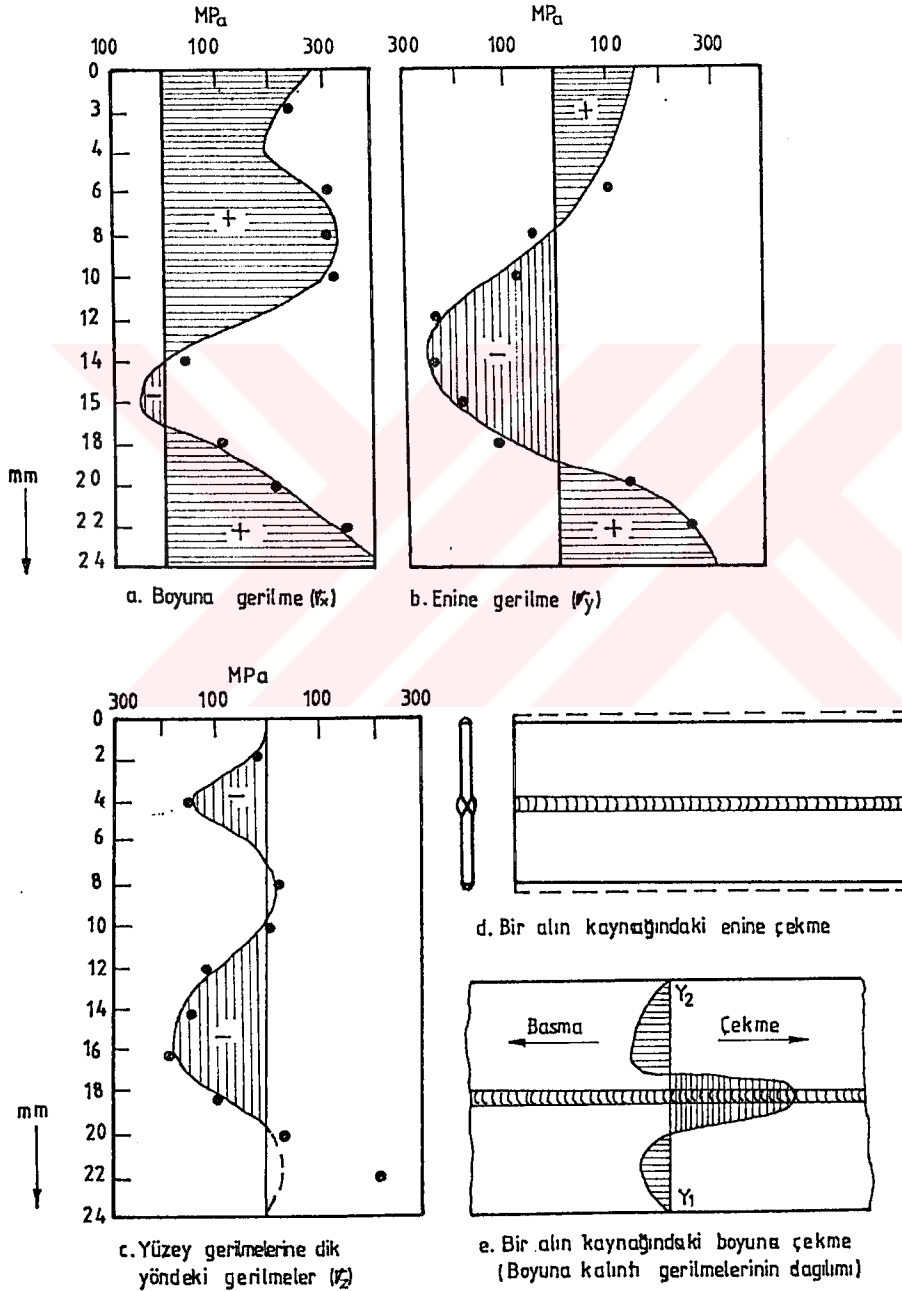
Şekil 2.8. Kaynak sırasında ısı tesiri altındaki bölge (Anık, 1991).

- Kaynak gerilmeleri: Kaynak işleminin yapılışı sırasında oluşan gerilmelerdir.
- Kalan kaynak gerilmeleri: Kaynak bağlantısının soğumasından sonra, kaynak işlemi nedeniyle parçada oluşan ve parçada kalan gerilmelerdir.
- Boylamasına gerilmeler: Dikiş düzlemine ve parça yüzeyine paralel bir düzlemdeki gerilmelerdir.

-Enlemesine gerilmeler: Dikiş düzlemine dikey ve parça yüzeyine paralel bir düzlemdaki gerilmelerdir.

-Kalınlık gerilmeleri: Dikiş ve kaynak yüzeyine dikey düzlemindeki gerilmelerdir.

Şekil 2.9'da kaynaklı yapılarda ortaya çıkan gerilmeler gösterilmektedir (American Welding Society, 1981).



Şekil 2.9. Bir alın kaynağındaki kanti gerilmelerinin dağılımı

(American Welding Society, 1981).

## 2.4. Çekme ve Çarpılmaya Neden Olan Artık Isıl Gerilmelerin Ölçülmesi

Konstrüksiyonların hafif fakat yeterli derecede dayanıklı olması gereksinimleri kaynak işleminde oluşan artık gerilmeler hakkında daha duyarlı bilgiler gerektirmektedir. Kaynak işleminde kaynak bölgesine yakın kısımlarda yüksek sıcaklık uzak kısımlarda ise daha düşük sıcaklık bulunması farklı büzülme ve genleşmeye neden olacağından artık ısıl gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmeler çekme ve çarpılmalarla birlikte, kendisiyle aynı yöndeki yüklemelerde bozunma yada kırılmalara neden olabilirken ters yönlü yüklemelerde dayanımı arttırıcı özellik gösterir. Dayanım yönünden bu denli önemli olan artık gerilmelerin kaba yaklaşımla faktör katsayılar kullanarak hesaba katmak ya da bu gerilme değerlerinin yön ve büyüklüklerinin bulunmadan gerilim giderme tavlamasına tabi tutarak gidermek gerçekçi olmayabilir. Ekonomi ve güvenilirlik için bu gerilmelerin gerçek değerlerini ölçerek parça ve konstrüksiyonlara uygulanması gerekmektedir.(Topuz, 1984).

Burada gerilmelerin ölçülmesinde pratik, ekonomik ölçmenin gerektirdiği duyarlılığı vermesi ölçmelerin lokal bir alanda sınırlı kalmaması yapılacak yada yapılmış konstrüksiyonlarda ölçme olanağı vermesi bakımından gerinim ölçer ve fotoelastik kaplama ile 45° rozet mekanik gerinim ölçerle, artık gerilme ölçme yöntemleri üzerinde durulmuştur.

Kaynak bölgesindeki gerilme dağılımı çok komplikedir. Sıcaklık, kaynak hızı, kaynak tipi levha kalınlığı ve metalin akma gerilmesi gibi faktörlere bağlıdır. Kaynak metali ve geçiş bölgesi ile yüksek sıcaklıkta büyük plastik deformasyonlara uğramış bölgede elastik kabullere göre gerilme hesaplanması anlamsızdır. Bu nedenle elastik kabullere göre hesaplama yapmak için kaynak çekme bölgesi tabir edilen bu bölgenin genişliği hesabında aşağıdaki formül verilmiştir (Topuz, 1984).

$$C = \frac{H(Q/V)}{\sigma_y \sum t} \quad (3)$$

Bu frmlde

- C : Çekme bölgesi genişliği  
H : Boyutsal olmayan bir sabite 0.11-0.13 arasında.  
 $\sigma_y$  : Kaynak edilen malzemenin akma gerilmesi N/mm<sup>2</sup>  
V : kaynak hızı (mm/sec)  
 $\sum t$  : Kanakla temas eden levha kalınlıkları toplamı  
Q : Isı girişi (watt)

Elastik kabullere göre hesaplamalar bu bölge dikkate alınarak yapılmalıdır.

Kaynak işleminde oluşan artık gerilmelerin ölçülmesi, önceleri kaynağa paralel boyuna yönde yapılıyor ve enine yöndeki gerilmeler küçük farzedilerek ihmal ediliyordu. halbuki Young (1971) ısı girişi yada kaynak alanına bağımlı olarak bunların deiştiğini göstermiştir. Kaynağa dik yöndeki enine gerilmeler, kaynak alanı arttıkça artmaktadır.

O halde kaynaktan doğan ısıl artık gerilmelerin sadece kaynağa paralel yönde ölçülmesi yeterli olmayacaktır. Bu nedenle kaynak artık gerilmelerinin lmesi için  yönde lme yaparak asal gerilmeleri, yönlerini, ayrıca da enine ve boyuna yöndeki gerilmeleri bulmak gerekir (Topuz, 1984).

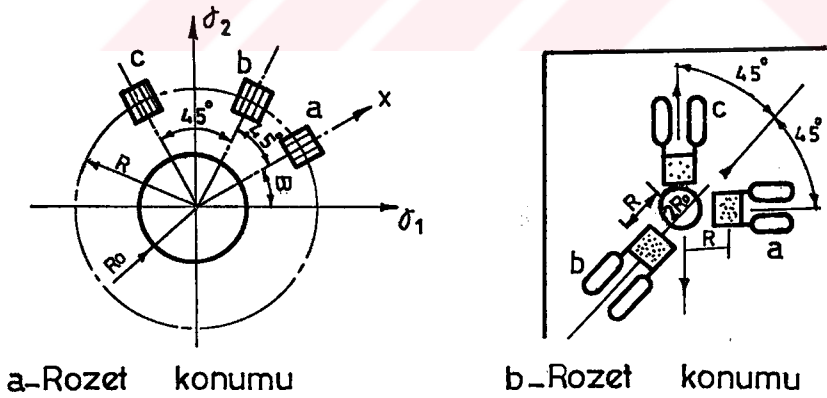
#### 2.4.1. Kr delik yöntemi ile artık gerilmelerin bulunması

Yöntemin esası Mahtar (1934) tarafından verilmiştir. Ancak yöntemin gelişmesi daha sonraki yıllarda gerinim ölçerlerinin (Straingage) ve fotoelastik yüzey kaplama yolu ile gerilme analiz tekniklerinin gelişmesiyle olmuştur.

Artık gerilme ölçülmesi istenen bir bölgeye bir gerinim relaksasyonu oluşturmak için 1.5 ile 3 mm çapında ve yaklaşık buna eşit derinlikte bir delik delinerek etrafındaki yüzey sahasında oluşan gerinimler, elektrik dirençli gerinim ölçüleri yada fotoelastik kaplama yolu ile bulunarak, buradan asal gerilmelerin yönü ve büyüklüğünün hesaplanması esasına dayanır. Bu yöntemle yalnız yüzey gerilmeleri değil, delik derinliği boyunca gerilme gradyanları da bulunabilir (Topuz, 1984).

#### 2.4.1.1. Elektrik dirençli gerinim ölçüleri ile asal artık gerilme büyüklükleri ve yönlerinin bulunması

Üç elektrik dirençli yaprak gerinim ölçeri Şekil 2.10 a, b'de görüldüğü gibi delik merkezinden bir R uzaklıkta birbirinden  $45^\circ$  aralıklarla parça üzerine yapıştırılır.  $\alpha_a = \beta$ ,  $\alpha_b = \beta + 45^\circ$ ,  $\alpha_c = \beta + 90^\circ$  alınarak her üç yöndeki gerinimler aşağıdaki gibi yazılabilir (Topuz, 1984).



Şekil 2.10. Üç elektrik dirençli gerinim ölçer (Topuz, 1984).

$$\epsilon_a = I\sigma_1 + B\cos 2\beta I\sigma_1 + I\sigma_2 + B\cos 2(\beta + 90^\circ) I\sigma_2 \quad (4)$$

$$\epsilon_b = I\sigma_1 + B\cos 2(\beta + 45^\circ) I\sigma_1 + I\sigma_2 + B\cos 2(\beta + 90^\circ) I\sigma_2 \quad (5)$$

$$\epsilon_c = I\sigma_1 + B\cos 2(\beta + 90^\circ) I\sigma_1 + I\sigma_2 + B\cos 2(\beta + 90^\circ + 90^\circ) I\sigma_2 \quad (6)$$

Burada;

$\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ , delik delindikten sonra tespit edilen gerinimlerdir.

4, 5, 6 nolu denklemlerden  $\sigma_1, \sigma_2$  asal gerilmeleri ve  $\sigma_1$  asal gerilmesinin referans eksenine yaptığı  $\beta$  açısı çözülebilir .

$$\sigma_1 = \varepsilon_a + \frac{\varepsilon_c}{4A} + \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{4B \cos 2\beta} \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \varepsilon_a + \frac{\varepsilon_c}{4A} - \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{4B \cos 2\beta} \quad (8)$$

$$A = 1 + \frac{\mu}{2E} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (9)$$

$$B = 1 + \frac{\mu}{2E} \cdot \left( \frac{3}{r^4} - \frac{4}{1} - \mu \frac{1}{r^2} \right) \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{(\varepsilon_c - 2\beta b + \varepsilon_c)}{\varepsilon_c - \beta c} \quad (11)$$

$r = \frac{R}{R_0}$ , E; elastiklik modülü  $\mu$  poisson's oranı duyarlı bir işlem için

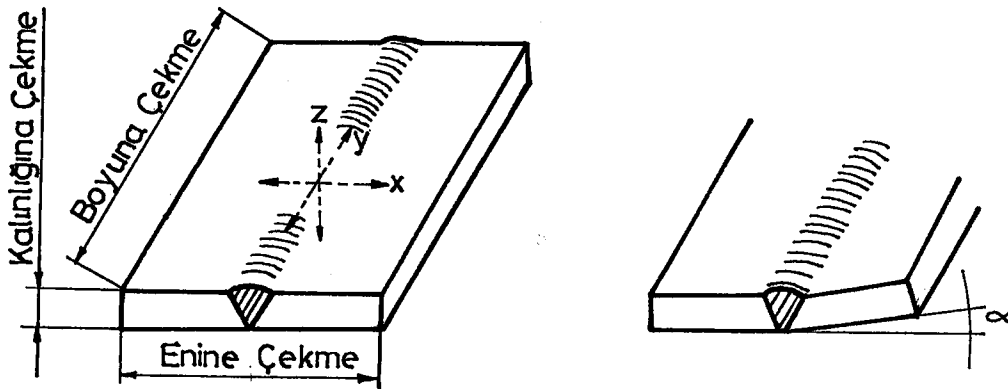
profilin E ve  $\mu$  değerleri hatasız bir şekilde tespit edilmelidir. Eğer artık gerinimler delik boyunca üniform bir dağılıma sahipse deneyler göstermektedir ki yaklaşık delik çapına eşit delik derinliğinden sonra gerinimler (strain) sabit kalmaktadır.

Ayrıca (r) değerleri arttıkça gerinim relaksasyonu azalmaktadır. Bu nedenle  $r=4$ 'ü geçmemesi tavsiye edilir. Delme işleminin duyarlı yapılabilmesi için delme kılavuzları yapılmıştır (Topuz, 1984).

## 2.5. Kaynaklı Yapılardaki Çekme ve Çarpılma Türleri

Herhangi bir yapı veya elemanın kaynağında, kaynak bölgesinin üniform olmayan ısınma ve soğuma durumuna maruz kalması, nedeniyle kaynak işlemine bölgesel gerilim eşlik eder. Bu gerilimin yapıda neden olduğu çekme ve çarpılmalar:

- Enine Çekme: Kaynak edilen plakalarda kaynak dikişine dik meydana gelen kendini çekmedir (Şekil 2.11).
- Boyuna Çekme; Kaynak edilen plakalarda kaynak dikişi boyunca meydana gelen kendini çekmedir (Şekil 2.11).
- Açısal çarpılma; bir nevi enine çekmedir. Parçanın kaynak edilmeden önceki konumuna göre  $\alpha$  açısı kadar kendini çekmesidir.
- Kalınlık çekmesi; kaynağı yapılan parçanın kesit kalınlığı boyunca kendisini çekmesidir.



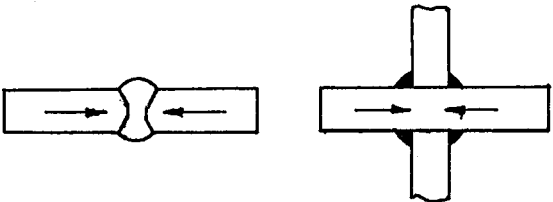
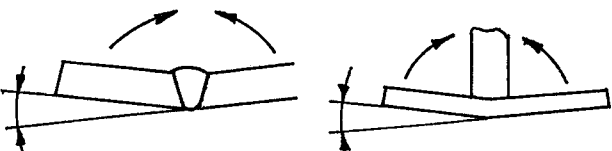
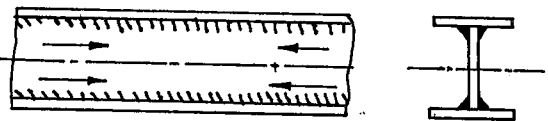
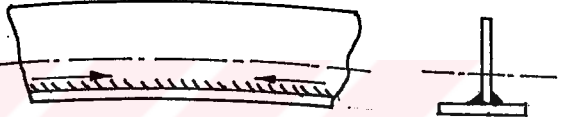
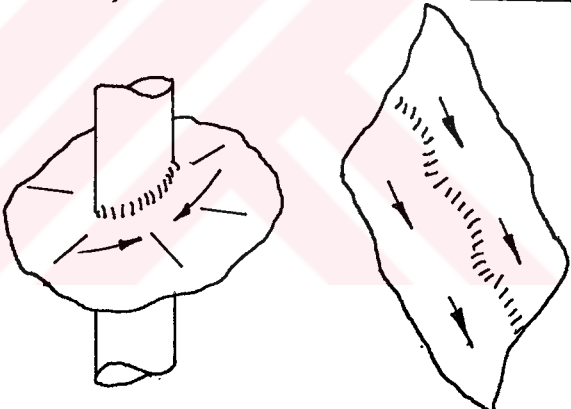
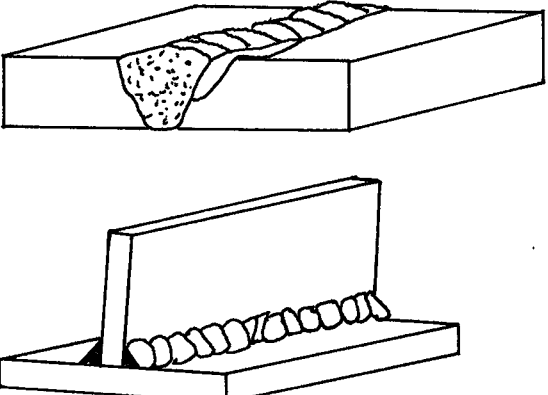
Şekil 2.11. Değişik çekme ve çarpılma şekilleri

Bu çekme ve çarpılmalar, kaynaklı yapılarda parçanın formuna, büyüklüğüne ve boyutlarına bağlı olarak, kalıcı değişiklikler meydana getirirler. meydana gelen bu kalıcı değişiklikler, serbest haldeki sac plakalarda ve simetrik dikişlerde enine kısaltmalar, V alın dikişleri ve T- bağlantılarındaki içköşe dikişlerinde açısal çarpılmalar, her iki taraftan boyuna dikişler içeren çift T- kirişlerinde kısaltmalar, tek taraftan boyuna boyuna kaynatılan T kirişlerinde eğilmeler ve ince kesitli saclarda dalgalanmalar şeklinde kendisini gösterir (Şekil 2.12).

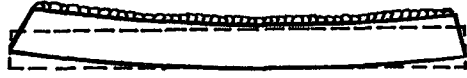
### 2.5.1. Boyuna çekme (boyuna kısalma)

Eğer kaynak işlemi herhangi bir şekilde bir yere tespit edilmemiş metal bir parçaya bir şerit boyunca yapılırsa, kaynak soğurken, şerit her iki ucundan bükülecektir. Şekil 2.13 Bu duruma, plaka yüzeyindeki kaynağın gerilmesi neden olur. Küçük, derine nüfuz eden ve düz kaynak dikişleri bu denli konveks deformasyona neden olmazlar.

Bir kaynak işleminde ısı kaynak edilen plakanın her iki tarafına aynı oranda dağıtılmazsa çekme çok büyük olacaktır. Şeritin her iki tarafına kaynak işleminin uygulanması halinde kaynak işleminden sonra parça tekrar orijinal konumuna gelmeyecektir. Aşırı kaynak kalıntısı birleştirmenin dayanımını arttırmadığı gibi maliyeti ve çarpılma miktarını arttıracaktır (American Welding Society 1981). Kaynak işlemi esnasında ergiyen kaynak metali bölgesi, kaynak ısı nedeniyle genişlemeye çalışırken, bu bölgeye komşu olan soğuk bölge bu boyuna uzamayı sınırlayarak plastik yığılma meydana getirir (Makhnenko, 1994).

<p>Bağlı olmayan saclarda ve simetrik dikişlerde enine çekme</p>	
<p>V-dikişleri ve T- bağlantılarındaki iç köşe dikişlerinde açılma çarpılma</p>	
<p>Her iki taraftan boyuna dikişler içeren çift T-kirişlerde kısalmalar.</p>	
<p>Tek taraftan boyuna dikişler içeren T-kirişlerde eğilmeler</p>	
<p>ince saclarda dalgalanmalar</p>	
<p>Yeterli şekil değiştirme kabiliyeti olması nedeniyle ; Enine gerilmelerin geniş bölgesinde neden oldukları boyuna çatlak Boyuna gerilmeler nedeniyle iç köşe dikişte enine çatlak</p>	

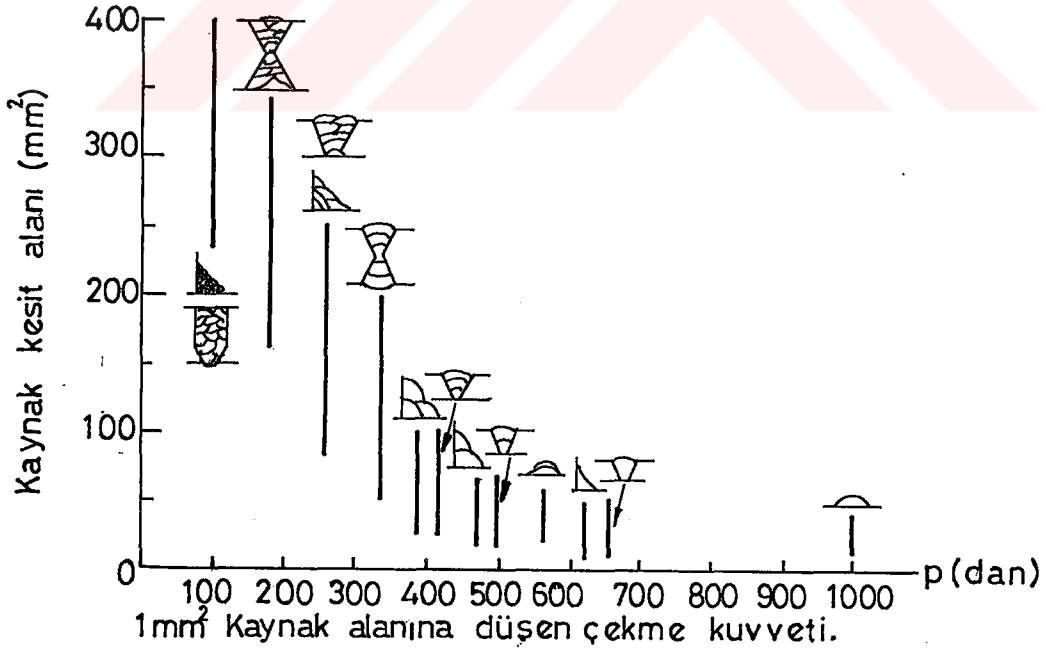
Şekil 2.12. Kaynaklı yapılarda görülen çekme ve çarpılmalar (ODTÜ Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992)



Şekil 2.13. Boyuna çekme; kesik çizgiler kaynaktan önceki konumu gösterirken, sürekli çizgiler ise kaynaktan sonraki konumu göstermektedir (Gourd, 1986).

Ölçülebilen boylamasına çekme miktarı azdır ve pratik olarak yalnız dikişin sonlarında bir kısalma olabilir. Dikişin boyu uzadıkça metre dikiş boyuna düşen kendini çekme oranı azalır. Alın kaynaklarında bu oran 0.1 ile 0.3 mm/m'dir. Dikişte yüksek miktarda uzunlamasına çekme gerilmelerinin oluşması halinde, özellikle ince saclarda dikişlerin arasındaki bölgelerde kabarıklıklar meydana gelir.

Şekil 2.14'te st 37 çeliğinin kalın örtülü elektrotla yapılan elektrik ark kaynağında, çeşitli birleştirme şekillerinde oluşan boylamasına özgül kendini çekme kuvveti verilmiştir (Anık 1983).



Şekil 2.14. st 37 çeliğinin kalın örtülü elektrotla yapılan ark kaynağında, çeşitli birleştirme şekillerinde oluşan F: Boylamasına özgül kendini çekme kuvvetleri, Q: toplam kesit alanı (Anık, 1983).

$$\delta = \frac{F \cdot b \cdot L^2}{B \cdot E \cdot J} \quad (12)$$

Burada:

$\delta$  = Kirişteki kabarma (sehim) yüksekliği (mm)

F = Kendini çekme kuvveti (N)

b = Yığılan alanın (A1)bütün kirişin ağırlık merkezine uzaklığı (mm)

L = Kirişin boyu (mm)

E = Elastiklik modülü (210.000 N/mm<sup>2</sup>)

J = Kirişin atalet momenti

A = toplam kesit (mm<sup>2</sup>)

Kısalma miktarı şu formülle bulunur:

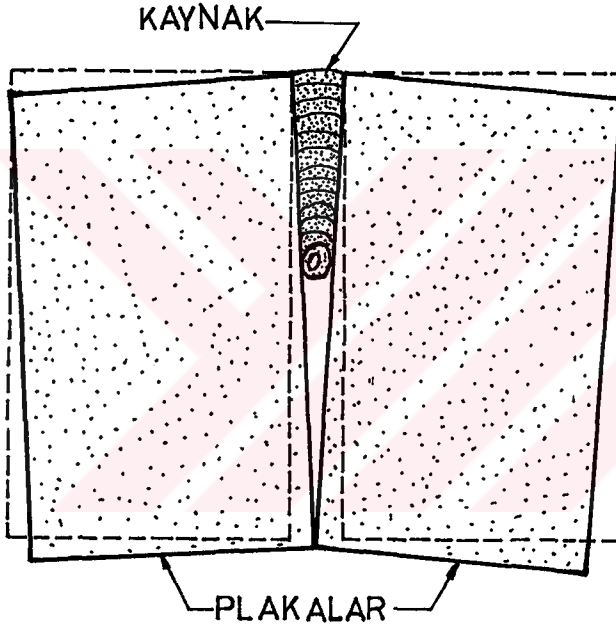
$$\Delta L = \frac{F \cdot L}{E \cdot A} \quad (13).$$

### 2.5.2. Enine çekme (çapraz kısalma)

Eğer plaka düz kaynakla birleştiriliyorsa ve bu plakaların kaynak esnasında hareket serbestisi var ise; kaynak edilen parçaların soğumasına bağlı olarak, ortaya çıkan çekmeyle, plaklar kaynak yapılan kısmın karşı tarafında birbirlerine doğru hareket edeceklerdir (Şekil 2. 15). Oluşacak çekme plaka kalınlığına, kaynak işleminin hızına, parçaların konumlanmasına, dikiş uzunluğuna, kaynak ağzının hazırlanmasına ve türüne, sınırlamalara, kaynak metali kalıntısının hacmine bağlı olarak değişir. 150 mm den kalın plakaların kesitleri boyunca yapılan kaynakta oluşacak enine çekme 6 mm den daha fazladır. Bu çekme önlenemez ancak alınacak önlemler ve uygun kaynak işlemi

ve uygun tasarımların kullanılmasıyla kontrol altına alınabilir veya minimize edilebilir (American Society for Metal, 1990; Raymond).

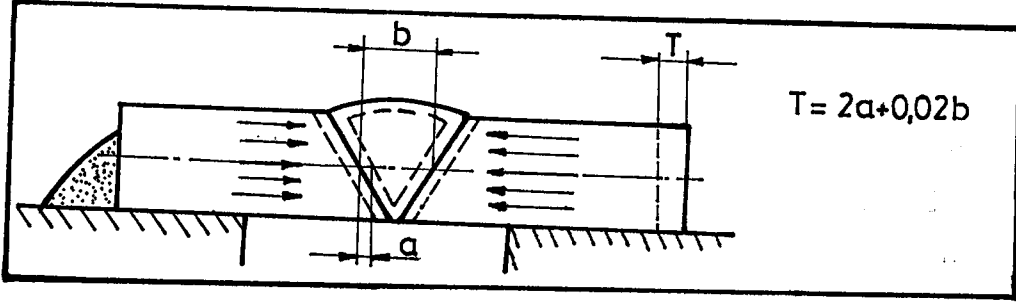
Kaynak işlemi sırasında, kaynak ısısının etkisiyle ısınan (tavlanan) kaynak ağzı, daralarak enine çekme meydana gelir. Meydana gelen bu çekmenin % 90 ile 95'i esas metalin uzaması ve % 5 ile % 10'u kaynak metalinin kendini çekmesi neticesinde meydana gelir (Şekil 2.16).



Şekil 2.15. Enine çekme; Kesik çizgiler kaynaktan önceki konumu, sürekli çizgiler ise kaynak işlemi sorasındaki konumu göstermektedir (American Society for Metal, 1990).

Herhangi bir yöntemle sınırlandırılmamış elemanların kaynağında oluşacak enine çekmeler aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Anık, 1991).

$$Q = \frac{0,24.600.\eta.a.u.I.\alpha}{S.v.\lambda} \quad (14)$$



Şekil 2.16. Alından yapılan kaynaklı birleştirmede, alın dikişinde meydana gelen enine çekme (ODTÜ Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992).

- Q = Kendini çekme miktarı (mm)  
 $\eta$  = Ark ısısından faydalanma faktörü (verim)  
 $\alpha$  = Çizgisel (boyutsal) uzama değeri ( $1/^\circ\text{C}$ )  
 a = Sıcaklık iletim sayısı  
 v = Kaynak hızı (cm/dak)  
 S = Sac kalınlığı (mm)  
 U = Ark gerilimi (Volt)  
 I = Kaynak akım şiddeti (amper)  
 $\lambda$  = Isı iletme katsayısı (cal/cm.san. $^\circ\text{C}$ )

verilen bu formül yardımı ile her pasonun neden olduğu kendini çekme miktarı muntazam olarak hesaplanabilir.

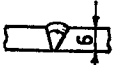
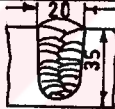
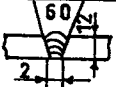

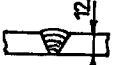


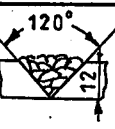

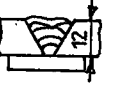
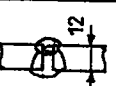
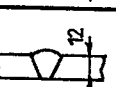
Oluşacak çekmeyi dikiş boyuna bağlı olarakta hesaplamak mümkündür (Anık, 1991).

- $\delta = 0.057 + 0.91 Lnl$   
 $\delta$  = Kendini çekme miktarı (mm)

$L_{nl}$  = Dikiş boyunun logaritmik değeri

$L$  = Dikiş boyu (cm)

Şekil 2.17'de değişik kaynak ağız şekillerine göre St37 ve St 42 çeliklerde alından yapılan birleştirmeler sonucu meydana gelen çekme miktarları verilmiştir.

Kesit	Enine (mm) Çekme	Doldurma şekli	Kesit	Enine (mm) Çekme	Doldurma şekli
	1,0	2 Paso ve örtülü elektrot ile ark kaynağı		3,2	20 Paso ve örtülü elektrot ile ark kaynağı
	1,4	4 Paso ve çıplak elektrot ile ark kaynağı		2,4	1/3 ü örtülü elektrotla 2/3 ü tozaltı kaynağı
	1,6	5 Paso ve örtülü elektrot ile ark kaynağı		0,6	Bakır altlık üzerinde bir Paso ile tozaltı kaynağı
	1,8	5 Paso ve örtülü elektrot ile ark kaynağı kök ters taraftan kaynatılmıştır		3,3	120° lik ağız açısında örtülü elektrotla ark kaynağı (tavsiye edilmez)
	1,8	iki tarafında 5paso ve örtülü elektrotla ark kaynağı		1,5	Altlık üzerinde örtülü elektrot ile ark kaynağı
	1,6	Derin nüfuziyet elektrot ile ark kaynağı			
	2,3	sağa gaz kaynağı			

Şekil 2.17. St 37 ve St 42 çeliklerinde değişik ağız formlarına göre alın birleştirmelerinde meydana gelen enine çekme miktarları (ODTÜ Kaynak Teknolojisi, 1990).

Kaynak dikişine dikey yönde göreceli şekil değiştirme olarakta anılan enine çekme, her bir elementin serbest ısıl şekil bozulması bütün yönlerde eşit

olduğundan kaynağın enine net çekmesi, kaynak bölgesinde yoğunlaşmış olup genişlik üzerinde ortalanmamıştır (Anık, 1983).

Kaynaklı yapılarda iç köşe kaynak işlemlerinde meydana gelen çekme miktarı alından yapılan kaynaklı birleştirmelerden daha azdır (Şekil 2.18). yatay sacın (levhanın) kaynak işlemi esnasında kaynak ısısı etkisiyle tavlanması enine çekmenin meydana gelmesine neden olmakta ve dikiş kalınlığının sac kalınlığına oranlanması ile şu şekilde yorumlanmaktadır.

$$\frac{\text{Dikiş kalınlığı}}{\text{Sac kalınlığı}} = \frac{a}{s}$$

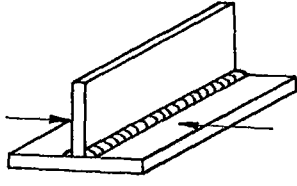
$\frac{a}{s} = 0.3$  ise çekme azdır.

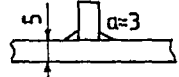
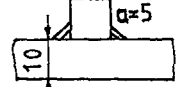
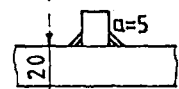
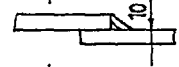


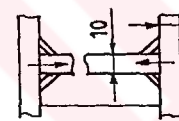


$\frac{a}{s} = 0.5$  ise, çekme normaldir.

$\frac{a}{s} = 0.8$  ise çekme fazladır.

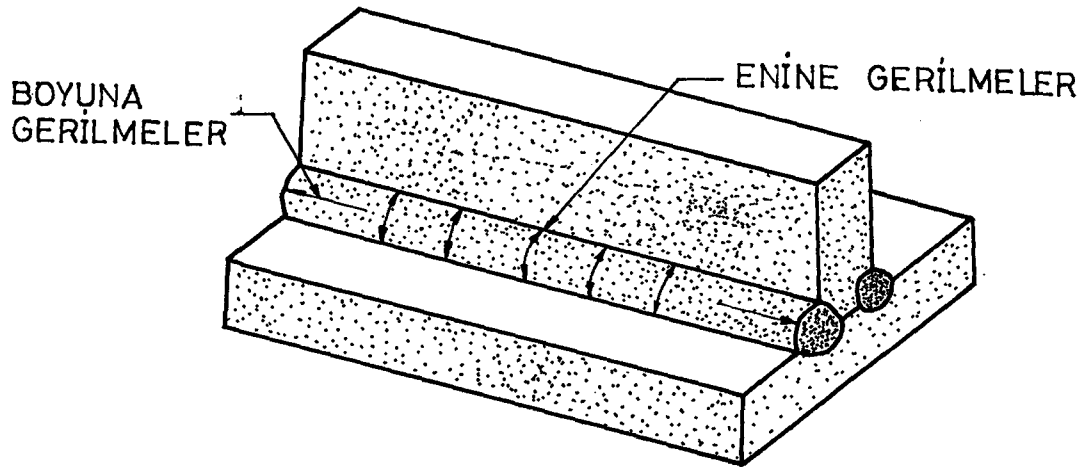
### 2.5.3. Açısal çarpılma

Köşe kaynakları şekil 2.19'da görüldüğü gibi boyuna ve enine gerilmelerin her ikisinde içerirler. Bir T birleştirmede köşe kaynağı kullanıldığında, T birleştirmenin düşey parçası kaynak yapılan tarafa doğru çekilecektir. Burada yine kaynak hacmi ve kaynak pasosu arttırıldıkça ve kaynak hızı düşürüldükçe çarpılma miktarı şekil 2.20'de görüldüğü gibi artacaktır (Raymond, 1990).

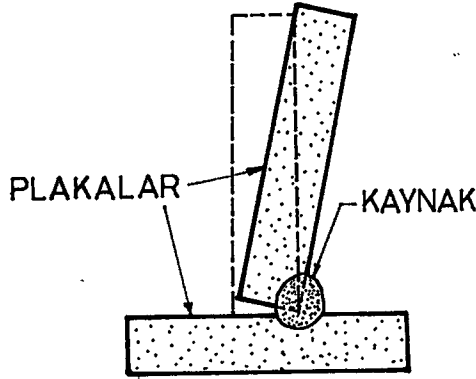


Kesiti	Enine Çekme (mm)	Doldurma Şekli
	0,5	
	0,3	Yatay Pozisyonda İkişer Paso
	0	Yatay Pozisyonda İkişer Paso
	0,5	Yatay Pozisyonda İkişer Paso
	10	Oluk Pozisyonu
	1,3	Dikme Kaynak Pozisyonu
	0	Yatay Pozisyonda İkişer Paso
	0	Yatay Pozisyonda İkişer Paso
	0,8	Yatay Pozisyonda İkişer Paso

Şekil 2.18. St 37 ve St 42 çeliklerinin örtülü elektrotla yapılan iç köşe kaynaklarındaki enine çekme miktarı (Anık, 1983).



Şekil 2.19. Köşe kaynağındaki çekme hem boyuna hem enine gerilmelere neden olur (Raymond, 1990).



Şekil 2.20. Kaynağın T birleştirmelere etkisi. Kesik çizgiler orijinal konumu, sürekli çizgiler ise kaynaktan sonraki konumu göstermektedir (Gourd, 1986).

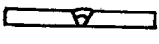







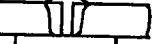


Meydana gelen açısal çarpılmanın büyüklüğü birleştirmesi yapılacak parçaların kaynak ağzı şekline, pasoların oluşturulma şekline ve plakaların kalınlığına bağlıdır. Şekil 2.21'de St 37 ve St 48 çeliklerin alın kaynağında meydana gelen açısal çarpılma miktarı verilmiştir.

Şekil 2.22 de ise plaka kalınlığının açısal çarpılmaya etkisi görülmektedir. Burada kaydedilen ölçüler 500 mm uzunluğundaki dikişler üzerinde yapılmıştır.

Şekil 2.23'de St 37 çeliğinin çeşitli iç köşe birleştirmelerinde meydana gelen açısal çarpılma miktarı verilmiştir.

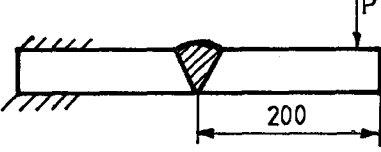
Açısal çarpılmanın büyüklüğü, kaynağın dikişinin kalınlığı ( $a$ ) ile alt sacın ( $s$ ) kalınlığının  $a/s$  oranına bağlıdır. Kalın çaplı bir elektrot ile bir paso halinde kaynak yapıldığı zaman, oluşan açısal çarpılma, aynı dikiş yüksekliği ( $a$ ) için ince çaplı elektrotla çok sayıda pasolar halinde yapılan kaynağa nazaran daha azdır.

Tek tarafında el ile elektrik ark kaynağı yapılan bir iç köşe birleştirilmesinde, çekilen paso sayısı arttıkça, açısız çarpılda artmaktadır (Şekil 2.24).

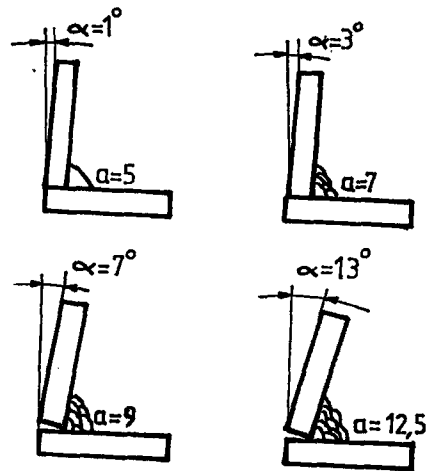
Kesit	Acısız ( $\alpha^\circ$ ) çarpılma	Doldurma Şekli
	1°	2 Paso ve örtülü elektrod ile ark kaynağı
	1°	3 Paso ve çıplak elektrodla ark kaynağı
	3 1/2°	5 Paso ve örtülü elektrodla ark kaynağı
	0°	5 Paso ve örtülü elektrodla ark kaynağı ; kök ters taraftan 3 Paso ile kaynaklanmış
	1°	Sağ gaz kaynağı
	0°	İki taraftan dikey pozisyonda gaz kaynağı
	7°	8 Geniş paso ve örtülü elektrodla ark kaynağı
	12°	22 dar paso ve örtülü elektrodla ark kaynağı
	0°	Bakır altlık üzerinde bir paso ile tozaltı kaynağı
	2°	1/3 örtülü elektrodla ark kaynağı 2/3 bir paso ile tozaltı kaynağı
	5°	Çelik altlık üzerinde 2 paso ile tozaltı kaynağı

Şekil 2.21 st 37 ve st 42 çeliklerin alın kalınlığında meydana gelen açısız çarpılma miktarları (ODTÜ Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992).

Plaka Kalınlığı (mm)	Paso Sayısı	Dikise 200 mm mesafede açısıl distorsiyon kuvveti (N)
8	3	4160
10	4	6800
12	5	12300
15	6	19300
18	7	23600



Şekil 2.22. Plaka kalınlığının v-alın dikişlerinde açısıl çarpılmaya etkisi (Anık, 1991)



Şekil 2.23. St 37 çeliğinin çeşitli iç köşe birleştirmelerinde meydana gelen çarpılma miktarları (Raymond, 1990).

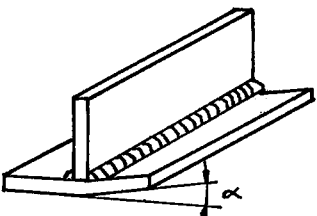
#### 2.5.4. Kaynaklı yapılarda açısız çarpılmaya etki eden faktörler







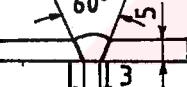
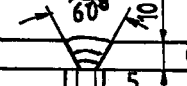

Aşağıdaki sıralanan faktörler açısız çarpılmaya etki ederler.

- Hareket serbestisi olan "V" alın birleştirmelerinde paso sayısının artmasına bağı olarak açısız çarpılmada artar.
- Açısız çarpılma sırası ile önce "V" sonra "U" kaynak ağız formuna sahip kaynaklarda en büyük ve çift "V" (X) ve çift U (H) kaynak ağız formuna sahip kaynaklarda en azdır.
- Her çekilen pasodan sonra uygun tarzda çekiçleme işlemi açısız çarpılma miktarını etkiler.
- Kaynak zamanı ve elektrod çapının açısız çarpılma üzerine önemli etkisi vardır.
- Isıtma Oranı; Diğer faktörlerin dengeli olması halinde, daha büyük ısı girişi oranı durumunda, meydana gelecek çarpılma oranı daha düşük olacaktır (Raymond, 1990).

#### 2.5.5. Kaynaklı yapılarıdaki bükülme (Kaynak çekmesi)

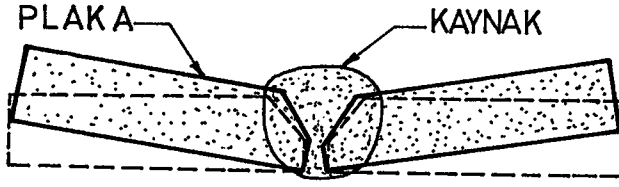
İnce plakalarda kaynak için tek taraflı olarak V ve U gibi kaynak ağız açılarak hazırlanmış kenarların kaynaklı birleştirmelerinde plakalar ilk konumlarından saparak birbirlerine doğru çekilecektir (Şekil 2.25) bu duruma, kaynak ağız kenarları hazırlanırken kaynak ağız üst kısmının alt kısımdan, daha büyük açılmasıyla, kaynak malzemesinin çoğunun üst kısımda yer alması sonucu üst kısımdaki çekmenin alt kısımdaki çekmeden daha fazla olması neden olur. Paso sayısının arttırılması da bükülmeyi arttıracaktır (Raymond, 1990).



Kesit	Acısal ( $\alpha$ ) Çarpılma	Doldurma Şekli
	3°	Örtülü elektrodla ark kaynağı
	3°	Yatay pozisyonda 2 paso ve örtülü elektrodla ark kaynağı.
	1°	Yatay pozisyonda 2 Paso ve örtülü elektrodla ark kaynağı.
	0	Örtülü elektrodla ve aralık bırakarak (2/3 serbest kesikli) zikzak kaynağı.
	2°	Yatay pozisyonda 3 paso ve örtülü elektrodla ark kaynağı.
	1 1/2°	Yatay pozisyonda 4 paso ve örtülü elektrodla ark kaynağı.
	0°	Bir paso ve örtülü elektrodla ark kaynağı.
	1°	3 Paso ve örtülü elektrodla ark kaynağı.
	0°	Bir paso ile tozaltı kaynağı.

Şekil 2.24. Tek taraftan orta rutil bir elektrodla kaynak yapılan iç köşe birleştirmelerinde çekilen paso sayısının açısız çarpılmaya etkisi (ODTÜ

Kaynak Teknolojisi, Birimi 1992).



Şekil 2.25. Kaynak sonrasında oluşan bükülme. Kesik çizgiler orijinal konumu sürekli çizgiler kaynak sonrası konumu göstermektedir (Raymond, 1990).

### 2.5.6. İnce kesitli yapılarda çekme ve çarpılma (distorsiyon)

İnce sac plakaların kaynağında distorsiyon veya büzölmeye sıkça rastlanır. Bu yapıların kaynağında, büyük kaynak hacmi, düşük kaynak hızında ve gerekli tedbirler alınmazsa meydana gelecek distorsiyon büyük olacaktır (Ertürk, 1989).

### 2.5.7. Kalın kesitli yapılarda çekme ve çarpılma (distorsiyon)

Kalın kesitli parçaların kaynak işlemine, kaynak birleştirmesinin iki tarafındaki eşit olmayan çekmelerin neden olduğu açısal distorsiyon eşlik eder. Eşit olmayan çekmenin meydana gelmesinin nedeni, çok pasolu kaynaklarda, kaynak dikişlerinin birbirini izleyerek yapılması ve birleştirme tasarımı sırasında kaynak hatlarının genişliğinin, kaynak ağzı doldurulurken artmasıdır. Kaynak işleminin tamamı tek taraftan yapıldığında meydana gelecek çarpılmanın önlenmesi gerçekte imkansızdır (American Society For Metal, 1990).

### 2.5.8. Düz kaynaklarda çekme ve çarpılmaya etki eden faktörler

Aşağıdaki faktörler düz kaynak ile birleştirilen parçalarda çekme ve çarpılmaya etki eder.

- . Kaynak edilecek plaka kalınlığına göre seçilen kaynak kesit bölgesi
- . Birleştirmenin açısı
- . Toplam ısı girişi
- . Isıtma oranı
- . Kaynak işleminden önce yapılacak ön hazırlık
- . Bağlama donanımları
- . Kaynak yöntemi
- . Kaynak işlemi sonrası yapılacak işlemler (Leino, et al., 1984; Raymond, 1990)

#### 2.5.9. Dolgu kaynaklarında çekme ve çarpılmaya etki eden faktörler

Aşağıdaki faktörler dolgu kaynağı ile birleştirilen parçalarda çekme ve çarpılmaya etki eder.

- Çekme kaynak hacmine bağlı olarak artar ve ısı giriş oranının yükselmesiyle azalır.
- Eğer kaynak aralıklı ise, çekme kaynağın boyuna dağılmıştır.
- Çekme, uygun kaynak aralığı, kaynak işlemlerinin seçilmesi ve uygun çekiçleme işlemi ile azaltılabilir.
- Bindirme kaynağıyla yapılan birleştirmede enine çekme, v düz kaynakla yapılan birleştirmeden daha azdır. Ön ısıtma, kaynaklar arasındaki mesafenin seçimi ve yapılan kaynağın tekniği (sıralı-şaşırtmalı vb. gibi) dolgu kaynaklarındaki çekme ve çarpılmayı etkiler (Leiono, et al., 1984; Raymond, 1990).

### 3. ÇEKME VE ÇARPILMALARI AZALTMA ÖNLEMLERİ

Kaynaklı yapılarda meydana gelen çekme ve çarpılmalar (distorsiyonlar) kaynak işleminde kullanılan özgül ısı oranına bağlı olarak değişir. Kaynak işlemi sonunda kaynaklı yapıda meydana gelen distorsiyonların tamamen önlenmesi imkansızdır. Ancak kaynak işlemi öncesinde, kaynak işlemi esnasında ve kaynak işlemi sonrasında alınacak bir takım önlemlerle en aza indirgenebilir. Bunun sağlanabilmesi için ise kaynak işlemine başlamadan önce, kaynak işlemi sonrasında meydana gelebilecek çekme ve çarpılmaların gözönünde bulundurulması gerekir. Bu distorsiyonların en aza indirilmesi için, mümkün olabilecek tasarım ve planlama önceden kararlaştırıldıktan sonra imalata geçilmelidir. Kaynaklı yapıların düzeltilmesi bugün tamamen pratik bir problemdir. Verilen esaslar dahilinde uygun bir işlem tatbik edildiğinde, düzeltme işlemi için harcanan süre minimuma indirilir. Kaynak işlemiyle ortaya çıkan çekme ve çarpılmaların ortadan kaldırılması büyük maliyetler gerektiren, doğrultma ve düzeltme işlemlerini gerektirir. Doğrulatma işlemi zaman kaybına sebebiyet verdiği gibi parçada, yeni gerilmelerde neden olur.

Bir tersanede kaynak yapılan bir gemi perdesinin kaynak ve doğrultma işlemleri için sarfedilen zaman bununla ilgili bir örnek olarak aşağıda verilmiştir.

Alın birleştirmeleri ve takviyelerin kaynağı	22 saat (% 50.5)
Doğrultma işlemi	21.5 saat (% 49.5)

Burada kaynak işleminden sonra düzeltme işlemi için sarf edilen zamanın neredeyse kaynak için sarf edilen zamana eşit olduğu görülmektedir. Buda çarpılma en az seviyeye indirmek için, uygun bir kaynak sırasının seçilmesinin, yani kaynak planının nedenli önemli olduğunu göstermektedir. İyi

planlama ve kaynak sırasıyla, doğrultma süresi kaynak zamanının % 10 ile % 20'si arasında kalır ve genelde bu sınırın aşılması tavsiye edilir (Anık, 1991)

### **3.1. Çekme ve Çarpılmaya Neden Olan Gerilmelerin kontrol Altına Alınması**

Kaynaklı bir yapıda, çekme ve çarpılmayla birlikte kırılmaya veya çatlamayada yol açabilecek birçok gerilmeler meydana gelir. Bu gerilmeler yapının geometrisinde önemli oranda kalıcı değişikliklere neden olurlar. Bu gerilmelerin giderilmesi için kullanılacak yöntemler aşağıda verilmiştir.

#### **3.1.1. Ön Isıtma**

Kaynak işlemi esnasında, yapıdaki çarpıklık ve genişleme oranının kontrol altına alınması veya azaltılması gerekir. Ön ısıtma işleminde, ısının yapıya muntazam bir şekilde dağılması için büyük itina gösterilmelidir. Eğer kaynaklı yapının parçalarından biri diğerinden daha fazla ısıtılırsa, iç gerilmeler ortaya çıkacaktır. Bu durum ön ısıtmadan beklenen, avantajlara ulaşmaya engel olur. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra, yapı yavaş yavaş soğumaya bırakılmalıdır. İşlem esnasında yapının sıcaklığının çok iyi bir şekilde kontrol altına alınması gerekir.

Ön ısıtma temel metalin veya belirli bir bölgesinin sıcaklığını çevre sıcaklığının üzerinde ısıtmayı içerir. Ön ısıtma sıcaklığı, şartlara göre değişir, bu sıcaklıklar oda sıcaklığı kadar 26°C (79°F) düşük, kaynak işlemi kışın dışarda yapılacaksa 650°C (1200°F) kadar yüksek, yüksek sertleşebilme kabiliyetine sahip çeliklerde 350°C (600°F) olabilir.

İşlemlerin çoğunda, temel metalin ısıtılma işlemi dikkatlice kontrol edilmelidir. En iyi kontrol yöntemi, parçayı istenilen sıcaklıkta tutmaya olanak veren bir fırında tutmak veya elektrik indüksiyon telleri, yada elektrik dirençli ısı battaniyeleri kullanılmalıdır. İnce cidarlı parçalarda ışın saçan lambalar veya sıcak hava cereyanı kullanılmalı. Bu yöntemlerde sıcaklık göstergeleri ön ısıtmaya tabi tutulacak parçaya tespit edilir. Bu yöntemlerin uygulanması mümkün değil ise, sıcaklığın ölçülmesinde kullanılacak birçok metot vardır; yüzey ısı derecesi ölçücüsü, manyetik olarak tutturulmuş çift metalli yüzey termometreleri, belirli sıcaklıklarda rengi değişen tebeşir ve ergime derecesi önceden bilinen tanecikler. Ön ısıtma için torçlar kullanıldığında, alanın aşırı ısıtılmasıyla kaynak edilecek bölgelerde ve kaynak yüzeylerinde yanma kalıntıları önlenmelidir (American Welding Society, 1981).

### 3.1.2. Kaynak işleminden sonra ısıtma

Gerilim gidermede en yaygın olan yöntem işlem sonrası ısıtmadır. Bu yöntemde, kullanılan ısı işlemi, sıcaklık kontrolü altında dengeli (uniform) ısı dağılımı sağlayan bir fırında yapılmalıdır. Isıtma metodu, ıslah edilen metale zarar vermemelidir. Isıtma işlemine, kaynaklı yapıdaki elemanların hiç birinde çarpılma meydana gelmeyecek şekilde devam edilmelidir. Sıcaklıktaki artış kademeli olmalı ve kaynaklı yapıdaki elemanlar düzenli bir oranda ısıtılmalıdır. Yumuşak çelik genellikle yaklaşık 1100°F tan 1200°F'ta kadar ısıtılır. Diğer çeliklerde kopma karakteristiklerine bağlı olarak daha yüksek sıcaklıklara gereksinim duyulabilir. Bazı alaşım çelikleri 1600°F sıcaklığa veya daha yüksek dereceye kadar ısıtılır.

Isıtma işleminin süresi plaka kalınlığına ve çeliğin sertlik oranına bağlıdır. Isıtma oranı her 25mm alınlık için 1 saattir. Kaynaklı yapı en kalın kısmınıda denge sağlanıncaya kadar emilimine (sordurmasına) olanak

verilmelidir. Sıcaklık düşüşü kademeli olarak ve tüm kısımlardaki sıcaklıkları ortalama eşit tutacak oranda olmalıdır. Farklı kalınlıklarındaki yapılar soğumak için 48 saate kadar süreye gereksinim duyabilir.

İşin fırından alınabileceği sıcaklık değişen plaka kalınlıklarına ve elemanların rijitliğine bağlıdır. Bu sıcaklık 200° F'ta kadar düşük veya 600° F'ta kadar yüksek olabilir. Fırını çevreleyen havanın, eşit ısı dağılımını sağlamak için yeterince sakin olması gerekir.

Bütün yapının, ısıtılması boru hattı örneğinde olduğu gibi her zaman mümkün olmaz. Böyle durumlarda, kaynak yapısının yalnızca bir kısmının belli bir zaman aralığında ısıtılmasıyla, gerilimin giderilmesi mümkün olur. İşlem esnasında yapının genişleşip kısılması önemlidir. Aksi takdirde yapıda giderilmeye çalışılan orijinal gerilimlerden, daha büyük gerilimlere neden olan ek gerilimleri yapıya girebilir (American Society for Metal, 1990).

### 3.1.3. Gerilim giderme yumuşatma tavlama (Annealing)

Tavlama işlemi diğer bütün metotlardan daha üstündür. Ancak idare edilmesi oldukça zordur. Tavlama sıcaklığı 1600-1650°F' ta kadar tamamen ısıtılmalıdır. Bu ısınma sonucu ortaya çıkan yoğunluk nedeniyle, kaynakların bazı türlerinin yıkılma tehlikesi vardır (American Society For Metal, 1990).

### 3.1.4. Soğuk çekiçleme

Soğuk çekiçlemede, yapıyı düzeltmek ve soğuma nedeniyle oluşan çekmeye karşı koymak için, kaynak yapısı çekiçlenir. Kaynak metalinin soğuk çekiçlenmesi, serbest bırakıldığında kalıntı gerilmeye neden olan plastik akışı meydana getirir. Etkin çekiçleme için operatörün konuya hakimiyeti gereklidir.

Çekişleme çeliğe soğuk şekil vermeyle benzerdir ve eğer aşırı yapılırsa yapının sünekliğini düşürecektir. Böylece yapı sertleşecektir. Aşırı çekişleme, çatlaklara neden olabilir veya yapıya yeni gerilimler ekleyebilir.

Çekişleme işlemi, parçalar el ile dokunmaya imkan verecek düzeyde düşük ısıda iken yapılmalıdır. Kaynağın kaynak kökü ve yapı yüzeyindeki kaynak çekişlenmemelidir. Kör ağızlı pnömatik bir keski kullanılmalıdır. El ile yapılan çekişleme kontrol altına alınamaz (American Society For Metal, 1990).

### 3.1.5. Mekanik yükleme

Mekanik yüklemde temel metale, basınçlı kaba (pressure vessel) basınç uygulanarak, akma noktasına kadar gerilimle yüklenir. Bu işlem basit kaynaklı yapılarda başarıyla uygulanabilir. Basınçlı kaplar, eşit kalınlık dağılımına sahip olmayan ve bu nedenle germe kuvvetleri bulunan plakalar için kullanılır. Ancak bununla birlikte, metalin tamamı aynı oranda açılmaz. Bu metod, kopma noktası oldukça düşük olan metallere uygulanabilir. Aksi takdirde gerilim sertleşmesi veya gevrek kırılma tehlikesi vardır. Burada hava basıncı kullanma durumunda bağlantılarda meydana gelebilecek yırtılma tehlikesi nedeniyle daha çok hidrolik basınç kullanılır (Anık, 1980).

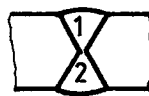
### 3.1.6. Kaynak tekniği ile gerilim düşürme

Kaynak işleminden önce ve sonra herhangi bir ısıtma işlemi uygulamadan, kaynak işlemi esnasında kalıntı gerilimleri, kontrol altına almanın imkansız olmasına rağmen, aşağıdaki kaynak prosedürlerinin uygulanmasıyla minimize edilebilir.

- Yapılarda en düşük kalıntı gerilimine neden olacak birleştirme tiplerine göre tasarım yapılmalı.
- Bir işlem seçilirken, bu işlemle yapılan kaynakta oluşacak kalıntı geriliminin derecesi gözönüne alınmalıdır.
- Kaynak esnasında, kaynağın kararlılığını arttırmayacak şekilde parçaların hareketine olanak sağlayan ve en kararlı olması istenen kaynakların ilk önce yapılmasına imkan veren kaynak montaj sırası planlanmalı.
- Aşırı sınırlandırılmış ve kesişmiş kaynak bölgelerinden kaçınılmalı.
- Çekiçleme işlemi gerilmeleri azaltmada, çarpılmayı ve bükülmeye kısmen doğrudmada etkindir. Kaynak kökü, yapı yüzeyindeki kaynak ve  $1/8'$  den daha kalın dikişler çekiçlenmemelidir.

### 3.2. Kaynak İşleminde Önce Çekme ve Çarpılmaya Azaltma Önlemleri

Birleştirmeler en az dolgu maddesi gerektirecek ve birbirlerini dengeleyecek şekilde düzenlenmelidir. Örneğin ağır parçaların kaynağında tek taraflı "V" kaynağı yerine mümkünse çift taraflı "X" kaynağı kullanılmalıdır. Böylece çift taraflı açılan kaynak ağzı, tek taraflı olarak açılana nazaran  $1/2$  oranında daha az dolgu metali gerektirir (şekil 3.1). Azaltılan dolgu miktarı meydana gelecek distorsiyonu azaltır. İki taraflı yapılan "X" kaynağında pasoların her iki ağızda değiştirilerek yapılması gerekir.



a. Tek taraflı v kaynak ağzı

b. Çift taraflı v kaynak ağzı

Şekil 3.1. V Kaynak ağzı ile X kaynak ağzı için gerekli kaynak metalinin karşılaştırılması (American Society For Metal, 1990).

Aşırı kaynak kanalı genişlikleri, kaynak dayanımına hiç bir katkıda bulunmazken, kaynak maliyetiyle beraber meydana gelecek kaynak çekmesinde arttıracaktır. Kaynak ağzı tasarlanırken en az dolgu metaline gereksinim duyan birleştirmeler seçilmelidir. Açığı ve destek parçasını da içeren kök açma işleminde kök minimum düzeyde olmalıdır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Doğru kenar hazırlığı ve düzenleme (Raymond, 1990).

Kaynak ağzı açısı küçüldükçe, kaynak kökünde iyi bir penetrasyon sağlamak için, daha büyük kaynak kökü açılmalıdır. Eğer kaynak kökü çok küçük düzenlenirse, kökte füzyonun oluşturulması daha zordur. Bu durumda, kaynak işlemini yavaşlatan daha küçük elektrotlar kullanılmalıdır. Eğer açılan kök çok geniş ise, kaynak kalitesini etkilemeyen bir destek parçası kullanılmalı. Çelik sac ve plakaların şekillendirilmesi esnasında meydana gelen gerilmeler kaynak ısıyla açığa çıkar ve önemli oranda distorsiyona neden olur. Bu gerilmeleri bünyesinde taşıyan parçaların gerilim giderme işlemine tabi tutulmasına gereksinim vardır (Raymond, 1990).

Gerilim giderme işlemi parçanın, yapıldığı mazemenin kritik sıcaklığının altında uygun bir sıcaklığa kadar düzgün olarak ısıtma, bu

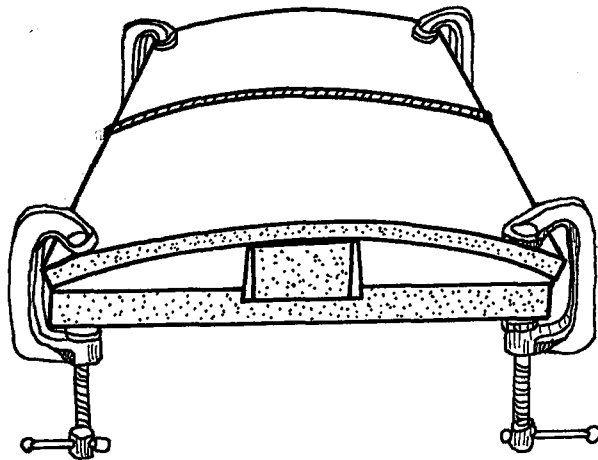
sıcaklıkta belirli bir süre tutma ve daha sonra düzgün olarak soğutma işlemidir (Raymond, 1990).

### 3.2.1. Kaynak işleminin ve donanımının seçimi

Serbest el ile yapılan kaynatkta örtülü elektrotların kullanılması yerine, yarı otomatik ve tam otomatik toz altı ark kaynak işlemlerinin uygulanmasıyla, ısıdan etkilenen bölge azaltılarak çarpılma miktarı düşürülür (Akpolat, 1981).

### 3.2.2. Ön germe

Çekme kuvvetleri kaynak edilecek parçaların önceden gerdirilmesiyle giderilebilir (şekil 3.3). Kaynak edilecek plakalar kaynak yapılacak yüzeye ters yönde bükülür. Kaynak esnasında, kaynak metalinin çekmesi, işkenceler yardımıyla sınırlandırılmıştır. Bu şekilde plakaların kasılması, kaynak çekmesi nedeniyle ortaya çıkacak bükülmeyi azaltır ve parçaların işkencedeyken soğumaya bırakılması daha etkili olur. Bununla beraber germe (kasma) bükülmeyi tamamen ortadan kaldırmaz. Soğuduktan sonra işkencelerin alınmasıyla plakalar birbirlerine doğru az miktarda esneyecektir (Raymond, 1990).



Şekil 3.3. Parçaların önceden gerilmesi ve tespit edilmesi (Raymond, 1990).

### 3.2.3. Parçaların arasına boşluk bırakarak konumlandırma

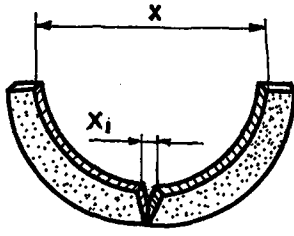
Başka bir yöntem kaynaktan önce parçalar arasında boşluk bırakarak olması gereken konumun dışında yerleştirilmesidir (şekil 3.4). Verilen bir iş için bırakılacak boşluğu tam olarak belirlemek deneyim gerektirir. Kollar kaynağın çekme kuvvetlerinin etkisiyle tekrar uygun konuma gelecektir (Şekil 3.5). Bir T birleştirmede düşey plakanın istikamet dışında yerleştirilmesini göstermektedir. Bu hazırlık kaynak işleminden önce yapılır. Kaynak işleminin tamamlanmasıyla meydana gelen çekme düşey plakayı doğru konumuna getirecektir. Operatör kaynak işleminden önce tüm birleştirilmelerin uygun şekilde konumlandırıldığından ve gereğinden fazla aralık bırakılmadığından emin olmalıdır. Bununla birlikte uygun montaj şartları elde edilemez ise metal dolgu malzemeleri, ciddi sonuçlar doğuracağı gözönüne alınarak ihtiyatlı kullanılmalıdır (Gourd, 1986).

### 3.2.4. Bağlama tertibatları ve donanımları

Bağlama tertibatları ve donanımları kaynağı sabit tutarak hareket kabiliyetini sınırlandırır. Bu suretle bükülmeyi önler. Bu tertibatların etkin olarak kullanılması, bükülmeyi önleyerek kaynağın ve parçalarının konumlanmasını sağlar kaynak hızını artırır (Anık, 1980).

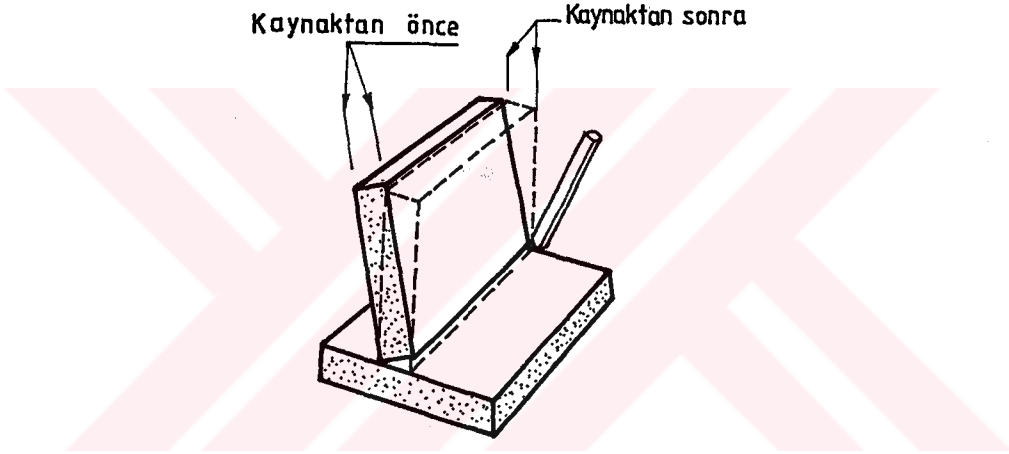
### 3.2.5. Enine kirişler

Enine kirişler, çarpılma dayanımını arttırmak amacıyla kaynak işlemi esnasında geçici bir süre için kullanılan destek lamalarıdır. Bu lamalar kaynak tamamlandıktan ve soğuduktan sonra alınır. Bu metod gemi yapımında ve diğer geniş yapılarda kullanılır.



Kaynak öncesi :  $x$   
 Kaynak sonrası :  $x-x_i$

Şekil 3.4. Kaynak işleminden önce, çarpılmayı önlemek için parçaların konumlanması (Raymond, 1990).

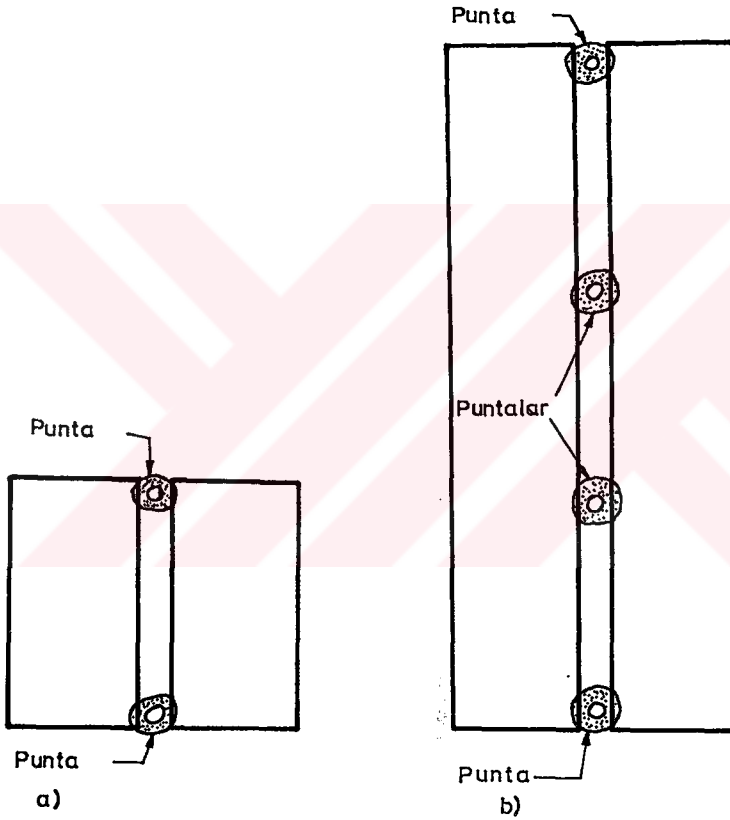


Şekil 3.5. T birleştirmenin  $90^\circ$  den kaçık (eğik) olarak konumlanması. Kaynakta meydana gelen çekme plakayı dik duruma getirecektir (Ertürk, 1989)

### 3.3. Kaynak Esnasında Çekme ve Çarpılmanın Kontrol Altına Alınması

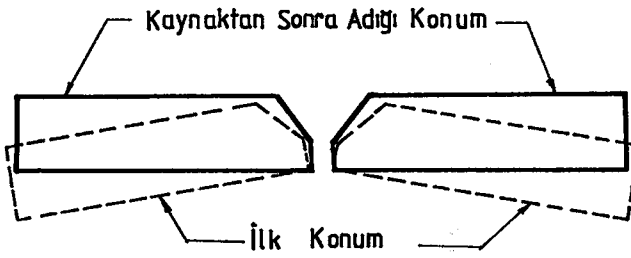
Düz kaynakla birleştirilen plakaların kaynak işlemi esnasında hareket sertbestliği varsa, kaynak yapılan parçanın soğumasına bağlı olarak, ortaya çıkan çekmeyle plakalar kaynak yapılan kısmın karşı tarafında birbirlerine doğru hareket edeceklerdir (Bkz ş. 2.15). Bu şekilde ortaya çıkan çapraz çekmeler kolaylıkla önlenemez. Bu amaçla çekilebilecek kaynak dikişi kısa ise kaynağa başlanan uçun karşı tarafı puntalanabilir (şekil 3.6.a). kaynak dikişi uzun ise puntalama birkaç yerden yapılmalıdır (şekil 3.6.b). Punta

kaynaklarının arası ve hacmi plaka kalınlığına ve kaynak ağızı tasarımına bağlıdır. yapılan puntalar genellikle parça kalınlığının iki katı uzunlukta ve 200 ile 300 mm aralıklarla tekrarlanmalı. Uzun dikişler tespit araçları ve kamalar yardımı ile kontrol altına alınabilir. Kama kaynak işlemi esnasında kaynak dikişi boyunca ilerletilir. Tespit araçları ise plakaları aynı düzlemde tutmaya yarar.



Şekil 3.6. Kısa ve uzun kaynak dikişi için puntalama, punta sayısı kaynak dikiş uzunluğuna bağlıdır (Raymond, 1990).

Gerilme ve çekmeyi kontrol altına almanın diğer bir yoluda parçaların önceden konumlanarak kontrol altına alınmasıdır. Bu yöntemde parçaların konumlanması dikiş uzunluğu, plaka kalınlığı ve kaynak hızı gibi bir takım değişkenlere bağlıdır (şekil 3.7).



Şekil 3.7. Kaynak sonrası konuma göre önceden konumlanmış parçalar  
(Gourd, 1986; TS. 563 - TS. 7706 - TS. 5618).

Açısal çarpımların önlenmesinde, sınırlandırılmış montaj metodu kolay uygulanabilirliği nedeniyle tercih edilen metottur. Sınırlandırma işlemi, işkencelerle, bağlama düzenekleriyle veya basitçe uygun puntalarla yapılabilir. Bu durumda ortaya çıkan yüksek kalıntı gerilmeleri ve çatlama riski, uygun kaynak sırası ve kalın kesitlere ön ısıtma uygulayarak çoğunlukla azaltılabilir. Kaynaklı yapının arzu edilen özellikte olması kalıntı gerilmelerinin giderilmesine, kaynak işleminden sonra ısıtma işleminin uygulanmış olmasına bağlıdır. Kaynaklı yapının tamamen sınırlandırılması kaynaklı yapıda istenilmeyen durumlara neden olabilir, ancak bir yönden sınırlayarak diğer yöndeki hareketine izin verilmesi durumunda etkilerin büyük çoğunluğu genellikle kontrol altına alınabilir. Bununla ilgili bir örnek şekil 3.8'de gösterilmektedir, burada bir V alın kaynağındaki açısal distorsiyonu önlerken enine çekmeye izin veren işkence düzeneği tasarlanmıştır (American Welding Society, 1981).

Taşıyıcı kirişlerin kaynak işleminde, yatay konumdaki parçaya önceden plastik şekil değiştirilerek şekil verildiğinde, kaynak işlemi sonunda meydana gelecek olan açısal çarpılma dengelenmiş olur (Şekil, 3.9). Verilecek bu sehimin aşağıdaki formül ile hesaplanır (Anık, 1980).

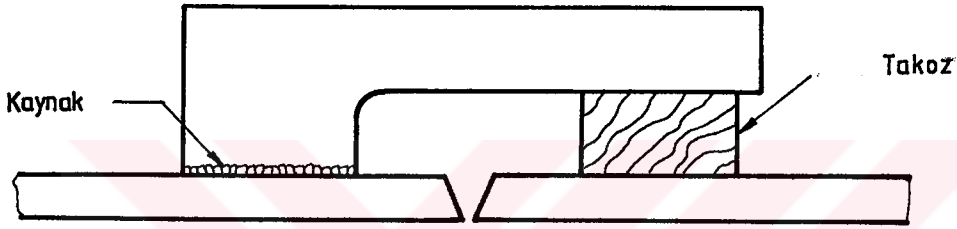
$$C = \frac{a \cdot b}{30 \cdot s}$$

c= Sehım miktarı (mm)

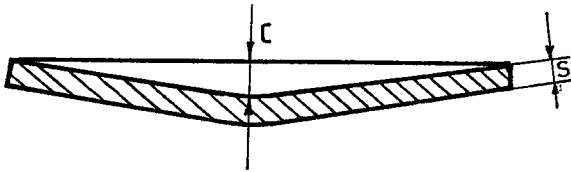
a= Dikişin yüksekliği (mm)

b= Yatay levhanın genişliği (mm)

s= sac (levha) kalınlığı (mm)

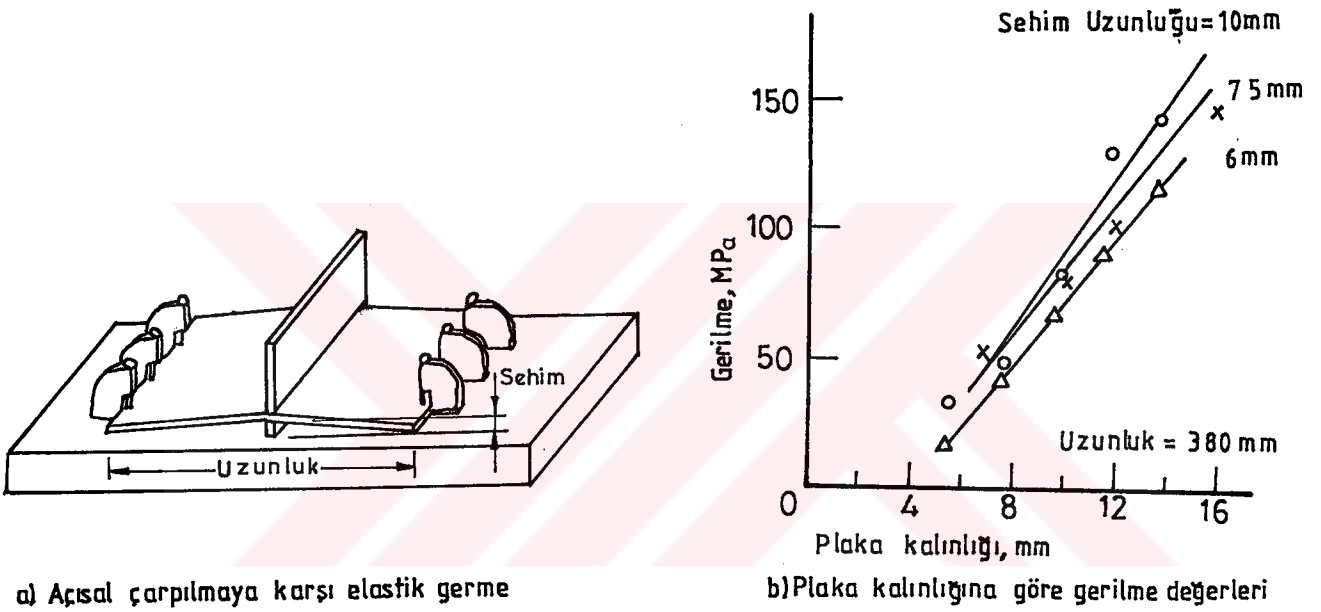


Şekil 3.8. Enine çekmeye olanak verirken açısıl distorsiyonu önlemek için hazırlanmış kenetleme düzeneği (American Welding Society, 1981).



Şekil 3.9. Taşıyıcı kirişlerde yatay parçaya önceden verilen sehım miktarı (Anık, 1980).

Elastik olarak önceden germe metodunda alt plaka, şekil 3.10.a'da gösterildiği gibi elastik olarak gerildikten sonra kirişlerin kaynağı yapılır. Tespit araçları çözüldüğünde açısal değişimler bu metod yardımı ile önemli oranda azaltılabilir. Şekil 3.10.a'daki numunelerle yapılan deneylerden alınan sonuçlar şekil 3.10.b'de gösterilmiştir. Bu diyagramdaki veriler, sıfır değerinde açısal değişim elde etmek için, plaka yüzeyinde olması gereken gerilimlerin değerlerini vermektedir (American Welding Society, 1981).

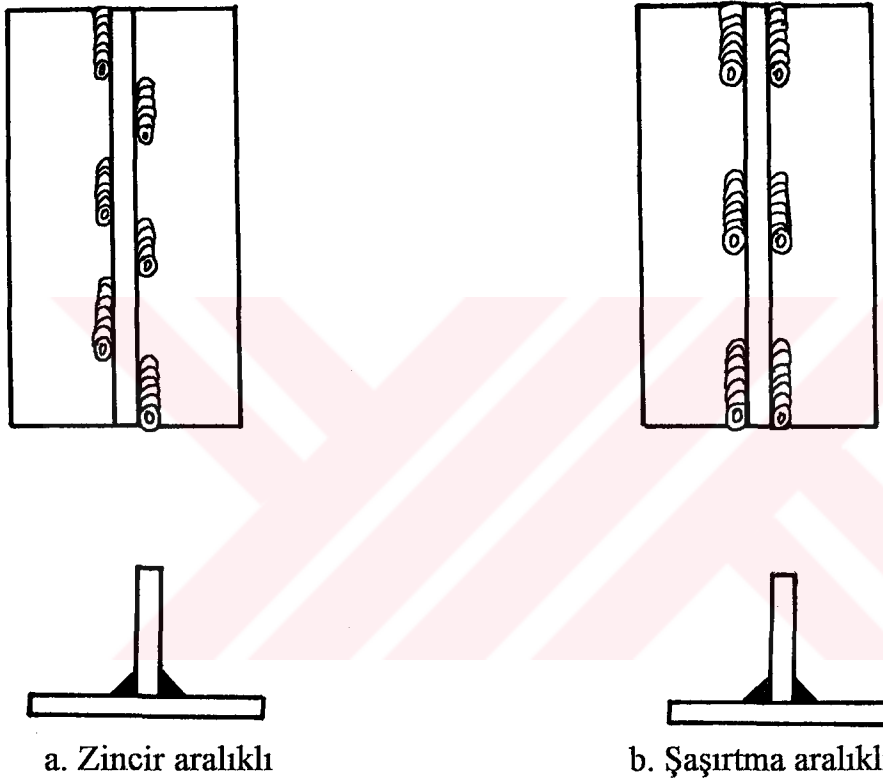


Şekil 3.10. Açısal değişimin elastik germe ile azaltılması (American Welding Society).

### 3.3.1. Kaynak sırasının planlamasıyla çekme ve çarpılmaların önlenmesi

Farklı noktalarda kaynak yapmaya olanak veren sıra atlamalı kaynak yöntemi olarak isimlendirilen kaynak yöntemiyle, kaynaklar arasında mesafe bırakmak suretiyle çarpılma miktarı azaltılabilir. Bir taraftaki kaynağın oluşturduğu çekilme diğer taraftaki kaynak nedeniyle oluşan çekilmeyle karşılanır ve dengelenir. Bu dengelenme şekil 3.11. a'da gösterilen aralıklı metod kaynaklarının veya şekil 3.11.b'de gösterilen şaşırtma aralıklı doldurma

kaynaklarının uygulanmasıyla sağlanır. Eğer istenilen kaynak sürekli kaynak ise kaynatılmayan kısımlar aynı sırayla kaynatılmalıdır. Gerilimleri dağıtmak veya toplanmalarını önlemek için geriye doğru adım adım ilerleyen kaynak yöntemi kullanılabilir. Bu yöntemde kaynak işlemi kesik adımlarla ve uygun yönde ilerlemeyle yapılır. Bu kaynak yönteminde kaynağın genel



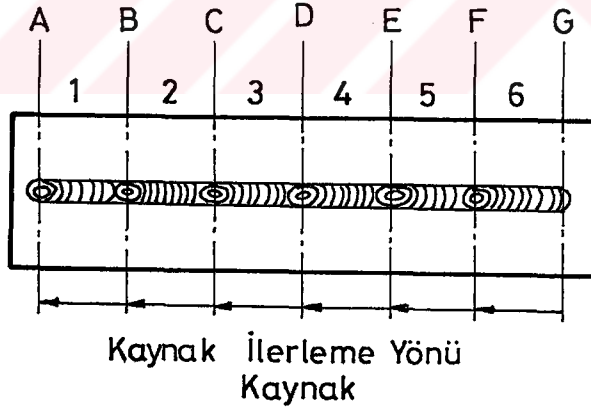
Şekil 3.11. Doldurma kaynaklarının düzenlenmesi (Raymond, 1990).

ilerleme yönü soldan sağdır, ancak her adımın ilerleme yönü sağdan soladır. Bu kaynak metodunun kullanılması belirli bir bölgede yoğunlaşam gerilimleri ve bükülmeyi azaltır (şekil 3.12).

Geriye doğru adım adım ara atlayarak yapılacak kaynak yöntemiyle çarpılma minimum düzeyde tutulabilir. Şekil 3.13.'de bu yöntemin işlem sırası görülmektedir. Kaynağın yönü geriye doğru adım adım ilerleyen kaynak yöntemi ile aynıdır. Ancak, kısa adımlı kaynaklar birbirini takip eden bir sırayla

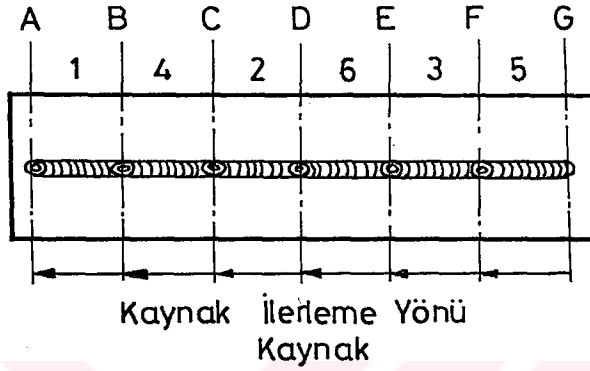
yapılmaz. Kaynak adımlarından biri birleştirmenin başlangıcına yapılır, bir adım atlanarak parçanın ortasına yakın bir kısmına ikincisi uygulanır. Daha sonra üçüncüsü yine arada, bir boşluk bırakılarak dahada ileriye uygulanır. Kaynak dikiş sonuna ulaştığında, tekrar başa dönülür ve kaynatılmayan kısımlar tamamlanır (Gourd, 1986).

Dengelenmiş bir kaynak işleminde yapının her iki tarafında eşit sayıda operatörün aynı anda karşılıklı kaynak yapmasıyla gerilimler dengelenir. Yukarıda değinilen geriye doğru adım adım ilerleyen kaynak yöntemi ve geriye doğru adım adım sıra atlayarak yapılan kaynak yöntemi ile dengelenmiş kaynak yöntemlerinin tamamı, geniş kaynaklı bağlantıların imalatına olanak verir. Böylece işlemdeki tahdit ve ısınan bölgedeki ısı düşüşünün neden olduğu çarpılma aza indirilir (Gourd, 1986).



B den A ya    E den D ye  
C den B ye    F den E ye  
D den C ye    G den F ye

Şekil 3.12. Geriye doğru adım adım ilerleyen kaynak yönteminde kaynak aralığı ve işlem örneği (Gourd, 1986).

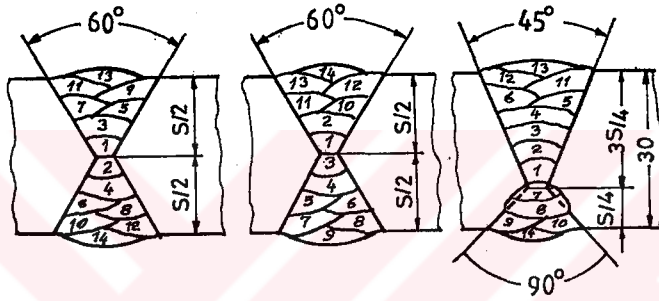


B den A ya C den B ye  
D den C ye G den F ye  
F de E ye E den D ye

Şekil 3.13. Geriye doğru adım adım sıra atlayarak ilerleyen kaynak yönteminde kaynak aralığı ve işlem örneği (Gourd, 1986).

Kalın plakalar düz kaynakla birleştirilirken plakaların oluşacak açısız distorsiyona ters yönde konumlanması, distorsiyonun çoğunu yapıdan uzaklaştıracaktır. Kaynak çekmesinin bir sonucu olarak plakalar kaynak esnasında ilk konumlarından saparak birbirlerine doğru hareket ederler. Bununla birlikte kaynağı yapılacak kalın kesitler yapıyla bütünlük halinde ise konumlanmanın yapılması söz konusu değildir. Çünkü kaynak metalinin çekilmesiyle oluşacak açısız hareket, birleştirmenin kaynak kökünden yırtılmasına neden olabilir. Bu mahsurları nedeniyle büyük kesitli plakalar imkan olduğu müddetçe her iki taraftan kaynak edilmelidir. Birleştirmeler her iki tarafta aynı hacimde kaynak metali gerektirecek tarzda tasarlanmalı ve

dengelenmiş kaynak tekniği kullanılmalıdır. Kaynağı her iki tarafa dengeli olarak yapmanın, açısal distorsiyonun kontrolü üzerinde olumlu etkisi vardır. Ancak kaynak düz' konumda yapılıyor ise, iş parçası herhangi bir şekilde sabitlenmeksizin her iki tarafından değiştirilerek kaynak edilmelidir (şekil 3.14). Birleştirme tasarımında kaynak ağız açısı, kök penetrasyonuna ve pasoları uygulamaya imkan veren ulaşılabilirliği mümkün kılan minimum değerde olmalıdır (Anık, 1980).

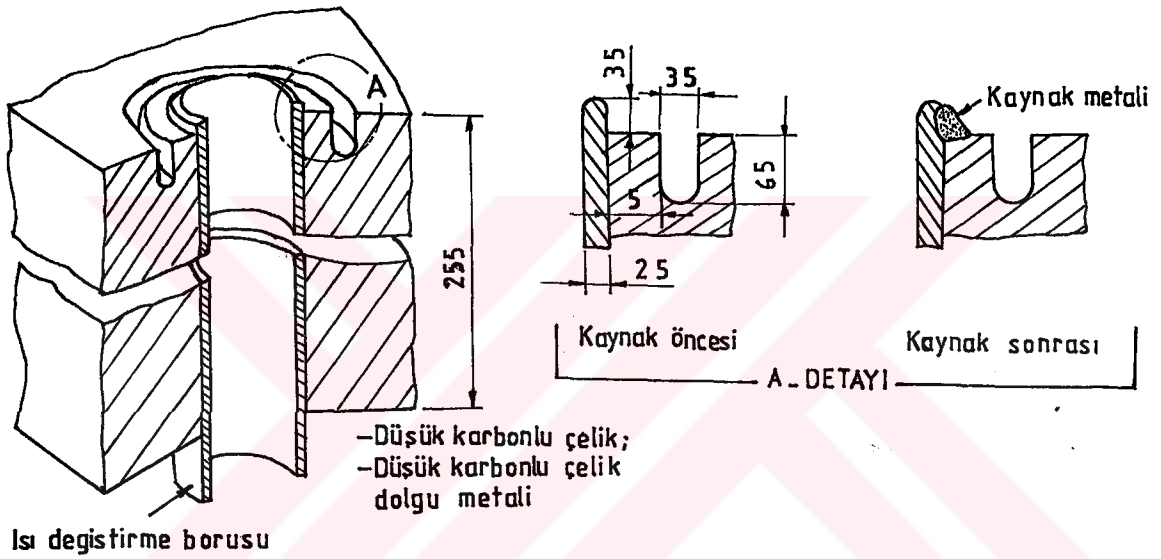


Şekil 3.14. X alın birleştirmelerinde distorsiyona karşı tavsiye edilen kaynak sıraları (Anık, 1980)

### 3.3.2. Kesit kalınlığı eşit olmayan parçaların kaynağı

Diğer kaynak işlemlerinde olduğu gibi, örtülü metal ark kaynağında da, eğer, kaynak edilecek parçalar arasında büyük bir ısı alma farkı var ise (ısı yayma kapasitelerindeki fark) özel tekniklere gerek duyulur. İnce bir kesit kalınlığı ile kalın bir kesit kalınlığına sahip bir eleman birleştirileceğinde, kalın kesitte yeterli penetrasyon için gerekli kaynak akımı bazen ince kesite sahip eleman için oldukça fazladır ve bu durum ince elemanda kaynak altı kesilmesine ve zayıf bir kaynağın oluşmasına neden olur. Eğer ince kesitli elemana uygun kaynak akımı kullanılırsa akımın miktarı, kalın kesitli elemanda uygun füzyon için yeterli olmaz ve sonuçta kaynak dayanım zayıf olur.

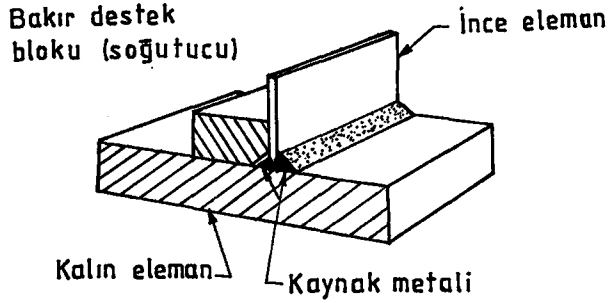
Eşit olmayan kesit kalınlığına sahip parçaları içeren bir uygulama 2.5 mm cidar kalınlığına sahip ısı değiştirme borularının, 255 mm kalınlığındaki boru plakalarına kaynatılmasıdır. Burada kullanılabilcek metod, plakanın üst yüzeyinde boru çevresinde 6.5 mm derinliğinde dairesel bir kanal açmaktadır (Şekil 3.15). Isı transferinin sınırlanmasıyla, açılan bu kanal ince cidarlı boru ile levha arasındaki ısı dağılım farkını minimize eder.



Şekil 3.15. Kanal açılmış boru plakası kaynak esnasında boruyla arasındaki ısı farkını minimize eder (American Society For Metal, 1990).

Daha geniş bir alanda uygulanabilecek, ısı farklarını minimize edecek başka bir yöntem ise ince elemanın bakır bir destek bloku ile desteklemesidir (Şekil 3.16). Blok ince eleman için soğutucu veya ısı emicisi görev görür. Bloğun bir kenarına pah açmak suretiyle, ince elemanın her iki tarafına yapılan doldurma kaynaklarıyla kullanılabilir. Isıyı gerektiği gibi dağıtmak amacıyla değişik şekil ve büyüklükte destek blokları yapılmıştır. Bazı uygulamalar optimum destek yerleşimi ve tasarımı gerektirir. Eşit olmayan kesitlere sahip parçalarda, eşit ısı ve ısı dağılımı sağlamanın başka bir yolu, elemanlardan

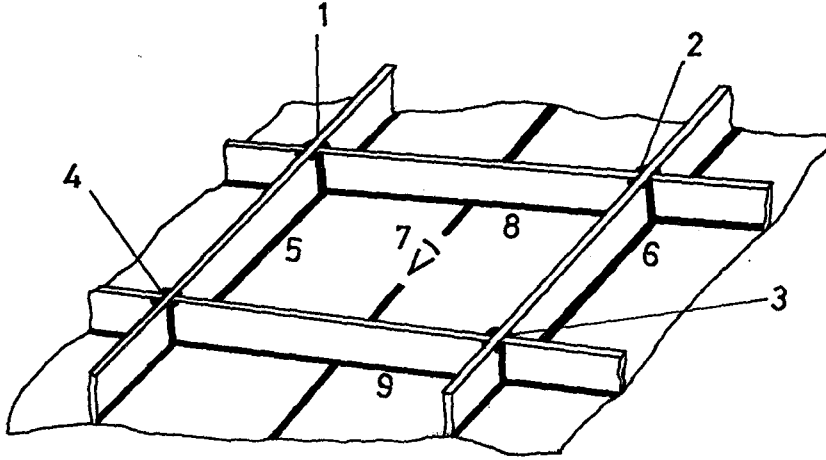
kalın olanının kaynak edilecek kenarının çekiçlenerek uygun kalınlığa getirilmesidir.



Şekil 3.16. Bir bakır bloğunun soğutucu olarak kullanılması, ısı dağılım farkını minimize eder (American Society For Metal, 1990)

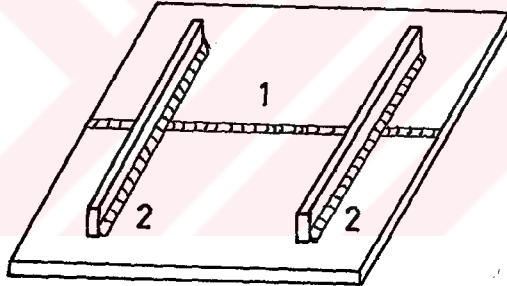
### 3.3.3. İnce kesitli plakalarda çekme ve çarpılmaları azaltma önlemleri

Elektriksel verilerin küçültülmesi, kaynak hızının yükseltilmesi ve parçanın altına ısıyı iyi ileten bir parçanın konulması meydana gelebilecek çarpılmayı azaltılacaktır. Kaynak sırası ve puntalama ile meydana gelebilecek çarpılma arasında büyük bir bağlantı vardır. Yapıda düzgün olmayan soğuma nedeniyle, kaynak işlemi esnasında bünyede meydana gelmiş olan ısıl gerilmeler konstrüksiyonda basma (tepki) kuvvetleri oluşturur. Konstrüksiyonun rijitliğine göre, bu basma kuvvetleri yapıda bir takım çarpılmalar veya kabarmalar meydana getirir. Düzgün olmayan haller çarpılmaya karşı rijitliği düşürür. Bunu önlemek için de ince sac konstrüksiyonlarında burkulma mukavemetini yükseltecek bazı takvileyer konur (Şekil 3.17). Düşük derecedeki bir rijitlik, soğuma sırasında büyük çarpılmalara neden olur.



Şekil 3.17. İnce bir sac konstrüksiyonunun takviyelerle tespiti (Anık, 1991).

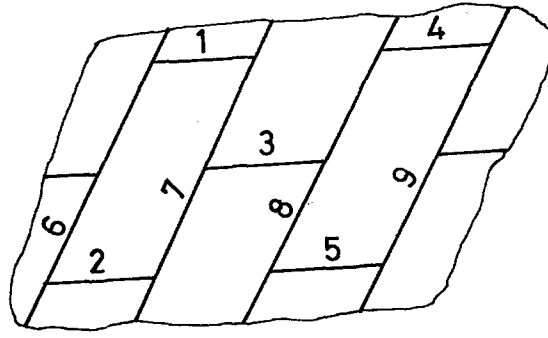
İnce sacların takviye edilmelerinde önce alın dikişi kaynatılır. Daha sonra köşe dikişleri kaynatılır. ( Şekil 3.18 )



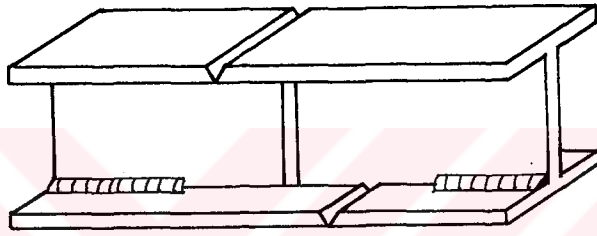
Şekil 3.18. İnce sac plakaların takviye edilmesi ( O.D.T.Ü Kaynak teknolojisi Birimi, 1992 )

Sac alanlarının kaynağında önce işlem sırasındaki yan dikişler 1'den 5'e kadar kaynatılır. Daha sonra 6'dan 9'a kadar olan uzun dikişler ortadan başlayıp kenarlara doğru kaynatılır. ( Şekil 3.19 )

Kaynaklı plaka kirişlerinin alın birleştirmesinde ilk önce enine büzülme ihtimali olan üst plakalar kaynatılır. Daha sonra destek plakası kaynatılır. En son olarak ise köşe dikişleri kaynatılır. ( Şekil 3.20)

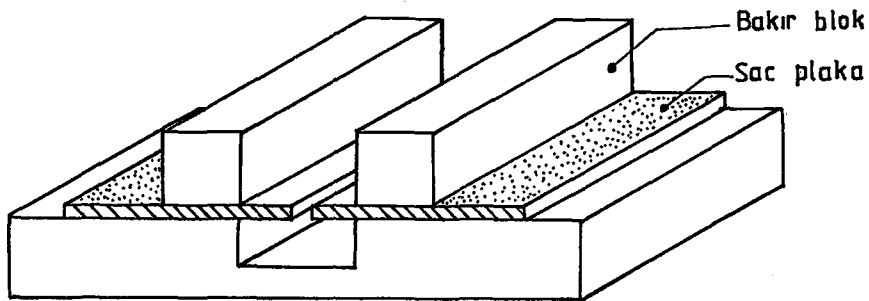


Şekil 3-19 Sac alanları kaynağında işlem sırası (O.D.T.Ü Kaynak Teknolojisi Birimi 1992 )



Şekil 3.20 Sac alanları kaynağında işlem sırası (O.D.T.Ü Kaynak Teknolojisi Birimi 1992 )

İnce plakalarda kaynak işlemi sonrası meydana gelebilecek dalgalanmaları azaltmak maksadıyla bakır bloklar şekil 3.21'de gösterdiği tarzda kullanılarak kaynak işlemiyle oluşan ısı miktarı sac plakalardan emilir. Dolayısıyla ile sac plakalardaki dalgalanma azaltılmış olacaktır.



Şekil 3.21. İnce plakaların kaynağında dalgalanmalara karşı bakır blokların kullanılması

### 3.4. Kaynak İşlemi Sonrası Çekme ve Çarpılmaları Azaltma Önlemleri

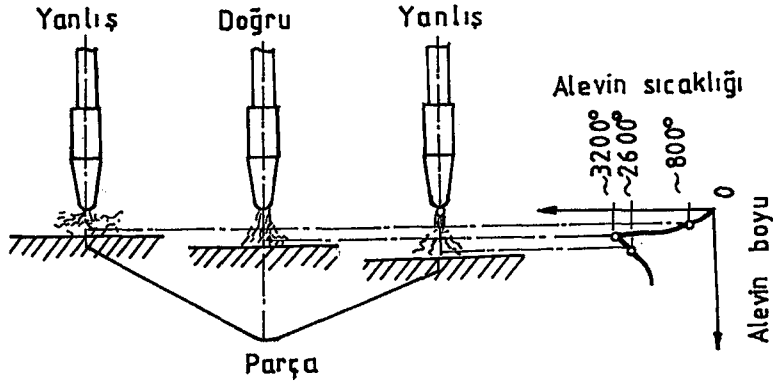
#### 3.4.1. Alevle Düzeltme

Kaynak işlemi sonrasında kaynaklı yapılardaki çekme ve çarpılmaları gidermek için en çok kullanılan işlem, alevle yapılan düzeltme işlemidir.

Tavlama işleminde kullanılan alev hafif, asetileni fazla bir karakter taşımalı. Tavlama esnasındaki mesafe 5 mm. kadar tutularak, parça düzgün şekilde tavllanır ( Şekil 3.22 ). Tavlama sıcaklığı 650 ile 850°C arasında bulunmalı ve aşağıda sıralanan faktörlere dikkat edilmelidir.

- Kaynaklı yapı 200 ile 350°C sıcaklıkları arasında, kırılma ve çatlama tehlikesi olduğundan çekiçle vurularak doğrultulmamalıdır.
- 850°C ' nin üzerinde bir sıcaklıkla yapılacak tavlama işlemi sonucu yapıda istenmeyen iç yapı dönüşümleri meydana gelir.
- Aşırı tavlamadan kaçınılmalı aksi taktirde yapıda martenzitik bir iç yapı oluşur.
- Tavlanan kısımların sıcaklığı, sıcaklık tespit araçları ile kontrol altında tutulmalıdır.
- Çalışılan çevre koşullarında sıcaklık -5°C 'nin altında ise doğrultma ve düzeltme işlemi yapılmamalıdır, çünkü gevrekleşme artar.
- Doğrutma amacıyla tavlancak kısmın büyüklüğü, düzeltilecek parçanın kalınlığına ve uygulanacak yönteme bağlıdır.

Tavlama alanının geniş tutulması, yapı malzemesinin akma kabiliyetini kaybetmesine neden olur. Tavlama işlemi yapıda meydana gelen çarpılmanın maksimum olduğu bölgenin dış kısmına ve tespit edilen sıcaklık sınırları



Şekil 3.22 Alevin çekirdeği ile parça arasındaki mesafenin yanlış ve doğru konumları ( Anık, 1991 )

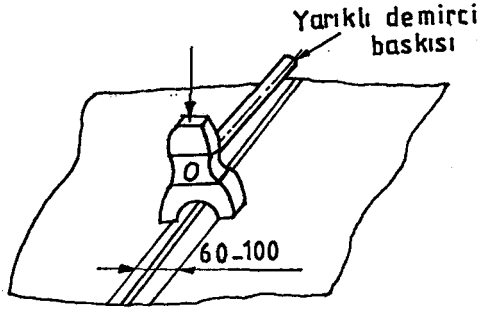
arasında kalacak şekilde yapılmalıdır. Tavlama işlemi uygun şekilde yapıldığında parçada büyük iç gerilmeler meydana gelmez ve düzeltmede hassasiyetini kaybetmez (Anık, 1991).

Düzeltilme etkisi ( yığılma ) tavlama sonrası, soğuma esnasında meydana gelir. Hareket serbestisi olan yapı tavlama esnasındaki genişleme miktarının iki misli kadar kendisini çeker. Kendini çekme etkisi tavlama bölgesinin tarafsız eksene olan uzaklığı ile değişir. Tavlama işleminde yapı elemanı rijit bir şekilde tesbit edilmek suretiyle doğrultma etkisi artırılabilir. Bu doğrultma etkisinin artışı, yapının tespit şekline ve tavlama malzemesinin yükselen yığılma miktarına bağlıdır. Ayrıca sertleşme eğilimi olmayan malzemelerde, tavlama kısmı basınçlı hava ile ani olarak soğutmak suretiyle kendini çekme etkisini arttırmak mümkündür. (Anık, 1991).

Kaynak dikişlerinin zorlamaya maruz kalan kısımları hiçbir zaman dinamik (darbeli) bir düzeltme işlemine maruz kalmamalıdır. Doğrultma işlemi kurallarına uygun olarak tavlama parçalarına çekme ve basma gerilmesi uygulayan aletlerle yapılmalıdır. (Şekil 3.23)

Kök pasoları ters tarafından, işlenerek kaynak yapılmamış olan "V" ve "I" birleştirmelerine, çentik tesiri dolayısıyla ile doğrultma işlemi

uygulanmamalıdır. Çekme etkisini arttırmak maksadiyle parçaların suya sokularak soğutulmasından kaçınılmalıdır.



Şekil 3.23. Bir kaynak dikişinin yarıklı demirci baskısı ile düzeltilmesi (Anık, 1991)

Fazla miktarda çarpılan ve distorsiyona uğrayan parçaları alevle değil mekanik olarak düzeltilmesi gerekir. Bazı durumlarda ise çarpılmaya neden olan kaynak yerlerinin kesilerek düzeltildikten sonra uygun yöntemle kaynak edilmesi gerekir. Böyle bir yöntem kaynak mühendisi veya sorumlu mühendisin onayı alındıktan sonra yapılmalıdır.


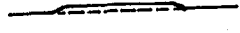

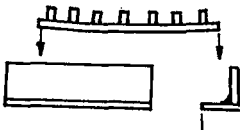


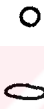




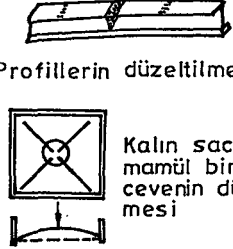
Değişik kaynaklı konstrüksiyonlara uygulanan farklı alevle düzeltme yöntemleri şekil 3.24 de birarada verilmiştir. (O.D.T.Ü. Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992)

### 3.4.2. Mekanik Düzeltme

Fazla miktarda meydana gelen çekme ve çarpılmalar mekanik düzeltme gerektirir. Çok eksenli olarak çarpılmış bir parça önce bir eksen sonrada diğer eksen boyunca doğrultma işlemine tabi tutulur. Doğrultma işlemi:

- 3 mm. kalınlığa kadar saclar için tokmak
- Tahta altlıklı çekiç
- Altlıklı balyaz

- Profiller ve kirişler için basit aletler. (Bağlama civataları, kamalar, vinç, el mengeneleri) yardımı ile yapılır.

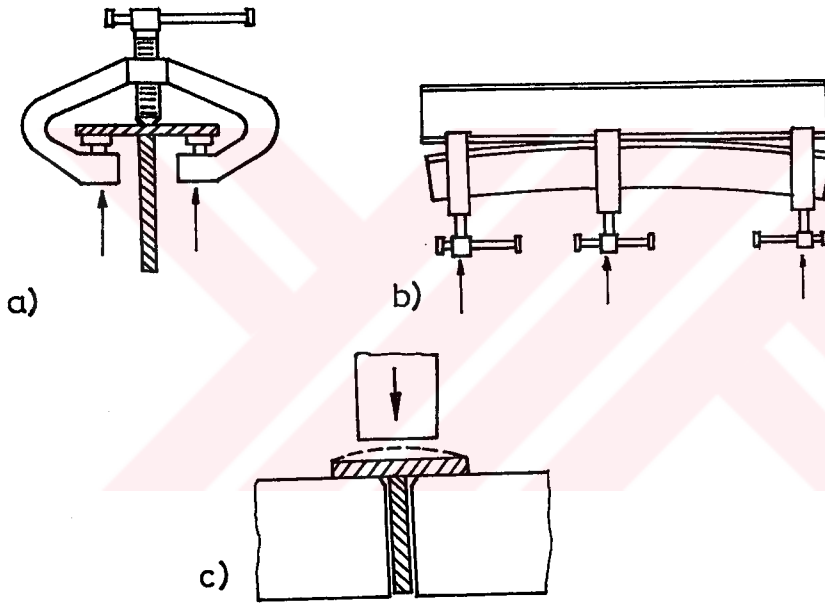
Yöntemin Adı	Tavlama Şekli	Kullanıldığı Yerler
Noktalama Yöntemi		 Sacların düzeltilmesi
Isı Yolu 1.Yanyana Noktalama Yöntemi 2 Çizgisel Yöntem		 Tek taraftan kaynak yapılmış parçaların düzeltilmesi
Zikzak Yöntemi		 Her tarafından tespit edilmiş bir sac çerçevesinin düzeltilmesi
Isı Çemberi Isı Elipsi		 Boru bağlantılarının düzeltilmesi
Isı Kaması		 Profillerin düzeltilmesi Sac kenarlarının düzeltilmesi
Kombine Yöntem 1-Isı Yolu ve Isı Kaması 2-Isı Haçı ve Isı Çemberi		 Profillerin düzeltilmesi Kalın sacdan mamül bir çerçevesinin düzeltilmesi

Şekil 3.24. Kaynaklı konstrüksiyonlara uygulanan farklı alevle düzeltme yöntemleri (O.D.T.Ü. Kaynak Teknolojisi Birimi, 1992).

Darbeli çalışan aletlerle çalışılırken tatbik edilen kuvvetin düzeltilen parça üzerinde fazla bir ezilme veya iz bırakmayacak tarzda ayarlanmalı. 20 mm. den küçük kabarıklıklar, mekanik bir etki olmadan ısı noktalar veya ısı yolu ile giderilmelidir. 20 mm. den büyük kabarıklıklarda ısı noktalar ve

mekanik vasıtalarla doğrultulur. T profilleri basınç gerilmesi tatbik eden aletlerle, tespit araçlarıyla veya presle düzeltilir ( şekil 3.25).

Büyük miktarda distorsiyona uğramış kaynaklı yapının hareket edebilme serbestisi varsa bu yapı, yeterli büyüklükteki bir preste düzeltilebilir. Preste düzeltme işlemiyle birlikte ısıtma duruma göre gerekli olabilir (Anık, 1991).



- T profilinin bir basınç gerilmesi tatbik eden aletle doğrultulması.
- T profilinin tespit tertibatları ile doğrultulması.
- T profilinin preste düzeltilmesi.

Şekil 3.25 Distorsiyona uğramış elemanların mekanik yöntemle düzeltilmesi

( Anık, 1991)

### 3.4.3. Kaynağı tamamlanmış yapıların komple ısıtma işlemi

Kolonlar ve büyük yatay basınçlı kapların gövde eklerinin bölgesel ısıtma işlemi yapılabildiği gibi, bazı durumlarda bu büyük yapıların etrafına montaj

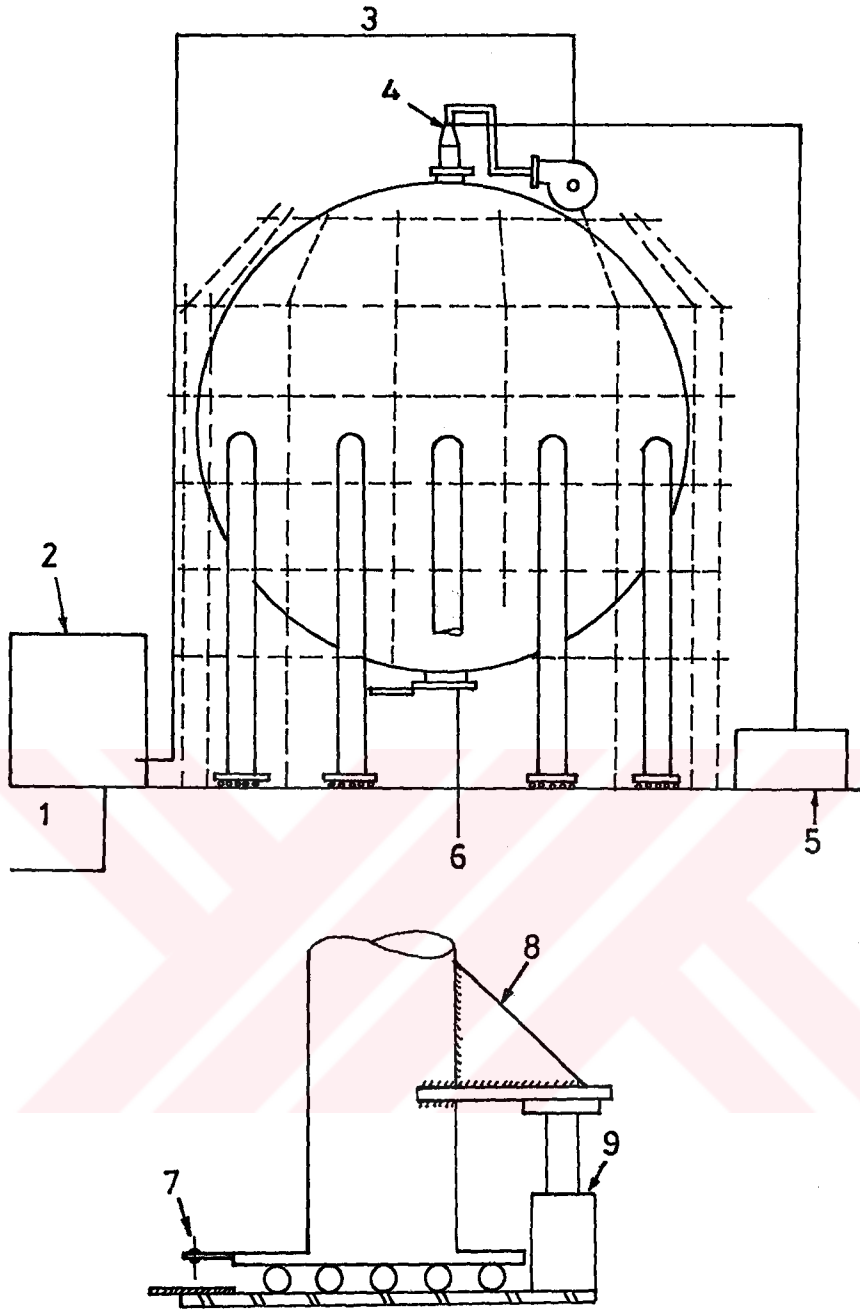
yerinde geçici bir fırın yaparak komple gerilim giderme işlemine tabi tutulması da mümkündür. Ayrıca bu kapları dış kısmından yalıtıp içerden ısıtarak gerilim giderme işlemi yapılabilir. Büyük silindirik depolama tankları ve küresel tanklar için de bu işlem tavsiye edilir (şekil 3.26 ). Bu tür büyük çaplı yapılarda ısı genleşme ve soğuma esnasında meydana gelen çekmeyi sağlamak amacıyla tank tabanı veya küre ayakları altına kızak veya makaralar yerleştirilmektedir. Yapı çeliklerinin gerilim giderme esnasındaki akma limiti normal çevre sıcaklığındaki akma limitinin yedide biri kadar olması dolayısıyla gerek boş ağırlıklar, gerekse rüzgar yükleri ve genleşme-çekme etkileri önemli olmaktadır. Bu nedenle özel desteklere gereksinim duyulabilir. Ancak yüksek hızlı yakıcılar ve hafif pozitif bir basınç sağlayarak yapıların bozulmaması sağlanabilir.

Kaynağı tamamlanmış yapıların ısı işlemlerinde gerilim giderme çatlaması gibi istenilmeyen mahzurlu durumların önlenmesi için, gerilim giderme işlemine tabi tutulacak parçaların malzeme özellikleri ve daha önce tabi tutuldukları ısı işlemler bilinmeli ve gerilim giderme yöntemi dikkatle seçilip uygulanmalıdır ( Macun, 1983 ).

### **3.5. Desteklenmiş (Berkıştirilmiş) Ringlerdeki Distorsiyonların**

#### **Modellenmesi**

Kaynak işlemi tersanede kullanılan temel birleştirme işlemi olmasının yanı sıra perçinleme gibi diğer birleştirmelere nazaran bir çok avantajı vardır. Bu avantajlar; kaynaklı birleştirmenin yüksek verimliliği, küçük ve çok büyük yapılara kolayca ve çabuk (hızlı) uygulanabilirliği, su ve hava ortamında kullanılabilirlik kabiliyeti v.b. dir. Kaynağın bu gibi birçok avantajının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlardan en dikkat edilmesi gerekenler, etkin termal bölgeler nedeniyle kaynaklı yapıda meydana gelen distorsiyonlar ve kalıntı gerilmeleridir. Bu problemleri tümünden ortadan kaldırmak veya tam olarak



Şekil 3.26. Bir küre tankının gerilim giderme düzenegi.(1) şebeke bağlantısı (2) kontrol odası, (3) fan için elektrik bağlantısı (4) yüksek hızlı yakıcı (5) propan tankı (6) küre çıkışı (7) genişleme göstergesi (8) ayaklara kaynatılmış kaldırma kulakları, (9) hidrolik kriko ( Macun, 1983)

kontrol altına almak henüz mümkün olmamıştır. Bölgesel olarak ısıdan etkilenen bölgenin genişleme ve çekilmesi olayı yapının geriye kalan kısmının mekanik özelliklerinin neden olduğu, yüksek basınç etkisiyle yapının, kırılma ve bükülmelere karşı dayanımını da düşürür.

Kaynak işlemleri yapı mekaniğinde lineer olmayan en önemli olaylardan biridir. Termal etki nedeniyle sadece mekanik özelliklerde değil, termal davranışın kendisinde değişir. Termal ve mekanik işlemler birbirlerinden ayrı olarak analiz edilebilir, böylece bu iki işlemin birbirlerinden ayrılması simülasyon işlemindeki zorlukları minimuma düşürür. Literatürdeki bu ayırım iki kısımda incelenmiştir: Isı kondüksiyonunu inceleyen literatür ve gerilme-uzamayı inceleyen literatür. Isı kondüksiyonu ile ilgili kısım için çözümler geliştirilmiştir, ancak gerilme-uzama için daha çok araştırma gerekmektedir.

60 lı yılların sonu ve 70 li yılların başında kaynak işlemleri esnasında yapısal davranış üzerine yapılan araştırmalar deneysel çalışmalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Borulardaki kaynaklarda distorsiyon ve kalıntı gerilimi/ uzama üzerinde bazı nümerik ve deneysel ölçümler verilmiştir. ( Makhnenko, et.al,1994)

Dijital kompütörlerin yaygın olarak kullanılmasıyla ve belirli şekil yöntemi (Finite element metodu = FEM)' nin geliştirilmesiyle, bu kaynak işleminin nümerik simülasyonuna dönüşmüştür.

Özellikle silindirik yapılardaki distorsiyonların anlaşılmasına ve bunların simülasyonuna her zamankinden daha çok ihtiyaç duyulmaktadır. Burada, sınırlandırılmamış silindirik bir yapının kaynağında meydana gelecek radyal distorsiyonun, temel prensipleri kullanılarak hesaplanması üzerinde durulacaktır. Burada verilen model distorsiyonu etkileyen değişik faktörlerin tamamını araştırmaya olanak verir. Diğer karmaşık kaynak işlemlerinde geçerli basit distorsiyon simülasyon modelleri benzer şekilde geliştirilebilir. basit modelden elde edilen sonuçlar, belirli şekil metodunu (FEM) kullanılarak elde edilen sonuçlarla mükemmel bir uyum içerisindedir (Habil, et al.,1988; Moshaiav, et al., 1991).

### 3.5.1. Kaynağı yapılmış ring desteği simülasyonu

Denizaltı gibi deniz araçlarının gövdeleri genellikle berkiştirilmiş silindirik şekilli hücrelerin konstrüksiyonlarıyla elde edilir. Bu konstrüksiyonlarda, distorsiyon nedeniyle mümkün olmasada mükemmel bir daireselliğin elde edilmesi istenir. Berkiştiriciler (destekler) genellikle birlikte kaynatıldıktan sonra ana gövdeye bağlanır. Bu tür yapıların kaynağında meydana gelen aksenal yöndeki kalıntı çekmelerinin hesabında kullanılacak basit bir model verilecektir.

Şekil 3.27'de gösterildiği gibi kaynaklı yapı iki kısımdan oluşur. Birbirine kaynatılmış bir flanş ve bir giriş. Kaynak işlemi esnasında, yapıda kompleks mekanik ve termal davranışlar meydana gelir. İlk önce çevresi boyunca sınırlanan kısımlarda kaynak pasosunun yakınındaki ısıdan etkilenen alanda bir genişleme (yayılma) ve ısıtma işlemi tamamlandığında ısıtılan alanlarda çekme meydana gelir. İşlem tamamlandığında yapıda; düzgün olmayan sıcaklık alanlarının plastiklik özelliği etkilemesi, yapının sınırlandırılmasının neden olduğu etkiler, ve ısıtma ve soğuma işlemi esnasında meydana gelen malzeme özelliklerindeki değişimler nedeniyle önemli distorsiyonlar ve kalıntı gerilimleri oluşacaktır.

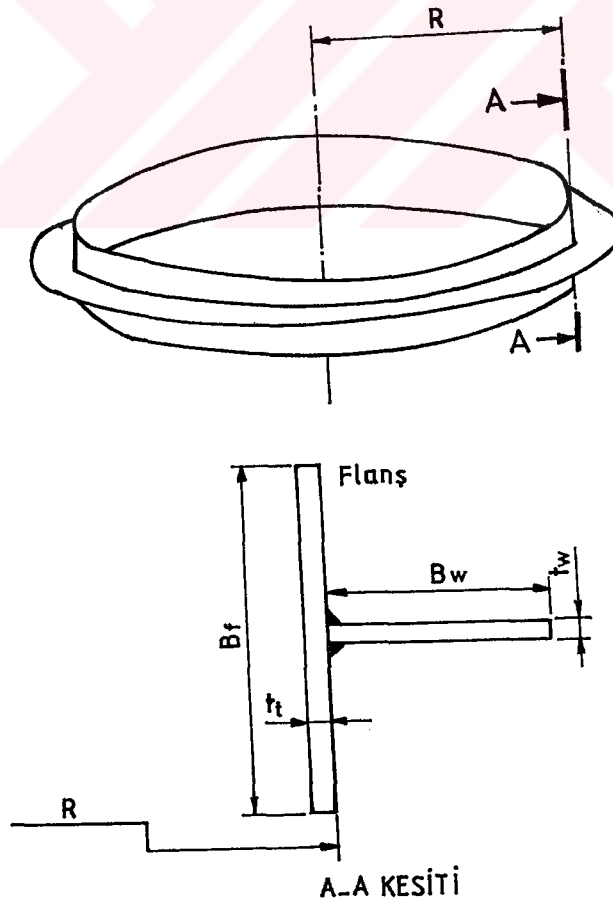
İşlem esnasında yapıdaki sıcaklık alanı ve mekanik davranış genelde ayrı ayrı değerlendirilebilir. Geirleme ve uzama alanları termal davranışları etkilemez iken sıcaklık değişim oranında, sıcaklık ile sıcaklık gradientine bağlı olan meknaik davranışları değiştirmez.

Yapının, yükleme koşulları ve kaynak pasosunun verdiği ısının, simetrik olduğu kabul edilir. Bu kabullenmenin kullanılması deformasyon hakkında iyi sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte kısmi (lokal) deformasyon farklı

olabilir. Çünkü gerçekte ring üzerindeki kaynak işlemi bir kerede yapılamaz. boru benzeri yapılarla ilgili referansların hepsinde, böyle bir simetriklik kabulü kullanılmaktadır. Kaynak hızının yüksek oluşu nedeniyle simetrik olmayan deformasyonlar gözardı edilebilir.

Şekil 3.27'de gösterilen tarzda ringlerle desteklenmiş silindirlerdeki aksel yönde simetrik kalıcı deformasyonları hesaplamak için basit bir model verilmektedir. Bu basit modelin avantajları şöyle sıralanabilir:

- Problemin fiziksel olarak anlaşılmasını sağlar.
- Mühendislik tasarım amaçları için kullanılabilir veriler verir.
- Daha kompleks durumların analizindeki hesaplama güçlüklerini azaltır. Bu model kaynak mekaniğinin yapısı ve yapının modellenmesini sağlayan belirli



Şekil 3.27. Ring destek geometrisi (Makhnenko, et al., 1994).

şekil metodunun analizi esas alınarak yapılmıştır. Model yapının kısmi (lokal) gerilme, kısmi uzama ve kısmi deformasyonu hakkında detaylı bilgi vermeyebilir ancak ring yapısının tamamında meydana gelen ortalama çekmeyi tahmini olarak verebilir (Makhnenko, et al., 1994).

Belirli şekil yönteminin (FEM) ve kaynak işlemi esnasında gözlenen mekanik davranışların kullanılmasıyla kaynağı yapılmış bir ring kesitini iki kısma ayırmak mümkündür. Kaynak yakınında yeralan ve termo elastik-plastik kısım olarak adlandırılan kısım ve bu kısmın uzağında yer alan, ve sadece elastik davranış gösteren kısım. Ringin kesit boyutu ringin yarıçapı ile karşılaştırıldığında oldukça küçüktü. Bu yüzden çevresel olarak meydana gelen, genişleme (yayılma) veya çekme kuvvetleri diğer yönlerde oluşan kuvvetlerden oldukça büyüktür. Bu nedenle çevresel olarak meydana gelen yayılma ve çekmeler, (Radyal şekil değişikliği olarak tanımlanan) diğer yönlerde meydana gelen küçük deformasyonları bastırır. Basit modelleme yönteminde aksiyal ve radyal yönde meydana gelen uzama/ gerilmeler, çevresel olarak meydana gelen uzama/gerilmelerle kıyaslandığında gözardı edilebilir.

Şekil 3.28. Basit indirgeme işlemini göstermektedir. Önce destek ve flanşın, ısınma ve soğuma esnasında elastik olarak kalan kısımlar radyal yöndeki eşdeğer yay sabitine ( $K_{eq}$ ) eşit  $K_f$  ve  $K_w$  yayları ile gösterilebilir. Termo plastik kısım ise bir termoplastik çubuk ile gösterilmiştir. Böylece ring yapısında radyal yönde meydana gelen deformasyon şeklindeki çubuk-yay sistemindeki deformasyona eşittir. Buradaki çubuk ısıtma ve soğuma işlemine maruz kalan çubuk termo elastik-plastik davranış gösterirken yay, çubuktaki aktif ısıya duyarlı ideal elastik bir yay olarak ele alınır.  $K_f$  ve  $K_w$  yay elastikleri flanş ve destek elastikliğine uygundur. Birimi ise kuvvet/ uzunluğun karesi veya ( $N/m^2$ ) dir (Makhnenko, et al., 1994).

Eşitlik ring yapısındaki ve çubuk-yay sistemindeki uzama ve gerilmenin eşit olmasını gerektirir. Uzama eşitliğinden:

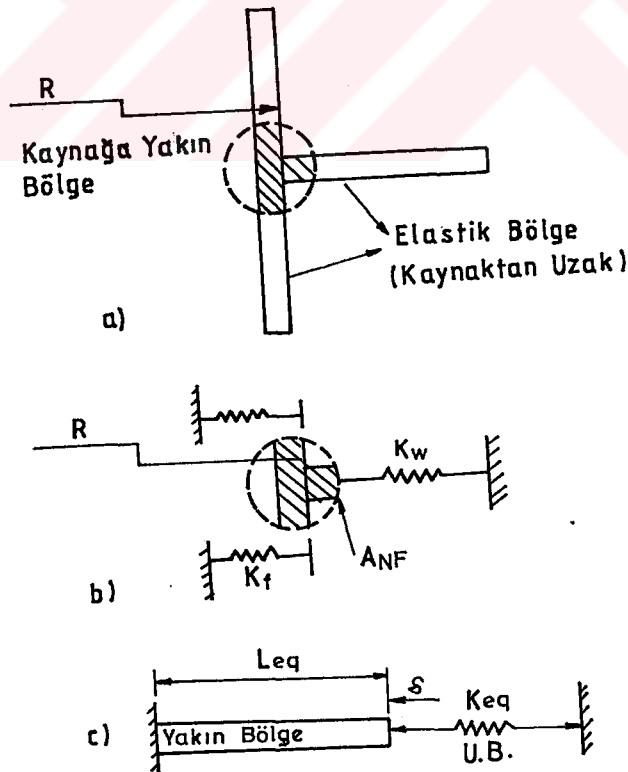
$$\varepsilon = \frac{2\pi\varphi_R}{2\pi R} = \varepsilon\alpha = \frac{\delta}{L_{eq}} \quad (1)$$

Burada  $\varepsilon$  ringinde çevresel olarak meydana gelen uzama ve  $\varepsilon\alpha$  çubuktaki eşdeğer uzama;  $R$  ringin yarıçapı ve  $L_{eq}$  çubuğun eşdeğer uzunluğu;  $\varphi$   $R$  ringindeki üniform (veya ortalama) değişim ve  $\varphi$  çubuktaki değişimdir.  $\varphi R = \varphi$  eşitliğinin kullanılmasıyla

$$L_{eq} = R \quad (2)$$

Gerilme eşitliği

$$\sigma_{00} = \frac{R(K_f + K_w)\delta_R}{A_{NF}} = \sigma_{eq} = \frac{K_{ca}\delta}{A_{eq}} \quad (3)$$



Şekil 3.28. Bir ring desteğinin basit bir modele uyarlanmasıyla basitleştirilmesi (Makhnenko, et al., 1994).

Burada  $\sigma_{00}$  ring gövdesindeki gerilme,  $\sigma_{cq}$  çubuktaki gerilme,  $A_{NF}$  kaynağa yakın olan termo elastik kısmın kesit alanı,  $A_{eq}$  çubuğun eşdeğer kesit alanı ve  $K_{cq}$  yay elastiklik eşdeğeri.

$$A_{cq} = A_{NF} \quad \text{alınırsa}$$

$$K_{cq} = R(K_f + K_w) \quad (4)$$

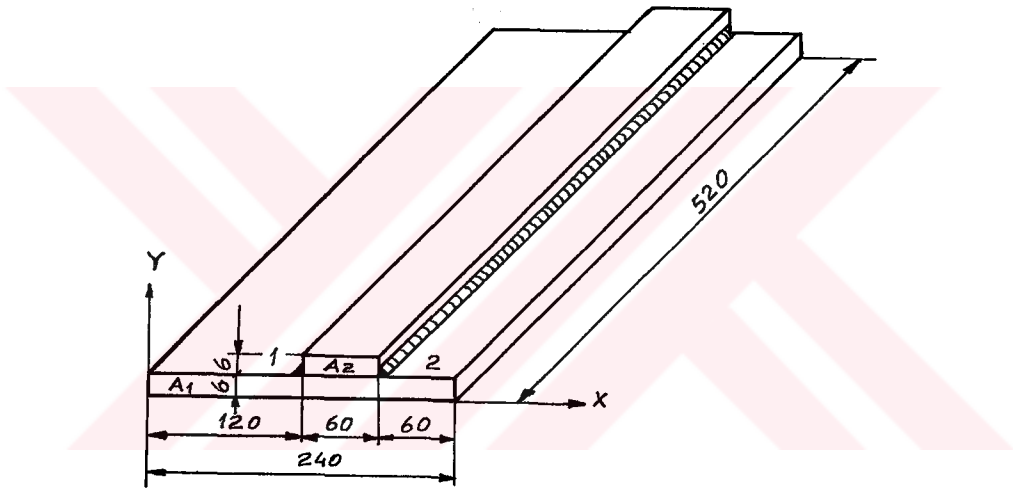
verilen bu eşitlikle çubuk ucundaki değişim, ( $L_{eq}$ ,  $A_{eq}$  boyutlarında) çubuktaki sıcaklık durumu kaynağa yakın bölgedekiyle aynı olduğu sürece, ringde radyal yönde meydana gelen değişimle aynı olacaktır (Moshaiav, 1991).



## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Bindrimeli Kaynakta Çekme ve Çarpılmaların Tespiti

Burada yapılan kaynaklı birleştirmede meydana gelecek çekme ve çarpılmaların tespit edilmesi amaçlanmıştır. bu maksatla yapıda çekme ve çarpılmayı azaltıcı önlemlere kaynak işleminde yer verilmemiştir. Aynı kaynak parametreleriyle işlem üç ayrı deney numunesine uygulanarak meydana gelen çekme ve çarpılmaların ortalamaları alınmıştır.



Şekil 4.1. Kaynak işlemine tabi tutulacak parçaların boyutları ve konumu.

### KAYNAK PARAMETRELERİ

Elektrot çapı 4mm, örtü tipi bazik

Kaynak sırası, önce 1, sonra 2

Kaynak akımı  $I = 165A$ , Ark gerilimi 23.5 V

Plakalar st 37.

Kaynak hızı  $v = 0.33 \text{ cm/s}$

Kaynak kalınlığı  $a = 4.5 \text{ mm}$

Elastisite modülü  $E = 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$

Atalet momenti  $J_{xx}$  ve  $J_{yy}$  hesaplanarak bulunacaktır.



Şekil 4.2. Kaynak işlemi tamamlanmış parçaların kaynak sonrası durumları

Tablo 4.1. Kaynak sonrası ölçülen değerler

	Boyuna çekme ( $\Delta L$ )	Sehim K	Enine Çekme Q
1.Deney	0.85	0.65	0.25
2.Deney	0.70	0.75	0.25
3. Deney	0.79	0.70	0.28
4. Deney	0.78	0.70	0.26

#### 4.1.1. Boyuna çekme hesabı

İkinci bölümdeki 13 nolu formülden

$$\Delta L = \frac{F.L}{E.A}$$

F: Şekil 2.14 den köşe kaynağı için 630 da N

$$F = 630 \times 10 \Rightarrow F = 6300 \text{ N} \Rightarrow F = \frac{6300}{9.8} \Rightarrow F = 642.85 \text{ kg (1mm}^2 \text{ ye düşen özgül}$$

kendini çekme kuvveti)

$$1 \text{ cm}^2 \text{ ye gelen çekme kuvveti } F = 642.85 \times 100 \Rightarrow F = 64285 \text{ kg.}$$

$$L = 520 \text{ mm} \Rightarrow L = 52 \text{ cm}$$

A : toplam kesit alanı

$$A = A_1 + A_2 \Rightarrow A = (24 \times 0.6 + 6 \times 0.6)$$

$$A = 18 \text{ cm}^2$$

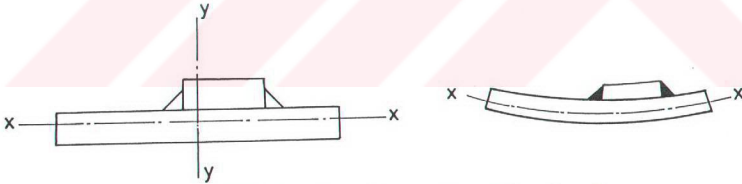
$$\Delta L = \frac{64285 \times 52}{2.100.000 \times 18}$$

$$\Delta L = 0.0884$$

$$\Delta L = 0.884 \text{ mm}$$

\* (Kaynak işlemi sonrası ölçülen değer  $\Delta L_{\text{ort}} = 0.78 \text{ mm}$ )

#### 4.1.2. Boyuna çarpılma (yapıdaki kabarma- sehim)



Şekil 4.3. Kaynaklı yapıda tarafsız eksenler

Bölüm 2 deki 12 nolu formülden

$$\delta = \frac{F \cdot b \cdot L^2}{8 \cdot E \cdot J}$$

Kiriş atalet momentleri ( $J_{xx}$  ve  $J_{yy}$ ) Hesabı

Ağırlık Merkezi  $\bar{X}$  ve  $\bar{Y}$

$$A_1 = 24 \times 0.6 \Rightarrow A_1 = 14.7 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = 6 \times 0.6 \Rightarrow A_2 = 3.6 \text{ cm}^2$$

$$(14.7 + 3.6)\bar{X} = (14.7 \times 12) + (3.16 \times 15)$$

$$\bar{X} = \frac{176.4 + 54}{18.3} \Rightarrow X = 12.59 \text{ cm}$$

$$(A_1 + A_2)\bar{Y} = (A_1 \cdot Y_1) + (A_2 \cdot Y_2)$$

$$(A_1 + A_2)\bar{X} = (A_1 \cdot x_1) + (A_2 \cdot x_2)$$

$$(14.7 + 3.6)\bar{Y} = (14.7 \times 0.3) + (3.6 \times 0.9)$$

$$\bar{Y} = \frac{4.41 + 3.24}{18.3} \Rightarrow \bar{Y} = 0.418 \text{ cm.}$$

$$J = \sum \frac{bh^3}{12} + A \cdot d^2$$

$$J_{xx} = \frac{24 \times 0.6^3}{12} + 14.7(12.59 - 12)^2 + \frac{6 \times 0.6^3}{12} + 3.16.(15 - 12.59)^2$$

$$J_{xx} = 0.432 + 5.11707 + 0.108 + 18.35359$$

$$J_{xx} = 24.01 \text{ cm}^4$$

$$J_{yy} = \frac{0.6 \times 24^3}{12} + 14.7(0.418 - 0.3)^2 + \frac{0.6 \times 6^3}{12} + 3.6(0.9 - 0.418)^2$$

$$J_{yy} = 691.2 + 0.2046 + 10.8 + 0.8363$$

$$J_{yy} = 703.041 \text{ cm}^4$$

$$\delta = \frac{F \cdot b \cdot L^2}{8 \cdot E \cdot J_{xx}}$$

$$F = 64285 \text{ kg}$$

b: Yığılan alanın bütün kirişinin ağırlık merkezine olan uzaklığı,

$$b = 1, 2 - 0.418 \Rightarrow b = 0.782 \text{ mm}$$

$$E = 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\delta = \frac{64285 \times 0.782 \times 24^2}{8 \times 2.100.000 \times 24.01} \Rightarrow f = 0.07178 \text{ cm} \Rightarrow f = 0.7178 \text{ mm}$$

(ölçülen değer  $\delta$  ort=0.70 mm)

#### 4.1.3. Enine çekme

Bölüm 2'deki 14 nolu formülden

$$Q = \frac{0.24.600\eta.a.v.I.\alpha}{S.v.\lambda}$$

Q = Enine çekme (mm)

$\alpha$  = Boutsal uzama değeri  $6.5 \mu \text{ mm}/^\circ\text{C}$

a = Sıcaklık iletim sayısı, a=0.58 (Anık 1980)

v = 0.33 cm/sn

I = 165 A

U = 23.5 v

$\lambda = 58 \text{ kcal/mm.san.}^\circ\text{C}$   $\lambda = 58.000 \text{ cal/mm.san.}^\circ\text{C}$   $\lambda = \text{Isı iletime katsayısı}$   
cal/mm.san. $^\circ\text{C}$

$$Q = \frac{0.24 \times 600 \times 0.75 \times 0.58 \times 23.5 \times 165 \times 0.1651}{6 \times 0.33 \times 58.000}$$

$$Q = 0.349 \text{ mm}$$

(ölçülen değer Q ort = 0.26 mm)

Deney numuneleri serbest haldeyken kaynak işleminin tamamlanması ve meydana gelen çekme ve çarpılmaların tespitinden sonra aynı deney bütün diğer parametreler sabit ancak parçalar çekme ve çarpılmaya karşı emniyete alındıktan sonra kaynak edilmiştir. Parçalar aynı ölçülerde (6x240x520 ve 6x60x520) kesildikten sonra 6x240x520 ölçüsündeki parça kaynak tablosuna

her iki taraftan puntalanarak emniyete alındı. Daha sonra 6x60x520 ölçüsündeki parça her iki tarafından puntalandı (şekil 4.4). daha sonra sırası ile parçanın önce 1. ve 2. tarafından kaynak edildi. Bu haldeyken parçalar soğumaya bırakıldı (şekil 4.5). Parçaların soğuma işlemi tamamlandıktan sonra puntalandığı tabladan zimpara taşı yardımıyla punta kaynakları temizlenerek alındı. Yapılan ölçme ve kontrolde meydana gelen çekme ve çarpılmaların minimum düzeyde olduğu görüldü (şekil 4.6).

#### 4.2. T. Kirişindeki Çekme ve Çarpılma

##### Kaynak şartları

Koruyucu gaz kaynağı

Ark voltajı : 29 volt

Kaynak Akımı : 320 Amper

Tel çapı : 1.2 mm

Kaynak Hızı : 0.3 m/s

Kaynak kalınlığı : 4 mm

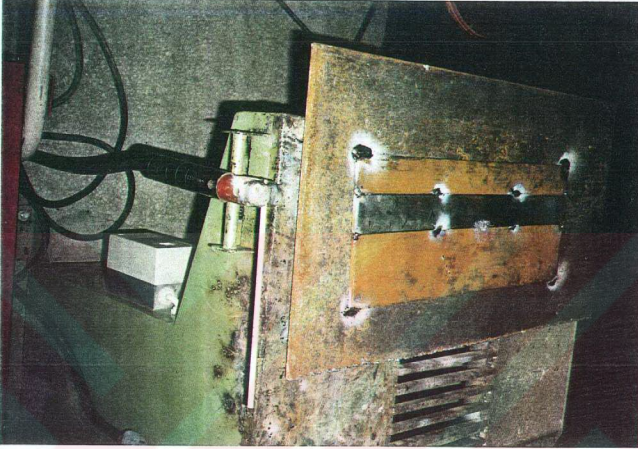
Kiriş Uzunluğu : 2320 mm

Bu deneyde ise 8x160x2320 ölçüsünde St 37'lik iki parça şekil 4.7'de gösterilen konumda bir kaynakçıyla önce bir tarafın kaynağı tamamlandıktan sonra diğer tarafından kaynak edilmiştir (Şekil 4.8).

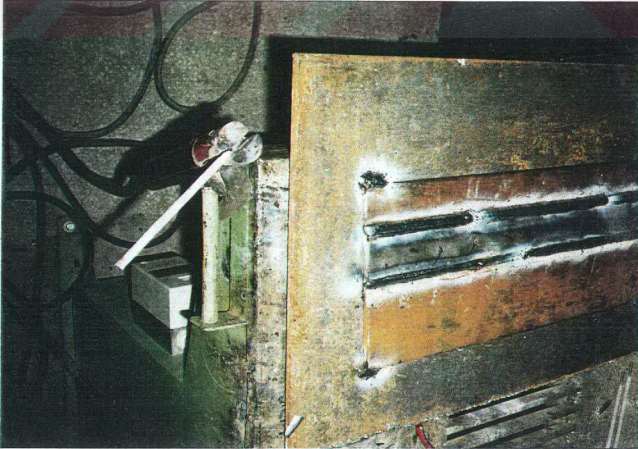
Bu kaynak işlemi tamamlandıktan sonra aynı ölçülerde test parçaları hazırlanarak bu parçaların kaynağı iki kaynakçı tarafından yapılmıştır (şekil 4.9). Kaynak işlemine önce bir taraftan başlandı. kaynak 200 mm ilerledikten sonra ikinci kaynakçı birinci kaynakçının başladığı uçtan diğer tarafın kaynağına başladı ve bu konum korunarak kaynak tamamlanmıştır. Bu iki test sonunda parçalar çekme ve çarpılmalar bakımından karşılaştırıldı. Şekil 4.9'da

görüldüğü gibi iki kaynakçı ile yapılan kaynakta daha az çapılma meydana gelmiştir.

T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE KLİMA BAKANLIĞI  
DOKÜMANİSYON MERKEZİ



Şekil 4.4. Parçaların puntalanarak emniyete alınması.



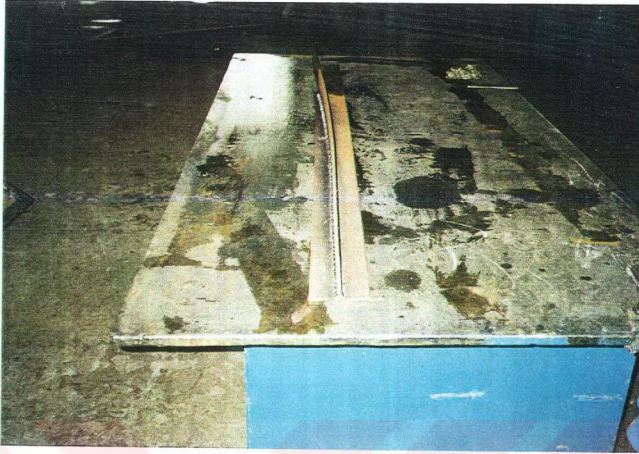
Şekil 4.5. Kaynak işlemi sonrası soğumayla bırakılan parçalar.



Şekil 4.6. Kaynak işlemi tamamlanmış parçasının son durumu.



Şekil 4.7. Parçaların kaynağa hazırlanışı



a



b

Şekil 4.8. Bir kaynakçı ile tek taraftan yapılan kaynak

a. Kaynak başlangıç kısmı

b. Kaynak sonu



a



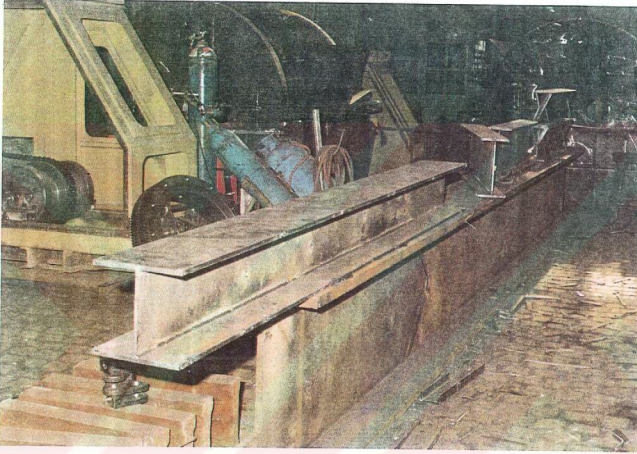
b

Şekil 4.9. İki kaynakçı ile iki taraftan yapılan kaynak

a. Kaynak başlangıç kısmı

b. Kaynak sonu

Yukarıdaki iki deneydede kiriş serbest halde iken kaynak edilmiştir. Oysa parçalar kaynak işlemi öncesinde kalıba alınmak suretiyle çekme ve çarpılmalar minimum düzeyde tutulabilir. Şekil 4.10 daki kiriş kaynak işlemi öncesinde eşit aralıklardan çelik çubuklarla tutturulmak suretiyle kalıba alındıktan sonra kaynak edilmiştir.



Şekil 4.10. Kalıba alınmak suretiyle kaynak edilmiş kiriş.

#### 4.2.1. Çekme ve çarpılmaların hesabı

Kaynak şartları:

Koruyucu Gaz Kaynağı

Ark Voltajı : 29 volt

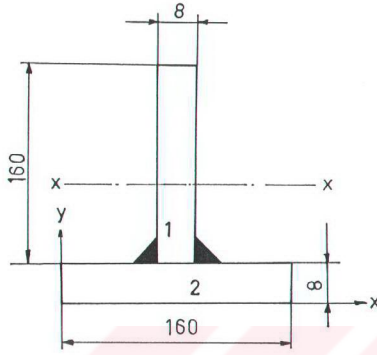
Kaynak Akımı : 320 Amper

Tel Çapı : 1.2 mm.

Kaynak Hızı : 0.3 m/s

Kaynak Kalınlığı : 4 mm

Kiriş Uzunluğu : 2320 mm



Şekil 4.11. T kaynaklı birleştirme

Kiriş kesit alanı (s) : A1+A2

$$s = 2 (16 \times 0.8)$$

$$s = 23.6 \text{ cm}^2$$

X-X eksenine göre atalet momenti

$$J_{xx} = \sum \frac{bh^3}{12} + A \cdot d^2$$

$$\bar{X} = 8 \text{ cm}$$

$$\bar{Y} = \frac{(12.8)8,8 + (12,8)0,8}{(12.8 + 12.8)}$$

$$\bar{Y} = 4.8$$

$$J_{xx} = \frac{0,8 \times 16^3}{12} + 12.8(8,8 - 4,8)^2 + \frac{16 \times 0,8^3}{12} + 12.8(4,8 - 0,4)^2$$

$$J_{xx} = 726.528 \text{ cm}^4$$

Kiriş Uzunluğu (l)=2320 cm.

Malzeme St 37; Yoğunluk 7.8 gr/cm<sup>3</sup>

Kaynak Kesiti (So)= 0.16 cm<sup>2</sup> (tek taraf için)

$k$  = Kaynakların tabii eksene olan uzaklığı.

Elastiklik modülü =  $2.100.000 \text{ kg/cm}^2$

Malzeme Elastik Limiti ( $R_e$ ) =  $2100 \text{ kg/cm}^2$

$R_l$  = Çekme miktarı  $f$  = Sehim.

#### 4.2.1.1. Çekme hesabı

Horst pflug formülüne göre çekme hesabı (Macun, 1983)

$$R_l = \frac{42 \cdot R_e \cdot S_o \cdot L}{E \cdot (S - S_o)}$$

$$R_l = \frac{42 \cdot 2100 \cdot (2 \times 0.16) \cdot 232}{2.100.000 [25.6 - (2 \times 0.16)]}$$

$$R_l = 0.246 \text{ cm}$$

(ölçülen ortalama değer 2.5 mm)

#### 4.2.1.2. Sehim hesabı

Horst pflug formülüne göre sehim hesabı

$$f = \frac{42 \cdot R_e \cdot S_o \cdot k \cdot l^2}{8 \cdot E \cdot J_{xx}}$$

$$f = \frac{42 \cdot 2100 \cdot (2 \times 0.16) \cdot (4.8 - 0.8) \cdot 232^2}{8 \cdot 2100.000 \cdot 726.528}$$

$$f = 3.98 \text{ cm}$$

(ölçülen ortalama değer 40 mm)

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuç

Çelik yapıların birleştirilmesinde kaynaklı birleştirmenin, civatalı ve perçinli birleştirmeye göre daha üstün olduğu bilinen bir gerçektir. Bununla birlikte tüm kaynak yöntemlerinde karşılaşılan ortak sorunlardan en önemlisi kendini çekme ve çarpılmalarıdır. Bir kaynaklı yapıda kendini çekme ve çarpılmalar kanak esnasında ısınma ve soğuma periyodları sırasında değişik sıcaklık derecelerine kadar ısınmış kaynak bölgesinin, üniform olmayan genişleme ve büzülmesi sonucu meydana gelir. Yapının rijitlik derecesi, kütlesi, malzemenin akma sınırı, elastiklik modülü, ısıl genişleme katsayısı ısı iletim kat sayısı , erime sıcaklığı, özgül ısı girdisi , konstrüksiyon ile kaynak bölgesi arasındaki sıcaklık farkı gibi faktörler meydana gelecek çekme ve çarpılmayı etkiler. Yapıda arzu edilmeyen durumlar olan bu çekme ve çarpılmalar uygun yöntemlerle giderilmediği takdirde , bunların düzeltilmesi için harcanan süre ve işçilik neredeyse yapının imali için harcama zaman ve işçiliğe eşit olmaktadır. Bu durum ise kaynaklı yapının maliyetini oldukça yükseltmektedir.

### 5.2. Öneriler

Kaynaklı yapılarda kullanılan kaynak yönteminin, kaynak ağız şeklinin, yapının rijitlik derecesinin, özgül ısı girdisinin, ısıl genişleme katsayısının, ısı iletim katsayısının ve erime sıcaklığının çarpılma üzerinde etkisi vardır.

- Oksi-gaz kaynağı örtülü elektrot ile yapılan ark kaynağından, yarı ve tam otomatik kaynak yöntemlerinden daha çok çarpılmaya neden olur.

- Çok pasolu kaynak yerine, daha fazla kaynak metali sağlayan yüksek eritme gücüne sahip, derin nüfuziyetli, az pasolu kaynak işlemi kullanılmalıdır.
- Kaynak işlemi sırasında yapıda meydana gelebilecek kalıntı gerilimleri aksi yöndeki bir öngerilme ile dengelenerek yapı kaynak işlemi sonrasında arzu edilen konumda tutulabilir.
- Çarpılmaların kontrol altına alınmasında işkenceler, bağlama donanımları ve puntalamaların kullanılması etkilidir.
- Kaynak işlemi en çok sınırlandırılmış elemandan en az sınırlandırılan elemana doğru yapılmalıdır.
- Yapım esnasında parçalar gerdirilerek kaynaktaki gerilme giderilmek suretiyle boyutsal tolerans ve kararlılık sağlanmalıdır.
- Uygun kaynak pozisyonları ve kaynak aralığı planlamak suretiyle kaynak ısısının mümkün olduğunca en iyi şekilde dağıtılması meydana gelebilecek çekme ve çarpılmayı minimuma indirecektir.
- Nötr eksene göre yapılan kaynak birbirini dengeleyecek tarzda düzenlenmelidir.
- Kaynak işleminde ısı girişi yükselirken kaynak hızıda yükseltilmelidir.
- Geriye doğru adım adım ilerleyen kaynak yöntemi ve geriye doğru adım adım sıra atılarak yapılan kaynak yöntemlerinin kullanılması lokal ısının artmasını önleyerek meydana gelecek çekmeyi düşürür.

• Aşırı kaynak pasosu sayısından kaçınılmalıdır.

• Gereğinden fazla kaynak çarpılmayı arttıracığından aşırı kaynak hacminden kaçınılmalıdır.

• Köşe kaynaklarında müsadde edilen en küçük ayak boyu kullanılmalıdır.

• Aşırı kaynak ağzı genişlikleri, kaynak dayanımına hiç bir katkıda bulunmazken kaynak maliyetleriyle beraber kaynak çekmesinide artırır.

• Açığı ve destek parçasınıda içeren kök açma işleminde kök minimum düzeyde tutulmalı.

• Az miktarda kaynak metaline gereksinim duyan kaynak birleştirmeleri seçilmeli.

Örneğin V kaynak ağzı yerine X kaynak ağzı kullanılmalıdır.

• Kaynak işleminde çekme ve çarpılmaya karşı çekiçleme işlemi tesirlidir. Ancak gereğinden fazla çekiçleme yapının süneklik uygunluğunu bozar.

• Kaynak işlemi öncesi ve sonrasında uygulanacak ısı işlemler kalıntı gerilmeleriyle birlikte meydana gelecek çekme ve çarpılmayı azaltacaktır.

### KAYNAKLAR

1. AKPOLAT, M., "Oksi Asetilen ve Elektrik Ark Kaynağı", TEF Yayını, Ankara 1981.
2. AMERICAN SOCIETY FOR METAL., "Metals Handbook", 1990.
3. AMERICAN WELDING SOCIETY. "Welding Handbook", Volume One, Seventh edition, 1981.
4. ANDERSON, J.C., LEAVER, K.D., ROWLINGS, R.D., ALEXANDER, J.M., "Materials Science", Fourth edition, 1990.
5. ANIK, S., Kaynaklı Parçalarda Oluşan Çekme ve Çarpılmalar. "Mühendis ve Makina", Cilt 24,sayı 284, Ankara 1983.
6. ANIK, S., Kaynaklı Parçalarda Oluşan Çekme ve Çarpılmalar. "Mühendis ve Makina", Cilt 24,sayı 285, Ankara 1983
7. ANIK, S., "Kaynak Tekniği El Kitabı Yöntemler ve Donanımlar", İstanbul,1991.
8. ANIK, S., "Kaynak Tekniği", İTÜ İstanbul 1980.
9. ERTÜRK, İ., "Oksi Asetilen Kaynağı", T.C.Devlet Bakanlığı, Yayın No:38, Ankara 1989, S.104-108.
10. FLETCHER, A.J., "Thermal Stresses and Strain Generation In Heat Treatment" Department of Metals and Metaterials Engineering Sheffield City Polytecnic Sheffield, U.K., 1989.
11. GOURD, L.M., Principles of Welding Technology", Second Edition, 1986.
12. HABIL, I., RADAJ, D., "Welding and Cutting", Stutgart 1988.
13. LEINO, K., NİKKOLA, A., VARTIANNA, K., "Prediction of Weld Defects Using Welding Condition Data, "Technical Research Centre of Finland Research Reports, 1984.
14. MACUN, A., Kaynaklı Çelik Proses Teçhizatı ve Boru Donanımlarında Şantiyede Gerilim Giderme İşlemleri "Mühendis ve Makina", cilt 24, sayı 284, Ankara 1983.

15. MAKHNENKO, V.I., SHEKERA, V.M., İZEBENKO, L.A., "Special Features of the Distrubution of Stresses and Strains Caused By Making Circumferantial Welds In Cylindrical Shells", 1994
16. MOSHAIIV, A., SONG, H., "Journal of Ship Research", Vol. 35, No.2, 1991
17. ODTÜ, Kaynak Teknolojisi Birimi, "Kaynak Yöntemlerine Genel Bakış", Ankara 1992
18. OĞUZ, B., "Ark Kaynağı", Oerlikon Yayını, İstanbul 1989.
19. RAYMOND, J.S., "Welding Priciples and Practies", Revised, 1990.
20. RICHARD, L.L., "Welding and Welding Technology", Printed in U.S.A. 1973.
21. TOPUZ, A., "1.Ulusal Kaynak Sempozyumu Tebliğ Özetleri", İstanbul 1984.
22. WEISSAVACH, W., "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi", İ.T.Ü., İstanbul 1983.
23. WELDING SOCIETY, "Welding International 1994 8 (12) 938-942., 1994 Translation 1677". Selected From Journal of the Welding Society 1994 63 (4) 32-36: Referans JJ/94/32.,