

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PASLANMAZ ÇELİK SAÇLARDA ŞEKİLLENDİRME  
KARAKTERİSTİKLERİ**

**Makina Mühendisi Emre ARKUN**

**FBE Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı İmal Usulleri Programında Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı: Prof. Mehmet Emin YURCİ**

**İSTANBUL, 2006**

## İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xi
ÖNSÖZ .....	xii
ÖZET .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
<b>1 GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2 PASLANMAZ ÇELİKLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....</b>	<b>5</b>
2.1 Paslanmaz çeliklerin metalurjik özellikleri.....	5
2.2 Paslanmaz çeliklerin faz diyagramları .....	6
<b>3 Paslanmaz çelik türleri.....</b>	<b>11</b>
3.1 Martenzitik kromlu paslanmaz çelikler .....	11
3.2 Ferritik kromlu paslanmaz çelikler .....	18
3.3 Östenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler .....	22
<b>4 TALAŞSIZ ŞEKİL VERME YÖNTEMLERİ .....</b>	<b>34</b>
4.1 Kesme.....	34
4.1.1 Paslanmaz çelikleri makasla kesme .....	37
4.1.2 Paslanmaz çelikleri kalıpta kesme .....	37
4.2 Bükme .....	38
4.3 Derin çekme.....	46
<b>5 PASLANMAZ ÇELİK SAÇLARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ .....</b>	<b>54</b>
5.1 Östenitik paslanmaz çeliklerin şekillendirilebilirliği .....	56
5.2 Ferritik paslanmaz çeliklerin şekillendirilebilirliği.....	57
<b>6 ŞEKİLLENDİRME KABİLİYETİNE TESİR EDEN FAKTÖRLER.....</b>	<b>61</b>

6.1	Malzeme temel özelliklerinin tesirleri.....	61
6.2	Kimyasal bileşimin tesirleri .....	64
6.3	Mikro yapının tesirleri .....	65
6.4	Sac üretim şartlarının tesirleri .....	67
6.5	Taslağın tesirleri .....	69
6.6	Kalıp geometrisinin etkisi .....	70
6.7	Şekillendirme şartlarının etkisi .....	73
7	<b>ŞEKİLLENDİRME KABİLİYET TESTLERİ .....</b>	<b>77</b>
7.1	Derin çekme testi .....	77
7.2	Çekme deneyi .....	78
7.2.1	Çekme deneyi ile anizotropi katsayısının (R) tayini.....	85
7.3	Erichsen çökertme deneyi .....	93
7.4	Şişirme deneyi .....	96
7.5	Rockwell ve Superficial Rockwell Test Metodu.....	98
8	<b>AISI-304 (EN-1,4301) KALİTESİNDEKİ PASLANMAZ ÇELİK SACIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>100</b>
8.1	Rockwell sertlik deneyleri.....	100
8.2	Bükme deneyleri .....	103
8.3	Çekme deneyleri .....	112
8.3.1	Mekanik özelliklerin belirlenmesi.....	114
9	<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>132</b>
9.1	Genel sonuçlar .....	132
9.2	Deneysel sonuçlar .....	134
	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>139</b>
	<b>Özgeçmiş.....</b>	<b>141</b>

## SİMGE LİSTESİ

$A_{5,65}$	Kopmada uzama yüzdesi veya nominal gerinim
$c$	Malzeme sabiti (Deformasyon hızında)
$d_n$	Parçanın son yarıçapı
$d_o$	Taslak çapı
$d_{1(\min)}$	Hatasız kap çeken zımbanın minimum çapı
$e$	Zımba ile kalıp arası boşluk
$e_f$	Kopmada uzama yüzdesi veya nominal gerinim
$e_u$	Maksimum üniform nominal gerinim
$E$	Elastisite katsayısı
$\bar{E}$	Ortalama elastisite katsayısı
$F$	Kesme kuvveti
$F_a$	Akma yükü
$F_ç$	Çekme yükü
$G_0$	Numune boyu yönünde işaretlenen ilk uzunluk
$G_s$	Numune boyu yönünde ölçülen son uzunluk
$h$	Elastik şekil değişimine uğramış tabaka kalınlığı
$K$	Dayanım katsayısı (Malzeme mukavemet katsayısı)
$L_o$	Numune ölçü uzunluğu
$L_b$	Büküm yayının tarafsız eksen üzerindeki uzunluğu
$M_f$	Bükme momenti
$m$	Gerinim hızına duyarlılık üsteli
$n$	Deformasyon sertleşmesi üssü (Pekleşme üsteli)
$p$	Kesilecek çevre uzunluğu
$R$	Dikey anizotropi değeri
$R_b$	Büküm yarıçapı
$R_m$	Çekme dayanımı (EN 10002-1'e göre gösterim)
$R_k$	Kalıp eğrilik yarıçapı
$R_{p0,2}$	Belirsiz akma gösteren malzemelerde %0,2 uzamada ölçülen akma dayanımı (EN 10002-1'e göre gösterim)
$R_z$	Zımba eğrilik yarıçapı
$\Delta R$	Düzlemsel anizotropi değeri
$\tilde{R}$	Çekilebilirlik oranı
$\bar{R}$	Dikey anizotropi katsayısının ortalaması
$S$	Nominal gerilme (Mühendislik gerilmesi)
$S_{\max}$	Çekme dayanımı

$S_u$	Çekme dayanımı
$s$	Bükme sonrası genişleme değeri
$t$	Parça kalınlığı
$t_0$	Parça ilk kalınlığı
$W$	Istampa matris arası boşluk
$W_0$	Genişlik yönünde işaretlenen uzunluk
$W_s$	Son genişlik
$w$	Parça genişliği
$\alpha_b$	Büküm açısı
$\varepsilon$	Gerçek şekil değiştirme
$\varepsilon_l$	Uzunluk gerinimi
$\varepsilon_y$	Düzlemsel gerinim hali
$\varepsilon_t$	Kalınlıktaki gerçek uzama
$\varepsilon_u$	Maksimum üniform gerçek gerinim
$\varepsilon_w$	Genişlikteki gerçek uzama
$\theta$	Haddeleme yönü ile yapılan açı
$\delta$	Kalıcı şekil değişimine uğramış tabaka kalınlığı
$\rho$	Bükmede tarafsız eksenin yarıçapı
$\sigma$	Gerçek gerilim
$\sigma_A$	Akma dayanımı
$\sigma_{A0,2}$	Belirsiz akma gösteren malzemelerde % 0,2 uzamada ölçülen akma dayanımı
$\sigma_d$	Deformasyon gerilmesi
$\sigma_f$	Bükmede akma gerilmesi
$\sigma_u$	Maksimum yükteki gerçek gerilme
$\tau$	Kayma gerilmesi

## KISALTMA LİSTESİ

AISI	American Iron and Steel Industry
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
DÇL	Derin Çekme Limit Oranı
DÇOS	Derin Çekme Oranı Sınırı
DDQ	Deep Draw Quality
DIN	Deutsches Institut für Normung
DQ	Drawing Quality
EÇD	Erichsen Çökertme Deneyi
EP	Yüksek Basınç
FLC	Forming Limit Curve
FLD	Forming Limit Diagram
KHM	Kübik Hacim Merkezli
KYM	Kübik Yüzey Merkezli
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Çeliğin Atmosferik Korozyonu Üzerine Kromun Etkisi (Kaluç ve Tülbentçi, 1995)	1
Şekil 2.1 İkili demir-krom denge diyagramı (Davis, J.R)	7
Şekil 2.2 Diyagramın yatay ekseni %12 Cr içeren çelikleri gösterir (Avner, 1974)	8
Şekil 2.3 Diyagramın yatay ekseni %18 Cr içeren demir-karbon alaşımları içindir (Avner,1974)	9
Şekil 2.4 %18 Cr ve %8 Ni içeren alaşımlı çelikte reaksiyonların eğilimini gösteren diyagramın yatay ekseni deneme sonucudur (Avner, 1974)	10
Şekil 3.1 Fe-Cr Alaşımlarında karbon miktarının östenit alanını genişletici etkisi	11
Şekil 3.2 Martenzitik kromlu paslanmaz çelikler ve uygulama alanları (Avner, 1974)	13
Şekil 3.3 Tam sertleştirilmiş çeliklerin %C oranına göre sertlikleri (Davis, J.R)	16
Şekil 3.4 X10Cr13(410) martenzitik paslanmaz çeliğin TTT diyagramı (Davis, J.R)	17
Şekil 3.5 Yüksek sıcaklıkta östenit için karbon miktarı üzerine krom bileşeninin etkisi (Avner,1974)	18
Şekil 3.6 Ferritik kromlu paslanmaz çelikler ve uygulama alanları (Avner, 1977)	22
Şekil 3.7 Demir-krom faz diyagramında karbonun etkisi (0,05 C) (Kaluç ve Tülbentçi, 2005)	23
Şekil 3.8 Demir-krom faz diyagramında karbonun etkisi (0,4 C) (Kaluç ve Tülbentçi, 2005)	24
Şekil 3.9 Östenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin kullanım alanları ve özellikleri (Avner,1974)	27
Şekil 3.10 % 18 Cr, % 5 Ni, % 8 Mn'lı AISI 202 çeliğinin mekanik özelliklerine soğuk şekil değişiminin etkisi (Kaluç ve Tülbentçi, 1995)	30
Şekil 3.11 % 17 Cr, % 7 Ni'li AISI 301 çeliğinin mekanik özelliklerine soğuk şekil değişiminin etkisi (Kaluç ve Tülbentçi, 1995)	31
Şekil 3.12 %18 Cr, %12 Ni'li AISI 305 çeliğinin mekanik özelliklerine soğuk şekil değişiminin etkisi (Kaluç ve Tülbentçi, 1995)	31
Şekil 3.13 %25 Cr, %20 Ni'li AISI 310 çeliğinin mekanik özelliklerine soğuk şekil değişiminin etkisi (Kaluç ve Tülbentçi, 1995)	32
Şekil 4.1 Düşük karbonlu bir sacın kalıpta kesilmesinde, kuvvet-yol ve çekme diyagramlarının kıyaslanması (Çapan, 1977)	34
Şekil 4.2 Kesme yüzelerinin karakteristik görünüşü (Çapan, 1990)	37
Şekil 4.3 Bükme (Marciniak ve Duncan, 1992)	39
Şekil 4.4 Çeşitli sac bükme işlemleri (Çapan, 1990)	39
Şekil 4.5 Kalın malzemelerin küçük kavislerle bükülmesi (Güneş, 2003)	40
Şekil 4.6 Bükme kavisinin kalınlık azalmasına etkisi (Güneş, 2003)	41
Şekil 4.7 Dar (a) ve geniş (b) kesitlerde ortaya çıkan gerilme ve gerinim halleriyle kesit distorsiyonları (Marciniak ve Duncan, 1992)	42
Şekil 4.8 Bir büküm bölgesinin geometrisi ve tarafsız eksene z uzaklığında alınan birim eleman (Hosford ve Caddell, 1983)	42
Şekil 4.9 Bükme sonrasında geri esneme (Yurci, 1997b)	43
Şekil 4.10 Elastik bükmede gerilmeler (Güneş, 2003)	43
Şekil 4.11 Elastik sınır üzerinde bükülmüş parçada gerilmeler (Güneş, 2003)	44
Şekil 4.12 Kalıcı şekil değişimi ile bükülmüş parçada elastik gerilmeler (Güneş, 2003)	45
Şekil 4.13 Silindirik bir kabın derin çekilmesi (Çapan, 1990)	47
Şekil 4.14 Silindirik bir kabın derin çekilmesi (kesit) (Çapan, 1990)	48
Şekil 4.15 Baskı plakalı çekmenin oluşumu (Çapan, 1990)	48
Şekil 4.16 18-8 Paslanmaz çelikler ve düşük karbonlu çeliklerde normal anizotropi (R) ve derin çekilebilirlik arasındaki ilişki (Schedin, E)	53

Şekil 5.1 Farklı paslanmaz çelikler için şekillendirme sınır eğrilerinin karşılaştırılması (Schedin, E) .....	56
Şekil 5.2 Eşit gerilme altında östenitik paslanmaz çelik ve karbon çeliğinin karşılaştırılması (Schedin, E) .....	57
Şekil 5.3 301 östenitik, 409 ve 430 ferritik paslanmaz çelik ve 1008 düşük karbonlu çeliğin soğuk şekillendirilmelerinin karşılaştırılması (The ASM. c) .....	58
Şekil 5.4 Akma ve kopma dayanımlarının karşılaştırılması (The ASM. c) .....	59
Şekil 6.1 Metal saclarda deformasyon hızı duyarlılığı üssü değerine bağlı olarak % üniform uzama değerinin değişimi (The ASM. c).....	62
Şekil 6.2 Çelik saclarda gerinim hızına duyarlılık üsteline bağlı olarak, deformasyon gerilmesinin değişimi (The ASM. c) .....	63
Şekil 6.3 Kartuj pirincinde tane boyutunun biçimlendirme limit diyagramı üzerindeki tesirleri (Kayalı ve Çimenoglu, 1986) .....	66
Şekil 6.4 Tavlama öncesi yapılan soğuk deformasyon miktarının ortalama çekilebilirlik oranına etkisi (Kayalı ve Ensari, 1986) .....	67
Şekil 6.5 Söndürülmemiş (a) ve söndürülmüş (b) bir çelik için farklı son sıcak haddeleme sıcaklığı ile soğuk deformasyon miktarının ortalama çekilebilirlik oranına etkisi. ....	68
Şekil 6.6 Bir söndürülmüş ve iki Al ile söndürülmemiş çelikte bobin sargı sıcaklığının R değerine etkisi. Söndürülmüş ve Al ile söndürülmemiş A çeliği Şekil 6.5'deki bileşime sahiptir. B çeliği ise (% olarak), C= 0,06 , Mn= 0,33, P= 0,009, S= 0,027, Al= 0,36 bileşimindedir (The ASM. c).....	69
Şekil 6.7 Çapak ve çapak bölgesindeki soğuk sertleşmiş bölgenin çatlama ihtimali üzerindeki etkileri (Kayalı ve Ensari, 1986).....	70
Şekil 6.8 Küresel tabanlı bir parçanın biçimlendirme işlemine ait örnek (The ASM, c) .....	71
Şekil 6.9 Düşük karbonlu çeliklerde sıkıştırma kalıbı kullanılmadan değişik kalıp geometrisine bağlı olarak derin çekme oranı sınırının değişimi (Kayalı ve Ensari, 1986) .....	73
Şekil 6.10 Deformasyon yöntemlerinde yağlamanın birim şekil değiştirme üzerindeki tesiri (Schedin, E) .....	74
Şekil 6.11 a- Aynı kuru yağlayıcı malzeme kullanıldığında, paslanmaz çelik ve karbon çeliğinin sürtünme miktarlarının mukayesesi.....	76
b- Sürtünme miktarının kuru yağlayıcı malzeme ile değişebilme olasılığı (Schedin, E) .....	76
Şekil 7.1 Derin çekme testi (Kayalı ve Ensari, 1983) .....	77
Şekil 7.2 Saclar için standart çekme deneyi numunesi (Kayalı ve Ensari, 1983) .....	78
Şekil 7.3 Mühendislik ve gerçek çekme diyagramları (Kayalı ve Ensari, 1983) .....	79
Şekil 7.4 Pekleşme üsteli (n) tayini (Dieter, 1988) .....	80
Şekil 7.5 Yük oranından pekleşme üsteli ve üniform uzamanın tayin edilmesi .....	82
(Kayalı ve Ensari, 1983).....	82
Şekil 7.6 Çeliklerde akma gerilmesine bağlı olarak pekleşme üstelinin değişimi (Kayalı ve Çimenoglu,1986)	83
Şekil 7.7 Derin çekilebilirlik oranının pekleşme üsteliyle değişimi (Kayalı ve Çimenoglu, 1986) .....	84
Şekil 7.8 Gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) ile toplam % uzama miktarının değişimi.....	84
Şekil 7.9 Normal anizotropi katsayısının tayini için, çekme numunesinin ölçü boyunda gerekli uzunlukların ( $G_o$ ve $W_o$ ) işaretlenmesi.....	86
Şekil 7.10 Metal saclarında derin çekme oranı sınırının ortalama dikey anizotropi katsayısına göre değişimi (Kayalı ve Ensari, 1983) .....	89
Şekil 7.11 Düşük karbonlu bir çelikte çekilebilirlik oranı ile deney numunesi yönü değişimi(deney yönü ile haddeleme yönü arasındaki açı/çekilebilirlik) (The ASM. c)...	90

Şekil 7.12 Derin çekme işlemi esnasında uygulanan kuvvetin zımbanın ilerleme mesafesine göre değişimi (Dieter, 1988).....	91
Şekil 7.13 Çelik saclarda ortalama dikey anizotropi katsayısı ve ortalama elastisite katsayısı arasındaki ilişki (Kayalı ve Çimenoğlu, 1986).....	91
Şekil 7.14 Çelik saclarda düzlemsel anizotropi katsayısı ve düzlemsel elastisite modülü arasındaki lineer bağlantı.....	92
Şekil 7.15 Sac çökertme deneyinde kullanılan kalıbın ana parçaları ve numunenin görünüşü (Kayalı ve Ensari, 1983).....	93
Şekil 7.16 DIN 1623'e göre düşük karbonlu çelik sacların kalınlığına göre minimum Erichsen derinlik değeri (Kayalı ve Ensari, 1983) .....	94
Şekil 7.17 Mekanik gerilim ve germe ile şekillendirme arasındaki ilişki (Schedin, E) .....	96
Şekil 7.18 Şişirme testi (Kayalı ve Ensari, 1983).....	97
Şekil 7.19 Bazı metal saclarda Erichsen derinliğinin deformasyon sertleşmesi üssüne bağlı olarak değişimi (Kayalı ve Çimenoğlu, 1986).....	97
Şekil 7.20 Rockwell ve Superficial Rockwell Test Metodu (DIN 50103).....	98
Çizelge 7.4 Rockwell ve Superficial Rockwell metoduna göre seçilmesi gereken yükler ve uçlar (DIN 50103) .....	99
Şekil 8.1 Rockwell sertlik ölçme cihazı. ....	102
Şekil 8.2 Deney parçalarının sertliklerinin ölçümü. ....	102
Şekil 8.3 Bükme deneyi numuneleri.....	103
Şekil 8.4 V- bükme kalıbı.....	103
Şekil 8.5 V-bükme kalıbı alt kısım.....	104
Şekil 8.6 İstampa. ....	104
Şekil 8.7 İstampa teknik resmi .....	104
Şekil 8.8 Bükme işlemi.....	105
Şekil 8.9 İlk kademe .....	105
Şekil 8.10 Son kademe .....	105
Şekil 8.11 Deney parçaları.....	106
Şekil 8.12 Bükme kademelerindeki parça açıları .....	106
Şekil 8.13 Kademelerdeki iç büküm radyüsleri .....	107
Şekil 8.14 Kademelerdeki dış büküm radyüsleri.....	108
Şekil 8.15 Büküm sonrası parça iç kısım genişliği.....	109
Şekil 8.16 Büküm sonrası parça dış kısım genişlikleri.....	110
Şekil 8.17 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın geri esneme katsayılarının pres kurslarına göre karşılaştırılması.....	112
Şekil 8.18 Çekme deneylerinde kullanılan TESTOMETRIC- 3 tonluk deney makinası .....	113
Şekil 8.19 Çekme testi .....	113
Şekil 8.20 Deneylerde kullanılan sac çekme numunesinin ölçüleri .....	114
Şekil 8.21 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 0°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen yük-uzama eğrileri ( $v_{çek}=17$ mm/dak) .	118
Şekil 8.22 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 0°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim- nominal gerilme eğrileri ( $v_{çek}=17$ mm/dak).....	119
Şekil 8.23 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 0°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen gerçek gerinim- gerçek gerilme eğrileri ( $v_{çek}=17$ mm/dak) .....	120
Şekil 8.24 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 45°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen yük-uzama eğrileri ( $v_{çek}=17$ mm/dak) .	121

Şekil 8.25 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 45°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim- nominal gerilme eğrileri ( $v_{çek}=17$ mm/dak).....	122
Şekil 8.26 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 45°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen gerçek gerinim- gerçek gerilme eğrileri ( $v_{çek}=17$ mm/dak) .....	123
Şekil 8.27 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 90°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen yük-uzama eğrileri ( $v_{çek}=17$ mm/dak) .	124
Şekil 8.28 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 90°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim- nominal gerilme eğrileri ( $v_{çek}=17$ mm/dak).....	125
Şekil 8.29 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 90°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen gerçek gerinim- gerçek gerilme eğrileri ( $v_{çek}=17$ mm/dak) .....	126
Şekil 8.30 AISI- 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın,haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°'lik doğrultularda çekme deneylerindeki yük- uzama eğrileri .....	127
Şekil 8.31 AISI- 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın,haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°'lik doğrultularda çekme deneylerindeki nominal gerinim- nominal gerilme eğrileri.....	128
Şekil 8.32 AISI- 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın,haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°'lik doğrultularda çekme deneylerindeki gerçek gerinim- gerçek gerilme eğrileri.....	129
Şekil 8.34 Kopma .....	130
Şekil 8.35 Deneylerde kullanılan kopmuş çekme numuneleri .....	131
Şekil 8.36 Kopmuş çekme numuneleri.....	131
Şekil 9.1 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, akma yükünün ( $F_a$ ) haddeleme yönüne göre değişimi .....	135
Şekil 9.2 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, çekme yükünün ( $F_c$ ) haddeleme yönüne göre değişimi .....	135
Şekil 9.3 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, akma dayanımının ( $\sigma_{A0.2}$ ) haddeleme yönüne göre değişimi .....	136
Şekil 9.4 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacda, çekme dayanımının (a) ve maksimum yükteki gerçek gerilmenin (b) haddeleme yönüne göre değişimi.....	136
Şekil 9.5 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacda, çekme deneylerinden elde edilen maksimum uniform gerinimin haddeleme yönüne göre değişimi .....	137
Şekil 9.6 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacda, çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinimin haddeleme yönüne göre değişimi.....	137
Şekil 9.7 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacda, çekme deneylerinden elde edilen kopmadaki uzama yüzdesi değerlerinin haddeleme yönüne göre değişimi .....	138

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Endüstride sık karşılaşılan martenzitik paslanmaz çelik türleri (Kaluç ve Tülbentçi, 1995) .....	14
Çizelge 3.2 Martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri (Kaluç ve Tülbentçi, 1995) .....	16
Çizelge 3.3 Başlıca ferritik kromlu paslanmaz çelikler (Kaluç ve Tülbentçi, 1995) .....	21
Çizelge 3.4 Östenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin yaygın kullanılan türleri.....	26
Çizelge 3.5 Östenitik paslanmaz çeliklerin bazı türlerinin oda sıcaklığındaki çekme mukavemetleri ile çentik-darbe mukavemetleri (Normalize Halde) (Colombier ve Hochmann) .....	30
Çizelge 4.1 Çeşitli metalik malzemelerin kayma mukavemetleri (Çapan, 1977) .....	35
Çizelge 4.2 Abkant preste bükme işleminde en küçük bükme yarıçapları (Aran ve Temel, 2003).....	46
Çizelge 7.3 Erichsen deney cihazının ana parçaları ile numunelerin boyutları .....	95
Çizelge 7.4 Rockwell ve Superficial Rockwell metoduna göre seçilmesi gereken yükler ve uçlar. ....	99
Çizelge 8.1 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, 10 farklı noktadan ölçülen Rockwell sertlik değerleri ve ortalaması. ....	101
Çizelge 8.2 Kademelerdeki büküm açıları .....	106
Çizelge 8.3 Kademelerdeki iç büküm radyüsleri .....	107
Çizelge 8.4 Kademelerdeki dış büküm radyüsleri.....	108
Çizelge 8.5 Büküm sonrası parça iç genişliği .....	109
Çizelge 8.6 Büküm sonrası parça dış genişliği.....	110
Çizelge 8.7 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın geri esneme katsayıları.....	111
Çizelge 8.8 AISI-304 paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 0°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen bazı mekanik özellikler.....	115
Çizelge 8.9 AISI-304 paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 45°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen bazı mekanik özellikler.....	116
Çizelge 8.10 AISI-304 paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 90°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen bazı mekanik özellikler.....	117

## ÖNSÖZ

Gıda, kimya, otomotiv başta olmak üzere bilimum imalat kollarında yarı mamul olarak kullanılan paslanmaz çelik saclar, üretim içinde büyük bir yer tutmaktadır.

Bu malzemelerin metalurjik ve mekanik özelliklerini belirlemek, buna göre de imalat esnasında presle şekillendirilebilme karakteristiklerini ortaya koymak amacıyla “Paslanmaz Çelik Saclarda Şekillendirme Karakteristikleri” adı altında hazırlamış olduğum yüksek lisans tez çalışmamda şekillendirmeye etki eden başlıca konulara deyinmeye çalıştığımı inanıyorum.

Yüksek lisans eğitimimde gerek ders gerekse tez aşamalarında danışmanım olan, çalışmalarında yardımlarını benden esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Prof. Mehmet Emin YURCİ başta olmak üzere, deney numunelerinin hazırlanmasında bana yardımcı olan dostum Mak.Müh İzzet ERDEN’e teşekkürlerimi belirtmek isterim.

En zor zamanlarımda daima yanımda hissederek destek bulduğum annem Zekiye ARKUN, babam Mustafa Kemal ARKUN, ve bu araştırmanın her safhasında bana daima destek veren eşim Nihan ARKUN’a teşekkürlerimi buradan bir kez daha ifade etmeyi bir görev bilmekteyim.

Ayrıca bu tezimi fani dünyadan göçüp giden değerli aile büyüklerimin ruhlarına hürmetlerimle ithaf ediyorum.

Son olarak, Türk ulusuna daima doğru hedefleri göstermiş olan yüce önder Mustafa Kemal ATATÜRK’ün şu sözüyle yazımı tamamlamayı bir görev bilmekteyim.

***“İlim ve fennin dışında yol gösterici aramak gaflettir, cahilliktir, doğru yoldan sapmaktır.”***

Saygılarımla  
**EMRE ARKUN**  
**Makine Mühendisi**

## ÖZET

Paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşim değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilir. Krom miktarı yükseltilecek veya nikel ve molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı artırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum, azot, kükürt ve selenyum gibi bazı elementlerle alaşımlama ile olumlu etkiler sağlanabilir. Bu şekilde makine tasarımcıları ve imalatçıları değişik kullanımlar için en uygun paslanmaz çeliği seçme şansına sahip olurlar.

Paslanmaz çeliklerde iç yapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Bunlardan öncelikle krom ve nikel iç yapının ferritik veya östenitik olmasını belirlerler.

Paslanmaz çelikler; martenzitik, ferritik ve östenitik olmak üzere üç kategoride incelenebilir. Paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu soğuk şekillendirme ile pekleşir ve dayanımın artması sayesinde tasarımlarda malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığı ve fiyatta önemli düşüşler sağlanabilir. Bazı türlerde ise ısıtma işlemi ile malzemeye çok yüksek bir dayanım kazandırmak mümkündür.

Bu tezde, paslanmaz çelik sacların genel özellikleri incelenmiş, şekil değiştirme ve işlem karakteristikleri incelenmiştir.

Son bölümde, paslanmaz çelik sacların şekillendirme karakteristiklerini ortaya koyma mahiyetinde çekme ve bükme deneyleri yapılmıştır. Malzeme türü sabit tutulup kalınlık ve haddeleme yönü faktörlerinin şekil değiştirme karakteristikleri üzerine etkisi incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Paslanmaz çelik saclar, mekanik ve metalurjik karakteristikler, şekillendirilebilirlik karakteristikleri, mekanik deneyler.

## **ABSTRACT**

The authors studied by the change of chemical composition in stainless steels, different characteristic alloys are formed. The corrosion resistance is increased by the increase the amount of Cr or adding Ni and Mo. Cu, Ti, Al, Si, Ni, Na, S and Se support good effects for the alloys. So the manufacturers easily select the material.

In stainless steel Cr, Ni, Mo and Na is important for the structure of material. First of all Cr and Ni support the structure, ferritic or austenitic. Stainless steels can be classified into three categories, martensitic, ferritic and austenitic. The strength and contipation of stainless steels are increased by the cold forming so the decrease of thickness and weight will be economic. High strength is supported for some groups of steels by heat threatment.

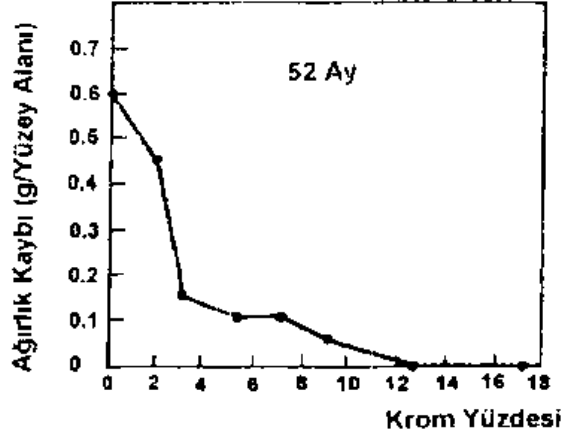
In this thesis, the process and forming characteristics which control forming of stainless steels, are discussed.

In last part, thickness and rolling direction parameters acts to the formability of stainless steel sheets is determined by tensile tests and bending tests.

**Keywords:** Stainless steel sheets, mechanical and metalurgical characteristics, forming characteristics, mechanical tests.

## 1 GİRİŞ

Çağımız endüstrisinin vazgeçilmez malzemeleri arasına giren paslanmaz çeliklerin her geçen gün kullanım alanlarının artmasının temel nedeni korozif ortamlarda mekanik özelliklerini yitirmeden gösterdikleri yüksek korozyon dirençleridir. Her türde ve biçimde bulunabilen paslanmaz çelikler kolaylıkla şekillendirilebilirler.



Şekil 1.1 Çeliğin Atmosferik Korozyonu Üzerine Kromun Etkisi (Kaluç ve Tülbentçi, 1995)

Çelikte korozyon ve oksidasyona karşı mukavemeti arttıran ve katılması mutlak gereken alaşım elementi kromdur. Krom çeliği küçük taneli yapar, kritik soğuma hızını azaltarak şiddetli sertleştirici etkide bulunur.

Paslanmaz çelikler, paslanmazlık özelliklerine sahip olabilmeleri için bileşimlerinde en az %12 Cr içermek zorundadırlar. Paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklıklarda oksidasyon dirençleri de artan krom miktarına bağlı olarak yükselmektedir.

Aslında çelikler diğer demir alaşımlarının büyük bir kısmı gibi atmosferde oksitlenirler ve yüzeylerinde pas olarak adlandırdığımız bir oksit tabakası oluşur. Alüminyum ve çinkonun yüzeyinde oluşan koruyucu oksit tabakasının tersine çeliğin yüzeyini kaplayan pas, oksitlenmenin iç kısımlara ilerlemesine engel olmaz. Paslanmaz çeliklerde ise, korozyon direnci artan krom miktarına bağlı olarak yükselmektedir; bu olay üzerine yani çeliğin paslanmazlığı konusunda birçok görüşler oluşmuştur. Bunlardan en kabul göreni, sıkı ve ince bir krom oksit tabakasının paslanmaz çelik üzerinde oluştuğu ve bu tabakanın oksidasyonun

ve korozyonun ilerlemesine engel olduğudur. Gerçekten elektrokimyasal gerilim serisine bakıldığında krom; demirden daha az asil olan bir metaldir. Çeliğin içeriğindeki kromun koruyucu etkisi, krom ile oksijen arasındaki benzerlikten ileri gelmektedir. Krom içeren çelikler yüzeyleri bir krom oksit tabakası ile örtülü olmadıkları sürece korozyona ve özellikle oksidasyona karşı çok hassastırlar, bu hale “aktif” denir, buna karşın bu oksit tabakası oluşma olanağı bulunduğu metali korozif ortamlara karşı korur, dolayısı ile de çelikler “pasifleşmiş” olur. Pasivitenin sınırları ile derecesi ortamın aktivitesi ile paslanmaz çeliğin tür ve bileşimine bağlıdır. Koşulların uygun olduğu hallerde pasivite kalıcıdır ve paslanmaz çelik çok yavaş bir korozyon hızına sahiptir (Kaluç ve Tülbentçi, 1995).

Bu pasif film yok olduğunda ve yeniden oluşması için gerekli koşulların bulunmaması halinde paslanmaz çelik normal karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler gibi korozyona uğrayabilir. İşte bu bakımdan paslanmaz çeliğin korozyon direncinin oluşabilmesi için en az %12 Cr içermesi ve ortamda da oksijen bulunmasına gerek vardır (Colombier ve Hochmann).

Paslanmaz çeliğin yüzeyinde pasif bir tabakanın oluşabilmesi için mutlaka bir kimyasal işleme de gerek yoktur. Bu film, yüzeyin oksijen ile teması halinde aniden oluşur, yani pasivasyon işlemi yüzeyde bulunan serbest demirin, oksitlerin ve diğer yüzey kirlerinin uzaklaştırılması esasına dayanır. Örneğin, çelikhaneden çıkan paslanmaz çelik, genellikle nitrik asit ve florik asit karışımı bir asit banyosunda temizlendikten sonra, parça hava ile temas ettiğinde üzerinde hemen pasif film tabakası oluşur (Outokumpu, 2004).

Alaşım elementi olarak çeliğin içinde %12’yi aşan miktarda kromun bulunması, çeliği atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi,  $\text{HNO}_3$  (Nitrik Asit) gibi oksitleyici asitlere karşı da korur, buna karşın yalnız krom içeren çelikler  $\text{HCl}$  (Hidroklorik Asit) ve  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Sülfürik Asit) gibi asitlere karşı dayanıklı değildirler. Bu asitler yüzeyi koruyan krom oksit tabakasını ortadan kaldırır ve dolayısı ile çelik korumasız kalır. Günümüz endüstrisinde redükleyici asitlere karşı da iyi bir direnç gösteren, içinde nikel, molibden gibi alaşım elementleri bulunan paslanmaz çelikler üretilmektedir. Bu tür çelikler yapılarında kromun yanısıra yüksek miktarlarda nikel ve molibden içerirler; bu alaşım elementleri çeliklerin mikroyapılarını etkin bir biçimde değiştirebilir, bu durum paslanmaz çeliklerin sınıflandırılmasına da yardımcı olur (Outokumpu, 2004).

Sacların mekanik özellikleri, şekillendirilebilirliği etkileyen en önemli faktörlerdir. Malzemenin kimyasal bileşimi, üretim yöntemleri ve üretim safhalarında uygulanan işlemler, sac kalitelerindeki mekanik özellik farklılıklarını tayin eden başlıca etkenlerdir. Malzemenin temel mekanik özellikleri, çekme deneylerinden belirlenebilmektedir. Bu deneylerde sünekliği doğrudan ifade eden uzama değerlerinin artması, şekillendirilebilirlikteki artışın en belirgin göstergesi olmaktadır. Süneklik ile dayanım (özellikle akma dayanımı) ve sertlik genelde ters orantılıdır. Dayanım ve uzamanın yanı sıra, sac malzemelerin pekleşme üsteli (n), gerinim hızına duyarlılığı (m) ve plastik gerinim oranı R, şekillendirilebilirliği artırıcı rol üstlenen diğer mekanik karakteristikler olmaktadır (Dieter, 1988).

Saclarda germe ile şekillendirilebilirliği yansıtan en önemli mekanik karakteristik, malzemenin pekleşme kapasitesini yansıtan n değeridir. Bir çekme deneyinde  $\sigma = K \epsilon^n$  davranışını sergileyen malzemelerde, maksimum yükün meydana geldiği ve kesitte yayılı boyunlanmanın başladığı andaki maksimum üniform gerinim  $\epsilon_u = n$  olmaktadır. Buradan anlaşıldığı üzere, malzemenin pekleşme üstelinin artması ile kesitteki kritik bölgelerde oluşan pekleşmenin derecesi de artmakta ve boyunlanmaya karşı daha yüksek bir direnç meydana gelmektedir. Böylece üniform gerinim alanı da büyümektedir. Gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) ise, özellikle boyun oluştuktan sonra uzamayı artırıcı etkisi önemlidir (Hosford ve Duncan, 1999).

Plastik gerinim oranı (R), sacların derin çekilebilirliğini ifade eden diğer bir mekanik karakteristiktir. Bu oran daralma gerinimi / incelme gerinimi olarak hesaplanmakta ve sacın incelmeye karşı direncini göstermektedir. R değeri, belli bir tekstüre sahip sac malzemede anizotropinin kalınlık yönündeki etkisini yansıttığından, 'normal anizotropi büyüklüğü' olarak da adlandırılmaktadır. Bu oranın derin çekme özelliğini artırıcı etkisi, artan R değerleri ile akma düzleminin deforme olmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek R değerine sahip bir sacdan derin çekilen bir kaptan, cidardaki gerilme haline göre dayanım artmakta ve incelme eğilimi azalmaktadır. Flanşta ise dayanım düşmekte ve sacın bu bölgede büzülerek kalıp içerisine akışı kolaylaşmaktadır.

Sac şekillendirilebilirliği, malzeme özelliklerinin yanı sıra işlem faktörleri tarafından da belirlenmektedir. Örneğin bir derin çekme işleminde bastırıcı kuvveti, kalıp ve ıstampa

boyutları, yağlama, ıstampa hızı gibi faktörler belirgin rol oynamaktadır. Malzeme ve işlem faktörlerinin sac şekillendirilebilirliğe olan etkisi, araştırmacılar tarafından teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. En genel söylemle, şekillendirme işlemlerinde malzemenin plastik akışının kolaylaşması, şekillendirilebilirlikteki artışın nedeni olmaktadır.

## 2 PASLANMAZ ÇELİKLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

### 2.1 Paslanmaz çeliklerin metalurjik özellikleri

Paslanmaz çeliklerin içerisinde, paslanmazlık özelliğini sağlayan elementlerin yanı sıra, diğer bazı gereksinimleri karşılamak üzere isteyerek katılan alaşım elementleri veya kaçınılmaz olarak bulunan karbon ve katışıklar bulunmaktadır.

**Alüminyum:** Kuvvetli bir ferrit yapıcıdır. Yüksek sıcaklık tufalleşme direncini arttırmada kullanılır. Titanyum ile beraber bazı yüksek mukavemetli alaşımlara katılarak yaşlanma sertleşmesi etkisini azaltır. Kuvvetli nitrür yapıcıdır.

**Karbon:** Kuvvetli östenit yapıcıdır. Yüksek mukavemetli alaşımlara sertleştirme ve mukavemet arttırıcı etki için katılmaktadır.

**Niobyum:** Nb Kuvvetli bir karbür yapıcıdır. Östenitik paslanmaz çelikleri krom karbür çökmesine karşı dengelemede kullanılır. Orta şiddette ferrit yapıcıdır. Yüksek mukavemetli bazı alaşımlara sertliği ve mukavemeti etkilemek için katılmaktadır. Bazı martenzitik paslanmaz çelik türlerine karbonu bağlayarak çeliğin sertleşme eğilimini azaltmak amacı ile katılır.

**Kobalt:** Bir çok paslanmaz alaşımın yüksek sıcaklıklardaki sürünme (creep) ve mukavemet özelliklerini geliştirmek amacı ile katılır.

**Krom:** Bir karbür ve ferrit yapıcıdır. Korozyon ve tufalleşme direncini sağlayan alaşım elementidir. Bu elementin paslanmaz çeliklerde yüksek sıcaklıkta mukavemet ve sürünme mukavemetine belirgin bir etkisi yoktur.

**Mangan:** Östenit yapıcıdır.

**Azot:** Kuvvetli östenit yapıcıdır. Yüksek kromlu ve az karbonlu çeliklerde yüksek sıcaklıklardaki tane büyümesini önlemek için katılır. Mukavemeti artırır.

**Nikel:** Kuvvetli östenit yapıcı ve dengeleyicidir. Oksitleyici olmayan sıvılara karşı genel korozyon direncini arttırmak için katılır. Bazen, kromlu paslanmaz çeliklere mekanik özellikleri geliştirmek için az miktarda eklenir.

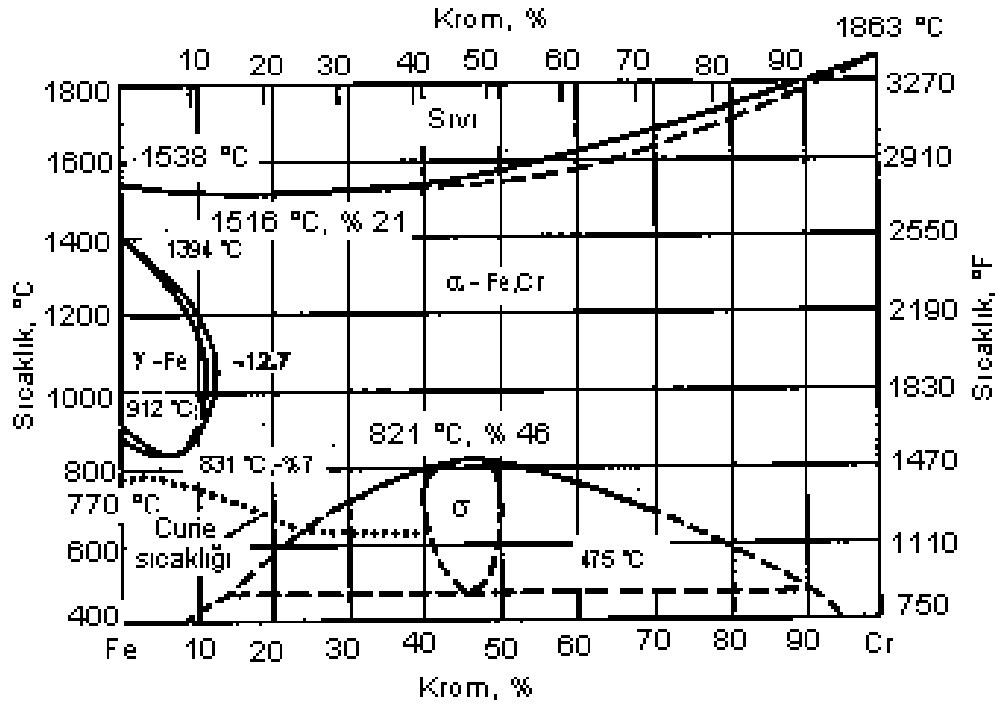
**Silisyum:** Bir ferrit yapıcıdır. Östenitik çeliklerde korozyon direncini arttırmak için kullanılır. Yüksek sıcaklıkta tufalleşme direncini artırır. Yüksek sıcaklıkta kullanılacak çeliklerin karbürizasyon direncini arttırmak için katılmaktadır.

**Titanyum:** Kuvvetli karbür ve nitrür yapıcıdır. Östenitik paslanmaz çeliklerde krom karbür çökmesini önlemek için dengeleme elementi olarak kullanılır. Kuvvetli ferrit yapıcıdır. Bazı yüksek sıcaklığa dayanımlı alaşımlara sertlik ve mukavemet artırıcı etkilerinden ötürü katılır, bazı yüksek mukavemetli ve ısıya dayanıklı alaşımlara yaşlanma sertleşmesini etkilemek için alüminyum ile beraber eklenir.

**Tungsten (Wolfram):** Bazı yüksek sıcaklık alaşımlarının mukavemet ve sürünme direncini arttırmak için eklenir. Kuvvetli bir ferrit yapıcıdır (Kaluç ve Tülbentçi, 1995).

## 2.2 Paslanmaz çeliklerin faz diyagramları

Demir-krom sistemi paslanmaz çelikler grubunun temelini oluşturur. Krom, kübik hacim merkezli kristal kafes (KHM) yapısına sahip ferriti kararlı hale getirir. Demir-krom denge diyagramında kübik yüzey merkezli (KYM) kristal kafes yapısına sahip östenitin oluşturduğu bölge olan östenit ( $\gamma$ ) alanını kapalı hale getirir ve bu faz en büyük krom çözünürlüğünü (%12), 1000°C civarında gösterir. Demir-krom denge diyagramından da görüldüğü gibi (Şekil 2.1), 1390°C'nin üzerinde ve 830°C'nin altındaki sıcaklıklarda hiçbir bölgede östenite rastlanmaz (Davis, J.R).



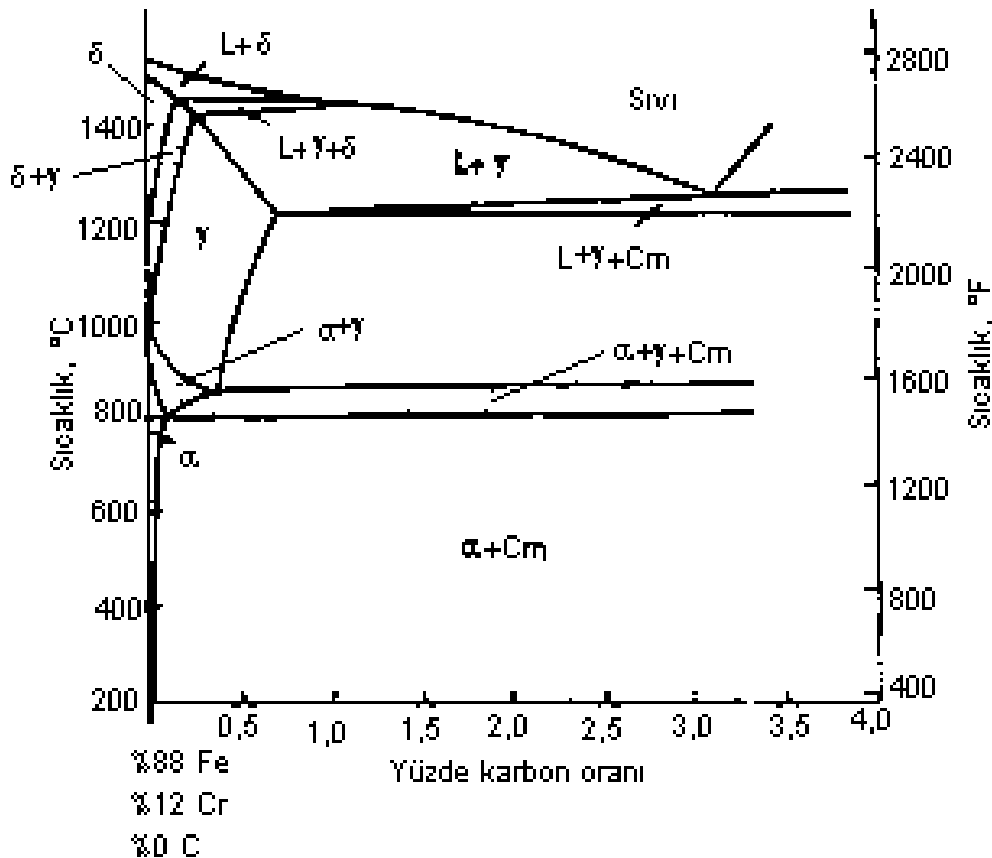
Şekil 2.1 İkili demir-krom denge diyagramı (Davis, J.R)

Saf demir-krom alaşımları Şekil 2.1'deki ikili faz diyagramından da görüldüğü gibi % 12'den fazla krom içermeleri halinde sıvı halden itibaren katılaştıklarında KHM kristal kafesli ferrit halinde katılaşmaktadır ve soğuma sırasında da hiçbir dönüşüm göstermemektedir. Bu olay kararlı östenit alanını da keskin bir şekilde sınırlandıran kromun ferrit oluşturma yeteneğinden kaynaklanmaktadır (Davis, J.R).

Diyagramın sol üst tarafında bulunan bir cep biçimindeki  $\gamma$  alanı alaşımın içeriğindeki karbon miktarına bağlı olarak genişlemektedir.  $\gamma$  alanını genişleten diğer bir element de azottur. Çok kuvvetli birer östenit dengeleyici olan C ve N,  $\gamma$  alanını genişleterek östenit içinde kromun çözünürlüğünü artırır. Örneğin, burada karbon+azot (C+N) miktarı % 0,13'e eriştiğinde  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$  dönüşümünün görülmemesi için krom içeriğinin % 24'e, C+N miktarının %0,2'ye çıkması halinde ise krom miktarının %27'ye yükselmesi gerekmektedir (Davis, J.R).

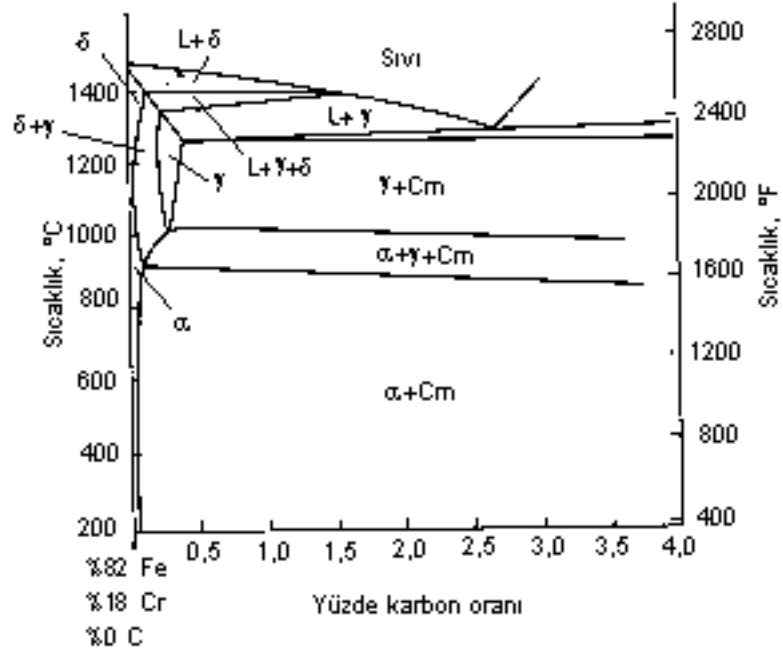
Demir-krom denge diyagramının alt orta bölgesinde görülen  $\sigma$ -fazı, tetragonal bir kafes yapısına sahiptir. Bu faz çok yavaş bir hızla 800 – 600 °C sıcaklık aralığında oluşur. Zaman zaman çeşitli ticari paslanmaz çelik türlerinde, uzun süre belirli sıcaklıklara maruz kalma sonucu görülen sert ve gevrek metallere arası bir bileşik olan bu  $\sigma$ -fazının demir-krom ikili alaşım sisteminde oluşum aralığı çok dardır ve ticari paslanmaz çelik alaşımlarının bileşiminde Si ve Mo gibi ferrit yapıcıların varlığı  $\sigma$ -fazının oluşumunu hızlandırdığı gibi varolduğu sıcaklık alanını da genişletir. 520°C'nin altındaki sıcaklıklarda bu faz ötektoid bir dönüşüm ile  $\alpha+\alpha'$  fazlarına ayrışır. Bu katı hal reaksiyonunun oluşum ve gelişme hızı çok yavaştır. Hızlı soğuma  $\sigma$ -fazının oluşumunu önler ve bu durumda da  $\alpha'$  fazı 520°C'nin altında ayrışarak ortaya çıkar.  $\alpha'$  fazı yaklaşık olarak % 90 Cr içerir, gevrek bir fazdır ve bunun çökmesi sonucu 475 °C gevrekliği diye adlandırılan bir olay ile karşılaşılır.

$\alpha+\alpha'$  fazlarının kafes parametreleri arasında sadece %0,2 kadar bir fark vardır ama buna karşın  $\alpha$  demirce zengin,  $\alpha'$  kromca zengin ferrittir (Avner, 1974) .



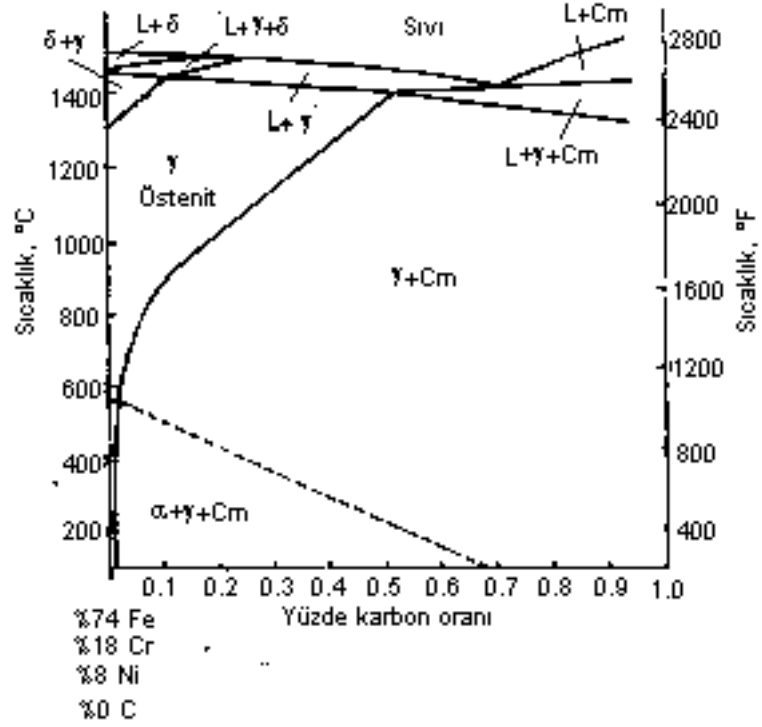
Şekil 2.2 Diyagramın yatay eksenini %12 Cr içeren çelikleri gösterir (Avner, 1974)

Şekil 2.2'de %12 Cr ve değişken karbon miktarları içeren çelikler için bir diyagram görülmektedir. Demir-demir karbür diyagramıyla karşılaştırmada, mevcut olan kromun bu miktarı, kritik sıcaklıkları arttırır ve östenit bölgeyi küçültür. Bununla birlikte uygun karbon miktarıyla bu çelikler, alaşımsız karbon çelikleri gibi sıcakta işlenebilir bir martenzitik yapı olabilirler (Avner, 1974).



Şekil 2.3 Diyagramın yatay eksenini %18 Cr içeren demir-karbon alaşımları içindir (Avner,1974)

Şekil 2.3'de % 18 Cr ve farklı karbon miktarlarındaki bir diyagram görülmektedir. Bu diyagramın anlatmak istediği husus; eğer çelikteki karbon miktarı düşerse, östenit sıcakta şekillendirilemeyecektir. Bu çelikler sertleştirilemeyecek, daha sonraki sertleştirme işlemine rağmen sadece düşük sertlikteki ferrit şeklini alacaktır (Avner, 1974).



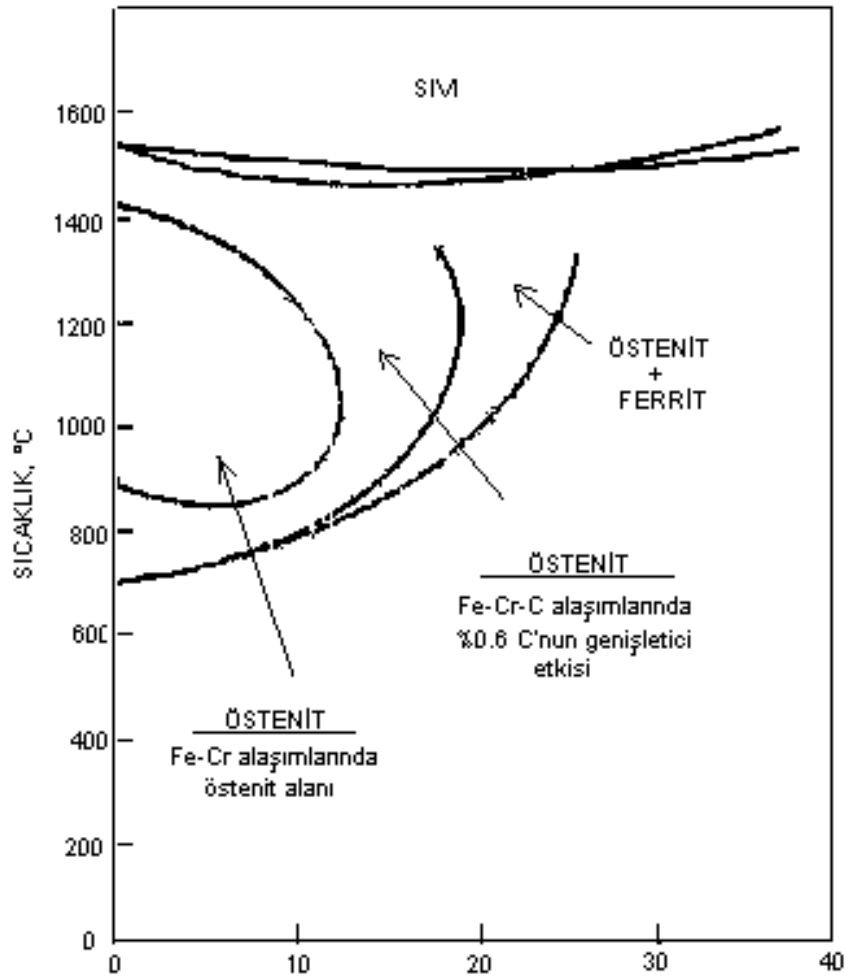
Şekil 2.4 %18 Cr ve %8 Ni içeren alaşımlı çelikte reaksiyonların eğilimini gösteren diyagramın yatay eksenini deneme sonucudur (Avner, 1974)

Şekil 2.4; % 18 Cr, % 8 Ni ve farklı karbon miktarlarındaki çeliğin değişimindeki yönelmeyi göstermektedir. Sıcaklık yükseldiğinde oluşan östenit form, özellikle değişime isteksiz dengeli faz ve tavlama sonrası oluşan yapıyı koruma eğilimindedir (Avner, 1974).

### 3 PASLANMAZ ÇELİK TÜRLERİ

#### 3.1 Martenzitik kromlu paslanmaz çelikler

Martenzitik kromlu paslanmaz çelikler % 11,5'tan fazla krom içeren ve yüksek sıcaklıklarda östenit yapısına sahip olan ve uygun bir soğutma işlemi ile de iç yapıları oda sıcaklığında martenzitik olan paslanmaz çeliklerdir. Yukarıdaki tanım bu tür paslanmaz çeliklerin krom içeriğini sınırlamaktadır zira, bu dönüşümün gerçekleşebilmesi için çeliğin bileşiminin yüksek sıcaklıklarda  $\gamma$  alanı içine düşmesi gerekmektedir. Önceden belirtilmiş olduğu gibi karbon,  $\gamma$  halkasını genişlettiğinden uygulamada çeliğin içeriğinde bulunan karbon yardımı ile %18 Cr içeren çelik de yüksek sıcaklıkta tam östenitik yapıya dönüşebileceğinden bu gruba girmektedir (Şekil 3.1). Bu tür paslanmaz çeliklerde krom miktarı alttan % 11,5, üstten de % 18 ile sınırlanmıştır. Burada alt sınırı korozyon direnci, üst sınırı ise yüksek sıcaklıkta çeliğin tamamen östenitik yapıya dönüşebilme özelliği belirlemektedir (Davis, J.R).



Şekil 3.1 Fe-Cr Alaşımlarında karbon miktarının östenit alanını genişletici etkisi

AISI Normuna göre 4XX serisi şeklinde gruplandırılan bu tür çelikler DIN ve TSE standartlarına göre yüksek alaşımlı çelikler grubu gibi simgelendirilerek X10Cr13, X105CrMo17 tarzında işaretlenmektedir (Çizelge 3.1). TS 2535 paslanmaz çelikleri, çeşitli kimyasal etkilere karşı dayanıklı olan ve bileşiminde ağırlık olarak % 11,5'tan çok krom içeren çeliktir diye tanımlar iken martenzitik paslanmaz çelikleri, bileşiminde % 11,5 – 18 Cr bulunan ve ısıl işlem ile sertleştirilebilen martenzitik yapılu paslanmaz çeliktir diye tanımlamaktadır (Kaluç ve Tülbentçi, 1995).

Aslında 1950'li yıllardan sonra geliştirilen az karbonlu krom-nikelli martenzitik paslanmaz çelikler (yumuşak martenzitik çelikler) hariç tutulursa bu gruba giren çeliklerden %16-18 Cr ve sertleşmeyi sağlayacak miktarda karbon içeren 440 türü dışındakilerin krom içeriği %14'ü aşmaz ve diğer alaşım elementlerinin toplamı da % 2 ila % 3'den fazla değildir.

Martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerin uygulama alanları ve özelliklerinden bir bölümü Şekil 3.2'de verilmiştir (Avner, 1974).

Bu tür paslanmaz çelikler, normal karbonlu çeliklerden daha zor işlenirler. X12CrS13 (416) çeliğinde az miktarda kükürt ve AISI normunda 416Se olarak bilinen çelikte de az miktarda selenyum işlenebilme kabiliyetini geliştirir. Selenyum kullanılması korozyon direnci üzerine kükürttten daha az etkilidir. Yüksek karbonlu türlerde; örneğin; X90CrMoV18 (440B), X105CrMo17 (440C), karbon % 0,60-1,20 arasında, krom ise %16-18 arasında bulunmaktadır. Bu türler yüksek mukavemete, yüksek korozyon ve aşınma direncine sahiptirler; dolayısı ile de bu türler kesici takımların, vanaların ve rulmanlı yatakların yapımında uygulama alanı bulmuştur.

Martenzitik paslanmaz çeliklerin kritik soğuma hızlarının çok yavaş olması, yavaş soğuma halindeki, örneğin sakin havada soğuma, martenzit oluşumuna neden olur. Bu tür çeliklerin, martenzitik halde, sertleşmiş durumda korozyon dirençleri oldukça iyidir. 815°C'ye kadar paslanmazlık özelliklerini yitirmezler, yalnız uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalırlarsa hafif korozyon başlangıcı olur ki bu bakımdan, endüstride sürekli olarak 700°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılamazlar.

<p><b>X 15 Cr13 ( 403 )</b></p> <p>410 kalitesine benzer buhar türbini kanatlarında ve bazı yüksek mukavemetli makine parçalarında kullanılır.</p> <p>C≤0.15, Si=0.5, Mn=1.0, Cr=11.5-13</p>	<p><b>X 10 Cr 13 ( 410 )</b></p> <p>Bu türün asıl alaşımıdır. Isıl işleme tabi tutulabilir. Makine parçaları pompa milleri yapımında kullanılır.</p> <p>C=0.08-0.12, Si=1.0, Mn=1.0, Cr=12-14</p>	<p><b>X 12 Cr S 13 ( 416 )</b></p> <p>410'un modifiye edilmiş otomat çeliğidir (S içerir). Kesici takımların yapımında kullanılır.</p> <p>C≤0.15, Si=1.0, Mn=1.25, Cr=12-14 Mo=0.6</p>	<p><b>X 20 Cr 13 ( 420 )</b></p> <p>410'un yüksek karbonlu türüdür. Yüksek sertlik ve aşınma direncine sahiptir. Bıçak, cerrahi alet ve vana yapımında kullanılır.</p> <p>C=0.17-0.22, Si=1.0, Mn=1.0, Cr=12-14</p>	<p><b>X 105 Cr Mo 17 ( 440 C )</b></p> <p>Paslanmaz çeliklerin çok yüksek karbonlu türüdür. Bilya, yatak yapımında kullanılır.</p> <p>C=0.95, Si=1.0, Mn=1.0, Cr=12-14</p>
<p><b>( 416Se )</b></p> <p>410'un modifiye edilmiş otomat çeliğidir. Hafif kesiciler sıcak veya soğuk dövme kalıpları yapımında kullanılır.</p> <p>C≤0.15, Si=1.0, Mn=1.25, Cr=12-14 Se≤0.15</p>	<p><b>( 440A )</b></p> <p>440B'den daha az karbon içerir. Yüksek korozyon direnci gösterir. Kesici takım ve vana parçalarının yapımında kullanılır.</p> <p>C=0.6-0.75, Si=1.0, Mn=1.0, Cr=16-18 Mo=0.75</p>	<p><b>X 90 Cr MoV 18 ( 440B )</b></p> <p>440C'den daha az karbon içerir. İyi tokluk özelliği vardır. İnce kesici takımlar ve vana parçalarının yapımında kullanılır.</p> <p>C=0.75-0.95, Si=1.0, Mn=1.0, Cr=16-18 Mo=0.75</p>		
<p><b>X 22 Cr Ni 17 ( 431 )</b></p> <p>Yüksek korozyon ve mekanik özelliklere sahiptir. Uçaklarda bağlantı parçaları, ısıtıcı çubukları, kağıt makinaları parçalarının yapımında kullanılır.</p> <p>C≤0.20, Si=1.0, Mn=1.0, Cr=15-17 Ni=1.25-2.5</p>				

Şekil 3.2 Martenzitik kromlu paslanmaz çelikler ve uygulama alanları (Avner, 1974)

Çizelge 3.1 Endüstride sık karşılaşılan martenzitik paslanmaz çelik türleri

(Kaluç ve Tülbentçi, 1995)

AISI (UNS)*	EURONORM DIN (TSE)	Kimyasal Bileşim (%)								
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Diğer
403(S40300)	X6Cr13	≤0.15	1.00	0.040	0.030	0.50	11.50 / 13.00			
410(S41000)	X10Cr13	≤0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50 / 13.50			
414(S41400)	X22CrNi17	≤0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50 / 13.50	1.25 / 2.50		
416(S41600)	X12CrS13	≤0.15	1.25	0.060	0.15 (min)	1.00	12.00 / 14.00		0.60*	
416Se(S41623)	-	≤0.15	1.25	0.060	0.060	1.00	12.00 / 14.00			0.15 Se (min)
420(S42000)	X20Cr13	0.15 (min)	1.00	0.040	0.030	1.00	12.00 / 14.00			
420F(S42020)	-	0.15 (min)	1.25	0.060	0.15 (min)	1.00	12.00 / 14.00		0.60*	
422(S42200)	-	0.20 / 0.25	1.00	0.025	0.025	0.75	11.00 / 13.00	0.50 / 1.00	0.75 /1.25	0.15/0.30V 0.75/1.25W
431(S43100)	X20CrNi172	0.20	1.00	0.040	0.030	1.00	15.00 / 17.00	1.25 / 2.50		
440A(S44002)	-	0.60 / 0.75	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00 / 18.00		0.75	
440B(S44003)	-	0.75 / 0.95	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00 / 18.00		0.75	
440C(S44004)	X105CrMo17	0.95 / 1.20	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00 / 18.00		0.75	
*ASTM-SAE Unified Numbering System										

Yüksek alaşımli çelikler gibi sertleştirilip temperlenen bu çelikler manyetikler ve oldukça üstün mukavemet özelliklerine sahiptirler.

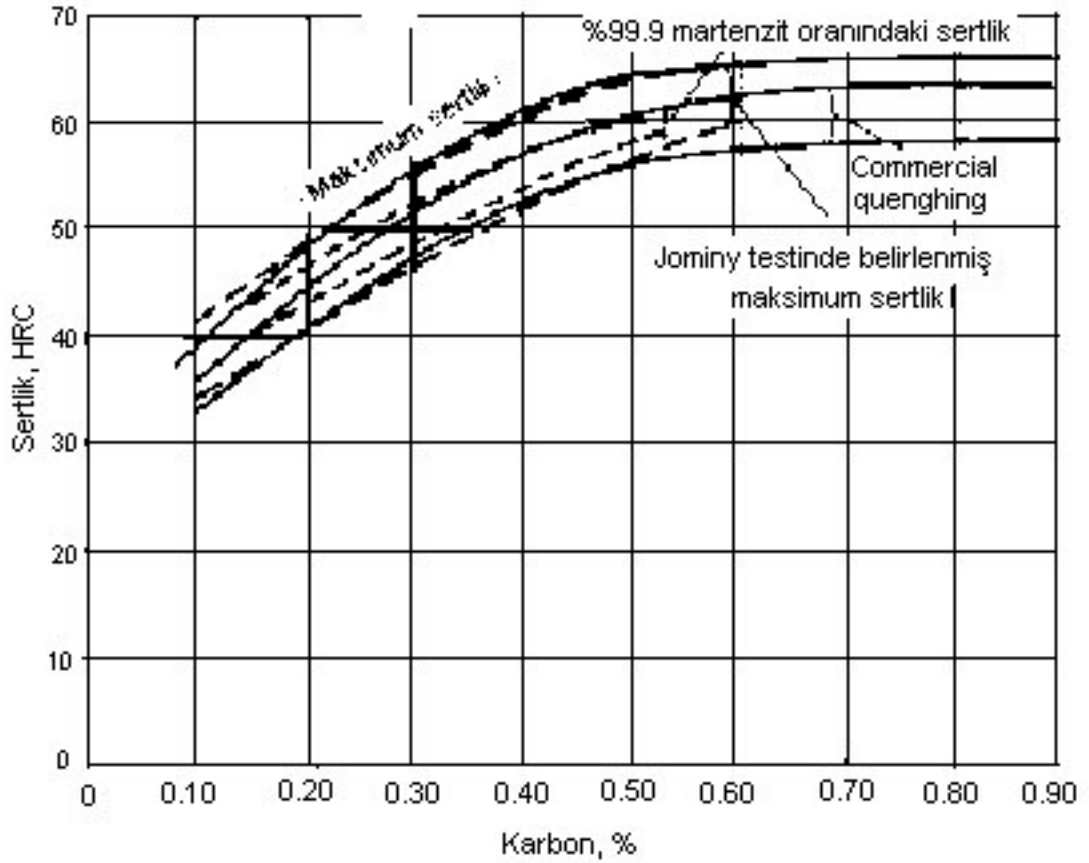
Piyasadan, su verilmiş ve temperlenmiş (ıslah edilmiş) olarak temin edilebilen bu tür çeliklerin cazip çekme mukavemeti özellikleri imalatçıları bunların diğer özelliklerini göz önüne almadan kullanmaya teşvik etmektedir. Çizelge 3.2'de martenzitik paslanmaz çeliklerin normalize durumdaki çekme özellikleri verilmiştir. Yalnız burada normalize deyimi ile sade karbonlu ve az alaşımli çeliklerdeki normalizasyonun aynı anlamda olmadığını göz önünden uzak tutmamak lazımdır. Zira bu tür çeliklerde normalize deyimi ile oldukça yüksek sıcaklıkta temperlenmiş bir ıslah işlemi anlatılmaktadır (Kaluç ve Tülbentçi, 1995).

Martenzitik paslanmaz çeliklerin çekme mukavemeti aynı karbon içeriğine sahip karbonlu ve az alaşımli çeliklerden çok daha yüksektir.

AISI 414 ve 431 türlerinde görülen yüksek mukavemet, düşük tokluk bu çeliğin bir miktar nikel içermesi ve bu neden ile östenit bölgesinin daha aşağı sıcaklıklara kadar inmiş olması sonucu temperleme sıcaklığının yükseltilmesinden kaynaklanmaktadır. Katı eriyik sertleşmesine karbonun etkisini görebilmek için % 0,1 C içeren 410, %0,2 C içeren 420, % 0,6-1,0 C içeren 440 çeliğinin çekme mukavemetlerini karşılaştırmak gerekir. Bu tür çeliklerin mekanik özellikleri üzerine en büyük etkiyi temperleme sıcaklığı yapmaktadır.

Çizelge 3.2 Martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri (Kaluç ve Tülbentçi, 1995)

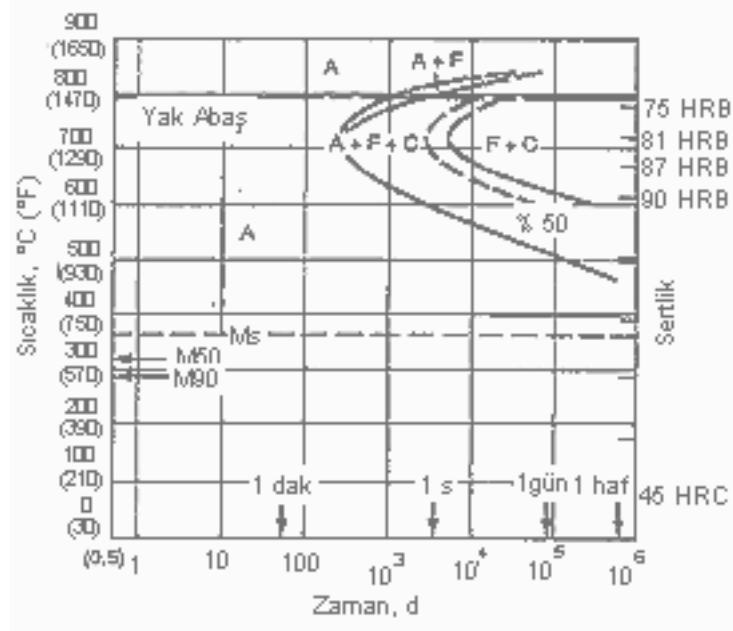
UNS	AISI	Akma Mukavemeti (%0,2 sınırı) MPa	Çekme Mukavemeti MPa	Uzama (50mm'de %)	Büzülme (%)
S41000	410 Sac	310	483	25	-
	Çubuk	276	517	35	-
	Levha	241	483	30	70
S41400	414	621	783	20	60
S41600	416				
S41623	416Se	276	517	30	60
S42000	420	345	655	25	55
S43100	431	655	862	20	55
S44002	440A	414	724	20	45
S44003	440B	427	738	18	35
S44004	440C	448	756	14	25



Şekil 3.3 Tam sertleştirilmiş çeliklerin %C oranına göre sertlikleri (Davis, J.R)

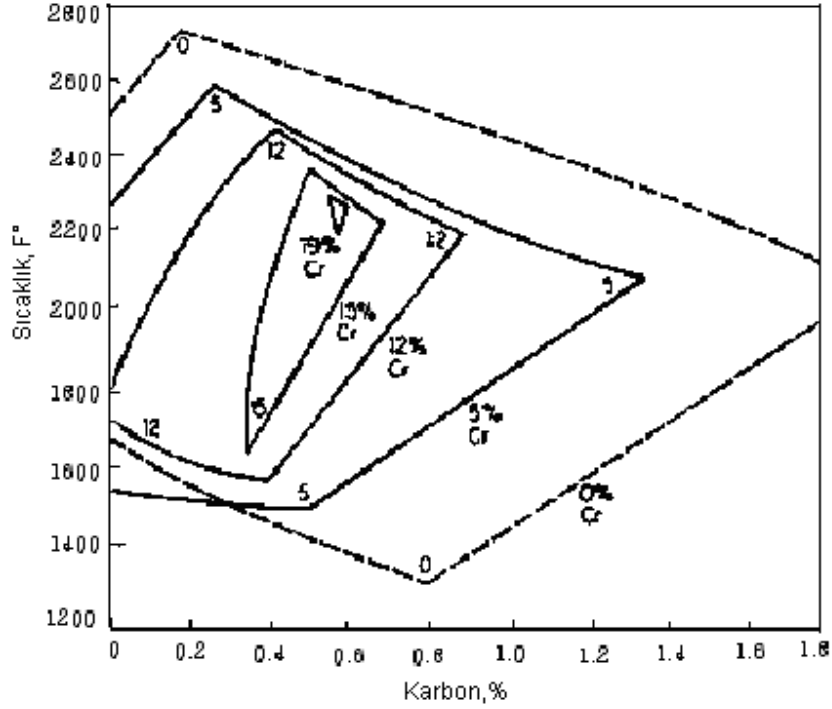
Bu tür çeliklerde önemli bir özellik de çok kalın kesitler dışında 820°C ve daha yüksek sıcaklıklardan itibaren havada soğuma halinde dahi sertleşebilmelerini sağlayacak derecede yeterli krom içermeleridir. Maksimum sertlik 960 °C'nin üzerinde bir tavlama sonucunda

sağlanır. Şekil 3.4'deki TTT diyagramı X10Cr13 (410) çeliğinde martenzit oluşumunu gösterir. Yaklaşık %17 Cr'un üzerinde krom içeren paslanmaz çelikler sertleştirilemezler zira kromun sürekli artması Şekil 3.5'de görüldüğü gibi östenit alanını daraltarak iyice ufalmasına neden olur (Davis, J.R).



Şekil 3.4 X10Cr13(410) martenzitik paslanmaz çeliğin TTT diyagramı (Davis, J.R)

Bu tür paslanmaz çelikler içerdikleri karbon ve krom miktarlarının limit değerleri içinde yaklaşık 1000 °C'de tamamıyla östenite dönüşürler. Bu sıcaklıktan itibaren hızlı soğuma ile mikroyapıda maksimum martenzit oluşur. 820–960°C arasındaki sıcaklıklara kadar ısıtıldıklarında tamamen östenit oluşmaz ve bu sıcaklık aralığından itibaren soğumada ise, mikroyapı ferrit ve martenzitten oluşabilir (Davis, J.R).



Şekil 3.5 Yüksek sıcaklıkta östenit için karbon miktarı üzerine krom bileşiminin etkisi (Avner,1974)

Bu tür çeliklerin sertleşmiş durumda toklukları düşüktür ve genellikle uygun tokluk için bir temperleme ısıl işlemine gerek duyulur. Temperleme sıcaklığı, değişik mukavemet seviyeleri sağlamak için ayarlanabilir.

Karbon miktarı genelde martenzit yapının sertliğini belirlemektedir. Şekil 3.3 deneysel olarak bulunmuş karbon miktarı ve sertlik arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bölgesel olarak incelendiğinde % 0,10 C miktarına karşılık martenzit yapının sertliği yaklaşık olarak 35 HRC'e kadar ulaşmaktadır.

Yaklaşık olarak %0,5 C oranında martenzit yapının sertliği 60 HRC'e kadar erişmektedir ve bu dereceden sonra belirgin bir değişim gözlenmemektedir (Davis, J.R.).

### 3.2 Ferritik kromlu paslanmaz çelikler

Ferritik kromlu paslanmaz çelikler, keşfedilmelerini takiben ilk geliştirilen paslanmaz çelik türlerinden biri olmaları nedeni ile endüstride oldukça yaygın kullanım alanına sahiptirler. İçeriğindeki alaşım elementlerinin özellikle karbonun miktarına bağlı olarak % 16-30 Cr içerirler, manyetikler, soğuk veya sıcak haddelenebilirler, ancak tokluk, süneklik ve

korozyon dirençleri normalize hallerinde maksimum değeri gösterir. Talaşlı işlenebilme kabiliyetleri ve korozyon dirençleri martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerden daha üstündür.

Ferritik kromlu paslanmaz çelikler, pahalı ve stratejik bir element olan nikel içermemeleri nedeni ile de krom-nikelli östenitik paslanmaz çeliklerden daha ekonomiktirler ve bu da günümüz koşullarında oldukça önemli bir üstünlüktür.

Ayrıca östenitik krom-nikelli çeliklere nazaran şu üstünlüklere sahiptirler; klorürlü çözeltilerde gerilmeli korozyon çatlamaına karşı daha dirençlidirler, daha yüksek akma mukavemetine sahiptirler, daha az şiddette soğuk şekil değiştirme sertleşmesi gösterirler, manyetikleşme özelliğine sahiptirler.

Oldukça parlak ve dekoratif görünüşe sahip olan bu tür paslanmaz çelikler, dünya paslanmaz çelik tüketiminde östenitik paslanmaz çeliklerden hemen sonra en büyük pazar payı ile ikinci sıradadırlar.

Ferritik kromlu paslanmaz çelikler, ekonomiklikleri ve yukarıda belirtilmiş olan üstün özellikleri nedeni ile çok çeşitli kullanım alanları bulmuşlardır; cihaz yapımı, otomotiv endüstrisi, mutfak ve ev aletleri, kimya ve petro-kimya endüstrisi, gıda endüstrisi, kaynar su kap ve boruları, iç ve dış mimari, buhar üretim ve iletim donanımları.

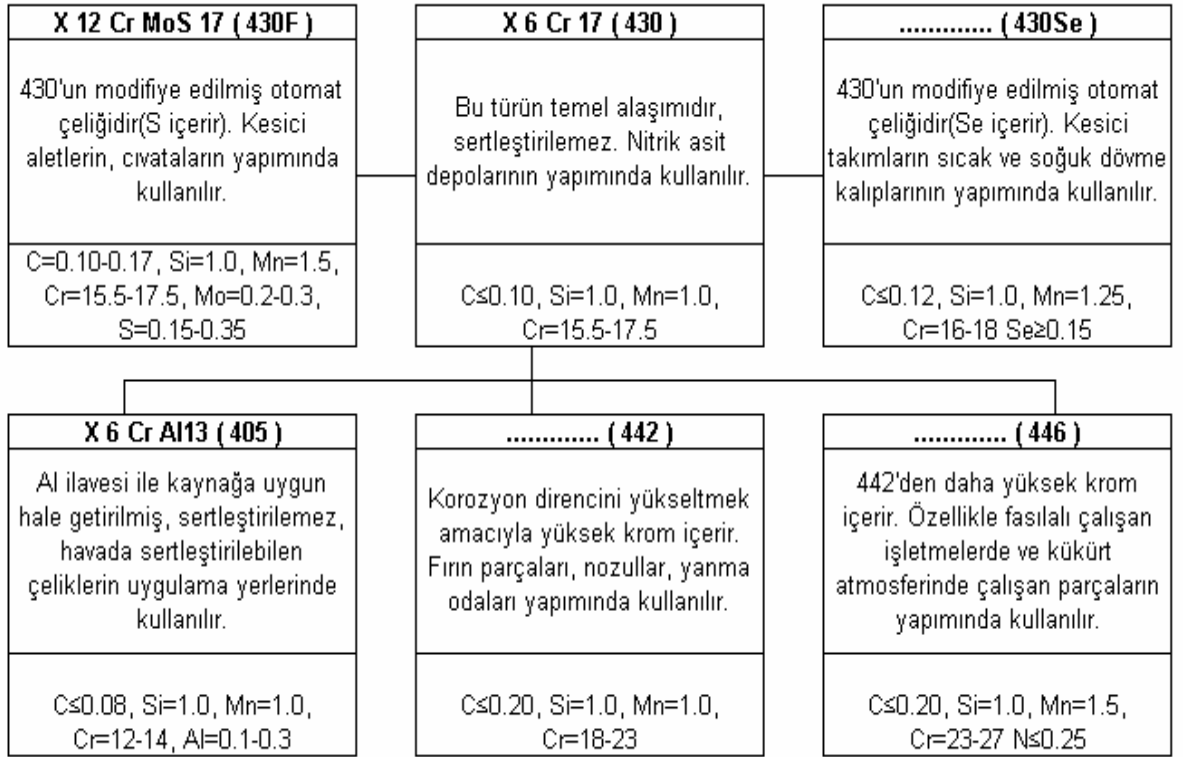
Bu tür çeliklerin ısı genleşme katsayıları, az alaşımlı çeliklerinkine yakındır; bu özellik, mimari yapılarda olduğu gibi büyük konstrüksiyonlarda sade karbonlu çelikler ile bir arada kullanılmaları halinde ısı genleşme farkının doğuracağı sorunları önler. Buna karşın bu tür çeliklerin ısı iletkenlik katsayıları normal çeliklerin yarısı kadardır (The ASM, b).

Ferritik kromlu paslanmaz çelikler bileşimlerinde korozyon direncini sağlayacak yeterli miktarda krom veya kroma ilaveten yüksek sıcaklıklarda östenit oluşumunu önleyici Al, Nb, Mo ve Ti gibi ferrit dengeleyici elementler içeren Fe- Cr- C alaşımlarıdır. AISI standardına göre martenzitik çelikler gibi 4XX serisi içinde gruplandırılan bu tür çelikler DIN 17440, EU 88, EU 95 ve TS 2535'e göre yüksek alaşımlı çelikler halinde olduğu gibi X6Cr17 (430),

X10CrN28 (446) olarak simgelendirilmektedir (Çizelge 3.3). TS 2535, ferritik paslanmaz çelikleri “bileşiminde %11,5 ila 18 Cr en çok % 0,2 C bulunan nikelsiz, genellikle ferritik kristal yapılı paslanmaz çeliktir. 750 °C’ye kadar manyetiktir, ısıl işlem ile sertleştirilemezler” diye tanımlarken günümüzde % 30’a kadar krom ve hatta yeni geliştirilen bazı türlerinde % 4’e kadar Ni içeren ferritik paslanmaz çelikleri kapsam dışı bırakmaktadır. Şekil 3.6’da AISI ve DIN normuna göre kısa gösterimleri de verilen tipik ferritik paslanmaz çelikler, uygulama alanları ve bileşimleri ile gösterilmektedir.

Bunlar manyetiktir ve soğuk veya sıcak işlenebilir,fakat maksimum yumuşaklık, kolay biçim verilebilme ve korozyon direnci tavlama durumunda iyileşir. Tavlanmış durumda bu çeliklerin gücü, karbon çeliklerinden yaklaşık %50 daha yüksektir, korozyon direnci ve işlenebilirliği martenzitik paslanmaz çeliklerden daha üstündür.

AISI (UNS)*	EURONORM DIN (TSE)	Kimyasal Bileşim (%)								
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Diğer
405(S40500)	X6CrAl13	≤0.08	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50/13.00	-	-	0.10/0.30Al
409(S40900)	X5CrTi12	≤0.08	1.00	0.045	0.045	1.00	10.50/11.75	-	-	6XC/0.75Ti
429(S42900)	X7Cr14	≤0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	14.00/16.00	-	-	
430(S43000)	X6Cr17	≤0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00/18.00	-	-	
430F(S43020)	X12CrMoS17	≤0.12	1.25	0.060	1.15(min)	1.00	16.00/18.00	-	0.60*	
430FSe(S43023)	-	≤0.12	1.25	0.060	0.060	1.00	16.00/18.00	-	-	0.15Se(min)
434(S43400)	X8CrMo17	≤0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00/18.00	-	0.75/1.25	-
436(S43600)	-	≤0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00/18.00	-	0.75/1.25	5XC/0.70 Nb+Ta
442(S44200)	-	≤0.20	1.00	0.040	0.030	1.00	18.00/23.00	-	-	
446(S44600)	X10CrN28	≤0.20	1.50	0.040	0.030	1.00	23.00/27.00	-	-	0.25N
*Üretici tarafından katılabilir.		**ASTM-SAE Unified Numbering System								

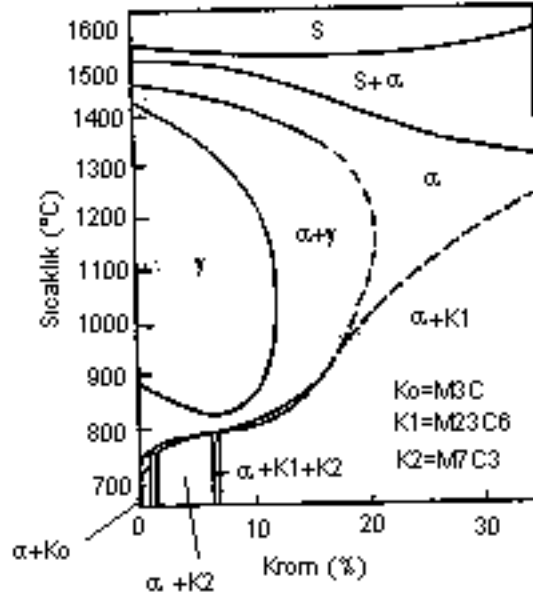


Şekil 3.6 Ferritik kromlu paslanmaz çelikler ve uygulama alanları (Avner, 1977)

### 3.3 Östenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler

İkili demir-krom faz diyagramında % 13'den daha büyük değerlerde krom içeren bölgenin dışında östenit alanının görülmediği ve her sıcaklık aralığında da yapının ferritik olduğu ve sadece % 12-13 Cr aralığında da dar bir  $\alpha+\gamma$  bölgesinin bulunduğu görülmektedir. Buradaki ferrit normal olarak çeliğin sıvı halden itibaren katılaşmasında ortaya çıktığı için  $\delta$ -ferrit olarak adlandırılır.

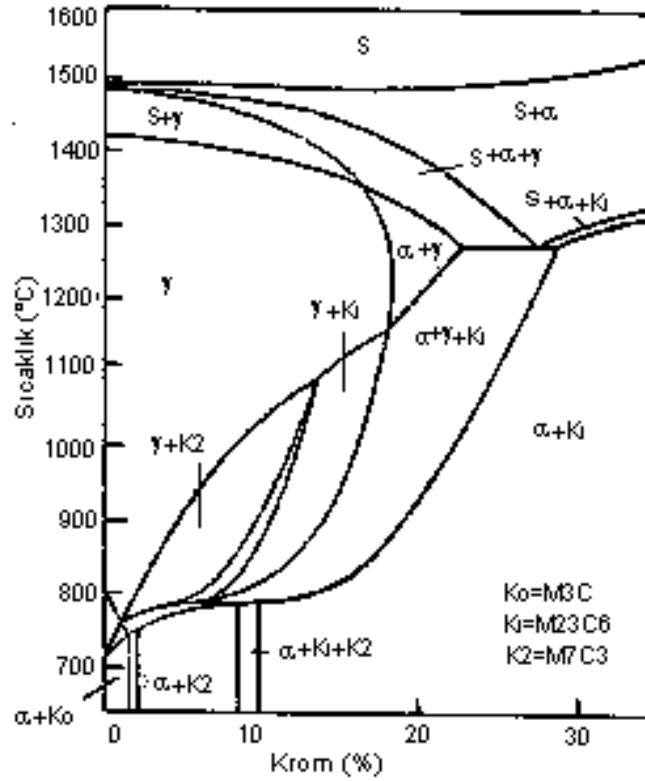
Bu iki alaşıma karbon eklenmesinin de  $\gamma$  alanını ve özellikle  $\alpha+\gamma$  alanının genişlemesine neden olduğu daha önce belirtilmişti. % 18 Cr'lu bir çeliğe % 0,4'e kadar karbon eklenmesi iç yapının tamamen ferritik kalmasına ve dönüşüm göstermemesine engel olamaz, buna karşın % 0,08 - % 0,22 C içirme aralığında yapı kısmi dönüşüm gösterir ve  $\alpha+\gamma$  iç yapısı elde edilebilir. % 0,4'den daha büyük değerlerde karbon içermesi halinde çelik  $\gamma$  bölgesinden itibaren hızla soğutularak oda sıcaklığında tamamen östenitik bir yapıda tutulabilir. Karbonun iç yapıda bir başka etkisi de yapıda karbür oluşumunda kendini gösterir (Şekil 3.7, Şekil 3.8).



Şekil 3.7 Demir-krom faz diyagramında karbonun etkisi (0,05 C) (Kaluç ve Tülbentçi, 2005)

Östenitik paslanmaz çeliklerde  $M_{23}C_6$  karbürü oluşan en önemli karbür olup bunun çeliğin korozyon direnci üzerinde önemli etkisi vardır. Düşük karbonlu ve %18 Cr içeren alaşıma katılan nikel,  $\gamma$  fazı oluşum bölgesini genişletir ve Ni miktarı %8'e eriştiği zaman  $\gamma$  alanı oda sıcaklığına kadar iner. Bu olay, en tanınmış östenitik çelik türü olan %18 Cr ve %8 Ni içeren çelik grubunun doğmasına neden olmuştur.

Bu özel bileşim minimum nikel içeriği ile oda sıcaklığında KYM'li iç yapıyı dengeli bir halde tutabilmektedir. Zira krom içeriğinin biraz azalması veya çoğalması yapının dengeli östenit fazında kalabilmesi için daha fazla nikel gerektirmektedir.



Şekil 3.8 Demir-krom faz diyagramında karbonun etkisi (0,4 C)

(Kaluç ve Tülbentçi, 2005)

Örneğin; korozyona daha dirençli % 25 Cr içeren paslanmaz çeliği oda sıcaklığında östenitik yapıda tutabilmek için % 15 Ni'e gerek vardır (Davis, J.R).

Bilindiği gibi, östenitik yapıda demir alaşımları elde etmek bu asrın başından beri metalurjistlerin en önemli uğraşlarından birisi olmuştur. Günümüzde AISI 300 serisi olarak adlandırılan östenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler, işte bu çalışmaların ürünüdür. Bugünün östenitik paslanmaz çelikleri % 16-26 Cr, % 10-24 Ni, % 0,40'a kadar karbon ve diğer bazı özellikleri geliştirmek için katılmış Mo, Ti, Nb, Ta ve N gibi elementler içerirler. Son yıllarda geliştirilmiş olan ve tam veya süper-östenitik paslanmaz çelikler diye adlandırılan gruplarda östenit yapıcı elementlerin miktarı daha da arttırılmıştır.

Östenitik paslanmaz çelikler de soğuma sırasında östenit → ferrit dönüşümü olmadığından su verme yolu ile sertleştirilemezler. Antimanyetik olan bu tür paslanmaz çelikler AISI 3XX serisi içinde gruplandırılmalarının yanı sıra DIN 17440, EU 88, EU 95 ve TS 2535'e göre yüksek alaşımlı çelikler halinde olduğu gibi simgelenirler (Çizelge 3.4). TS 2535 östenitik

paslanmaz çelikleri “bileşiminde korozyona karşı krom ve östenitik bir yapı sağlamak amacı ile de nikel bulunan, oda sıcaklığında manyetik olmayan, ısı işlem ile sertleştirilemeyen soğuk biçimlendirmeye elverişli paslanmaz çeliktir” diye tanımlar. Şekil 3.9’da AISI ve DIN normuna göre kısa gösterimleri de verilen tipik östenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler uygulama alanları ve bileşimleri ile gösterilmektedir (Avner, 1974).

Östenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin korozyon dirençleri martenzitik kromlu ve ferritik kromlu paslanmaz çeliklerden daha yüksektir. İç yapının östenitik olması da ferritik paslanmaz çeliklerde karşılaşılan çok önemli bir sorun olan geçiş sıcaklığı altındaki gevrekleşme bu tür çeliklerde görülmez. Gerek sıfır altı (-270°C’ye kadar) ve gerekse yüksek sıcaklıklardaki korozyon dirençleri, mekanik özelliklerin üstünlüğü bu çelik grubunun birçok alanda rakipsiz bir yapı çeliği olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır.

X5CrNi1810 (304) paslanmaz çeliği, korozyon direnci ve iyi biçimlendirebilme kabiliyeti bakımından çok yaygın kullanılan bir östenitik paslanmaz çeliktir. Bu tür çeliğin şekil değiştirme sertleşmesi de arttırılmış olduğundan yüksek mukavemet gerektiren makine parçalarının yapımında oldukça sık kullanılır. X10CrNi188 (302) çeliği, yüksek karbonludur ve soğuk şekil değiştirme sertleşmesi ile de yüksek mukavemete sahip olur. X10CrNiS189 (303) çeliği, kükürt katkısı ile otomat çeliği haline dönüştürülmüş olup, paslanmaz cıvata, mil ve vana yapımında kullanılır.

X2CrNi1911 (304L) çeliği, X5CrNi1810 (304) çeliğinin karbon miktarı azaltılmış türüdür. Çok düşük karbonlu (ELC) paslanmaz çelikler olarak tanınan bu çeliklerin geliştirilmesinin yegane amacı, kaynak sırasında ısının tesiri altında kalan bölgede oluşan ve taneler arası korozyona neden olan karbür çökelmesinin önlenmesidir.

X15CrNiSi2012, X5CrNiSi2520, X15CrNiSi2520 çelikleri yüksek sıcaklıklarda korozyon ve çatlamaya dayanıklı, nikel ve krom içerikleri yüksek olan çeliklerdir, yanma odalarının ve yüksek sıcaklıkta çalışan parçaların üretiminde kullanılırlar.

AISI (UNS)*	EURONORM DIN (TSE)	Kimyasal Bileşim (%)								
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Diğer
201(S20100)	-	≤0.15	5.50/7.50	0.60	0.30	1.00	16.00/18.00	3.50/5.50	-	0.25 N
202(S20200)	X8CrMnNi189	≤0.15	7.50/10.00	0.060	0.030	1.00	17.00/19.00	4.00/6.00	-	0.25 N
205(S20500)	-	0.12/0.25	14.00/15.50	0.030	0.030	0.50	16.50/18.00	1.00/1.75	-	0.32/0.40 N
301(S30100)	X12CrNi177	≤0.15	2.00	0.045	0.030	1.00	16.00/18.00	6.00/8.00	-	-
302(S30200)	X10CrNi189	≤0.15	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	8.00/10.00	-	-
302B(S30215)	-	≤0.15	2.00	0.045	0.030		17.00/19.00	8.00/10.00	-	-
303(S30300)	X10CrNiS189	≤0.15	2.00	0.20	0.15(min)	1.00	17.00/19.00	8.00/10.00	0.60*	-
303Se(S30323)	-	≤0.15	2.00	0.20	0.60	1.00	17.00/19.00	8.00/10.00	-	0.15 Se (Min)
304(S30400)	X5CrNi1810	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00/20.00	8.00/10.50	-	-
304L(S30403)	X2CrNi1911	≤0.030	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00/20.00	8.00/12.00	-	-
S30430	-	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	8.00/10.00	-	3.00/4.00 Cu
304N(S30451)	X5CrNi1810	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00/20.00	8.00/10.50	-	0.010/0.16 N
305(S30500)	X8CrNi1812	≤0.12	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	10.50/13.00	-	-
308(S30800)	-	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	19.00/21.00	10.00/12.00	-	-
309(S30900)	-	≤0.20	2.00	0.045	0.030	1.00	22.00/24.00	12.00/15.00	-	-
309S(S30908)	-	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	22.00/24.00	12.00/15.00	-	-
310(S31000)	-	≤0.25	2.00	0.045	0.030	1.50	24.00/26.00	19.00/22.00	-	-
310S(S31008)	-	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.50	24.00/26.00	19.00/22.00	-	-
314(S31400)	-	≤0.25	2.00	0.045	0.030	1.50/3.00	23.00/26.00	19.00/22.00	-	-
316(S31600)	X5CrNiMo17122	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	16.00/18.00	10.00/14.00	2.00/3.00	-
316F(S31620)	-	≤0.08	2.00	0.20	0.10(min)	1.00	16.00/18.00	10.00/14.00	1.75/2.50	-
316L(S31603)	X2CrNiMo17133	≤0.030	2.00	0.045	0.030	1.00	16.00/18.00	10.00/14.00	2.00/3.00	-
316N(S31651)	-	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	16.00/18.00	10.00/14.00	2.00/3.00	0.10/0.16 N
317(S31700)	X5CrNiMo1713	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00/20.00	11.00/15.00	3.00/4.00	-
317L(S31703)	X2CrNiMo18164	≤0.030	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00/20.00	11.00/15.00	3.00/4.00	-
321(S32100)	X6CrNiTi1810	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	9.00/12.00	-	5xCi(Min)
329**(S32900)	X4CrNiMoN2752	≤0.10	2.00	0.040	0.030	1.00	25.00/30.00	3.00/6.00	1.00/2.00	-
330(N08330)	-	≤0.08	2.00	0.040	0.030	0.75/1.50	17.00/20.00	34.00/37.00	-	0.10 Ta 0.20 Cb
347(S34700)	X6CrNiNb1810	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	9.00/13.00	-	10xC Cb+Ta(Min)
348(S34800)	-	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	9.00/13.00	-	Cb+Ta(Min) (Ta+0.10Max) 0.20Co
384(S38400)	-	≤0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	15.00/17.00	17.00/19.00	-	-

\*Üretici tarafından katılabilir.

\*\*Çift fazlı alaşım-östenit+ferrit

\*\*\*ASTM-SAE Unified Numbering System

Molibden içeren X5CrNiMo17122 (316), X2CrNiMo17132 (316L) çelikleri denizcilik ve kimya endüstrisinde X5CrNi1810 (304) çeliğinden daha yaygın olarak kullanılırlar. X2CrNiMo17132 (316L) çeliği de düşük karbon içeriği ile taneler arası korozyon problemini önlemek amacı ile üretilmiştir.

X6CrNiTi1810 (321) ve X6CrNiNb1810 (347) çelikleri titanyum ve niyobyum ile stabilize edilerek, yüksek sıcaklıklarda kaynak bağlantılarındaki tanelerarası korozyona eğilim önlenmiştir.

	.....(202)	X12 CrNi 188 (302)	.....(302B)	
	302 çeliğinin düşük nikel eşdeğerlisidir; Ni yerine Mn katılmıştır.	Bu türün temel alaşımıdır. Sac, gıda taşıma malzemeleri, uçak parçaları, anten, yay, mimari ürün, tencere yapımında kullanılır.	Si içeriğinden dolayı 302'den daha fazla tufalleşme direncine sahiptir. Fınn parçaları, ısıtıcı elemanlarının yapımında kullanılır.	
X12 CrNi 1911 (304L)	X5 CrNi 1810 (304)	X5 CrNiNb 1810 (347)	.....(308)	.....(305)
Kaynakta krom-karbür çökmesini önlemek için 304'ün karbonu çok düşük tutulmuş türüdür.	302'den daha düşük karbonludur. Kimya ve gıda endüstrisinde, çalgı aleti tellerinde kullanılır.	Nb veya Ta katılmıştır. 321'e benzer, kaynak için stabilize edilmiştir.	Yüksek Ni ve Cr bileşimiyle korozyon ve ısıya direnç arttırılmıştır, kaynakta alaşım kaybını karşılamak için kaynak metali olarak kullanılır.	Yüksek Ni bileşeni ile düşük çalışma sertleşmesine sahiptir. Derin çekme işlemlerinde kullanılır.
X10 CrNiS 189 (303)	X6 CrNiTi 1810 (321)	.....(348)	.....(309)	.....(309S)
S katılarak otomat çeliği haline dönüştürülmüştür. Dişli makine parçaları, miller, valflerin yapımında kullanılır.	Ti bileşeni kaynakta krom-karbür çökmesini önler. Uçak egzost manifoldları, kazan sacları, kimyasal proses ekipmanları yapımında kullanılır.	347 türüne benzer ancak Ta max. sınırdadır. Nükleer enerji uygulamalarında kullanılır.	308 türüne benzer; çok iyi korozyon ve tufal direncine sahiptir. Uçak ısıtıcıları, ısı işlem ekipmanları, fınn parçaları yapımında kullanılır.	İyi kaynak sağlamak için karbonu düşüktür.
.....(303Se)		.....(314)	.....(310)	.....(310S)
Se katılmış otomat çeliğidir. Hafif kesici takımlar ve soğuk veya sıcak işlerde kullanılır.		310'a benzer; yüksek sıcaklıkta tufal direnci arttırılmıştır.	309'a benzer; ısı eşanjörleri, fınn parçaları, yanma odaları, kaynak metali yapımında kullanılır.	Kaynaklanabilirliği düzeltmek için 310'un düşük karbonlu türüdür.
X12 CrNi 177 (301)	.....(201)	X5 CrNiMo 1713 (317)	X5 CrNiMo 17122 (316)	X5 CrNiMo 17132 (316L)
Düşük Ni ve Cr bileşimiyle çalışma sertleşmesi oranı arttırılmıştır. Treylar kasaları, uçak parçaları yapılır.	301'in düşük nikelli türüdür; Mn, Ni yerine katılmıştır; yüksek çalışma sertleşmesi oranına sahiptir.	Korozyon ve sürünmeye direncini arttırmak için yüksek Mo katılmıştır.	Mo bileşeni dolayısıyla 302 ve 304'den daha yüksek korozyon direncine sahiptir. Kimya, gıda, fotoğraf endüstrilerinde kullanılır.	Kaynaklı konstrüksiyonlar için 316'nın çok düşük karbonlu türüdür.

Şekil 3.9 Östenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin kullanım alanları ve özellikleri (Avner,1974)

Östenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler genellikle nemli ortamlarda kullanılırlar. Artan krom ve molibden içerikleri agresif çözeltilere karşı korozyon dirençlerini arttırıcı rol oynar. Yüksek nikel içeriği gerilmeli korozyon çatlamasına karşı riski azaltır. Östenitik paslanmaz çelikler, katılan alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak genel korozyona, çukurcuk ve aralık korozyonuna dirençleri yükselir; bu olay çeliğin klor içeren ortamlarda kullanılması durumunda daha da önemlidir. Çukurcuk ve aralık korozyonuna dirençleri, artan molibden ve krom ile artar (Aran ve Temel, 2003).

Östenitik paslanmaz çelikler iç yapılarına göre stabl veya metastabl östenitik paslanmaz çelikler olarak iki grupla incelenirler. Metastabl östenitik paslanmaz çelikler soğuk şekillendirme sonucu iğnemsiz veya martenzitik türde bir iç yapı gösterirler. Stabl östenitik paslanmaz çelikler ise oldukça yüksek derecede soğuk şekil değiştirme sonucunda bile östenitik iç yapılarını korurlar. Bu iki tür arasındaki belirgin fark, gayet açık bir biçimde bunların çekme diyagramlarından görülebilir. Stabl östenitik paslanmaz çeliklere örnek olan AISI 304 çeliği normal gerilme-genleme diyagramında bir östenitik davranış gösterir. Çekme eğrisinin parabolik değişimi gerilme uygulandıkça şekil değiştirme sertleşmesinin devam ettiğinin işaretidir. Buna karşın, AISI 301 östenitik paslanmaz çeliği metastabl östenitik paslanmaz çeliklere güzel bir örnek olmaktadır. Yaklaşık olarak %10-15'lik bir % uzamadan sonra şekil değiştirme sertleşmesi hızlanan bir şekilde kendini belli eder. Metastabl östenitik paslanmaz çeliklerde şekil değiştirme sertleşmesinde görülen bu artış doğrudan östenitin dengesizliğinin bir göstergesidir. Burada plastik şekil değiştirme sonucu martenzit oluşmaya başlamıştır (Avner, 1974).

Şekil değiştirme sırasında oluşarak östenitik paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerini etkileyen martenzitin oluşumunun çeliğin kimyasal bileşimine ve özellikle şekil değiştirmenin yapıldığı sıcaklığa bağlı olduğu birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda bu çeliklerdeki martenzit oluşumunun yalın karbonlu çeliklerdekine benzer olması ilginçtir. Ayrıca belli bir sıcaklığın üzerinde martenzit oluşumunun sıcaklığa bağlı olmadığı da saptanmıştır. Çeliğin kimyasal bileşimindeki elementlerin etkileri de araştırıldığında bunların martenzitik dönüşüm sıcaklığını düşürdükleri dolayısı ile de östenitin stabilitesini arttırdıkları görülmüştür.

Çizelge 3.5, normalize halde bir grup östenitik paslanmaz çeliğin oda sıcaklığındaki çekme ve çentik-darbe mukavemetlerini göstermektedir. Kimyasal bileşimin şekil değiştirme sırasında bu özelliklere etkisi hemen izlenebilmektedir. Örneğin, akma mukavemeti genel olarak elastik şekil değişiminin sona erdiği nokta olduğundan buraya kadar plastik şekil değişiminin bir etkisi görülmemektedir. Akma sınırı üzerine bileşimin etkisi burada basit bir şekilde katı eriyik sertleşmesinin etkisindedir ve bu katı eriyik sertleşmesine en büyük etkiye bulunan elementler de karbon ve azot gibi ara yer elementleridir. Bu bakımdan yüksek miktarda karbon ve azot içeren çeliklerin akma mukavemetleri daha yüksektir. Çizelge 3.5'in incelenmesinden görüleceği üzere AISI 201 ve AISI 202 en yüksek karbon ve azot içeriğine sahip olduklarından en yüksek akma mukavemeti gösterirler. Stabl ve metastabl östenitik paslanmaz çelikler arasındaki farkı kesin bir biçimde çekme mukavemeti belli eder. Burada AISI 201, 202 ve 301 ile stabl gruptaki 304 ve 310'un çekme mukavemetlerini karşılaştırdığımızda metastabl östenitik paslanmaz çeliklerin daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduklarını görürüz. Ayrıca Çizelge 3.5, östenitik paslanmaz çeliklerin uzama ve büzülme değerlerini de gösterir. Bu değerler incelendiğinde de bu çeliklerin çok şiddetli deformasyonlara yatkın oldukları görülmektedir. Daha önceden de belirtilmiş olduğu gibi, bu tür çeliklerin çentik-darbe mukavemetleri de (Charpy-V) oldukça iyidir. Östenitik paslanmaz çeliklerin elastiklik modülleri yalnız karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin elastiklik modüllerinden biraz daha küçüktür. Bu da, bunların verilmiş olan bir gerilme için daha fazla elastik deformasyon göstereceklerinin delilidir (Colombier ve Hochmann).

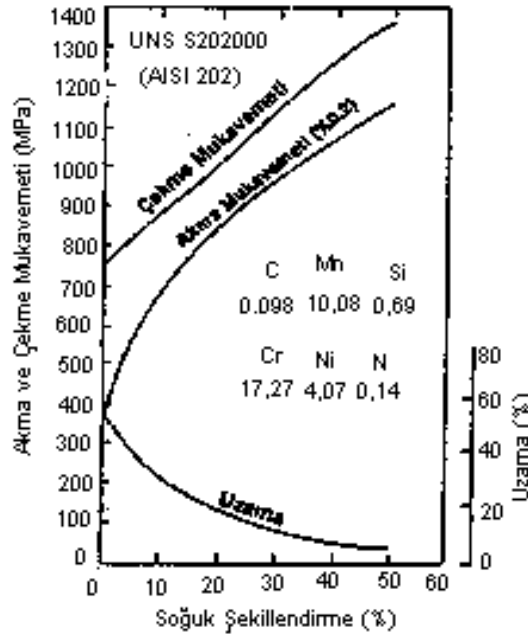
Yüksek derecede şekil değiştirme sertleşmesinin bu çeliklerin çok yüksek akma ve çekme mukavemetine sahip olmalarını sağladığı daha önce de belirtilmişti ki burada ilginç olan bu tür çeliklerin bu yüksek akma ve çekme mukavemetlerinde dahi süneklik ve tokluklarının bir kısmını korumalarıdır. Bu bakımdan östenitik paslanmaz çelikler soğuk haddelenmiş veya çekilmiş halde yüksek mukavemetli ve yüksek korozyon dirençli çeliklerdir. Doğal olarak kaynak işlemi gibi bir üretim yönteminin uygulanması durumunda parçanın tümü veya bir bölümü soğuk şekil değiştirme ile kazanılmış özellikleri yitirecektir. Ancak çok iyi düşünülmüş geliştirilmiş bir kaynak yöntemi ve çok iyi tasarlanmış bir bağlantı ile bu tür paslanmaz çelikler rahatlıkla birleştirilmektedir. Hatta uygulamada, soğuk şekil değişiminin mukavemet üzerine yapmış olduğu tüm etkilerden yararlanılmaktadır. Bu konuda en iyi uygulama örnekleri soğuk şekil değiştirilmiş östenitik paslanmaz çeliklerin kullanıldığı demiryolu taşıtları, kamyon, treyler kasaları ve atlas roketlerdir.

Çizelge 3.5 Östenitik paslanmaz çeliklerin bazı türlerinin oda sıcaklığındaki çekme mukavemetleri ile çentik-darbe mukavemetleri (Normalize Halde) (Colombier ve Hochmann)

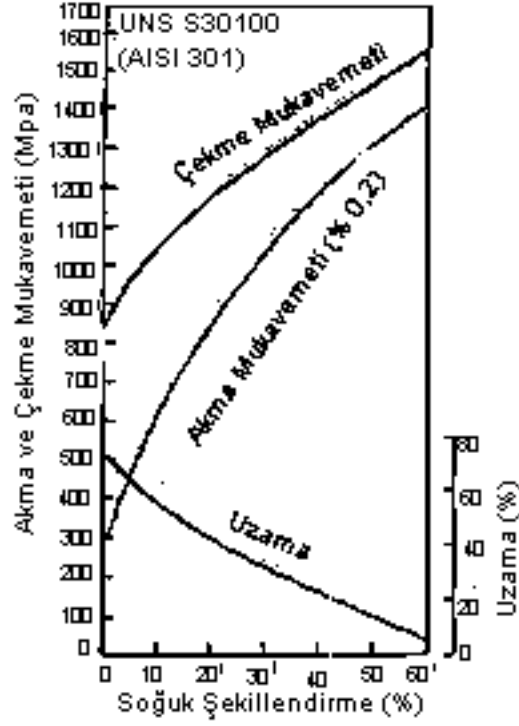
Çelik	Ürün Biçimi	Akma** Mukavemeti MPa	Çekme Mukavemeti MPa	Uzama (50 mm'de %)	Büzülme %	Çentik Darbe (min)J	Elastiklik Modülü MPa
S20100 (201)	Sac ve band	310	655	40	-	-	197x10 <sup>3</sup>
S20200 (202)	Sac ve band	310	621	40	-	-	-
S30100 (301)	Sac ve band	276	758	60	-	-	193x10 <sup>3</sup>
S30400 (304)	Sac ve band	290	580	55	-	-	193x10 <sup>3</sup>
S30400 (304)	Levha ve çubuk	241	565-586	60	70	149	193x10 <sup>3</sup>
S31000 (310)	Levha	310	655	50	65	122	200x10 <sup>3</sup>
S38100*** (XM15)	Levha	207	517	40	-	135	-

\*UNS numarası altında parantez içindekiler AISI numaralarıdır. /\*\*%0,2 sınırı. /\*\*\*USS 18-8-2

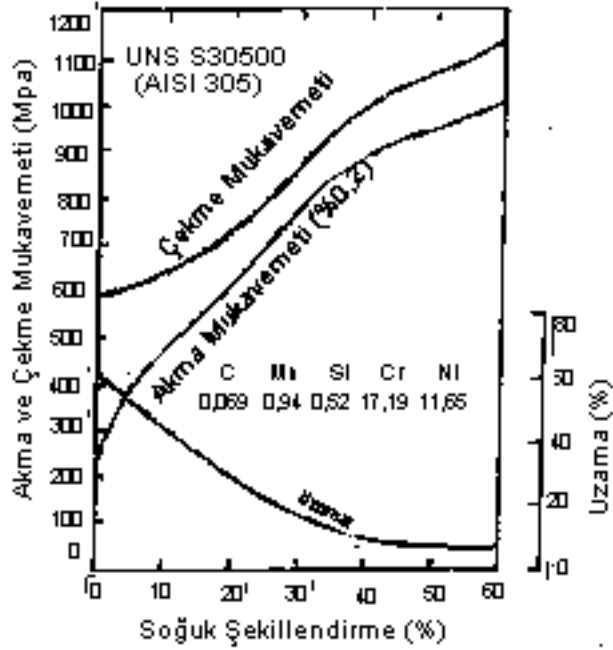
Şekil 3.10, 3.11, 3.12, 3.13; AISI 202, 301, 305 ve 310'un soğuk şekil değiştirilmiş haldeki çekme mukavemeti özelliklerini göstermektedirler. Şekiller incelendiğinde görülecektir ki belli bir şekil değişimi oranı için metastabl çelikler 201, 202 ve 301, stabl 305 ve 310'a nazaran daha yüksek akma, çekme ve % uzama göstermektedirler.



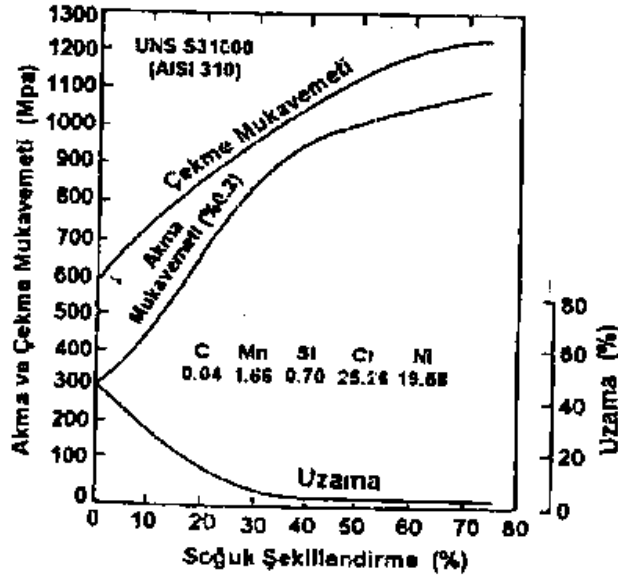
Şekil 3.10 % 18 Cr, % 5 Ni, % 8 Mn'lı AISI 202 çeliğinin mekanik özelliklerine soğuk şekil değişiminin etkisi (Kaluç ve Tülbentçi, 1995)



Şekil 3.11 % 17 Cr, % 7 Ni'li AISI 301 çeliğinin mekanik özelliklerine soğuk şekil değişiminin etkisi (Kaluç ve Tülbentçi, 1995)



Şekil 3.12 %18 Cr, %12 Ni'li AISI 305 çeliğinin mekanik özelliklerine soğuk şekil değişiminin etkisi (Kaluç ve Tülbentçi, 1995)



Şekil 3.13 %25 Cr, %20 Ni'li AISI 310 çeliğinin mekanik özelliklerine soğuk şekil değişiminin etkisi (Kaluç ve Tülbentçi, 1995)

Östenitik paslanmaz çeliğinin kimyasal bileşimi özelliklerini etkiler. Bileşim ilk olarak dönüşümü yani çeliğin stabilitesini, ikinci olarak da katı eriyik sertleşmesini etkiler. Özellikle, hemen hemen tüm alaşım elementlerinin paslanmaz çeliğin bünyesine katılması östenitik yapıyı daha dengeli hale getirmekte ve bu bileşimin etkisi de daha karmaşık olmaktadır. Örneğin, bir elementin katılması başlangıçta östenitik yapının dengelenmesinde az etki gösterebilir buna karşın yüksek katı eriyik sertleşmesi etkisi sonucu yüksek akma ve çekme mukavemeti ve daha düşük uzama ortaya çıkar. Öte taraftan bu elementin daha fazla katılması ile etkisi östeniti dengelemede daha şiddetli olmaktadır. Dolayısı ile akma mukavemeti ve çekme mukavemeti düşmekte ancak daha yüksek uzama elde edilmektedir. Bu durumda östeniti dengeleme etkisi, katı eriyik sertleşmesini etkileyen en önemli konulardan bir tanesi de işlemin yapıldığı sıcaklık derecesidir. Metalurjik olarak, bu deformasyon sırasında metastabl östenitin martenzite dönüşümün başladığı sıcaklık olan  $M_d$  sıcaklığı ile tanımlanabilir. Soğuk haddeleme  $M_d$  sıcaklığının altında gerçekleştiğinden plastik deformasyon östenitin martenzite dönüşmesini sağlayacak ve önemli derecede mukavemet artışı görülecektir. Soğuk şekil değiştirme  $M_d$  civarında gerçekleştiğinde martenzit oluşmayacak ve şekil değiştirme sertleşmesi daha düşük oranda ortaya çıkacaktır. Metastabl östenitik paslanmaz çeliklerde  $M_d$  oda sıcaklığının üzerindedir ve dolayısı ile bu türlerde oda sıcaklığında soğuk haddeleme sonucu çok büyük mukavemet artışları görülür.

Örneğin, bu türlerde haddeleme 200°C’de gerçekleştirilirse Şekil değiştirme sertleşmesinin hemen düŐtüđü görölür ve buna bağlı olarak bu sıcaklıklarda yapılan işleminde harcanılan enerji de çok daha azdır. Bu tür çeliklerde soğuk haddeleme gücünün sınırlı olduğu durumlarda sıcaklık biraz yükseltilerek önemli bir üstünlük kazanılmış olunur (Kaluç ve Tülbentçi, 1995).

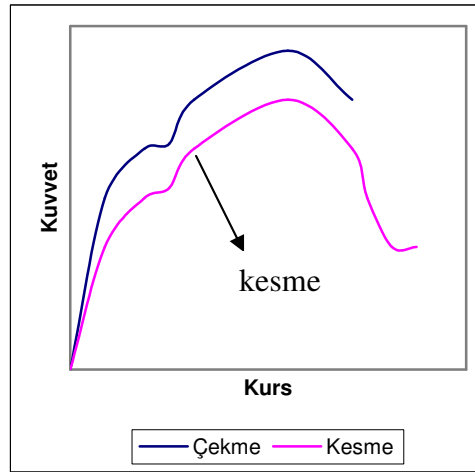
## 4 TALAŞSIZ ŞEKİL VERME YÖNTEMLERİ

### 4.1 Kesme

Saclar, preslerde kalıpla kesilerek istenen çevre şeklinde parçalar elde edilir. Sac kesme kalıpları en basit şekilleriyle bir kesme matrisi ve bir ıstampadan ibarettir.

Bir sacın kalıpla kesilmesi sırasında, ıstampa ve matris tarafından metale birbirine eşit fakat aksi yönde ve aralarında kesme boşluğu kadar uzaklık bulunan kesme (makaslama) gerilmeleri uygulanır. Böylece matris deliğinin ve ıstampanın çevresi şeklinde bir sac parça kağıdın makasla kesilmesine benzer şekilde kesilir (Çapan,1990).

Düşük karbonlu (yumuşak) bir sacın çekme diyagramı ile kalıpta kesilmesi sırasında ıstampa kuvvetinin ıstampa kursu ile değişim diyagramı birbirine çok benzer.



Şekil 4.1 Düşük karbonlu bir sacın kalıpta kesilmesinde, kuvvet-yol ve çekme diyagramlarının kıyaslanması (Çapan, 1977)

Kalıpta kesmede, ıstampa ile matris arasında belirli bir boşluk bırakılmalıdır. Bu boşluk  $W$  ile gösterilirse

$$\text{Düşük karbonlu çelik ve pirinç için } W = \frac{1}{40}t \quad (4.1)$$

$$\text{Yüksek karbonlu çelik için} \quad W = \frac{1}{30}t \quad (4.2)$$

$$\text{Alüminyum için} \quad W = \frac{1}{20}t \quad (4.3)$$

alınmalıdır.

Çevre kesildiği takdirde, matris, kesilecek çevre boyutlarında işlenerek ıstampa küçük alınır; buna karşılık delik delindiği takdirde, ıstampa, delinecek delik boyutunda alınarak matris büyük işlenir (Çapan, 1990).

Kesme kuvveti

$$F=P.t.\tau \quad (4.4)$$

denkleminde hesaplanabilir. Bu ifadede P=kesilecek çevre uzunluğu, t=sac kalınlığı,  $\tau$ =kesilecek malzemenin kayma mukavemeti.

Çizelge 4.1 Çeşitli metalik malzemelerin kayma mukavemetleri (Çapan, 1977)

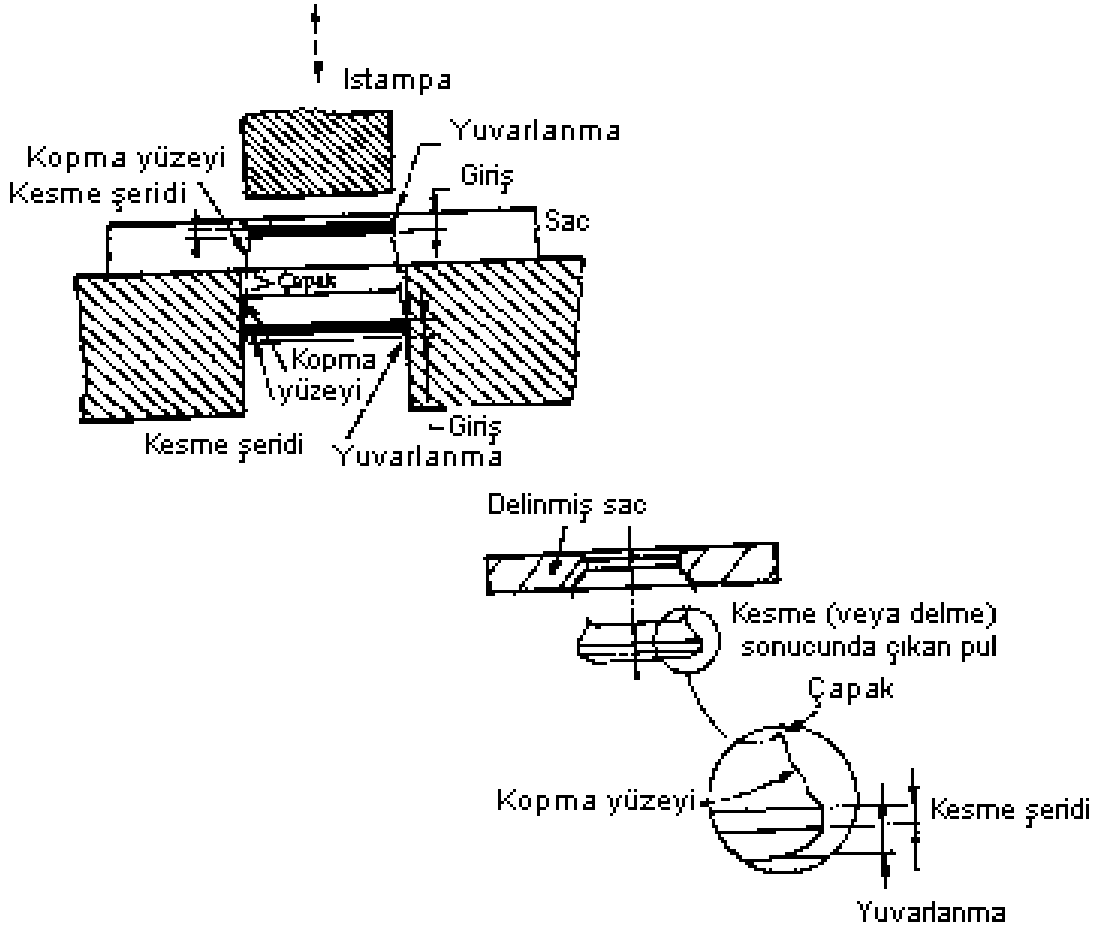
Malzeme	Kesme Mukavemeti(Kgf/mm <sup>2</sup> )		
	Yumuşak (Tavlı)	Yarı Sert (Yarı Tavlı)	Sert (Tavsız)
Alüminyum	7...9	10...12	13...16
Kurşun	2...3		
Bakır	20...30		
Ms 60, Ms 63, Ms 72	22...32		30...40
Paslanmaz Çelik	-	52...56	
Çelik (%0,1 C)	25		32
Çelik (%0,2 C)	32		40
Çelik (%0,3 C)	36		48
Çelik (%0,4 C)	45		56
Çelik (%0,6 C)	56		72
Çelik (%0,8 C)	72		90
Çelik (%1 C)	80		105

Istampa ve matrisler, bir süre çalıştıktan sonra körlenir. Bu durumda, kesici ağızlar sivriliklerini kaybederek yuvarlaklaştıklarından kesilen parçalar çapaklı çıkar. Körlenen kalıplar sökülerek ıstampa ve matris satıh taşlama tezgahında taşlanır (Yurci, 1991a).

Istampa kesiti sabittir. Böylece bilendikten sonra, ıstampa boyutlarının değişmemesi sağlanır. Kesme sırasında ıstampa matris içine çok az girmelidir. Aksi taktirde, ıstampanın matrise göre tam merkezlenmemiş olması halinde takımlar zarar görebilir (Çapan, 1977).

Kesmede son kesilen parça daha öncekileri iterek aşığı düşmelerini sağlar. Matris deliği 4-5 mm boyunda silindirik bir kısımdan sonra konik olarak işlenir. Böylece kesilen parçaların matris içinde yığılmaları önlenmiş olur. Konik kısmın eğimi %5 alınabilir (yaklaşık 3°).

Kesme boşluğunun uygun, matris ve ıstampanın da aşınmamış olmaları halinde kesme yüzeylerinin karakteristik görünüşü Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Kesme yüzeylerinin karakteristik görünüşü (Çapan, 1990)

#### 4.1.1 Paslanmaz çelikleri makasla kesme

Paslanmaz çelik sacların kesilmesi, pekleşme özelliklerinden dolayı eşdeğer karbonlu saclarla göre daha fazla kuvvet gerektirir. Malzeme sünek olduğundan kesme boşluğu dar olmamalıdır. 2 mm'den kalın saclarla kalınlığın % 5'i, daha ince saclarla kalınlığın % 3'ünün kesme boşluğu olarak alınması tavsiye edilir (Aran ve Temel, 2003).

#### 4.1.2 Paslanmaz çelikleri kalıpta kesme

Yağlayıcı kullanmadan kesme yapılabilir, ancak kullanılması halinde kuvvet ve güç ihtiyacı düşer, dolayısıyla takım ömrü artar. Kesme boşluğunun doğru ayarlanması çok önemlidir. Dar boşluklar hassas ayar gerektirir ve kalıp aşınmasını artırır. Gereğinden büyük boşluklar ise sünek paslanmaz çeliklerde kesme yüzeyinin bozulmasına yol açar. En uygun boşluk; kullanılan takım, iş parçası geometrisi ve malzeme özelliklerine bağlı olarak ayarlanır.

Delme ve pul kesme kalıpları da karbon çelikleri için yapılanlara kıyasla daha hassas yapılmalıdır. Kesme boşluğu kalınlığın % 10'unu geçmemelidir. 1 mm ve daha ince saclarda, tavsiye edilen kesme boşluğu (her tarafta) 0,025 ile 0,035 mm arasındadır. Kesme kuvvetinin düşürülmesi için kalıp veya zımbanın açılı yapılması gerekebilir. Zimba üstüne malzemenin kaynamasının önlenmesi için yüksek viskoziteli yağlayıcılar kullanılabilir. Delik delme işlemlerinde, en düşük çap sac kalınlığının 2 katından az olmamalıdır. Birden fazla delik olduğunda, delikler arası uzaklık en az sac kalınlığı kadar olmalıdır (Aran ve Temel, 2003).

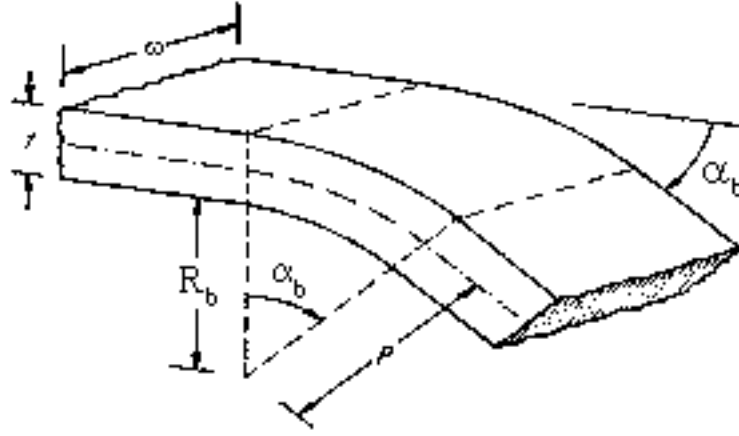
#### 4.2 Bükme

Sac işleme yöntemleri içinde en çok uygulanan işlemlerden biri bükmedir. Bükme bölgesinin geometrisini sac kalınlığı ( $t$ ), sac genişliği ( $w$ ), büküm açısı ( $\alpha_b$ ), büküm yarıçapı ( $R_b$ ), tarafsız (nötr) eksenin yarıçapı ( $\rho$ ) ve nötr eksende büküm yayının uzunluğu ( $L_b$ ) oluşturmaktadır. Büküm derecesinin artması demek, büküm yarıçapının ( $R_b$ ) azalması ve büküm açısının ( $\alpha_b$ ) artması demektir (Şekil 4.3). Şekil 4.4'de sac bükme ile ilgili çeşitli örnekler verilmiştir (Marciniak ve Duncan, 1992).

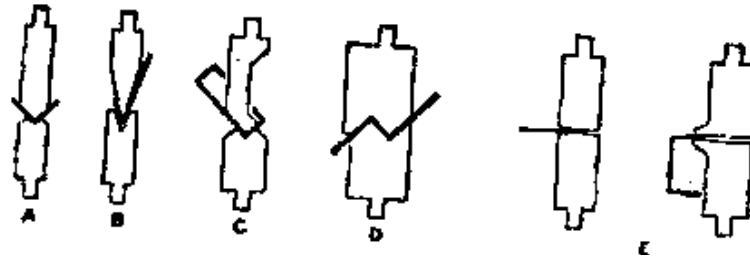
Bükmede sacın dış yüzeyi çekmeye, iç yüzeyi ise basmaya zorlanır. Çekme ve basmaya zorlanan kısımları ayıran çizgiye nötr eksen denir. Bükülen kısımda sac kalınlığının değişmediği kabul edilirse nötr eksen sacın ortasından geçer. Bu durumda dış ve iç yüzeylerde birim şekil değiştirmeler mutlak değer olarak eşittir ve

$$t_{dış} = -t_{iç} = \frac{1}{\left(\frac{2R_b}{t}\right) + 1} \quad (4.5)$$

denklemleriyle hesaplanır. Bu denklemlerden  $t_{iç}$  için elde edilen değerle, deney sonuçları birbirine yakındır. Buna karşılık  $t_{dış}$  değerleri deneysel sonuçlardan küçüktür. Gerçekte, bükülmüş bir sac parçada bükülen bölgede sac kalınlığı  $t$ ,  $t'$  değerine düşer, ayrıca bükmeden önceki parça eni  $w$ , içte artarak  $w+2s$ , dışta ise azalarak  $w-2s$  değerini alır (Çapan, 1990).

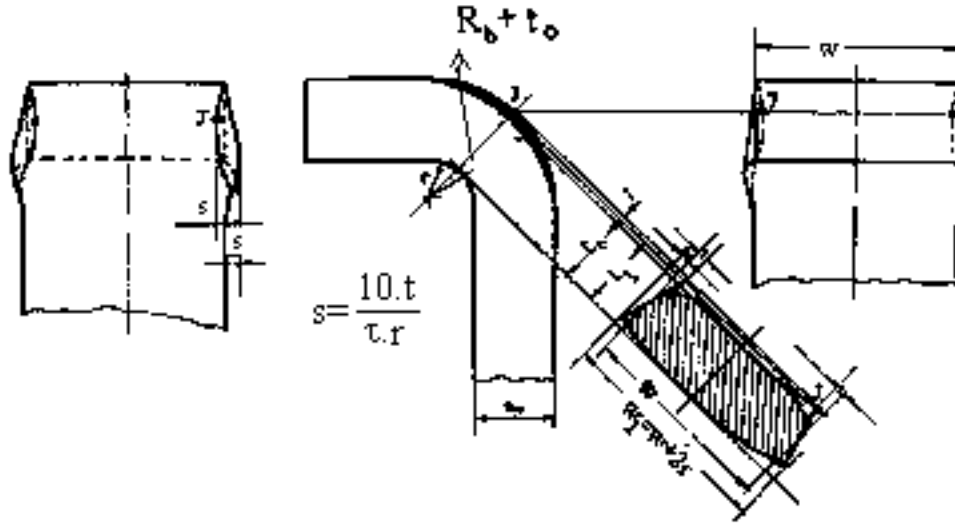


Şekil 4.3 Bükme (Marciniak ve Duncan, 1992)



Şekil 4.4 Çeşitli sac bükme işlemleri (Çapan, 1990)

Bu boyut değişimleri nötr eksenin iç yüzeye doğru kaymasına neden olur. Bunun sonucunda da teorik olarak sac kalınlığının değişmediği varsayılarak geliştirilen yukarıdaki denklemden elde edilen  $t_{dış}$  değerleri deneysel değerlerle uyum göstermez,  $t_{dış}$  ve  $|t_{iç}|$  değerleri arasındaki fark  $R_b/t$  oranı küçüldükçe artar (Şekil 4.5) (Güneş, 2003).



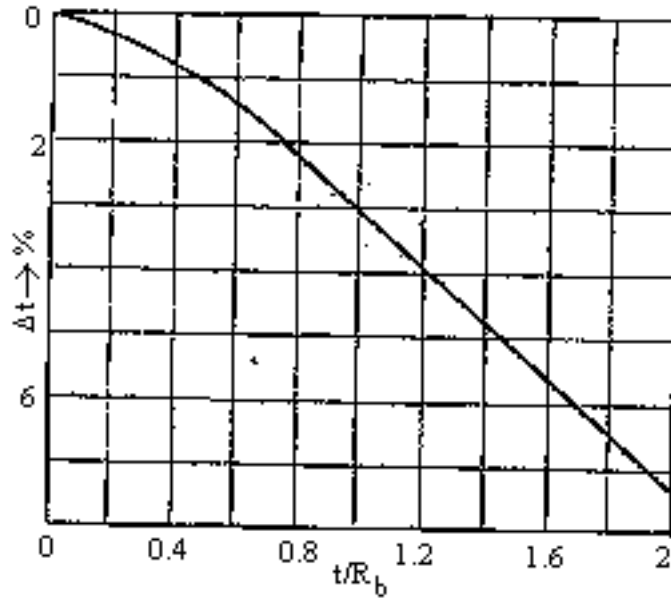
Şekil 4.5 Kalın malzemelerin küçük kavislerle bükülmesi (Güneş, 2003)

Dar ve kalın şeritlerin küçük kavislerle bükülmelerinde daha büyük şekil değişimleri söz konusudur. Şekil 4.5’de dar kavisli bükülmüş kalın bir parça görülmektedir. Malzeme kalınlığı bükme bölgesinde bir miktar azalmakta, bükmeden önce prizmatik şekilde olan parça kesiti iç bükey trapez şeklini almaktadır. Malzeme eni, bükme kavisli tarafından genişlemekte, dış tarafta da daralmaktadır. Bükme öncesi ( $w$ ) genişliğinde olan malzeme bükme sonrası ( $w+2s$ ) genişliğine erişmektedir. Bu durumun menteşe gibi birbiri içinde çalışacak parçaların ölçülerinin belirlenmesinde dikkate alınması gerekir. Bükme sonrası genişleme değerinin yumuşak çelik için  $s=0,4t/R_b$  eşitliğine uyduğu söylenebilir (Güneş, 2003).

Bükme işlemi esnasında tarafsız eksenin uzunluğu ise sabit kalmaktadır. Tarafsız eksenin hareketi, sac kalınlığının bir fonksiyonudur ve tarafsız eksenin iç yüzeyden olan mesafesi ince saclarda kalınlığın 0,5’i, orta kalınlıktaki saclarda ( $t=0,75-3$  mm) 0,4’ü olarak alınabilir (Yurci, 1997b).

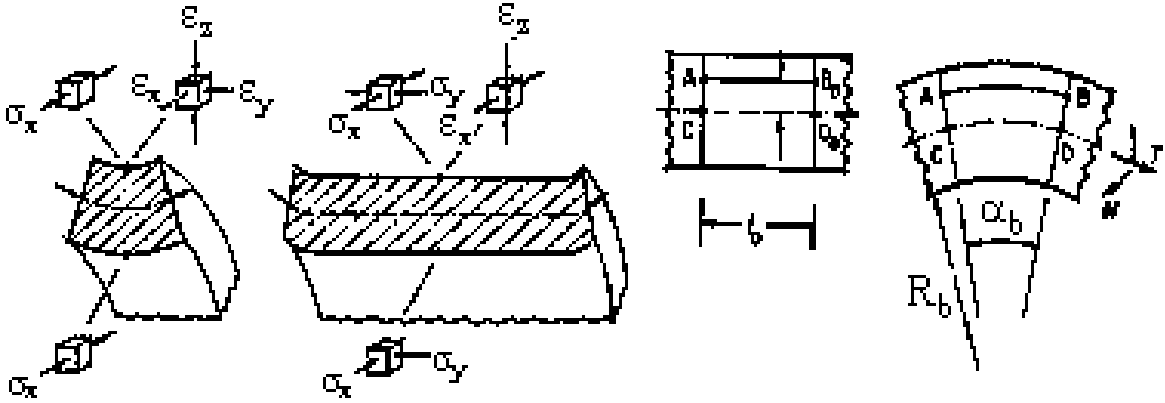
Bükme bölgesinde meydana gelen şekil değişiklikleri bükülen malzemenin cinsine ve bükmede uygulanan boyutlarının birbiri ile olan oranlarına bağlıdır. Şekil değişiminde bükme kavisli ve açısının en büyük rolü oynadığı bilinmektedir. Bükme kavisli bölgesindeki kalınlık azalmasına etkisi Şekil 4.6’da görülmektedir. Denemede 6,35 mm kalınlığında ve HB 120 sertliğinde alüminyum malzeme kullanılmıştır. Bükme bölgesindeki kalınlık azalmasına

parça genişliğinin fazla etkisi olmamakla birlikte bükme kavisini kalınlık oranının önemli olduğu görülmektedir. Bükme sonrası parça genişliğinde de değişim olmaktadır. Bükülen parçanın eni ne kadar genişse bükme eksenini yönündeki direnci de o kadar büyük olur. Enine gerilime karşı gösterilen direnç parça genişliğinin fazla değişimine engel olur. Bu bakımdan bükülen parça, kalınlığına oranla yeteri kadar genişse ( $w > 3t$ ) enine doğrultudaki bozulma sıfır kabul edilir (Güneş, 2003).



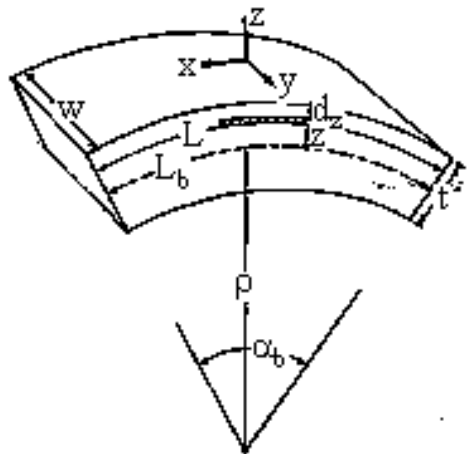
Şekil 4.6 Bükme kavisinin kalınlık azalmasına etkisi (Güneş, 2003)

Bükme işlemlerinde kesit distorsiyonu, sac kalınlığına olduğu kadar sac genişliğine de bağlıdır. Dar ve geniş saclarda meydana gelen gerilme halleri Şekil 4.7'de görülmektedir. Sac kesiti daraldıkça, genişlik doğrultusundaki gerinim ( $\epsilon_y$ ) belirginleşmekte ve kesit Şekil 4.7a'daki şekli almaktadır. Böyle bir durumda, dış yüzeyin tek eksenli çekme, iç yüzeyin ise tek eksenli basma davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır. Sac kesitinin genişlemesi durumunda ise iki eksenli gerilme hali etkinlik kazanmakta ( $\alpha = \sigma_y/\sigma_x$  artmakta) ve kesitte düzlemsel gerinim hali belirginleşmektedir ( $\beta = \epsilon_y/\epsilon_x \rightarrow 0$ ). Gerilmede iki eksenlilik ve en son sınırdaki düzlemsel gerinim hali ( $\epsilon_y = 0$ ), bükmede sünekliğin azalmasına neden olmaktadır (Marciniak ve Duncan, 1992).



Şekil 4.7 Dar (a) ve geniş (b) kesitlerde ortaya çıkan gerilme ve gerinim halleriyle kesit distorsiyonları (Marciniak ve Duncan, 1992)

İnce saclarda kalınlığın çok küçük olmasından dolayı, tarafsız eksenin kayması oldukça düşük mertebelere düşer ve genelde ihmal edilmektedir. Ayrıca sac genişliği, kalınlığa göre çok büyük olduğundan, düzlemsel gerinim hali ( $\epsilon_y = 0$ ) kabulüyle genişlikteki deformasyonlar ihmal edilebilmektedir (Yurci, 1997b). Bu kabuller ile, büküm yönünde meydana gelen gerinimleri ( $\epsilon_x, \epsilon_x$ ) belirlemek için, Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, kesitin orta düzlemindeki tarafsız eksene  $z$  uzaklığında ve  $L_z$  uzunluğunda birim yay elemanı alınır. Tarafsız eksen üzerinde büküm yayının uzunluğu değişmediğinden, kesitteki nominal gerinimler (4.7) eşitliği ile hesaplanırken, gerçek gerinim (4.8) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

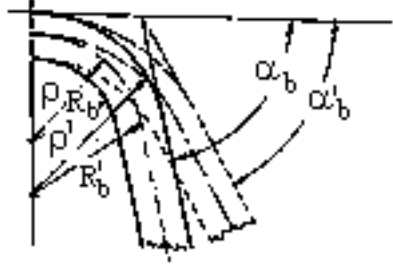


Şekil 4.8 Bir büküm bölgesinin geometrisi ve tarafsız eksene  $z$  uzaklığında alınan birim eleman (Hosford ve Caddell, 1983)

$$e_x = (L_z - L_b) / L_b \quad (4.7)$$

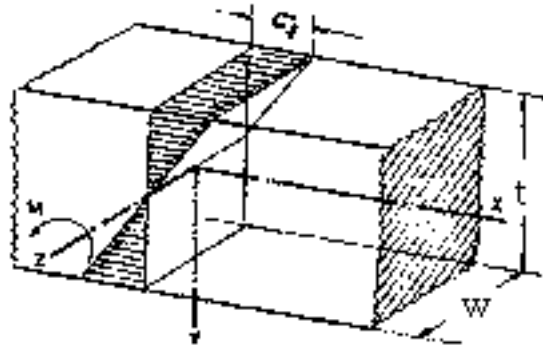
$$\varepsilon_x = \ln\left(1 + \frac{z}{\rho}\right) \quad (4.8)$$

İç yüzeydeki gerinimi hesaplamak için  $z=-t/2$ , dış yüzeydekini hesaplamak için ise  $z=+t/2$  değerleri eşitliklerde yerlerine konulur (Hosford ve Caddell, 1983 ; Marciniak ve Duncan, 1992)



Şekil 4.9 Bükme sonrasında geri esneme (Yurci, 1997b)

Bükme işlemi uygulanmış bir malzeme üzerinden bükme yükü kalktığı zaman parça bükülmüş haldeki şeklinde kalmaz. Malzemedeki artık elastikiyet bükülmüş durumdaki parçanın Şekil 4.9'da görüldüğü gibi bir miktar açılmasına sebep olur. Bükme işleminde bu olaya "geri esneme" ismi verilmektedir. Bükme sonrası arzulanan parça şeklinin sağlanabilmesi için geri esnemenin dikkate alınması gerekir (Yurci, 1997b).



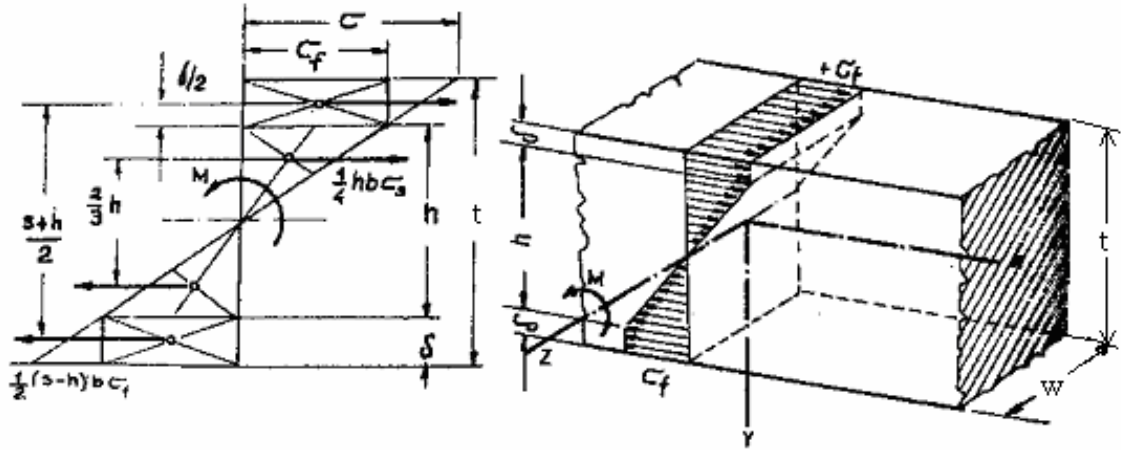
Şekil 4.10 Elastik bükmede gerilmeler (Güneş, 2003)

Şekil 4.10'da görülen (t) kalınlığında ve (w) genişliğindeki prizmatik bir çubuğa (z) eksenine etrafında

$$M_f = \sigma_f \cdot W = \frac{2I}{t} \cdot \sigma_f = \sigma_f \cdot \frac{w \cdot h^2}{6} \quad (4.9)$$

Değerinde bir bükme momenti uygulanırsa çubuğun dış liflerinde ( $\sigma_f$ ) değerinde bir gerilme meydana gelir. Bükme momenti ( $M_B$ ) değerinden daha küçükse çubukta yalnız elastik şekil değişimi olur. ( $\sigma_f$ ) malzemenin akma gerilimidir. Bükme momenti ( $M_B$ ) değerinden daha büyükse Şekil 4.11’de görüldüğü gibi çubuğun üst liflerinde  $\delta= 0,5 (t-h)$  kalınlığında kalıcı şekil değişimine uğramış bir tabaka oluşur. Çubuğun ortasındaki ( $h$ ) kalınlığındaki bölge yalnızca elastik şekil değişimine uğramış kısımdır (Güneş, 2003).

( $\delta$ ) kalınlığında kalıcı deformasyona uğramış tabakalar meydana getiren bükme momenti Şekil 4.11 ’den bulunabilir:



Şekil 4.11 Elastik sınır üzerinde bükülmüş parçada gerilmeler (Güneş, 2003)

$$M = \frac{1}{2}(t-h).w.\sigma_f.\frac{2}{3}.h \quad (4.10)$$

$$M = \sigma_f \left[ \frac{h^2.w}{6} - \frac{t-h}{2}.w.(h + \frac{t-h}{2}) \right] \quad (4.11)$$

$$M = \sigma_f \left( \frac{3t^2 - h^2}{12} \right)^2 \quad (4.12)$$

Elastik şekil değişimine uğramış ( $h$ ) tabaka kalınlığı.

$$h = \sqrt{3t^2 - \frac{12M}{\sigma_f.w}} \quad (4.13)$$

Kalıcı şekil değişimine uğramış ( $\delta$ ) tabaka kalınlığı.

$$\delta = \frac{t-h}{2} = 0,5 \left[ t - \sqrt{3t^2 - \frac{12M}{\sigma_f \cdot W}} \right] \quad (4.14)$$

Çubuk dış tabakasındaki gerilme akma sınırına eriştiğinde çubuk eğrilik yarıçapı:

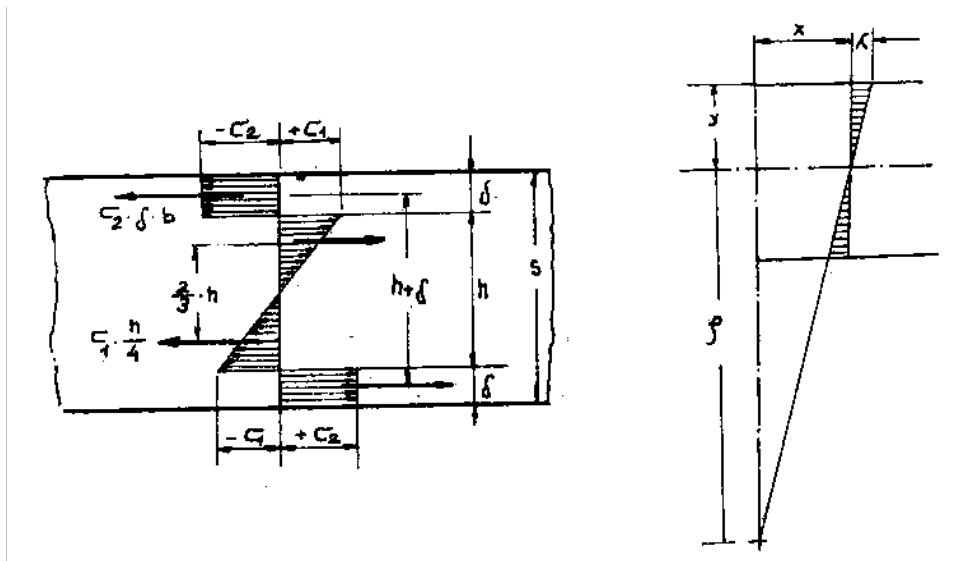
$$M_f = \frac{I \cdot E}{\rho_f} \quad \rho_f = \frac{I \cdot E}{M_f} = \frac{E \cdot t}{2 \cdot \sigma_f} \quad (4.15)$$

olur.

Hesaplanan bu eğrilik yarı çapı dış tabakadaki gerilmelerin akma sınırına henüz eriştiği, fakat dış tabakada henüz kalıcı deformasyonun olmadığı en küçük eğrilik yarı çapıdır. Eğrilik yarı çapı bükme momenti artırılarak daha da küçültülürse alt ve üst kenarda kalıcı deformasyona uğramış tabaka meydana gelir (Güneş, 2003).

$M > M_B$  momenti ile çubuk  $\rho < \rho_f$  eğriliğine erişir.

Bükülmüş parça üzerinden bükme yükü kalktığı zaman tabakadaki gerilmelerin momentleri parçayı bükme öncesi şekline getirmeye zorlar. Bunun sonucu olarak da parça eğrilik yarı çapı büyür. Bükme yükü kalktıktan sonra çubuktaki gerilme yayılışları Şekil 4.12'deki gibi olur. Kalıcı şekil değişimine uğramış tabakada meydana gelen gerilmelerin momentleri yalnızca elastik şekillenmiş tabakada ortaya çıkan gerilmelerin momentlerine eşittir (Güneş, 2003).



Şekil 4.12 Kalıcı şekil değişimi ile bükülmüş parçada elastik gerilmeler (Güneş, 2003)

Paslanmazların bükme ve kenarlama işlemleri de diğer çeliklere oranla daha fazla özen ve % 50-60 daha fazla kuvvet gerektirir. Bunun yanında geri esneme miktarı da karbon çeliklerine göre çok daha fazladır. Tavlanmış haldeki çeliklerin bükme eksenine haddeleme yönüne paralel veya dik seçilebilir. Ancak ferritik çeliklerin bükme eksenine haddeleme yönüne dik tutulmalı ve bükme radyüsü sac kalınlığının 2 katından az olmamalıdır (Çizelge 4.2). Özellikle kenarlama zımba (burun) yarıçapı, bükme radyüsünün 8 katı kadar olmalı ve zımbanın sac yüzeyine hasar vermesi önlenmelidir. Kenarlama kalıp-ıstampa arası boşluk sac kalınlığından en az %10 fazla tutulmalı ve arada sac sıkışması ve çizilmesi önlenmelidir. Kalıp yüzeyleri taşlama sonrası elle veya makine ile çok iyi parlatılmalı ve her türlü çapak, metal artığı, toz vb. kalıntılar tamamen uzaklaştırılmalıdır (Aran ve Temel, 2003).

Çizelge 4.2 Abkant preste bükme işleminde en küçük bükme yarıçapları

(Aran ve Temel, 2003)

Paslanmaz Çelik Türü	R/t Oranı
Tavlanmış Çelikler	0,5- 1,5
Sertleştirilmiş ve Pekleşmiş Çelikler	
Çeyrek Sert	1 - 2
Yarım Sert	2,5 - 4
Tam Sert	4 - 6

Silindirik kazan ve depo yapımında kullanılan merdaneli kıvrırma işlemi karbon çeliklerine benzer şekilde yapılır, ancak daha fazla geri esneme oluşacağı hesaba katılmalıdır. Silindir makinesinde profil bükme işleminde de geri esneme dikkate alınmalı, malzeme yüzeylerinin çizilmemesi için yüksek viskoziteli yağlar tercih edilmeli, merdane yüzeyleri de krom-nikel veya titanyum nitrür ile kaplanmalıdır (Aran ve Temel, 2003).

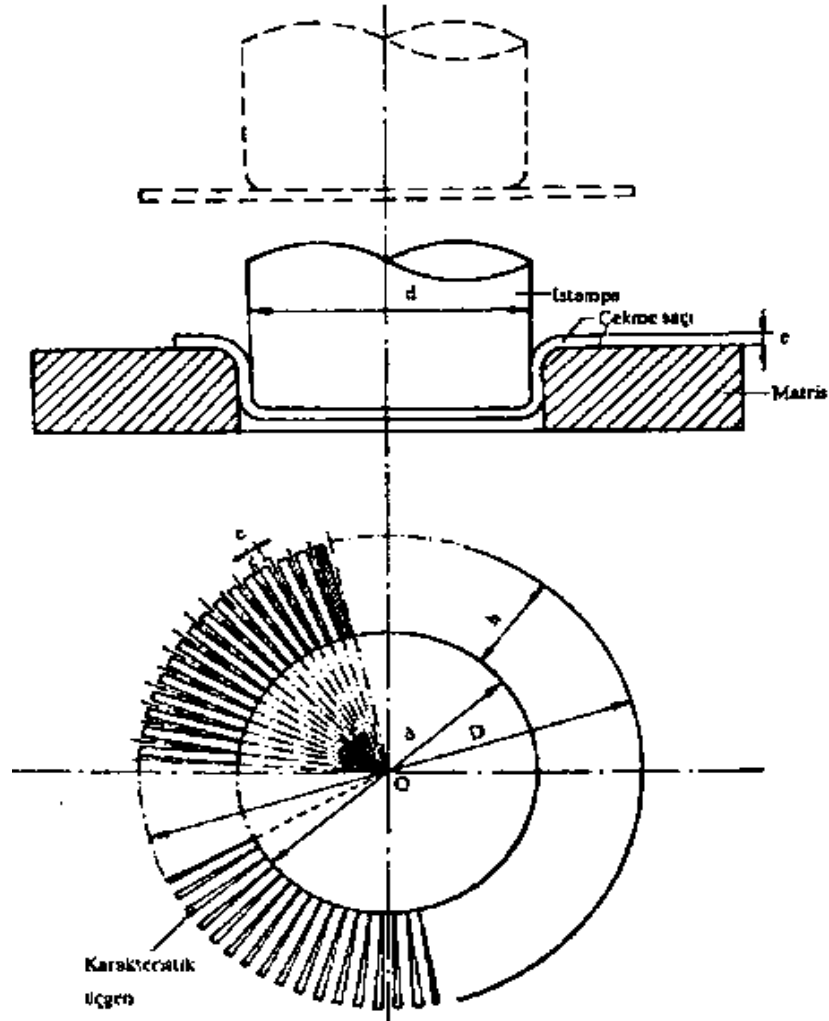
### 4.3 Derin çekme

Sac levhalardan kap şeklinde parçalar elde etmekte kullanılan yöntemlerin en önemlisi derin çekmedir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de D çapında dairesel bir puldan (çekme sacı), iç çapı d olan silindirik bir kabın derin çekilmesi görülmektedir.

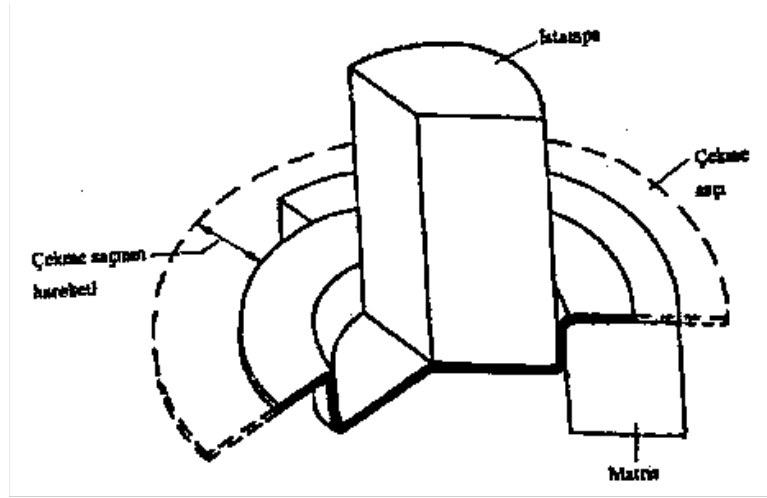
Çekme sacının kalınlığı t olsun. Şekil 4.13'de, d çapındaki daire üzerinde, aralarındaki daire yayı uzunluğu t olan noktalar alarak O daire merkezine birleştirilim. Böylece d çapındaki

daire üzerinde aralıkları  $t$  olan yarıçaplar elde edilir. Bu yarıçapları  $D$  çapındaki daireye kadar uzatalım ve  $d$  ile  $D$  çapındaki bu iki dairenin sınırladıkları halka üzerinde kenar uzunlukları  $t$  ve  $h$  olan dikdörtgenleri çizelim. Bu dikdörtgenleri birbirinden ayıran üçgenlere karakteristik üçgen denir.  $D$  çapındaki çekme sacından  $d$  çapında bir kap elde edilmesi için kenar uzunlukları  $t$  ve  $h$  olan dikdörtgenleri  $d$  çapındaki daire etrafında  $\pi/2$  kadar kıvrırmak yeterlidir. Böylece karakteristik üçgenlere ait malzemenin gereksiz olduğu görülmektedir (Çapan, 1990).

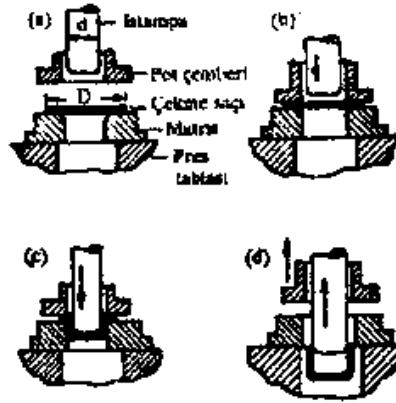
Derin çekmede karakteristik üçgenleri meydana getiren fazla malzeme katlanmalara neden olabilir. Bu katlanmalara engel olmak için pot çemberi kullanılır (Şekil 4.15). Bu şekilde derin çekme işleminin dört ayrı kademesi görülmektedir:



Şekil 4.13 Silindirik bir kabın derin çekilmesi (Çapan, 1990)



Şekil 4.14 Silindirik bir kabın derin çekilmesi (kesit) (Çapan, 1990)



Şekil 4.15 Baskı plakalı çekmenin oluşumu (Çapan, 1990)

a-D çapındaki çekme sacı matris üzerine yerleştirilmiş durumda;

b-Pot çemberi ve ıstampanın aşağı hareketi; pot çemberi ıstampadan önce çekme sacına değerek onu matris üzerine bastırır;

c-İstampa çekme sacını matris deliğine iter;

d-Derin çekme tamamlandıktan sonra ıstampa ve pot çemberi yukarı çıkar. Elde edilen kap pres tablasının deliğinden aşağı düşer (Çapan, 1990).

Pot çemberi çekme sacı malzemesini radyal doğrultuda akmaya zorlayarak katlanmalara engel olur. Pratikte  $D/d > 21/20$  olduğu takdirde pot çemberi kullanılır.  $D/d < 21/20$  olduğunda ise

karakteristik üçgenleri meydana getiren malzeme miktarı az olduğundan işlem pot çemberi kullanmadan ve katlanmalar meydana gelmeden yapılabilir (Çapan, 1990).

Sünek olmaları nedeniyle özellikle soğuk sac şekillendirmede en çok kullanılan türler östenitik paslanmaz çeliklerdir. Bu malzemelere yüksek oranlarda çekme uygulanabilir. 201 ve 301 kaliteleri iki eksenli germe ile % 35'den daha fazla şekillendirilebilir, çünkü şekillendirme sırasında kısmen martenzitik dönüşüm olması metalin büzülme direnc göstermesini ve daha büyük miktarlarda üniform şekil değiştirmesini sağlar (Aran ve Temel, 2003).

Ferritik türlerin de şekil değiştirme kabiliyetleri iyidir; ancak bunlar daha az sünek olduklarından bu alaşımların şekillendirme özelliği daha sınırlıdır, dolayısıyla çoğu zaman ara tav gereği ortaya çıkabilir. Ara tav sonrasında asitle temizleme işlemi yapılmalı ve paslanmazlığın muhafazası için bunu bir pasivasyon işlemi izlemelidir. Az alaşımlı martenzitik paslanmazlar şekillendirilebilirler ancak genel olarak martenzitik paslanmaz çeliklerin derin çekmeye uygun olmadığı söylenebilir. Kullanılacak şekil verme yöntemi, kullanılan çelik türünün karakteristiğine ve parçanın kalınlığına uygun olarak seçilmelidir. Yukarıda belirtildiği gibi, paslanmaz çelikler için güç gereksinimi, özellikle östenitiklerde, daha yüksektir, çünkü bunlar ferritiklerden daha hızlı pekleşirler. Karbon çeliklerine soğuk olarak şekil verilebilen kalınlıklarda, paslanmaz malzemeler için sıcak veya yarı sıcak olarak şekillendirme uygulanması gerekebilir (Aran ve Temel, 2003).

Östenitik çelikler arasında 301 kalite krom ve nikel oranı en düşük olandır ve yüksek pekleşme özelliğiyle yüksek çekme dayanımına sahiptir. Bu özelliği ile şekillendirme ile imal edilmiş yapı elemanlarında kullanımı yaygın iken derin çekme işlemine uygun değildir. Daha fazla krom ve nikel içeren 304, 304L ve 305 gibi alaşımlar daha az pekleşirler ve derin çekme ve benzeri şekillendirme işlemlerinde en yaygın olarak kullanılan östenitik paslanmaz çelik malzeme bunlardır. 302 kalite çelik, 301 ve 304 arasındaki mekanik davranışıyla bir ara çözüm oluşturmaktadır. Niyobyum, titanyum, tantal gibi stabilizatör alaşım elementleri ve artan oranda karbon içeren 321 ve 347 alaşımlarının şekillendirilebilirliği daha düşüktür.

Paslanmaz çelik malzemelerin derin çekilebilme kabiliyetini gösteren en uygun ölçüt, o malzemeye ait “sınır çekme oranı” değeridir. Derin çekme işleminde çekme oranı; parçanın (pulun) başlangıç çapının, çekme sonrası çapa oranıdır (Aran ve Temel, 2003).

Problemsiz bir çekme işlemi için bu değer malzemeye ait “sınır çekme oranı”, ( $\tilde{R}$ ) değerinden küçük olarak seçilmesi gerekir.

Östenitik paslanmaz çelikler hızlı pekleşme özellikleri olmasına rağmen ilk çekme işleminde yüksek çekme oranlarına ulaşılabilir ( $\tilde{R}=2,1$ ). Malzemenin sadece östenitik olduğu biliniyor, fakat daha fazla ayrıntılı bilgi yok ise, çekme oranı olarak 1,8 değerinin üzerine çıkılmamalıdır. Paslanmaz çeliklerin çekmesinde kullanılan takımlar, normal karbonlu çeliklerinkinden daha güçlü yapılmalıdır, çünkü etkiyen kuvvetlerinin düşük karbonlu çeliklerden % 50~100 daha fazla olması beklenir. Çekme birden fazla kademede yapılacak ise kademeler arasında parçalar 7 ila 10 dakika süre ile 1000 °C – 1100 °C arasında tavlmalıdır. Tav sonrasında soğutma suda veya basınçlı hava ile yapılmalıdır. Tav öncesinde yağ artıklarının tümünün giderileceği bir temizleme yapılması gereklidir. Şekil verme hızları düşük tutulmalıdır, aksi halde takım aşınması çok yüksek olur. Pot çemberi basıncı katlanmaları önleyecek derecede yüksek olmalıdır, ilk derin çekme kademesinde sorun çıkmaz ise daha sonraki kademelerde genellikle sorun çıkmaz. Ancak pot oluşmuş ise bunun ilerdeki kademelerde giderilmesi mümkün değildir (Aran ve Temel, 2003).

Ferritik çeliklerde akma ve çekme dayanımları arasındaki fark, östenitik çeliklerden daha azdır, yani daha az pekleşirler, fakat bunun yanında süneklikleri de daha düşüktür. En çok tüketilen sac malzemeler arasında 409 ve 430 kalite çelikler sayılabilir. Kullanımları 304 kalite östenitik kadar yaygın olmasa da , özellikle 430 kalite saclar her türlü parlak paslanmaz çelik uygulanmasında tercih edilirler. Ferritik çelikler daha ilk derin çekme kademesi için bile çok iyi değillerdir. Yani derin çekme oranları östenitikler kadar yüksek seçilemez. ( $\tilde{R}$ ) değeri en düşük olarak 1,55 değerinden yüksek seçilebilir. Çok kademeli çekmelerde 750-800 °C arasında kısa bir ara tav ile derin çekmeye devam edilebilir, ikinci kademede ( $\tilde{R}=1,28$ ) ve üçüncü kademede ise ( $\tilde{R}=1,2$ ) değerleri kullanılabilir. Malzemenin daha iyi şekillendirilebilmesini sağlamak için, bazı durumlarda yarı sıcak (ılık) derin çekme

yapılabilir. Sıcaklık ince saclarda 100 °C, kalın saclarda ise 300 °C civarında seçilebilir (Schedin, E).

Martenzitik kaliteler arasında sadece 403-410-414 kaliteler soğuk şekillendirme için tavsiye edilir. Bu alaşımlarda akma ve çekme dayanımları ve şekillendirme için gerekli kuvvet ve enerji, gerek östenitik ve ferritik çeliklere gerekse karbon çeliklerine oranla çok yüksektir. Daha fazla karbon içermeleri nedeniyle diğer martenzitik çeliklerin soğuk şekillendirilebilirliği çok düşüktür ve genellikle ancak yarı-sıcak (ılık) durumda işlenirler. Yüksek karbonlu martenzitik türlerden 440A, 440B, 440C kaliteler ise çok daha düşük şekillendirme kabiliyetine sahiptir. Bu çeliklerden yapılma sac parçanın pekleşme sonrası sertliği yeterli bulunmazsa, genellikle havada su verilerek 60 HRC'ye kadar yükseltilebilir.

Dubleks çeliklerin akma dayanımları östenitiklerin yaklaşık olarak iki katıdır. Kopma uzamaları (süneklik), tokluk ve pekleşme özellikleri ise östenitik ve ferritiklerin sahip olduğu değerler arasındadır. Sac parçalardaki kenar-köşe radyüsleri östenitiklerden daha büyük tutulmalı, % 25'den fazla şekillendirme gerektiğinde ara tav uygulanmalıdır. Yaşlandırılabilir çelik sacların şekillendirmesi ise diğer dört sınıf alaşıma göre daha ender olarak uygulanır. Bu durum özellikle martenzitik çeliklerin sertliğinin yeterli bulunmadığı parçalar için söz konusudur. Bu alaşımlar çözme tavı sonrası yumuşak halde iken şekillendirilebilir ve daha sonra çökeltme sertleşmesi (yaşlandırma) işlemiyle istenilen sertlik değerine ulaşılır.

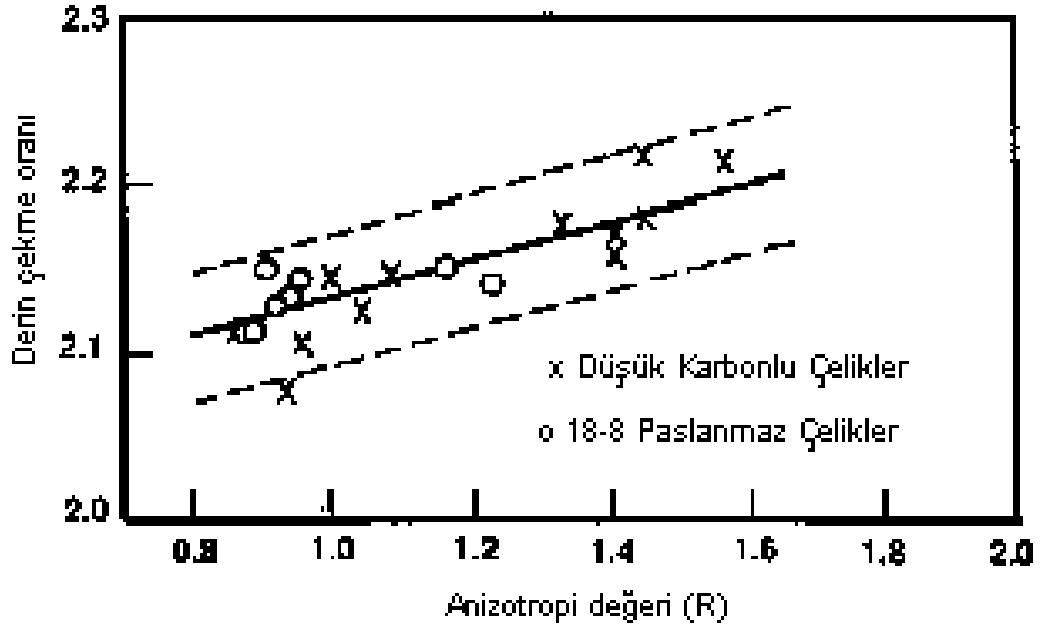
Paslanmaz çeliklerin derin çekmesinde alaşım yanında içyapı özellikleri de önem taşır. Bunlar arasında tane büyüklüğü en önemlisidir. Tane büyüklüğü arttıkça yüzeyde portakallaşma tehlikesi ortaya çıkmakta, çok küçük olduğunda ise akma dayanımı arttığından derin çekme zorlaşarak imkansız hale gelmektedir. ASTM standartlarına göre, genel olarak tane büyüklüğü 6-10 arasında olan saclar derin çekme, 9-12 arasında olanlar ise (mekanik) kesme için en uygun görülenlerdir. Derin çekme ve sıvamada yaygın olarak kullanılan alaşımlardan 304, 305, 316 ve 430 sacların DQ (draw quality) ve DDQ (deep draw quality) kodlu çekme ve derin çekme kalitesindeki ticari formları bu özellikteki sacları ifade etmektedir (Aran ve Temel, 2003)

Derin çekmede etkili bir diğer özellik de yöne bağımlılıktır (anizotropi), yani malzeme özellikleri haddelenme yönünde ve buna dik yönde farklılıklar gösterir. Soğuk haddelenmiş ve ince saclarda, sıcak haddelenmiş kalın saclara göre daha belirgin olarak ortaya çıkabilen bu özelliğin etkileri, derin çekmede pot çemberi basıncının yerel olarak ayarlanması ile kontrol edilebilir.

Derin çekme-sıvama kalıplarının tasarımında dikkat edilecek konulardan biri de geri yaylanmadır. Karbon çeliklerine göre yüksek akma ve çekme dayanımı, kalıp tasarımında aynı oranda yüksek geri yaylanma telafisi veya şekillendirme sırasında daha yüksek pot çemberi basıncı gerektirir. Paslanmaz çeliklerin derin çekme işleminde dikkat edilmesi gereken önemli diğer konular ise: kalıp kaplamaları, yağlama ve şekillendirilecek malzemedir. Derin çekme, sıvama ve kenarlama kalıplarında tavsiye edilen kaplamalar arasında CVD ile kaplanmış titanyum karbür (TiC), titanyum nitrür (TiN) ve titanyum karbonitrür (TiCN) vardır. Sıyırıcı veya pot kullanılan kalıplarda, pot yüzeyleri kauçuk veya plastik ile kaplanmalı ve basma altında oluşabilecek yüzey hasarları önlenmelidir (Colombier ve Hochmann).

Paslanmaz çeliklerin yüzeyi, sürtünme nedeniyle diğer çeliklere kıyasla daha kolay çizilir, dolayısıyla şekillendirmede yağlamaya daha fazla özen göstermek gerekir. Bu amaçla kullanılan madeni yağlar çoğu zaman yetersiz kalır, bu nedenle yüksek basınca dayanıklı hidrokarbon ve polimerler içeren yüksek ıslatıcılığa sahip özel kaydırıcı yağlar kullanılabilir. Yağlayıcı kullanımı konusunda değişik deneyimler mevcuttur. Yüzeye grafit-su karışımı sürülerek, çekmeden önce kuruması beklenebilir. Ayrıca çekmede kullanılan diğer yağlara bir miktar grafit katılarak işlem yapılabilir. Ara tav gereği var ise en uygunu grafitten yararlanmaktır, diğer yağlayıcıların tav öncesi uzaklaştırılması gereği vardır.

Paslanmaz çelik sacların şekil değiştirme hızına duyarlılığı karbon çeliklerine göre daha fazla olduğundan, preste şekillendirmede daha düşük hızlar kullanılması tavsiye edilir. Bu sayede hem gereken kuvvetler düşer, hem de sünekliliğin de hissedilir derecede arttığı görülür. Çekme aralığı olarak da kalınlığın % 20-35 fazlası önerilmektedir. Matris köşelerinde yuvarlatma yarıçapı olarak kalınlığın 5 ila 10 katı tavsiye edilir. Zimba kenarlarında ise yuvarlatma yarıçapı olarak kalınlığın 5 katı önerilmektedir.



Şekil 4.16 18-8 Paslanmaz çelikler ve düşük karbonlu çeliklerde normal anizotropi (R) ve derin çekilebilirlik arasındaki ilişki (Schedin, E)

## 5 PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ

Ferritik paslanmaz çelikler, oda sıcaklığında pek çok yöntemle şekillendirilebilirler. İlk mukavemetlerinin yüksek ve genel sünekliklerinin düşük olması nedeniyle, östenitik paslanmaz çeliklere oranla daha zor şekil verilebilirler. Mutfak lavaboları, domestik mutfak cihazları kullanımında östenitik çeliklere oranla daha çok tercih edilirler.

Ferritik paslanmaz çeliklerin düşük deformasyon sertleşme hızı özelliği göstermeleri, bunların kolayca deforme edilebilmelerini sağlamaktadır. Bu yönden yumuşak çeliklere benzeyen ferritik çeliklere kolayca pul şeklinde basma, soğuk dövme, soğuk şekillendirme ve bükme yapılabilir. Germe şekillendirmesi gerektiğinde ise östenitik çelikler, ferritik çeliklere oranla daha uygun olmaktadır (Tekin, 1981).

Ferritik çelikler, nihai tavlama sonrası yüzey pasosundan geçirilmedikçe, germe veya sıvama işlemleri sırasında, germe şekil değişmesi gösterirler. Derin sıvama karakteristiklerine kristallografik tekstürün etkisi çok önemlidir.

Paslanmaz çeliklerin soğuk şekillendirilme kabiliyetini etkileyen özellikleri akma ve çekme dayanımı, süneklik, pekleşme özelliği ve kesit daralması değerleridir. Şekil verme kabiliyeti bakımından ortak özellikler olarak şunlar sıralanabilir:

a-Paslanmaz çeliklerin dayanımı, sertliği ve sünekliği genellikle daha yüksektir.

b-Daha hızlı pekleşirler (yani şekil verdikçe dayanımları hızla artar)

Bu nedenlerle, genel olarak, imalat sırasında daha fazla güç kullanılması ve kullanılan takım, kalıp, aparat ve ekipmanlarının daha sık tamiri veya değiştirilmesi ortaya çıkmaktadır (Aran ve Temel, 2003).

Diğer ciddi bir sorun da çeliğin sıcak işlemi sırasında germe şekil değişmesine benzemeyen izler oluşmasıdır. Bu izler, süreksiz akma olayı sonucu değil kristallografik tekstür etkisi ile meydana gelir. İzler haddeleme doğrultusuna paralel olarak uzanır ve böylece germe izlerinden farklı yön göstermiş olurlar. Sıcak işlem sürecinde, istenilmeyen tekstür yapısının

gelişmesiyle meydana gelen ve halat görünüm adı verilen bu olayın kontrol edilmesi gerekir. Çünkü bu işlem çok düşük plastik anizotropiye sahip sıralar halinde bantları (izleri) doğurma özelliğindedir (Tekin, 1981) .

Halat görünüm olayını minimuma indirmek için uygulanacak yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a) Düşük tavlama sıcaklığı.
- b) Yeniden kristalleşmeyi hızlandırmak ve rasgele bir tekstür yapısını sağlamak için, östenit oluşumunu geliştirici alaşım elementi ilave etmek.

Martenzit oluşumu ve genel sertlik bir problem teşkil edeceğinden, malzemenin tamamı ile tavlama gereklidir. Eğer Ni östenit oluşumunu geliştirici bir element olarak kullanılırsa, bu durumda maliyet artışı söz konusudur.

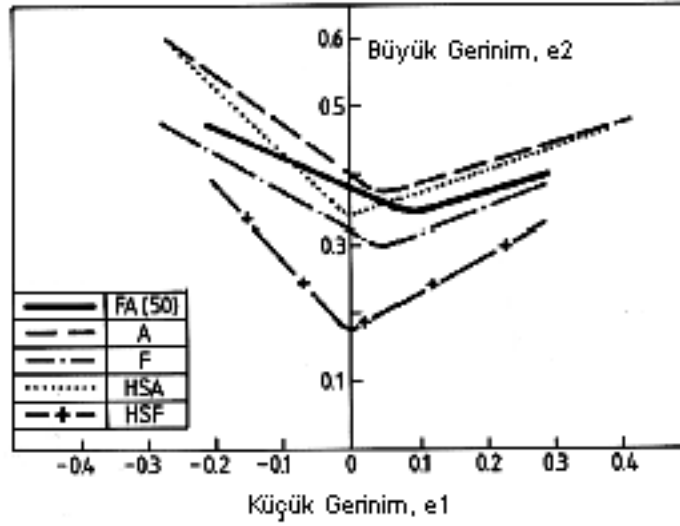
- c) Nb (CN)'in teşekkül etmesi için Nb ilavesi ve böylece yeniden kristalleşme ve çok küçük tane boyutlu rasgele tekstür yapısının elde edilmesi. Bunun için ilave edilmesi gerekli olan %1 Nb ilavesi ise oldukça pahalıdır.
- d) Toz metalurji prosesinin kullanımı özel fabrika yatırımı gerektirir ve ayrıca yüksek maliyetlidir.

Östenitik çeliklerle mukayese edildiğinde, ferritik çelikler bazı dezavantajlarına karşın, yeterli düzeyde soğuk şekillendirilebilen çok basit dizaynları gerektirirler.

Roping'den ileri gelen çizikler ile deforme edilmemiş hatta soğuk haddelenmiş şeritlerde dahi çoğu kez gözlenen yüzey hatalarının karıştırılmaması gerekir. Bu yüzey hataları çelik saclarda tercihli dağılım ve oryantasyon ile sıralanmış karbürlerin neden oldukları hatalardır (Tekin,1981).

Sonuç olarak, sıcak şekillendirilebilme ve özellikle sıcakta deformasyon açısından, ferritik paslanmaz çelikler, yüksek sıcaklıklarda çok düşük akma gerilmesine sahip çelikler olarak tanımlanabilirler. Kolaylıkla sıcak işlenebilen, süneklikleri mükemmel olan bu çelikler, çok

yumuşak olmaları nedeni ile sıcak işlem sırasında kolaylıkla çizilebilirler. Bununla beraber sıcak işlem sıcaklığında mevcut östenit miktarındaki artışla birlikte sıcak işlenebilirlik çok hızlı düşmekte, östenit ve ferritin eşit oranlarda bulunduğu durumda da minimum değerine inmektedir (Tekin,1981) .



Şekil 5.1 Farklı paslanmaz çelikler için şekillendirme sınır eğrilerinin karşılaştırılması (Schedin, E)

A: Östenitik paslanmaz çelikler

F: Ferritik paslanmaz çelikler

HSA: Yüksek mukavemetli östenitik paslanmaz çelikler

HSF: Yüksek mukavemetli ferritik çelikler

FA (50): Ferritik – östenitik paslanmaz çelikler

### 5.1 Östenitik paslanmaz çeliklerin şekillendirilebilirliği

Östenitik paslanmaz çelikler yaklaşık 0,5 civarında bir pekleşme üssü “n” değeri içerirler. Bunun sonucu olarak da çok yüksek kapasiteli biçimlendirme işlemlerinde kompleks şekle sahip parçalar tek bir operasyonla elde edilebilmektedir (The ASM. a).

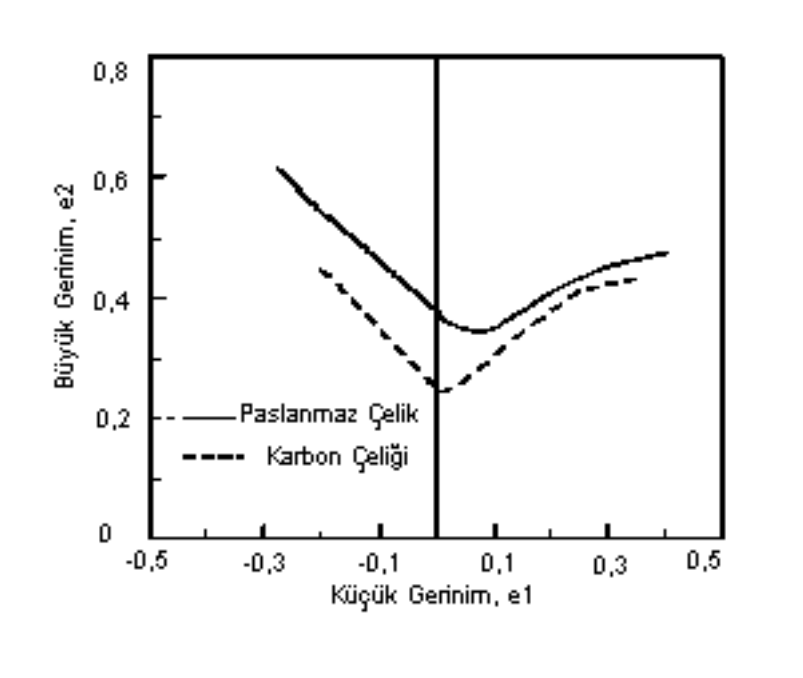
AISI-301 östenitik grup içinde en düşük % Ni ve Cr içeriğine sahip alaşımdır ve en yüksek gerilme kuvvetine sahiptir. AISI-301'in yüksek oranda sertleşmesinin en belirgin sonucu gerilme kuvveti ve akma mukavemetinin soğuk şekil vermeyele artmasıdır. Böylece sertleşme bölgesel olarak üretim ve soğuma esnasında, açılar ve kanal bölgelerinin dahil olduğu yapıda gözlenebilir. Diğer taraftan derin çekme uygulamaları için düşük oranda sertleşme uygun

olmaktadır ve yüksek oranda Ni içeren alaşımlarda bu olay görülmektedir (304, 304 L ve 305) (The ASM. c).

Genelde östenitik alaşımlarda, AISI-301'de olduğu gibi şekillendirilebilirlikte % Ni veya %Ni-%Cr oranlarının düşmesiyle bazı sorunlarla karşılaşılabilir. Benzer alaşımlar sertleşme oranlarının artmasından dolayı derin çekme veya benzer şekil değiştirme işlemleri için pek uygun değildir (The ASM. a).

Yüksek karbonlu alaşımlarda olduğu gibi, niyobyum, titanyum ve tantal gibi denge elementlerinin varlığı, östenitik paslanmaz çeliklerin şekil değiştirme özelliklerini ters yönde etkilemektedir (The ASM. a).

Bundan dolayı, 321 ve 347 kalite saclar, 302, 304 ve 305 kalite saclara göre talaşsız şekil verme ile işlemeye daha az uygundur (The ASM. a).



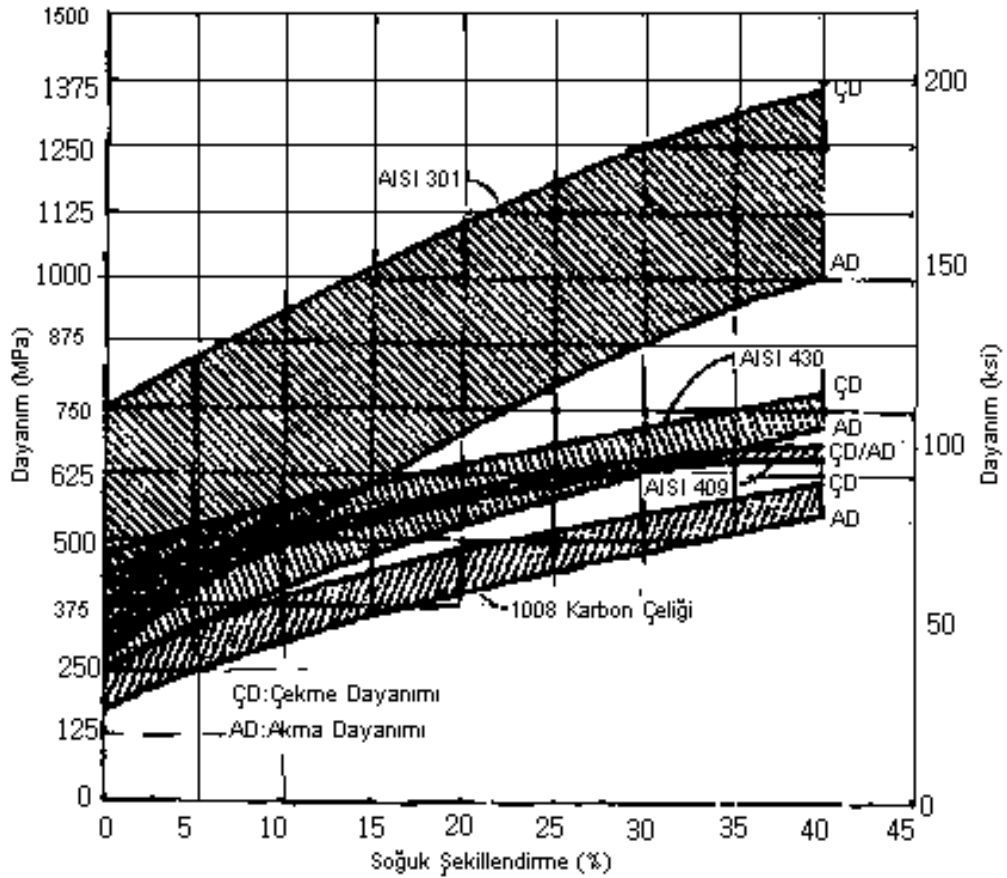
Şekil 5.2 Eşit gerilme altında östenitik paslanmaz çelik ve karbon çeliğinin karşılaştırılması (Schedin, E)

## 5.2 Ferritik paslanmaz çeliklerin şekillendirilebilirliği

409 ve 430 kalite çeliklerde Şekil 5.3'de görüldüğü gibi soğuk şekil değiştirme ile akma ve çekme dayanımının belirlediği alan daralmaktadır. Bu davranış ferritik alaşımların tipik bir

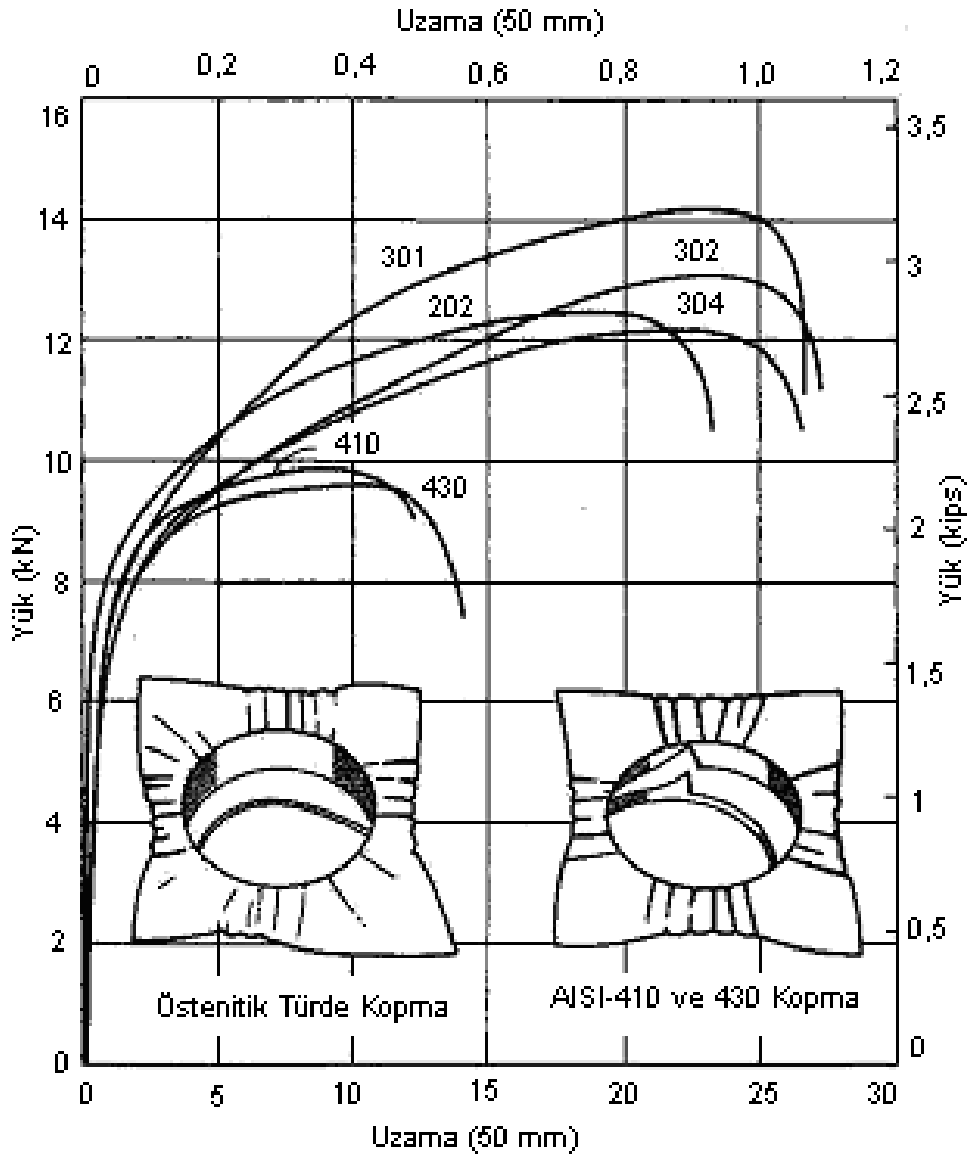
özelliğidir ve talaşsız şekillendirmeyi belirli noktalarda kısıtlamaktadır. Bununla beraber 409 ve 430, 302 kadar şekil değiştirmeye yatkın olmamalarına rağmen bükme, çekme veya sıvama gibi geniş bir alanda kullanılmaktadır (The ASM. c).

1008 düşük karbonlu çeliğin eğrisinin tabloya katılmasının sebebi paslanmaz çeliklerin şekil değiştirme özelliklerinin değerlendirilmesi için bir referans teşkil etmesidir. Soğuk şekil değiştirme ile 1008 çeliğinde de, 409 ve 430 arasında, hatta yüksek şekil değiştirme özelliğine sahip 301'de görüldüğü gibi şekillendirme kapasitesinde düşüş gözlenir. Şekilde soğuk şekil vermenin 1008 çeliğinin dayanımını 301 ve ferritik çelikteki kadar hızlı arttıramadığı görülmektedir.



Şekil 5.3 301 östenitik, 409 ve 430 ferritik paslanmaz çelik ve 1008 düşük karbonlu çeliğin soğuk şekillendirilmelerinin karşılaştırılması (The ASM. c)

430'un en önemli uygulamalarından bazıları otomotiv endüstrisi ve dövmedir. 409 egzost sistemleri içinde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Ferritik paslanmaz çelikler yaklaşık 0,22 civarında bir "n" değerine sahiptir ve derin çekme uygulamaları için geniş bir kullanım alanı bulamamıştır. Fakat bununla birlikte derin olmayan pres uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Östenitik paslanmaz çelikler ferritik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek sınır gerilimlerine sahiptir, dolayısıyla biçimlendirilebilirlikleri daha iyidir (The ASM. c).



Şekil 5.4 Akma ve kopma dayanımlarının karşılaştırılması (The ASM. c)

Şekil 5.4'de 6 tür paslanmaz çeliğe ait kuvvet uzama eğrisi görülmektedir. 4 östenitik (202, 301, 302 ve 304), bir martenzitik (410) ve bir ferritik (430). Şekilde görüldüğü gibi bir kabın derin çekilmesinde, östenitik tür paslanmaz çeliğin, 410 ve 430 tür çeliklere göre kopma

dayanımlarının farklı değerler gösterdikleri görülmektedir. Östenitik tür paslanmaz çeliklerde kopma zımba baskı radyüsüne yakın bir bölgede net olarak gözlemlenmektedir ve kabın altı tamamen patlamıştır. 410 ve 430 tür çeliklerde ise şiddetli soğuk şekil değiştirme etkisiyle, meydana gelen sertleşme nedeniyle oluşan kırılgenlik sayesinde keskin, köşeli bir kopma meydana gelmiştir.

şekilde görüldüğü gibi 301 tip çeliğin şekil değişimi için gerekli olan g, diğer tür östenitik çelikler için gerekli olan gten fazladır. Sonuç olarak 301 tip çelikler kopmadan önce maksimum uzama gösterirler. 410 ve 430 tip çelikleri şekillendirmek için daha az güç gereksinimi olmasına rağmen, kopma öncesi düşük uzama seviyeleri gösterirler.

Paslanmaz elikler düşük karbonlu çeliklere göre daha yüksek akma mukavemetlerine sahip olduklarından dolayı, şekillendirme esnasında iki kat güce ihtiyaç vardır. Östenitik elikler, soğuk şekil değiştirmenin başlamasıyla hızla pekleştikleri için, değişim esnasında g ihtiyaı ferritik çeliklerden daha yüksek olmaktadır. Ferritik elikler şekil değişiminin başlangıcında g ihtiyaı olarak sade karbonlu çelikler kadar güce ihtiyaçları olsa da, plastik şekil değişim esnasında g ihtiyaçları artar (The ASM. c).

## 6 ŞEKİLLENDİRME KABİLİYETİNE TESİR EDEN FAKTÖRLER

Sacların şekillendirme kabiliyetine tesir eden faktörlerin başlıcaları malzeme temel özellikleri, kimyasal bileşim, mikroyapı, sac üretim yöntemleri, taslak hazırlama, kalıp geometrisi ve şekillendirme şartlarıdır. Bu faktörlerin tesirleri aşağıda tek tek açıklanacaktır.

### 6.1 Malzeme temel özelliklerinin tesirleri

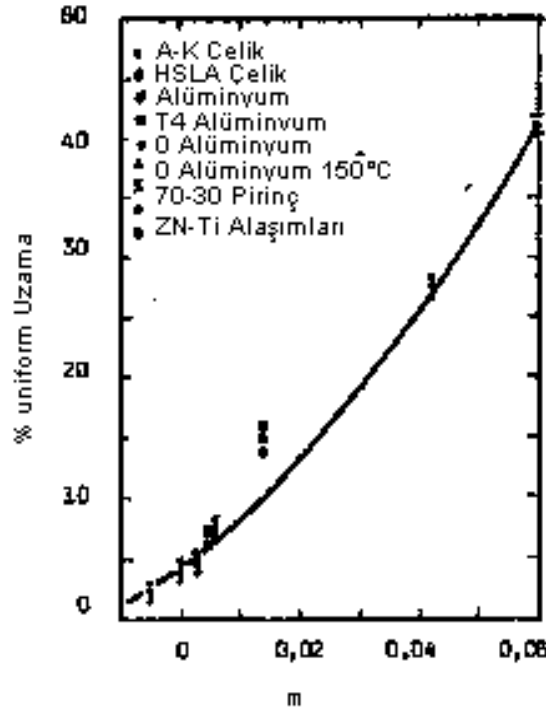
Şekillendirilecek sacın kalınlığı önemli özelliklerin başında gelir. Sac kalın oldukça şekillendirme sırasında kalınlık incelmesi daha fazla olacağından germe ve derin çekme oranı artacaktır (Aran ve Temel, 2003).

Matematik hesapları göstermiştir ki pekleşme üsteli ( $n$ ) değeri çekme deneyindeki boyun vermenin başladığı gerçek üniform uzama değerine eşittir.  $n$  değerinin yüksek olması malzemenin boyun vermeye olan direncinin yüksek olduğunu gösterir. Pekleşme üstelinin esas tesiri, germe şekillendirilmesinde görülmektedir. Bir sacın pekleşme üsteli değeri arttıkça germe şekillendirme kabiliyeti veya gererek biçimlendirme oranı sınırı artış göstermektedir.  $n$  değerinin derin çekme şekillendirme işlemi üzerindeki tesiri çok azdır (Dieter, 1988).

Pekleşme üsteli değerinin artması halinde deformasyon sırasında sac daha fazla şekillendirme sertleşmesine maruz kalacağından şekillendirilen parçada, birim şekillendirme gradyeni azalır. Zira daha fazla şekillenen bölge daha fazla sertleşeceğinden, daha yüksek gerilmelere ihtiyaç vardır. Yüksek gerilmeyi sağlamayan dış şekillendirme yükleri uygulandığında bu yük komşu yüklere intikal eder (Yurci, 1991b).

Bu yükün tesiri altında komşu elemanlar da şekillendirmeye maruz kaldığında iş parçasında şekil değiştirme gradyeni azalmış olur. Yani pekleşme üsteli değeri yüksek olan saclarda şekil değiştirme dağılımı daha homojen olmaktadır. Bunun sonucu olarak derin, kompleks şekilli parçalar yüksek ( $n$ ) değerli malzemelerden üretilmektedir (Marciniak ve Duncan, 1992).

Malzemenin gerinim hızına duyarlılık üsteli değeri şekil değiştirme gradyeni dağılımı üzerinde önemli rol oynar. Preste zımba ile germe işleminde şekil değiştirme konsantrasyonuna bağlı olarak hemen şekillendirme gradyeni teşekkül eder. Bu nedenle zımba ile germe işleminde deformasyonun başlamasıyla birlikte gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) önem kazanır. m değeri arttıkça zımba ile germe işi kolaylaşmaktadır. Şekil 6.1 de muhtelif metallerin m değeri ile çekme deneyinde ölçülen % üniform uzamanın nasıl değiştiği görülmektedir (The ASM. c).



Şekil 6.1 Metal saclarda deformasyon hızı duyarlılığı üssü değerine bağlı olarak % üniform uzama değerinin değişimi (The ASM. c)

m değeri arttıkça üniform uzama artmakta ve dolayısıyla sacın germe ile şekillendirme kabiliyeti artmaktadır. Metalik saclarda şekillendirme gerilmesi ve gerinim hızına duyarlılık üsteli arasında aşağıdaki bağıntı mevcuttur.

$$\sigma_d = c \cdot \epsilon^m \quad (6.1)$$

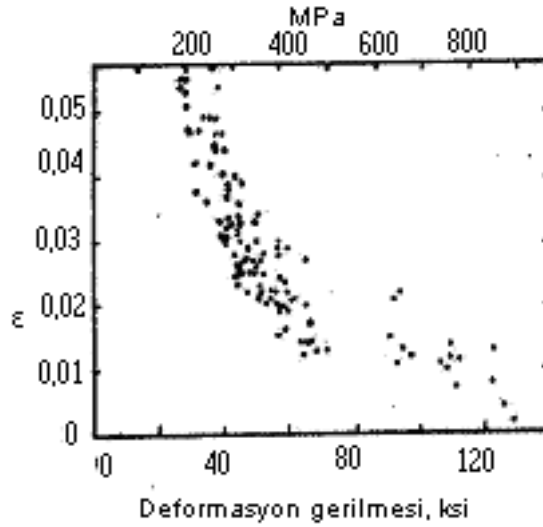
$\sigma_d$ : Deformasyon gerilmesi

$\epsilon$ : Deformasyon hızı

c: Malzeme sabiti

m:Gerinim hızına duyarlılık üsteli

Çelik saclarda m değerin deformasyon gerilmesi üzerindeki tesiri Şekil 6.2’de görülmektedir. m değeri arttıkça gerilme azalmaktadır. Yani gerinim hızına duyarlılık üsteli arttıkça şekillendirme kolaylaşmaktadır, bu kolaylık germe şekillendirmesinde pozitif rol oynamaktadır.



Şekil 6.2 Çelik saclarda gerinim hızına duyarlılık üsteline bağlı olarak, deformasyon gerilmesinin değişimi (The ASM. c)

Pekleşme üsteli n ve gerinim hızına duyarlılık üsteli m değerlerinin yüksek olması derin çekme işlemini olumlu yönde etkilemelerine rağmen, etkinlikleri azdır (Dieter, 1988).

Derin çekme kabiliyetini etkileyen en önemli mekanik özellik R dikey anizotropi katsayısıdır. Dikey anizotropi katsayısı ise malzemenin kristallografik yapısına ve kristallografik yönelmesine bağlıdır (Dieter, 1988).

Sac üretim şartlarına bağlı olarak sac içerisinde metalik yönelmeler teşekkül etmektedir. Dikey anizotropi değerinin (R) yüksek olduğu saclarda düzlemsel anizotropi değeri ( $\Delta R$ ) de yüksek olmaktadır.  $\Delta R$ 'nin yüksek olması şekillendirilen parçada fazla kulaklanma olacağını gösterir. Kulaklanma meydana geldiğinde, kulakların parçadan kesilmesi gerektiğinden, hem operasyon sayısı artmakta, hem de malzeme sarfiyatı fazlalaşmaktadır.

Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için çelik üreticileri R değeri yüksek ve ( $\Delta R$ ) değeri sıfır olan sac üretimi üzerinde araştırmalar yapmaktadırlar. Dikey anizotropi katsayısının germe ile şekillendirme üzerinde tesiri hemen hemen yok gibidir.

## 6.2 Kimyasal bileşimin tesirleri

Çelik bileşimine üretim sırasında geçen ve temizlenmesi zor olan bazı elementler sacların kalitesine çeşitli etkiler yapmaktadır.

C, miktarı soğuk şekil değiştirmeden dolayı % 0,08'i pek geçmemeli ve bilhassa söndürülmemiş çeliklerde kaba tanelerin ortaya çıkması tehlikesinden dolayı % 0,05'in altına düşürülmemelidir.

Mn, sertliği artırıcı yöndeki eğiliminden dolayı, metalurjik hadde tekniği açısından gerekli olan sınırın, % 0,35'in üzerine pek çıkmamalıdır.

Si, çeliğin şekillendirilmesine kötü etkisinden dolayı gayet düşük (% 0,010 maksimum) olmalıdır.

P, söndürülmemiş çeliklerden üretilen sacların çekilebilirlik oranını yükseltirse de, soğuk şekillendirme için önemli olan mekanik özellik değerlerini düşürür, kırılgnlık yapar.

Sb, antimon söndürülmemiş çeliklerden en iyi haddeleme ve tavlama şartlarında üretilen sacların çekilebilirlik oranı  $\tilde{R}$  değerini yükseltir.

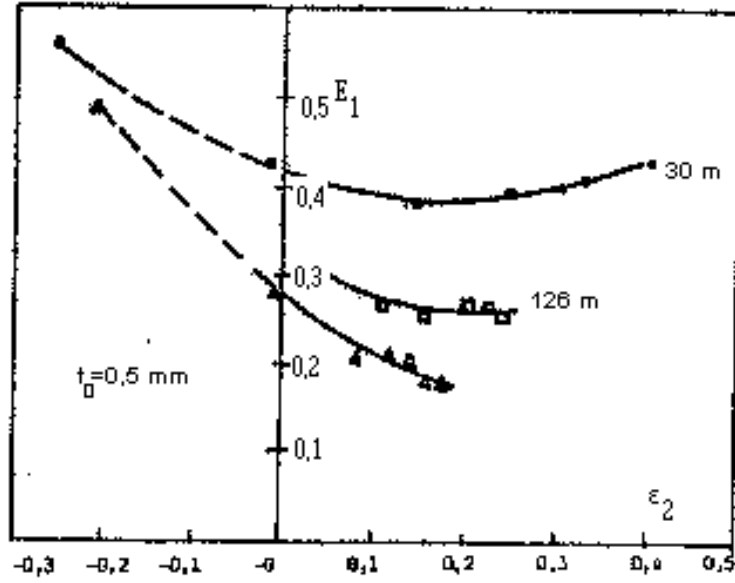
Cu, söndürülmemiş çeliklerden üretilen sacların çekilebilirlik oranını ( $\tilde{R}$ ) yükseltmesine rağmen pekleşme üsteli n azalacağından düşük olması istenir. Cu, % 0,15~0,20 civarında bulunur.

N, azot çeliklerde süresiz akma olayına (akma uzamasına) sebep olduğundan mümkün olduğunca düşük olması istenir. Azot atom boyutu demir atomlarına nazaran çok küçük olduğundan oda sıcaklığında bile çelik içerisinde yayımlanmaktadır, difüze olabilmektedir. Çelik saclar istenilen kalınlığa soğuk haddelendikten sonra tavlansarak sünek hale getirilir. Tavlama sonrası temper haddesi ( % 0,5 deformasyon yapan haddeleme işlemi ) yapılarak piyasaya verilir. Temper haddesi yapılan çelik saclarda akma gözükmez. Kaynar çelik (deokside edilmemiş) saclar oda sıcaklığında dört hafta kadar bekletildiğinde yaşlanma gösterirler. Çelik içerisinde bulunan empürüte azot atomları dislokasyonlar çevresine yayılarak dislokasyon hareketini engellemekte ve bunun sonucu olarak sacda akma olayı meydana gelmektedir. Bu süresiz akma olayı şekillendirilen sac yüzeyinde Lüders bantları adı verilen çizgilerin teşekkülüne sebebiyet vermektedir. Lüders bantları hem germe ile şekillendirilen hem de derin çekilen parçalarda görülmekte ve parça yüzey kalitesini bozmaktadır. Azotun bu negatif tesirini azaltmak için azot oranını minimuma indirmemiz gerekir.

Al, derin çekme kalite sacların üretiminde deoksidasyon için kullanılır. Alüminyum ile söndürülmüş (sıvı haldeyken Al ilave edilmiş) çeliklerde alüminyum oksijen atomlarının yanı sıra azot atomlarını da bağlar. Böylece alüminyum azotun olumsuz tesirini azaltmaktadır. Alüminyum ile söndürülmüş çelik saclar temper haddesinden sonra oda sıcaklığında altı ay bekletilseler bile, süresiz akma olayı göstermezler. Alüminyumun diğer bir avantajı da tane boyutunun küçük olmasını sağlamasıdır. Alüminyumla söndürülmüş çelik sacların mukavemeti, sünekliği, germe ve derin çekme kabiliyeti artmaktadır (Kaluç ve Tülbentçi, 1995).

### **6.3 Mikro yapının tesirleri**

Çelik tane boyutunun şekillendirme ve yüzey kalitesi üzerinde tesirleri mevcuttur. Tane boyutu küçüldükçe süneklik arttığından şekillenme kabiliyeti artmaktadır. Şekil 6.3'de tane boyutunun biçimlendirme limit diyagramı üzerindeki tesiri görülmektedir. Görüldüğü üzere tane boyutu küçüldükçe şekillendirme kabiliyeti artmaktadır.



Şekil 6.3 Kartuj pirincinde tane boyutunun biçimlendirme limit diyagramı üzerindeki tesirleri (Kayalı ve Çimenoğlu, 1986)

Presle şekillendirilen sacların deformasyon bölgelerindeki yüzey pürüzlülüğü tane boyutunun bir fonksiyonudur. Tane boyutu küçüldükçe yüzey pürüzlülüğü azalır. Tane boyutu arttıkça yüzey kalitesi düşer ve deforme olmuş bölgeler portakal kabuğu gibi pürüzlü bir yüzey arz eder. Bu yüzeylerin boyanması veya kaplanması çok zor olmaktadır, bu nedenle şekillendirilecek malzemenin tane boyutu küçük olması gerekir (The ASM. c).

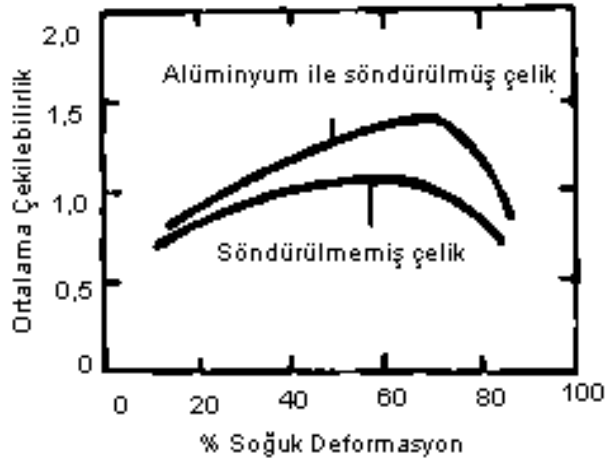
Çelik saclarda inklüzyonlar, segregasyonlar, porozite (gözenekler noktasal boşluklar) gibi mikro yapı hataları yönlenme gösterirler. Bu mikro yapı hataları haddeleme doğrultusuna paralel uzama gösterirler. Bu hatalar mikro yapının içerisindeki sürekliliği bozar ve gerilme altında boşluk gibi davranırlar. Bu hataların içerisinde bilhassa inklüzyonlar çok önemlidir. Inklüzyonlar metalik olmayan kalıntılardır. Inklüzyonların hacim oranı arttıkça malzemenin mukavemeti ve bilhassa sünekliği, şekillendirme kabiliyeti azalır. Bu nedenle inklüzyonların azaltılması gerekir. Çelik içerisinde istemediğimiz halde bulunan kükürt ve oksijen atomlarının miktarının azaltılması gerekir. Sıvı çeliğe deoksidasyon ve kükürt giderme işlemleri uygulanarak kükürt ve oksijen oranı minimum seviyeye indirilir (The ASM. a).

#### 6.4 Sac üretim şartlarının tesirleri

Yapılan araştırmalar sonucu, anizotropinin sıcak ve soğuk haddeleme ile değiştiği tespit edilmiştir. Yeniden kristalleşme tavlamaşı öncesi yapılan soğuk işlem miktarının, son sıcak haddeleme ve sargı sıcaklıklarının da çekilebilirlik oranını etkileyen birer faktör oldukları tespit edilmiştir.

Yapılan deneylerde, soğuk deformasyon ve tavlama sonunda elde edilen malzeme yapısının, soğuk deformasyon miktarının artışı ile derin çekmeye uygun bir şekilde değiştiği görölmüştür. Yapıdaki değişim  $\tilde{R}$  ve R değerlerine de yansır.

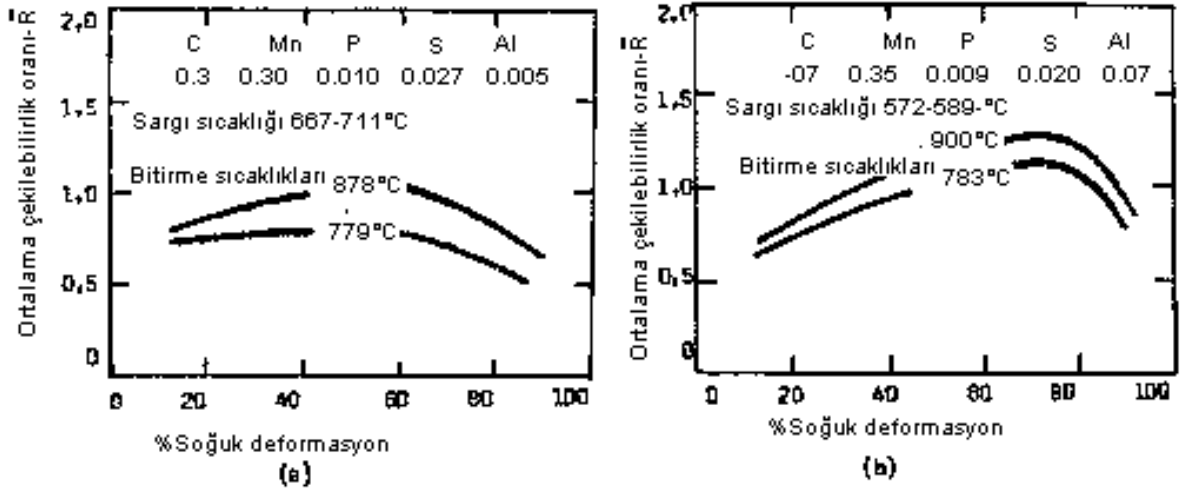
şekil 6.4'de söndürölmemiş ve Al ile söndürölmüş bir çelikte soğuk haddeleme miktarının ortalama çekilebilirlik oranı  $\tilde{R}$  etkisi görölmektedir.



şekil 6.4 Tavlama öncesi yapılan soğuk deformasyon miktarının ortalama çekilebilirlik oranına etkisi (Kayalı ve Ensari, 1986)

şekil 6.4'de görölen %50-70 soğuk deformasyon ve tavlama sonucu çekilebilirlik oranında meydana gelen artma, söndürölmemiş ve alüminyum ile söndürölmüş bir çok çelikte de görölmüştür. Çekilebilirlik oranı belirli bir değere kadar arttıķa derin çekilme kabiliyeti iyileşeceğinden derin çekme işlemlerinde kullanılacak çeliklerde soğuk haddeleme miktarı % 60 civarında olmalıdır.

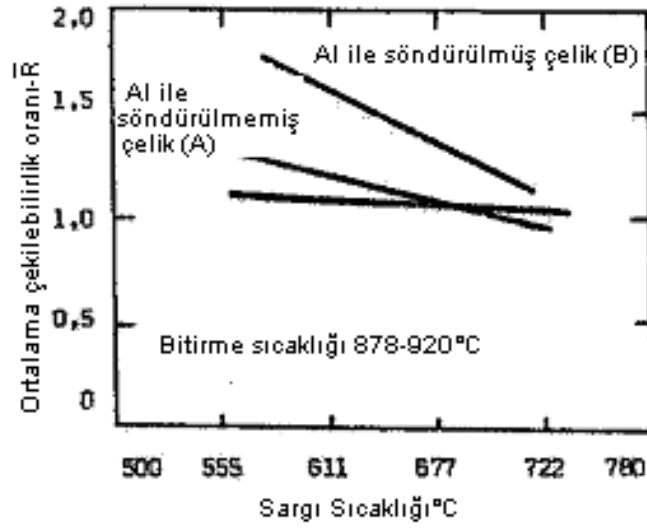
Ayrıca alüminyum ile söndürülmüş çeliğin çekilebilirlik oranının daha yüksek oluşu da dikkate değerdir. Alüminyum tane küçültücü etkisi çekilebilirliğin artmasının nedenidir. Şekil 6.5’de soğuk haddeleme öncesi yapılan sıcak haddeleme, son haddeleme sıcaklığının ortalama çekilebilirlik oranına etkisini, söndürülmüş ve söndürülmemiş çeliklerde göstermektedir.



Şekil 6.5 Söndürülmemiş (a) ve söndürülmüş (b) bir çelik için farklı son sıcak haddeleme sıcaklığı ile soğuk deformasyon miktarının ortalama çekilebilirlik oranına etkisi.

Genel olarak son sıcak haddeleme sıcaklığı azaldıkça, iç yapıda bantlaşma olmakta ve çekilebilirlik oranı düşmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta tavlanan saclarda soğuk deformasyon sonrası uygun tavlama rejimi uygulanmazsa tane büyümesi sonucu çekilebilirlik oranında tekrar düşme görülür.

Sargı sıcaklığının da çekilebilirlik oranına  $\bar{R}$  etkisi vardır. Çelik sıcak sarıldığında soğuk sarılmaya nazaran daha düşük bir R değerine sahip olmaktadır. Bunun nedeni de yine tane boyutu ile ilgilidir. Eğer son haddeleme sıcaklığı yeterince yüksekse, sargı sıcaklığının söndürülmemiş çeliklerde çekilebilirlik oranına etkisi azalır, ancak alüminyum ile söndürülmüş çeliklerde, bobin sargı sıcaklığı önem kazanır. Şekil 6.6’da alüminyum ile söndürülmüş çelikte sargı sıcaklığı arttıkça ortalama çekilebilirlik oranı azalmaktadır.

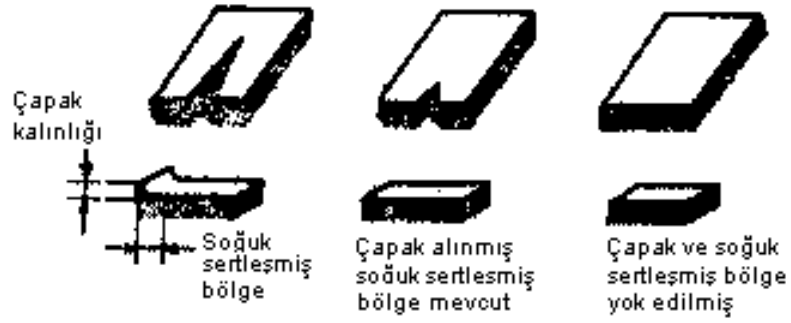


Şekil 6.6 Bir söndürülmüş ve iki Al ile söndürülmemiş çelikte bobin sargı sıcaklığının R değerine etkisi. Söndürülmüş ve Al ile söndürülmemiş A çeliği Şekil 6.5'deki bileşime sahiptir. B çeliği ise (% olarak), C= 0,06 , Mn= 0,33, P= 0,009, S= 0,027, Al= 0,36 bileşimindedir (The ASM. c)

## 6.5 Taslağın tesirleri

Sac preslemesinde önemli faktörlerden bir tanesi de taslaktır. Üreticilerin büyük bir kısmı sac tabakasından en fazla sayıda taslak üretmeyi kendilerine hedef almışlardır. Ancak sac malzemesi özelliklerinin yönlere bağlı olarak değişmesinden dolayı taslak sayısı kadar bitmiş parça üretmek mümkün olmamaktadır. Taslağın uygun olmayan yönünden şekillendirme yapılması halinde parçada hasar meydana gelmektedir (Yurci, 1997b).

Taslakta dikkat edilmesi gereken ikinci bir hususta taslağın kenar uzunluklarıdır. Taslak kenarı pürüzlü veya çapaklı ise şekillendirme kabiliyeti genellikle azalır. Bilhassa pürüzlü kısım, şekillendirilmiş kısmın dış kısımlarına rastlar ise hasar ihtimali daha fazla büyür. Kesilen kenar boyunca şekillendirme sırasında çekme kuvvetleri teşekkül ederse çoğu kez çatlaklar ve yırtılmalar meydana gelmektedir. Bu problemin çoğu kesme bıçaklarının körlüğünden veya kesme boşluğunun uygun seçilmemesinden ileri gelir. Kesme çapağı yüksek oranda şekil değişimine maruz kalırsa Şekil 6.7'de görüldüğü gibi çatlak teşekkül etmektedir. Çapak kısmının çevresinde soğuk şekillenmeyle sertleşmiş dar bir bölge vardır.



Şekil 6.7 Çapak ve çapak bölgesindeki soğuk sertleşmiş bölgenin çatlama ihtimali üzerindeki etkileri (Kayalı ve Ensari, 1986)

Bu bölgenin şekillendirme kabiliyeti düşük olduğu için deformasyon sırasında buradan çatlamaaktadır. Çapağın ve bu soğuk şekillendirilmiş bölgenin kaldırılmasıyla çatlak ihtimali kısmen veya tamamen giderilebilir (Kayalı ve Ensari, 1986).

## 6.6 Kalıp geometrisinin etkisi

Kalıp geometrisi açısından derin çekme kabiliyetini etkileyen önemli parametreler kalıp eğrilik yarıçapı ( $R_k$ ), zımba eğrilik yarı çapı ( $R_z$ ) ve zımba ile kalıp arasındaki boşluk ( $e$ ) mesafesidir. Derin çekme işleminde çatlama karşı en zayıf bölge parça yan duvarının tabana yakın olan bölgesidir. Bu bölgedeki gerilme zımbanın uyguladığı kuvvete doğrudan bağlıdır. Dolayısıyla zımbanın uygulayacağı kuvveti azaltıcı önlemler, parçanın çatlama ihtimalini de azaltır (Güneş, 2003a).

Malzemenin kalıba girişindeki kalıp eğrilik yarıçapının ( $R_k$ ) seçimi önemlidir.  $R_k=0$  durumunda malzeme rahat hareket edemez, kesme işlemine benzer bir durum söz konusu olur. Belirli derin çekme kuralları için ( $R_k$ ) değerinin artması, derin çekme kuvvetini azaltır, dolayısıyla derin çekme oranını artırır. Ancak ( $R_k$ ) değeri sınırsız olarak artırılmaz, çünkü aşırı durumda sıkıştırma kalıbının etki alanı azalacağından taslak çevresinde veya ürünün yan duvarlarında kırışıklık ve erken hasar görülür. Tecrübelerin ışığı altında kalıp eğrilik yarı çapı tayini :

$$\text{Çelik malzemelerde : } R_k = 0,8\sqrt{(d_o - d_z)t_o} \quad (6.2)$$

$$\text{Alüminyum ve alaşımlarında: } R_k = 0,9\sqrt{(d_o - d_z)t_o} \quad (6.3)$$

bağıntularından bulunmaktadır (Güneş, 2003a).

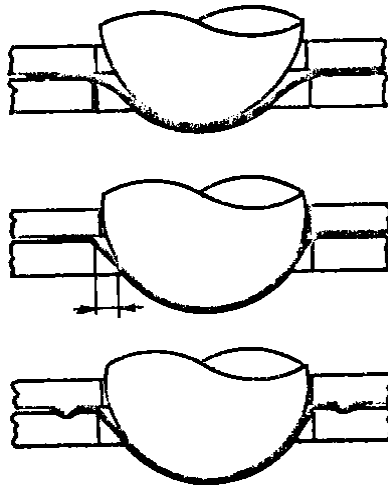
Burada  $t_0$  malzemenin orijinal kalınlığıdır. İkinci ve daha sonraki yeniden derin çekme işlemlerinde,

$$R_k = \frac{d_{(n-1)} - d_n}{2} \quad (6.4)$$

bağıntısından kalıp eğrilik yarıçapı tayin edilir. Bu bağtıda  $d_n$  parçanın son çapı,  $d_{(n-1)}$  ise parçanın bir önceki yeniden derin çekme işlemindeki çapıdır. Sacın zımba tarafından hasara uğratılmaması için zımba taban kenarının yuvarlatılması gerekir. Zımba eğrilik yarıçapının artması derin çekme kuvvetini azaltır, derin çekme oranını da artırır. Genel olarak zımba eğrilik yarıçapı ( $R_z$ ) malzeme kalınlığına ( $t_0$ ) bağlı olarak seçilir (Yurci, 1997b).

$$R_z \cong (5 \approx 10)t_0 \quad (6.5)$$

Parça tabanının keskin köşeli veya küçük eğrilik yarıçapına sahip olması istenirse, malzeme önce eğrilik yarıçapı büyük olan zımba ile biçimlendirilir, daha sonra uygun bir zımba ile istenen boyutlara getirilir.  $R_z$  değeri, malzeme kalınlığının 10 katını geçmemelidir, aksi halde elde edilen ürünün yan duvarlarında kırışıklık görülür. Küresel şekilli parçaların biçimlendirme işleminde derin çekme ve gerekerek biçimlendirme yöntemleri beraberce uygulanır. Bu durumda malzemenin kırışmasını önlemek için Şekil 6.8’de görülen önlem alınır (The ASM, c).



Şekil 6.8 Küresel tabanlı bir parçanın biçimlendirme işlemine ait örnek (The ASM, c)

Malzeme önce en üst şekilde görüldüğü gibi çevresi boyunca iyice sıkıştırılarak hareket etmesi önlenir. Bu arada gererek biçimlendirme yoluyla kalınlık % 10-15 oranında inceltir ve parçanın ön biçimlenmesi sağlanır. Daha sonra ortadaki şekilde görüldüğü gibi, zımba ilerledikçe, sıkıştırma kuvvetinin azaltılıp malzemenin kalıp içine doğru hareketine müsaade edilmelidir. Ancak bu durumda oklarla belirtilen bölgede malzeme serbest kalacağından kırılmaya uğrayabilir. Kırışmanın önlenmesi için malzeme bir yandan kalıp içine hareket ederken bir yandan da iyice gerdirilmelidir. Bu gerdirme işleminde , kalıplarda değişiklik yapılarak, malzemenin belirli kavisler yaparak kontrollü bir şekilde kalıba girmesi sağlanır (The ASM, c).

Zımba ile kalıp arasındaki boşluk (e) yine tecrübelerle bağlı olarak seçilir.

$$e \cong (1,07 \approx 1,15)t_0 \quad (6.6)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Ancak sürtünme kuvvetlerini ve kalıp aşınmasını azaltmak için yan duvar kalınlığının önemli olmadığı durumda:

$$e \cong (1,05 \approx 1,20)t_0 \quad (6.7)$$

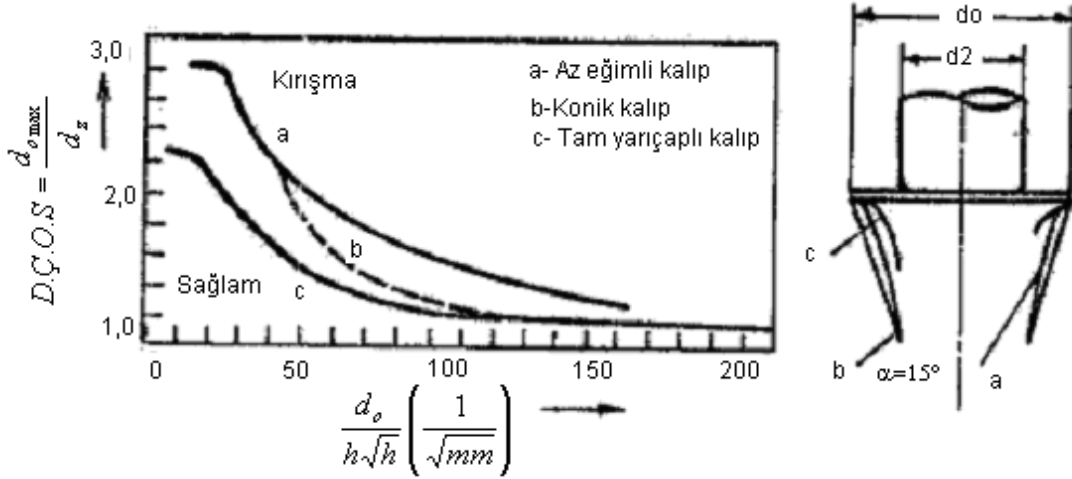
alınır. Parça yan duvar kalınlığının homojen olarak istendiği durumlarda (e) mesafesi daha küçük değerlerde tutulur. İkinci ve daha sonraki yeniden derin çekme işlemlerinde ise;

$$e = \frac{d_{(n-1)} - d_n}{2} \quad (6.8)$$

bağıntısından faydalanılır.

Burada, yine  $d_n$  parçasının son çapı  $d_{(n-1)}$  parçasının bir önceki derin çekme işlemindeki çapıdır (Güneş, 2003a).

Derin çekme işleminde malzeme radyal çekme kuvvetleri ile kalıp içine çekilirken, taslağın kalıp içine henüz girmemiş bölgesinde çevresel basma kuvvetleri oluşur. Çevresel basma kuvvetleri malzemenin büzülerek kalınlaşmasına ve önlem alınmaz ise malzemenin kırışmasına neden olur.



Şekil 6.9 Düşük karbonlu çeliklerde sıkıştırma kalıbı kullanılmadan değişik kalıp geometrisine bağlı olarak derin çekme oranı sınırının değişimi (Kayalı ve Ensari, 1986)

Kırışma olayı taslağın kalıp içine henüz girmemiş bölgelerinin uygun bir kalıp yardımıyla sıkıştırılması sonucunda önlenir. Şayet sıkıştırma kalıbı kullanılmadan derin çekme işlemi uygulanacak ise Şekil 6.9 a'da kırışmayı önlemek için derin çekme oranı ( $d_0/d_1$ ), 1,2 değerinden küçük olmalıdır. Kalıp geometrisine bağlı olarak, taslağın yeterince kalın olması durumunda da sıkıştırma kalıbına gerek olmayabilir. Şekil 6.9'da bu sınır koşulları dışında derin çekme işleminde genellikle taslağa ön sıkıştırma işlemi uygulanmamalıdır. (Şekil 6.9 a ve b). Sıkıştırma kuvveti öylesine uygulanmalıdır ki taslak çevresi veya parça yan duvarlarında kırışıklık olmamalıdır. Sıkıştırma kuvvetinin çok fazla uygulandığı durumlarda malzeme kalıplar arasında hareket edemez ve radyal çekme kuvvetlerinin etkisiyle malzeme kalınlığı hızla azalır ve sonuçta erken hasar görülür. Sıkıştırma basıncı olarak önce malzeme türüne göre yardımcı tablo ve bağıntılardan seçilen basınç uygulanır. Daha sonra deneme yanılma yöntemiyle uygun olan basınç tespit edilir.

## 6.7 Şekillendirme şartlarının etkisi

Daha önce belirtildiği gibi sıkıştırma basıncının uygun seçilmesi derin çekme işleminin başarılı olarak sürdürülmesi için önemli bir faktördür. Bu arada taslağın bazı bölgelerinin uygun bir yağ ile yağlanması, sürtünme kuvvetlerini önemli derecede azaltacağından, erken hasar olayını önler ve derin çekme oranını artırır. Taslağın sadece sıkıştırma kalıbı ve biçimlendirme kalıbı ile temas eden yüzeyleri yağlanmalıdır. Zımbanın tabanı ile temas eden yüzeyin yağlanması olumsuz etki gösterir. Zımba tabanının yağlanması halinde, zımbanın parça tabanına uyguladığı kuvvet olduğu gibi parça yan duvarlarına iletilmiş olur. Bu



özellikleri içinde sürtünmeyi azaltma ve kaplama özelliği, ısı taşınımı, ana metal ile tepkimeye girmemesi ve kolay temizlenmesi gibi özellikler yer almaktadır. Özellikle östenitik türlerin şekil değişimi esnasında meydana çıkan sıcaklık artışı sık sık polar yağlayıcıların moleküllerinin kırılmasına neden olmaktadır (The ASM, c).

Şiddetli derin çekme işlemleri esnasında, paslanmaz çelik yağlayıcılara (EP) yüksek basınç katkıları ilavesi uygundur. Klor ve sülfür katkıları yüksek sıcaklıklarda çelik üzerinde tepkimeye girerek kolayca birleşik oluşturabilirler. Klor en çok kullanılan EP katkısıdır, çünkü sülfür bazı çelik takımlarla kolayca tepkimeye girebilir (The ASM, c).

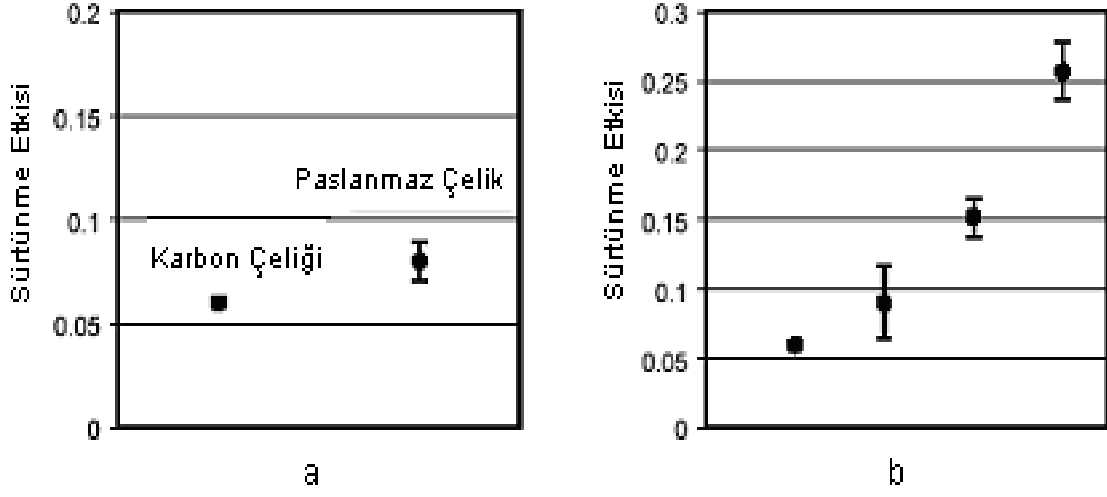
Mineral yağlar, sabun çözeltileri, su emülsiyonları gibi genel amaçlı çözünebilir yağlar şekil değiştirme prosesinde kullanılmadıkları için göz ardı edilebilir.

Sac işleme operasyonu sona erdikten sonra önlem olarak, malzeme üzerinde bulunan yağlayıcı maddeler uzaklaştırılmalı ve kurutulmalıdır.

Çözünmeyen sülfür veya klor gibi maddelerin yer aldığı yağlayıcılar şekillendirilecek kısımlar ısıl işleme uğramadan uzaklaştırılmalıdır. İlâveten, östenitik paslanmaz çelikler yağlayıcılarıyla tepkimeye girerler ve bunun sonucu olarak yüksek gerilmeli bölgelerde çatlamalara neden olurlar.

Soğuk biçimlendirme işlemlerinde sürtünme kuvvetlerinin etkisi ile malzeme sıcaklığı 80 °C civarına yükselerek malzemede gevreklik oluşturabilir. Bu nedenle, işlemi sürekli oda sıcaklığında tutabilecek soğutma önlemlerini almak yararlı olur (The ASM, c).

Derin çekme işlemi esnasında üretilecek parçanın tabanına dışardan uygulanacak hidrostatik basınç kuvvetleri malzemede çatlama olayını geciktireceğinden , derin çekme kabiliyetine olumlu katkıda bulunur. Hidrostatik basınç kuvvetleri, derin çekme işlemi esnasında kalıp tabanına yerleştirilecek kauçuk bir blok veya içi sıvıyla dolu lastik diyafram yardımıyla uygulanabilir (Aran ve Temel, 2003).



Şekil 6.11 a- Aynı kuru yağlayıcı malzeme kullanıldığında, paslanmaz çelik ve karbon çeliğinin sürtünme miktarlarının mukayesesi.

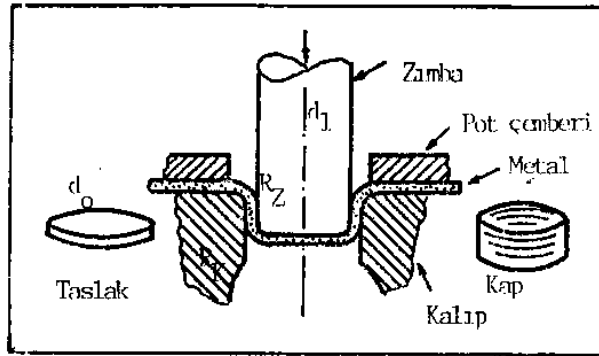
b- Sürtünme miktarının kuru yağlayıcı malzeme ile değişebilme olasılığı (Schedin, E)

## 7 ŞEKİLLENDİRME KABİLİYET TESTLERİ

Preslenen parçalarda gerilme ile şekil değiştirme durumlarının malzeme iç yapısına bağlı olarak kritik değerlere ulaştığı bölgelerde çatlak teşekkülü meydana gelir. Sacdaki yönlenmeler, tane boyutu, inklüzyonların şekli ve hacim oranı, iç gerilmeler ve diğer faktörler çatlak teşekkülü ve kırılma olayında önemli rol oynarlar. Bu nedenle, şekillendirme test numuneleri gerçek şekillendirmede kırılma gösteren veya gösterme ihtimali olan bölgelerdeki malzeme mikro yapısının, mikro yapısını içermelidir.

### 7.1 Derin çekme testi

Bu deney derin çekilecek malzemeler için en fazla uygulanan ve sonuçları en fazla itibar gören deneydir. Deney hidrolik preste Şekil 7.1’de gösterildiği gibi uygulanmaktadır.



Şekil 7.1 Derin çekme testi (Kayalı ve Ensari, 1983)

Kalıp yarıçapı ( $R_k$ ) malzeme kalınlığının 10 katı, pot çember basıncı sac akma ve çekme mukavemetinin aritmetik ortalamasının % 2'si, kalıp ile zımba arasındaki açıklığın metal kalınlığından % 30 daha fazla olması zımba köşesinin yuvarlatılmış olup keskin olmaması ve kalıp duvarına gelen metal kısmının sürtünmeyi önleyecek şekilde yağlanmış olması gerekir. Bu deneyde ( $d_0$ ) çaplı taslaktan hatası olmayan en küçük ( $d_1$ ) iç çaplı kap elde edilmeye çalışılır. Değişik çaplarda zımba kullanılarak deney yapılır. Deney sonunda derin çekme oranı sınırı tespit edilir. Bu oran aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$D.Ç.O.S = \frac{d_o}{d_{1(\min)}} \quad (7.1)$$

*D.Ç.O.S*:Derin Çekme Oranı Sınırı

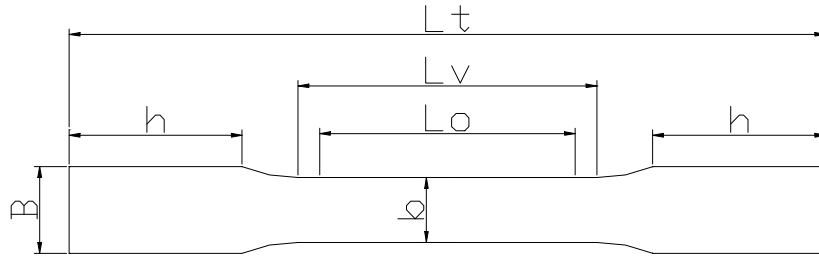
$d_o$ :Taslak Çapı

$d_{1(\min)}$ :Hatasız kap çeken zımbanın minimum çapı.

Çelik sacın derin çekme oranı sınırı sacın derin çekme kabiliyetini gösterir. Bu oran ne kadar büyük olursa, derin çekme kabiliyetinin o kadar yüksek olduğu anlaşılır. Bu oran ancak ideal şartlarda 2,7 değerindedir. Endüstriyel uygulamalarda bu oran 2 değerini geçmez (Kayalı ve Ensari, 1983).

## 7.2 Çekme deneyi

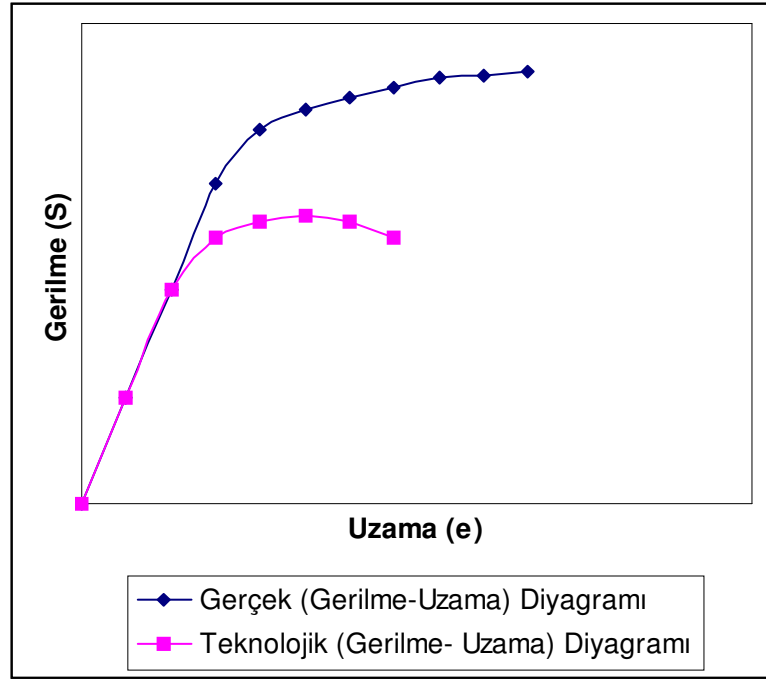
Metalik malzemelere en fazla uygulanan deneylerden birisidir. Saclar için standart çekme numunesi Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Şekil 7.2’de harflerle gösterilen boyutlar ise Çizelge 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.2 Saclar için standart çekme deneyi numunesi (Kayalı ve Ensari, 1983)

Şekil 7.3’de çelik sacların çekme deneyinden elde edilen yük-uzama eğrisinden faydalanılarak çizilen mühendislik gerilme-şekil değiştirme eğrisi görülmektedir. Mühendislik çekme eğrisinden, sacın akma gerilmesi, çekme gerilmesi toplam uzama, üniform uzama, akma uzaması ve elastisite modülü hesaplanabilmektedir (Kayalı ve Ensari, 1983).

Mühendislik eğrisinden hesaplama yapılarak gerçek gerilme-gerçek uzama diyagramı çizilir.



Şekil 7.3 Mühendislik ve gerçek çekme diyagramları (Kayalı ve Ensari, 1983)

$$\varepsilon = \ln(e+1), \text{ Gerçek Şekil Değişirme} \quad (7.2)$$

$e$ =Mühendislik % uzaması

$$\sigma = S(e+1), \text{ Gerçek Gerilme} \quad (7.3)$$

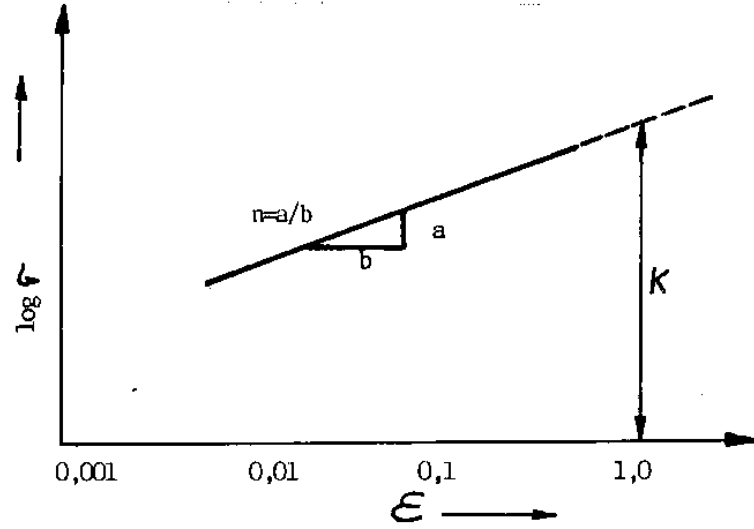
$S$ =Mühendislik eğrisinde okunan gerilme

Gerçek gerilme ve gerçek uzama oranı hesaplamalarıyla bulunan noktalar yardımıyla çizilen gerçek gerilme-gerçek uzama diyagramı Şekil 7.3'de görülmektedir. Aynı diyagramda mühendislik eğrisi de verilerek iki diyagram arasındaki fark gösterilmiştir.

Metalik malzemelerde deformasyon sertleşmesinin görüldüğü, deformasyon sıcaklıklarında ( $T < 0,5 T_m$ ) gerilme-şekil değiştirme eğrisinin homojen deformasyon bölgesi Holloman denklemiyle ifade edilir.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (7.4)$$

Pekleşme üsteli ( $n$ ) plastik deformasyonun başladığı akma gerilmesi ile boyun vermenin başladığı nokta arasında bulunan homojen deformasyon bölgesindeki gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değiştirme değerlerine göre çizilen logaritmik grafiğin eğimine eşittir (Şekil 7.4).  $\varepsilon = 1$  ( $\log \varepsilon = 0$ ) olduğu noktadaki gerçek gerilme değerine ( $K$ ) malzeme mukavemet katsayısı denir. Bazı çeliklerin  $K$  ve  $n$  değerleri Çizelge 7.1'de gösterilmiştir (Dieter, 1988).



Şekil 7.4 Pekleşme üsteli ( $n$ ) tayini (Dieter, 1988)

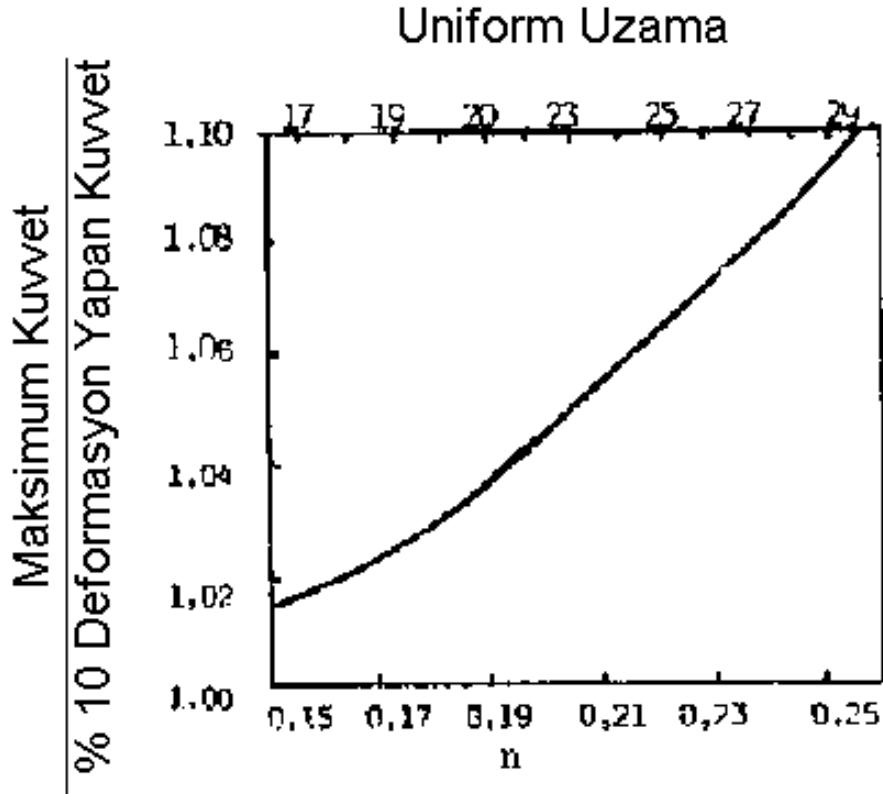
Çizelge 7.1 Tavlanmış çelik sacların oda sıcaklığındaki  $K$  ve  $n$  değerleri (Dieter, 1988)

Çelik türü	$n$	$K$ , MPa
% 0,08 C çeliği	0,25	600
% 0,15 C çeliği	0,18	620
% 0,45 C çeliği	0,12	950
302 paslanmaz	0,30	1300
410 paslanmaz	0,10	960

Sac kalınlığı	Numune genişliği b		Baş kısmının genişliği B b=15 b=20		Baş kısmının uzunluğu h en az	b=15	b=15	b=15	b=20	b=20	b=20
						İlk ölçü uzunluğu L <sub>o</sub>	Daraltılmış kısmın uzunluğu L <sub>T</sub>	Toplam uzunluk L <sub>t</sub>	İlk ölçü uzunluğu L <sub>o</sub>	Daraltılmış kısmın uzunluğu L <sub>T</sub>	Toplam uzunluk L <sub>t</sub>
0,25 mm den daha ince	15	20	20	30	50	10	30	140	10	30	160
0,25-0,35						10	30	140	15	35	165
0,35-0,45						15	30	140	15	35	165
0,45-0,65						15	30	140	20	40	170
0,65-0,80						20	35	145	20	40	170
0,80-1,20						20	35	145	25	45	175
1,20-1,60						25	40	150	30	50	180
1,60-2,20						30	45	155	35	55	185
2,20-2,80						35	50	160	40	60	190
2,80-3,50						40	55	165	45	65	195
3,50-4,30						45	60	170	50	70	200
4,30-5,00						50	65	175	55	75	205

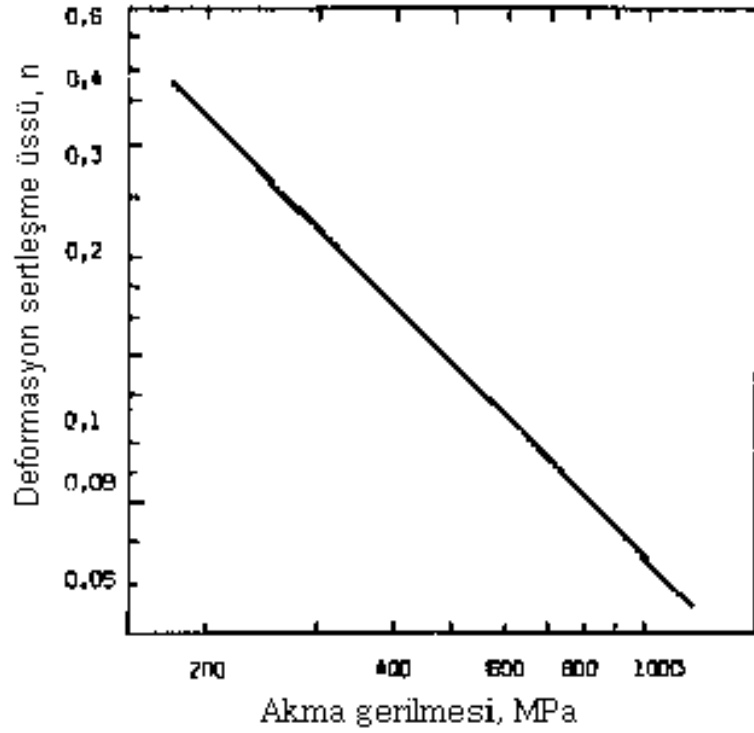
Çizelge 7.2 Sacların standart çekme numune boyutları (mm)

Pekleşme üstelinin ( $n$ ) kolayca bulunması için Şekil 7.5'de gösterilen diyagramdan da faydalanmak mümkündür. Çekme deneyinde ölçülen maksimum kuvvetin ( $P_{mak}$ ), %10 uzamaya sebebiyet veren kuvvete ( $P_{10}$ ) oranı bulunarak Şekil 7.5'de verilen diyagramdan çelik saca ait uniform uzama yüzdesi ve deformasyon sertleşmesi üssü direkt olarak tayin edilir (Kayalı ve Ensari, 1983).



Şekil 7.5 Yük oranından pekleşme üsteli ve üniform uzamanın tayin edilmesi  
(Kayalı ve Ensari, 1983)

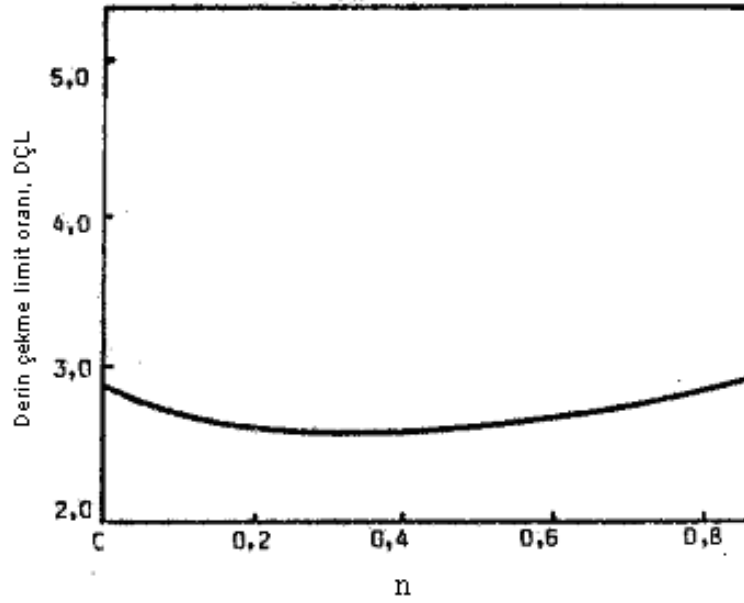
Alaşımız ve az alaşımlı yüksek mukavemetli çeliklerde akma mukavemeti arttıkça deformasyon sertleşmesi üssü Şekil 7.6'da görüldüğü gibi azalma göstermektedir. Mukavemet artışıyla sünekliğin azalması, az alaşımlı yüksek mukavemetli çelik sacların presle şekillendirilmesinde büyük bir problem teşkil etmektedir. Bu problemi önlemek için  $A_1$ - $A_3$  kritik sıcaklıkları arasında su vermek suretiyle ferrit+martenzit mikroyapısında dual fazlı çelikler üretilmiştir (Kayalı ve Çimenoglu, 1986).



Şekil 7.6 Çeliklerde akma gerilmesine bağlı olarak pekleşme üstelinin değişimi (Kayalı ve Çimenoglu,1986)

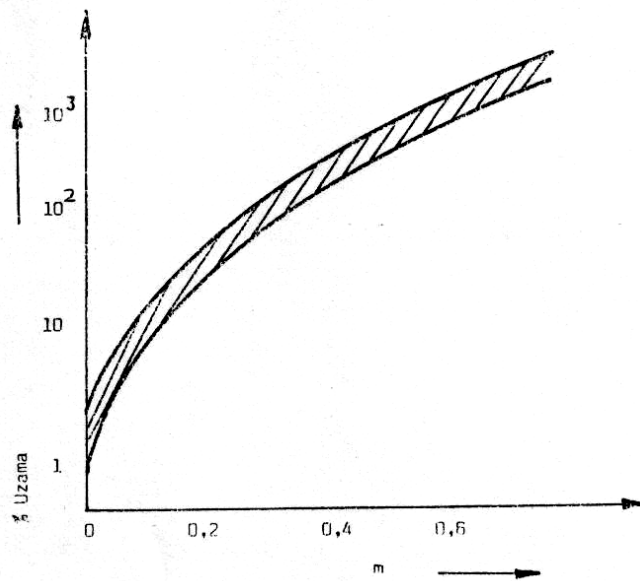
Bu çeliklerin çekme mukavemeti klasik yüksek mukavemetli çeliklerle aynıdır. Ancak bu çeliklerin % uzamaları fazla ve akma mukavemetleri düşük olduklarından presle şekillendirilmeleri kolay olmaktadır.

Saclarda pekleşme üstelinin derin çekilebilirlik sınırı oranı üzerindeki tesiri Şekil 7.7’de görülmektedir. Bu tesir çok azdır. Yumuşak haldeki malzemelerin deformasyon sırasında sertleşmesinden dolayı çekilebilirlik oranı biraz azalmaktadır.



Şekil 7.7 Derin çekilebilirlik oranının pekleşme üsteliyle değişimi  
(Kayalı ve Çimenoğlu, 1986)

Deformasyon hızının mekanik özelliklere önemli ölçüde etkisi vardır. Deformasyon hızı arttıkça malzemenin mukavemeti artar. Farklı deformasyon hızları uygulanması halinde çekme deneyinde mukavemetin deformasyon hızı ile arttığı fakat toplam birim şekil değiştirmenin deformasyon hızıyla azaldığı görülmektedir. Deformasyon hızının etkisi düşük sıcaklıkta az iken sıcaklıkla artar. Gerinim hızına duyarlılık üsteli ( $m$ ) çekme deneylerinden faydalanılarak hesaplanmaktadır. Çeşitli malzemelerde mühendislik toplam % uzama miktarının gerinim hızına duyarlılık üsteli ile artışı Şekil 7.8'de görülmektedir.



Şekil 7.8 Gerinim hızına duyarlılık üsteli ( $m$ ) ile toplam % uzama miktarının değişimi

### 7.2.1 Çekme deneyi ile anizotropi katsayısının (R) tayini

Yassı metalik malzemelerde mekanik özelliklerin yöne göre değişmesi malzemenin anizotropik olduğunu belirtmektedir. Böyle malzemelerde anizotropinin bir ölçüsü olarak anizotropi katsayısı tanımlanmıştır.

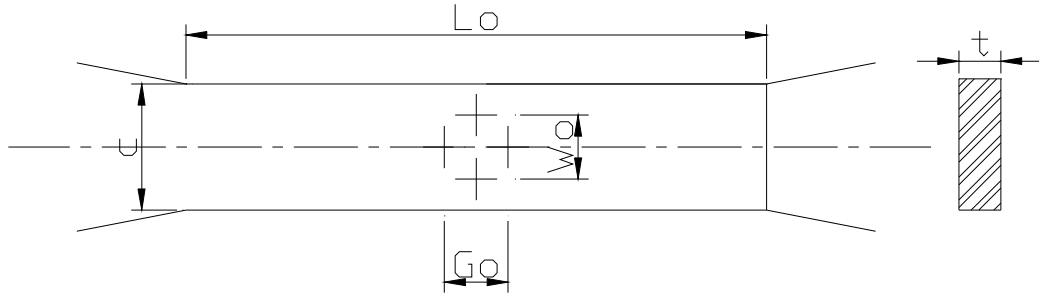
$$\text{Anizotropi katsayısı : } R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (7.5)$$

Burada;

$$\epsilon_w = \text{Genişlikteki gerçek uzama oranı} = \ln\left(\frac{W_s}{W_o}\right) \quad (7.6)$$

$$\epsilon_t = \text{Kalınlıktaki gerçek uzama oranı} = \ln\left(\frac{t_s}{t_o}\right) \quad (7.7)$$

R ; Malzemenin kalınlığındaki deformasyonun (yassı malzeme yüzeyine dik yöndeki) genişlikteki deformasyondan az veya çok olduğunu belirtir ve R dikey anizotropi katsayısı olarak isimlendirilir. İzotropik bir malzemede dikey anizotropi katsayısı, R=1'dir. Çekme deneyi ile dikey anizotropi katsayısının tayini için standartlara uygun olarak hazırlanmış yassı çekme numunesinin ölçü uzunluğu  $L_o$  içindeki bölgede veya düz bir şerit halinde kesilmiş numunede numune genişliği yönünde ve numune boyu yönünde birbirine eşit  $W_o$  ve  $G_o$  uzunlukları işaretlenir. Şekil 7.9'da görüldüğü gibi.



Şekil 7.9 Normal anizotropi katsayısının tayini için, çekme numunesinin ölçü boyunda gerekli uzunlukların ( $G_o$  ve  $W_o$ ) işaretlenmesi.

$L_o$ =Numune ölçü uzunluğu

$c$  =Numune genişliği

$t$ =Numune kalınlığı

$W_o$ =Genişlik yönünde işaretlenen ilk uzunluk

$G_o$ =Numune boyu yönünde işaretlenen ilk uzunluk

Çekme numunesinin ölçü uzunluğunda Şekil 7.9'da gösterildiği gibi  $W_o$  ve  $G_o$  uzunlukları işaretlendikten sonra numune çekme cihazında homojen plastik deformasyon bölgesi içindeki herhangi bir  $P_1$  yüküne kadar çekilir. Bu  $P_1$  yükü, akma yükü ( $P_{akma}$ )'dan büyük, malzemenin çekme dayanımının hesaplandığı maksimum yükten de ( $P_{maksimum}$ ) küçük olmalıdır. Numune  $P_1$  yüküne kadar çekilip homojen bir deformasyon yapıldıktan sonra çekme cihazından çıkarılır,  $W_o$  ve  $G_o$  olarak işaretlenmiş olan uzunluklar hassas olarak ölçülüp  $W_s$  ve  $G_s$  olarak kaydedilir.

Dikey anizotropi katsayısının hesaplanabilmesi için genişlikteki ve kalınlıktaki gerçek uzama oranlarının ( $w$  ve  $t$ ) hesaplanması gerekmektedir. Yapılan homojen deformasyon sırasında kalınlıkta meydana gelen değişimi hassas olarak ölçmek zor olduğundan, kalınlıktaki gerçek uzama oranı aşağıdaki bağıntıdan faydalanılarak daha doğru olarak hesaplanabilir. Deformasyon sırasında malzemenin hacmi sabit kalır kabulünden faydalanarak;

$$Hacim(V) = G_o \cdot W_o \cdot t_o = G_s \cdot W_s \cdot t_s \quad (7.8)$$

yazılabilir, Buradan

$$\frac{t_s}{t_o} = \frac{G_o \cdot W_o}{G_s \cdot W_s} \quad (7.9)$$

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t_s}{t_o}\right) = \ln\left(\frac{G_o \cdot W_o}{G_s \cdot W_s}\right) \quad (7.10)$$

elde edilir.

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{W_s}{W_o}\right)}{\ln\left(\frac{G_o \cdot W_o}{G_s \cdot W_s}\right)} \quad (7.11)$$

olarak yazılabilir. Yukarıdaki bağıntıda negatif işarettten kurtulmak için

$$R = \frac{\ln\left(\frac{W_o}{W_s}\right)}{\ln\left(\frac{G_s \cdot W_s}{G_o \cdot W_o}\right)} \quad (7.12)$$

olarak yazılabilir.

Bu bağıntıdan dikey anizotropi katsayısı ( $R$ ),  $W_o$  ve  $G_o$  boyutlarının çekme deneyi öncesi ve sonrası değerlerinden hesaplanabilir.

Burada;

$W_s$ = Son genişlik

$G_s$ = Son uzunluk

Yassı malzemedden numunenin alındığı yöne göre dikey anizotropi katsayısının değeri değişebilir. Bu sebeple yassı malzeme yüzeyinde farklı yönlerde ölçülen  $R$  değerlerinin ortalamasını almak gerekir. Dikey anizotropi katsayısının ortalaması  $\bar{R}$ :

$$\bar{R} = \frac{R_o + R_{90} + 2R_{45}}{4} \quad (7.13)$$

şeklinde tanımlanır. Burada ;

$R_0$ = Yassı malzemenin uzunluğu yönünden hazırlanan çekme numunesinin dikey anizotropi katsayısı,

$R_{90}$ = Yassı malzemenin uzunluğu yönü ile  $90^\circ$ 'lik açı yapan yönden hazırlanan çekme numunesinin dikey anizotropi katsayısı,

$R_{45}$ = Yassı malzemenin uzunluğu yönü ile  $45^\circ$ 'lik açı yapan yönden hazırlanan çekme numunesinin dikey anizotropi katsayısıdır.

Saclarda dikey anizotropi değerleri ( $R$ ), deney numunesinin haddeleme yönünün konumuna bağlıdır.  $R$  değeri çekilebilirlik oranı olarak da adlandırılmaktadır.

$R < 1$  ise derin çekilebilirlik az,

$R = 1$  ise malzeme izotrop

$R > 1$  ise derin çekilebilirlik fazla demektir.

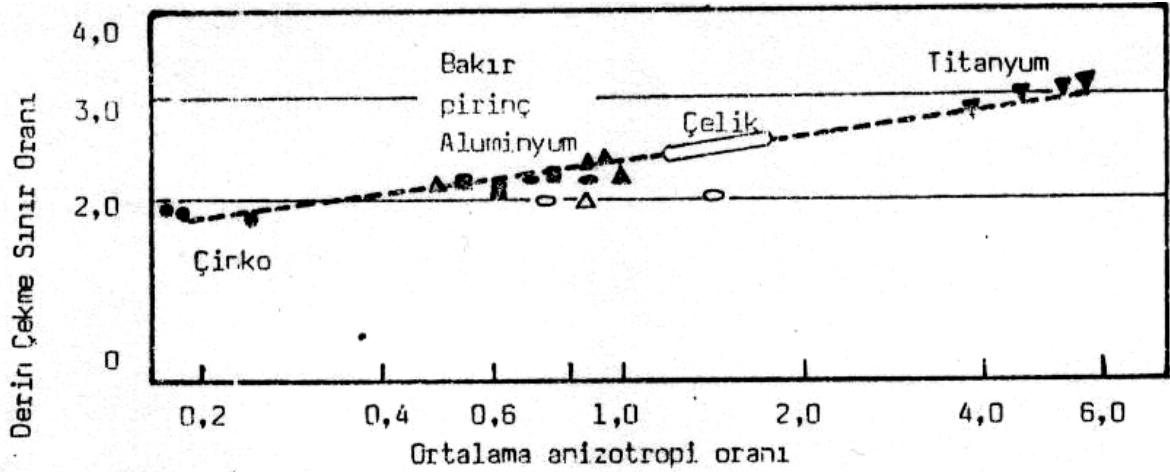
Ortalama dikey anizotropi değeri,  $\bar{R}$ , ortalama çekilebilirlik oranı olarak adlandırılır ve sacın derin çekilebilirliği hakkında daha sıhhatli bir fikir verir. Muhtelif metaller de ortalama dikey anizotropi katsayısına bağlı olarak derin çekme oranı sınırının değişimi Şekil 7.10'da gösterilmiştir. Çeliklerde derin çekilebilirlik,  $\bar{R}$  değerlerine göre şöyle sınıflandırılır.

$\bar{R} < 1$  ise derin çekilemez,

$1 < \bar{R} < 1,3$  ise az derin çekilebilirlik

$1,3 < \bar{R} < 1,6$  ise iyi derin çekilebilirlik

$\bar{R} > 1,6$  ise çok iyi derin çekilebilirlik sağlanır.

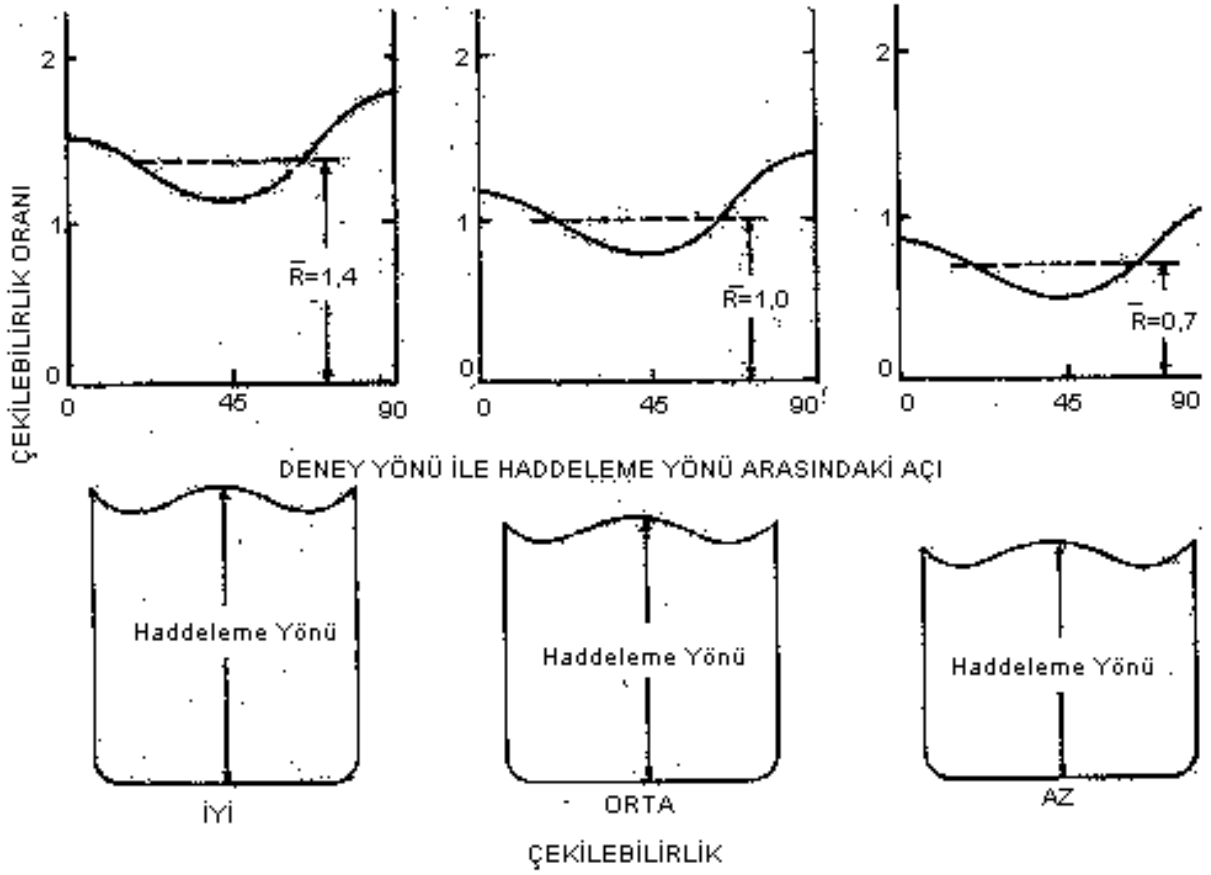


Şekil 7.10 Metal saclarında derin çekme oranı sınırının ortalama dikey anizotropi katsayısına göre değişimi (Kayalı ve Ensari, 1983)

Sac yüzeyinde değişik yönlerden alınan numunelerin farklı dikey anizotropi değeri veya çekilebilirlik oranı  $R$  göstermeleri; düzlemsel anizotropi olarak adlandırılır. Düzlemsel anizotropinin  $R$  ölçüsü ise aşağıdaki bağıntıya göre yapılmaktadır.

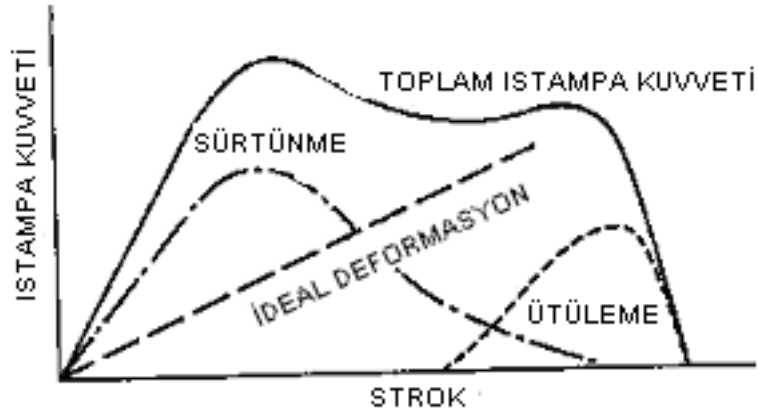
$$\Delta R = \frac{1}{2}(R_0 + R_{90} - 2R_{45}) \quad (7.14)$$

$\Delta R$  değeri sıfıra yaklaştıkça, malzemede kulaklanma denilen hadise azalır, aksinde ise artar. Kulaklanma, derin çekme işleminde sacların kenarlarındaki farklı uzamalar sonucu ortaya çıkan dalgalanmalardır. Bu dalgalanan kısım kullanılamaz ve malzeme kaybına sebep olur.  $\bar{R}$  ve  $\Delta R$  parametreleri malzemenin derin çekme davranışlarını göstermektedir. Şekil 7.11'de düşük karbonlu bir çelikte çekilebilirlik oranının ( $R$ ) deney numunesi yönüne bağlı olarak değişimini göstermektedir.  $R$  değeri arttıkça, derin çekilebilme kabiliyeti artmaktadır (The ASM. c).



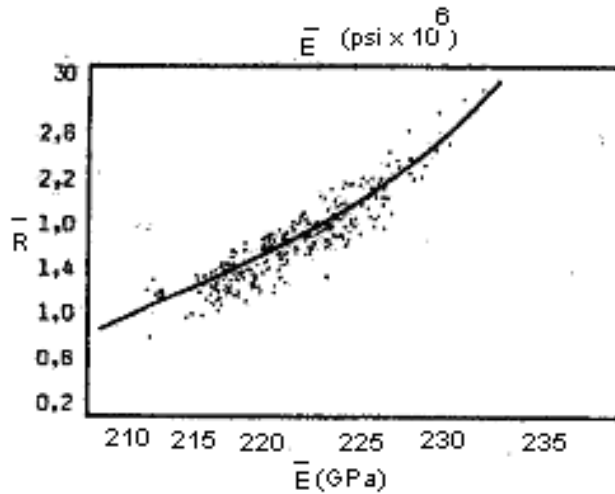
Şekil 7.11 Düşük karbonlu bir çelikte çekilebilirlik oranı ile deney numunesi yönü değişimi(deney yönü ile haddeleme yönü arasındaki açı/çekilebilirlik) (The ASM. c)

$\Delta R$  değerindeki sıfırdan sapmalar ise daha öncede belirtildiği gibi kulaklanmayı oluşturmaktadır. Şekil 7.12'de belirtildiği üzere, zımbanın uyguladığı kuvvet, ideal şekil değiştirme kuvveti, sürtünme kuvvetleri ve şayet varsa ütüleme işlemi için harcanan kuvvetin toplamına eşittir. Şekil değiştirme sertleşmesinden dolayı plastik gerilme sürekli artacağından, ideal şekil değiştirme kuvveti işlem boyunca sürekli artar. Sürtünme kuvvetlerinin büyük bir kısmı sıkıştırma kalıbının yüzeyinde oluşur. Bu kuvvet bileşeni başlangıçta hızlı artar. İşlem ilerledikçe taslağın sıkıştırma kalıbı ile temas eden yüzeyi azaldığından, sürtünme kuvvetleri de azalır. Ütüleme olayı derin çekme işleminin sonlarına doğru başlar (Dieter, 1988).



Şekil 7.12 Derin çekme işlemi esnasında uygulanan kuvvetin zımbanın ilerleme mesafesine göre değişimi (Dieter, 1988)

Kulaklanma derin çekme işleminde deformasyon miktarının maksimum olduğu doğrultularda, çekilebilirlik oranlarının farklı yönlerde farklı değerlerde olmasından dolayı oluşmaktadır. Eğer malzemenin haddelene yönündeki ve haddelene yönüne dik doğrultulardaki çekilebilirlik oranı, haddelene yönü ile  $45^\circ$  lik açı yapan doğrultudaki çekilebilirlik oranından büyük ise,  $\Delta R > 0$  olur. Bu durumda kulaklanma haddelene yönüne göre  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  lik doğrultularda meydana gelir. Şekil 7.11’de bu durum görülmektedir. Eğer  $\Delta R = 0$  ise, bu durumda kulaklanma olmamaktadır. Malzeme  $\Delta R$  değeri negatif ise ( $-\Delta R$ ) kulaklanma haddelene yönüne  $45^\circ$  lik doğrultularda oluşur (The ASM. c).



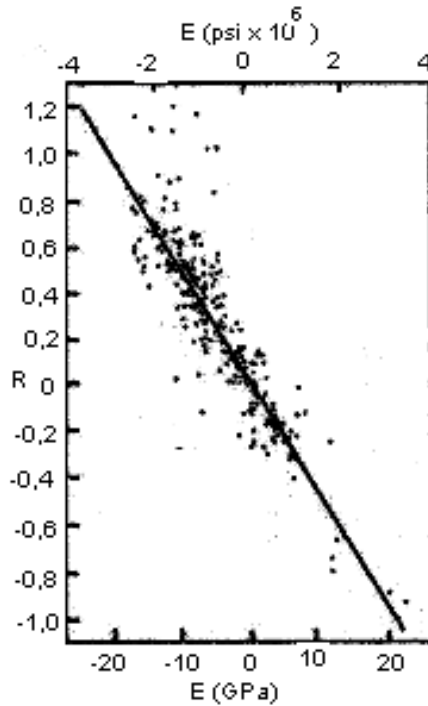
Şekil 7.13 Çelik saclarda ortalama dikey anizotropi katsayısı ve ortalama elastisite katsayısı arasındaki ilişki (Kayalı ve Çimenoglu, 1986)

Çelik saclarda elastisite katsayısı yönler göre değişim göstermektedir. Ortalama elastisite katsayısı ( $\bar{E}$ ) ve düzlemsel elastisite katsayısı ( $E$ ) dikey anizotropi ve düzlemsel anizotropi katsayısı gibi deneysel olarak hesaplanabilmektedir.

$$\bar{E} = \frac{(E_0 + 2E_{45} + E_{90})}{4} \quad (7.15)$$

$$\Delta E = \frac{(E_0 - 2E_{45} + E_{90})}{2} \quad (7.16)$$

Bu formüllerde verilen sayılar deney numunesinin haddeleme doğrultusu ile yaptığı açısıl yönlenmeyi göstermektedir. Şekil 7.13 ve 7.14'de  $\bar{R}$  ve  $\bar{E}$  ile  $\Delta R$  ve  $\Delta E$  arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Bu diyagramlar deneysel olarak çizilmiştir. Ortalama elastisite modülü yüksek olan çelik saclarda çekilebilirlik oranı ve dolayısıyla derin çekme oranı sınıırı yüksek olmaktadır.  $\Delta E$  ise  $\Delta R$  ile ters orantılıdır. Yani düzlemsel elastisite katsayısı azaldıkça kulaklanma azalmaktadır.

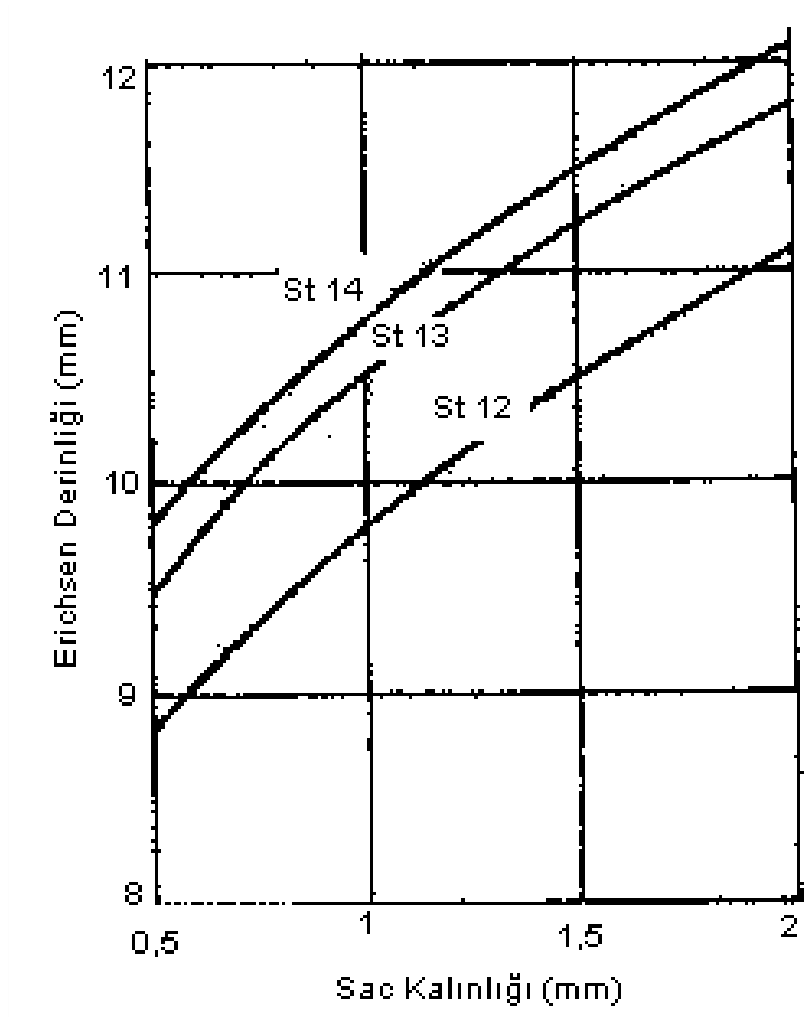


Şekil 7.14 Çelik saclarda düzlemsel anizotropi katsayısı ve düzlemsel elastisite modülü arasındaki lineer bağlantı



Numune %25 grafit ihtiva eden gres ile yağlandıktan sonra kalıp ile tutucu çember arasında 1000 kg kuvvetle sıkıştırılır. Üç deney ortalaması alınarak Erichsen derinlik değeri tespit edilir.

DIN 1623'e göre düşük karbonlu çelik saclarda sac kalınlığına göre minimum Erichsen derinlik değerleri Şekil 7.16'de gösterilmiştir (Kayalı ve Ensari, 1983).

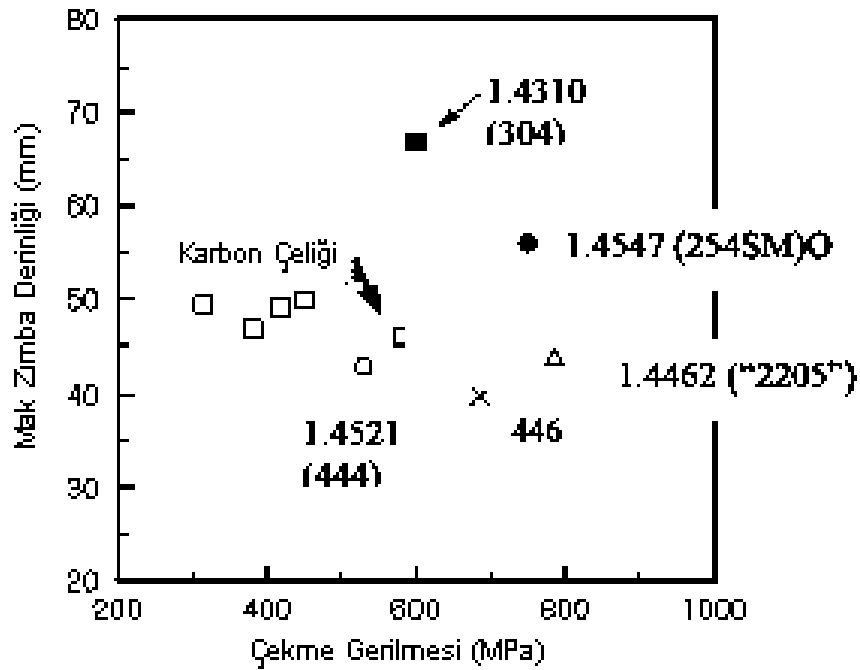


Şekil 7.16 DIN 1623'e göre düşük karbonlu çelik sacların kalınlığına göre minimum Erichsen derinlik değeri (Kayalı ve Ensari, 1983)

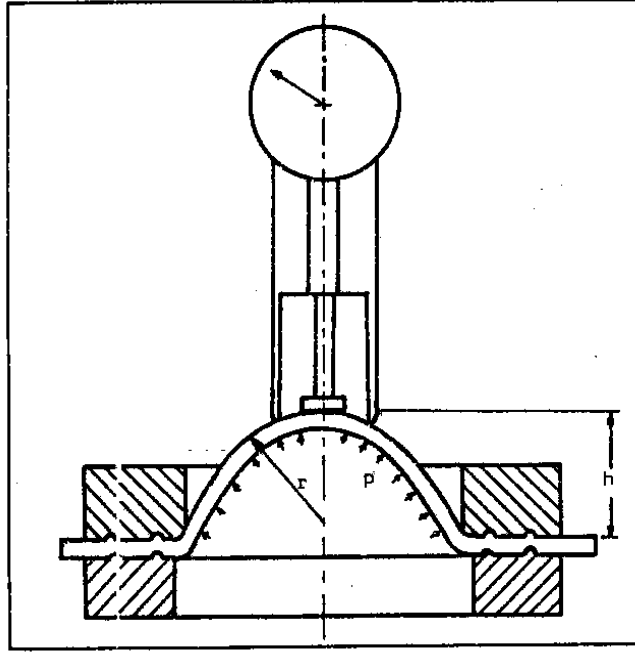
İşareti	Parçanın adı	Anlamı	Genişliği 90mm den fazla olan sac ve bantlar için		Genişliği 90mm den az olan sac ve bantlar için	
			Boyutu mm	Boyutu mm	Boyutu mm	Boyutu mm
a	Numune	Numune kalınlığı	0,2-2,0	2-3	0,2-1,0	0,2-2,0
b		Numune genişliği	90-100	90-100	30-55	55-90
1		Numune uzunluğu (min) (üç çökertme yapmak için)	270	400	270	270
D	Küresel uçlu zımba	Küresel ucun çapı	20±0,05	20±0,05	8±0,02	15±0,02
D <sub>1</sub>	Kalıp	Kalıbın delik çapı	27±0,05	40±0,05	11±0,02	21±0,02
D <sub>2</sub>		Kalıbın dış çapı	55±0,1	70±0,1	55±0,1	55±0,1
r <sub>1</sub>		Kalıbın iç tarafındaki köşe yarıçapı	0,75±0,05	2±0,05	0,75±0,05	0,75±0,05
r <sub>2</sub>		Kalıbın dış tarafındaki köşe yarıçapı	0,75±0,05	1±0,05	75±0,05	0,75±0,05
h		Kalıbın delik derinliği	3±0,1	6±0,1	3±0,1	3±0,1
-		Kalıbın kalınlığı (min)	20	20	20	20
D <sub>3</sub>	Tutucu çember	Tutucu çemberin delik çapı	33±0,1	33±0,1	10±0,1	18±0,1
-		Tutucu çemberin dış çapı	55±0,1	55±0,1	55±0,1	55±0,1
r <sub>3</sub>		Tutucu çemberin dış tarafındaki köşe yarıçapı	0,75±0,1	1±0,1	0,75±0,1	0,75±0,1
-		Tutucu çemberin kalınlığı (min)	20	20	20	20

#### 7.4 Şişirme deneyi

İki kalıp arasında yassı malzeme sıkıca çenelerde yakalandıktan sonra sıvı basıncıyla Şekil 7.18’de gösterildiği gibi deformasyon yapılmaktadır. Bu engellenmiş iki eksenli gerilme ve şekil değiştirme durumundaki metallerin temel özelliklerini incelemeyi mümkün kılmaktadır. Kırılma basıncı ve elde edilebilen maksimum yükseklik ( $h_{max}$ ) malzemenin şekillenme kabiliyeti limitini ifade etmektedir. Hidrolik basınç metal zımbaya nazaran tercih edilmektedir. Çünkü hidrolik basınç sürtünmeden doğan problemleri tamamen yok etmekte ve daha uniform deformasyon yapmaktadır. Bu testin diğer bir avantajı da levhanın anizotropi özelliğinden önemli miktarda etkilenmesidir. Yönlenmenin şiddeti yırtılmadan sonraki ölçümlerle tespit edilmektedir. Bu durum tek ve basit bir deneyle anizotropi hakkında bilgi edinmeyi mümkün kılar (Kayalı ve Ensari, 1983).

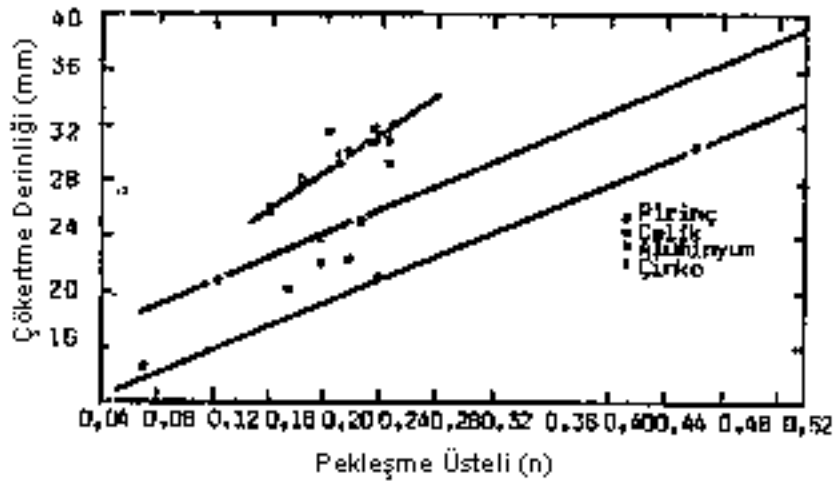


Şekil 7.17 Mekanik gerilim ve germe ile şekillendirme arasındaki ilişki (Schedin, E)



Şekil 7.18 Şişirme testi (Kayalı ve Ensari, 1983)

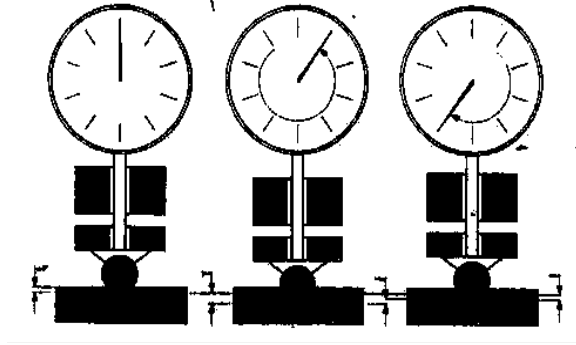
Erichsen derinlik yüksekliği malzeme pekleşme üsteli ile bağıntılıdır. Şekil 7.19'da gösterildiği gibi çelik ve diğer metallerde  $n$  değeri arttıkça Erichsen değeri artmaktadır.  $n$  değeri yükseldikçe metalin deformasyon sertleşmesi artacak ve dolayısıyla boyun verme direnci artma gösterecektir. Yani şekillendirme kabiliyeti ve Erichsen değeri yüksek olacaktır (Kayalı ve Çimenoğlu, 1986).



Şekil 7.19 Bazı metal saclarda Erichsen derinliğinin deformasyon sertleşmesi üssüne bağlı olarak değişimi (Kayalı ve Çimenoğlu, 1986)

### 7.5 Rockwell ve Superficial Rockwell Test Metodu

120° elmas koni uç veya değişik çaptaki bilya uçların yaptığı penetrasyon derinliğinin sertliğe çevrilmesi metodudur. Çizelge 7.4’de uygulanacak Rockwell ve Superficial Rockwell metoduna göre seçilmesi gereken yükler ve uçlar gösterilmiştir.



Şekil 7.20 Rockwell ve Superficial Rockwell Test Metodu (DIN 50103)

Çizelge 7.4 Rockwell ve Superficial Rockwell metoduna göre seçilmesi gereken yükler ve uçlar (DIN 50103)

<b>Test Metodu</b>	<b>Uç</b>	<b>Ön Yük (kg)</b>	<b>Toplam Yük(kg)</b>	<b>Uygulama Alanı</b>
HRA	Elmas koni uç	10	60	İnce sertlik tabakalı yüzey sertleştirilmesi yapılmış parçalar.
HRB	1/16" bilya	10	100	Bakır alaşımları,yumuşak çelikler,alüminyum alaşımları,temper döküm vs.
HRC	Elmas koni uç	10	150	Sertleştirilmiş çelikler ve HRB değeri 100 den fazla olan diğer malzemeler.
HRD	Elmas koni uç	10	100	Orta kalınlıkta sertlik tabakalı yüzey sertleştirilmesi yapılmış parçalar.
HRE	1/18" bilya	10	100	Dökme demir,alüminyum ,bakır,magnezyum alaşımları,sentetik malzemeler.
HRF	1/16" bilya	10	60	Tavllanmış bakır alaşımları,yunuşak ince metaller(>0,6 mm).
HRG	1/16" bilya	10	150	Orta sertlikte tenperlenmiş döküm,fosforlu bronz,berilyum bakır.
HRH	1/18" bilya	10	60	Alüminyum,çinko,kurşun,taşlama taşları.
HRK	1/18" bilya	10	150	Yatak malzemeleri ve çok düşük sertlikteki diğer metaller.
HRL	1/4" bilya	10	60	Rockwell K gibi Sert lastik (ASTM D 530-59 T) ve sentetik malzemeler (ASTM D 785-60 T).
HRM	1/4" bilya	10	100	Rockwell K ve L gibi,kontraplak, (ASTM D 805-52) ve sentetik malzemeler(ASTM D 785-60 T)
HRP	1/4" bilya	10	150	Rockwell K,L veya M gibi ve sentetik malzemeler(ASTM D 785-60 T).
HRR	1/2" bilya		60	
HRS			100	
HRV	1/2" bilya	10	150	Rockwell K,L,M,P,R veya S gibi.
HR 15 N	Elmas koni uç	3	15	Rockwell A,C ve D gibi fakat özellikle çok ince sertlik tabakalı malzemeler için(> 0,15 mm)
HR 30 N			30	
HR 45 N			45	
HR 15 T	1/16" bilya	3	15	Rockwell B.F veya G metodu gibi fakat özellikle daha ince malzemeler için (> 0,25 mm).
HR 30 T			30	
HR 45 T			45	
HR 15 W	1/18" bilya	3	15	
HR 30 W			30	
HR 45 W			45	
HR 15 X	1/4" bilya	3	15	Çok düşük sertlikteki ve incelikteki malzemeler,Rockwell X ve Y özellikle sinter malzemeler için kullanılır. (ASTM B 347-59 T)
HR 30 X			30	
HR 45 X			45	
HR 15 Y	1/2" bilya	3	15	
HR 30 Y			30	
HR 45 Y			45	

## **8 AISI-304 (EN-1,4301) KALİTESİNDEKİ PASLANMAZ ÇELİK SACIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Çeşitli kalınlıklardaki AISI-304 (EN-1,4301) kalitesindeki paslanmaz çelik saclara malzemenin, mekanik özelliklerini ve şekillendirme karakteristiklerini belirlemek amacıyla bir dizi deneyler yapılmıştır.

Bu çalışmada deney numuları 1- 1,5- 2- 4- 5- 6 mm'lik sac parçalardan meydana gelmektedir. Tüm parçalara Rockwell sertlik deneyi (DIN-50103), 1,5 mm'lik parçalara haddeleme yönü ile değişik açılarda çekme deneyleri, 1 – 2 – 4 –5- 6 mm'lik parçalarla da V bükme kalıbı ile büküm esnasında malzemenin şekil değiştirme karakteristiklerini incelemek amacıyla; bükmenin kalıcı olabilmesi için en büyük bükme kavis, bükmenin parçaya hasar vermeden uygulanabileceği en küçük bükme kavis, bükme sonrası parça genişliği, geri esneme ve bu parametrelere kalıp kavisinin etkileri kademe kademe basılarak tespit edilmiştir.

### **8.1 Rockwell sertlik deneyleri**

AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sac numunelerin Rockwell sertlik değerlerini ölçmek için, numunelerin değişik bölgelerinden 10 noktadan, Bulut Makine sertlik ölçme cihazı (Şekil 8.1) ile Rockwell sertlik değerleri belirlenmiştir. Ölçüm sonuçları ve ortalaması Çizelge 8.1'de görülmektedir.

AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın ortalama Rockwell sertlik değeri 85,625 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 8.1 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, 10 farklı noktadan ölçülen Rockwell sertlik değerleri ve ortalaması.

DENEY NO	MALZEME KALINLIKLARI (mm)						ORT. Ortalaması
	1	1,5	2	4	5	6	
1	84	84,5	86	86,5	86,6	86	ORT. Ortalaması
2	83,5	85	86	85	85,5	85	
3	84	85,5	87	86,5	85,4	85	
4	85	85,6	85	87	86,6	86	
5	85,5	86,6	85	85	86,7	86,5	
6	85	86	85,5	86	86,8	85,5	
7	84,5	85	86	85,5	85,4	86,5	
8	85	85,6	86	86,5	85,7	85	
9	86	86,4	87	87	86	86	
10	85	85,7	85	86	87	86,5	
ORT.	84,75	85,59	85,85	86,1	86,17	85,8	85,71



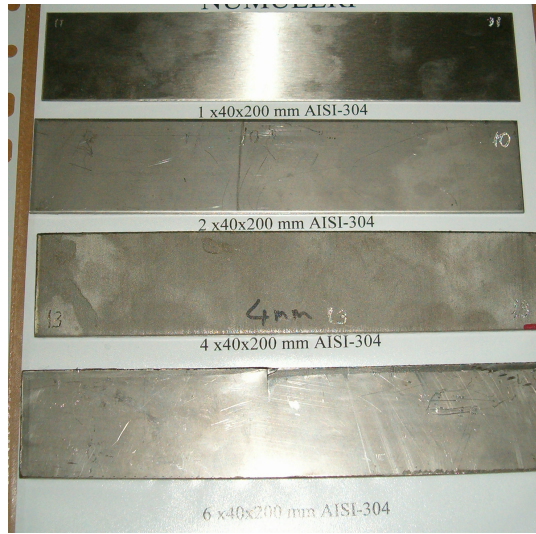
Şekil 8.1 Rockwell sertlik ölçme cihazı.



Şekil 8.2 Deney parçalarının sertliklerinin ölçümü.

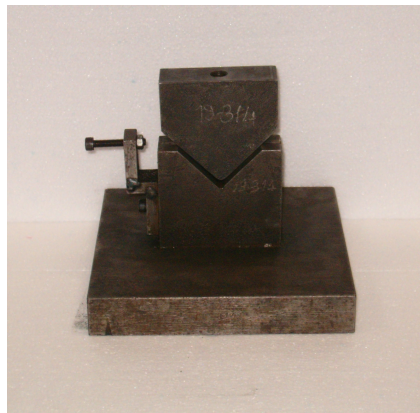
## 8.2 Bükme deneyleri

Bu deneyde AISI-304 (EN- 1,4301) kalitesindeki 6 -5- 4 - 2 - 1 mm kalınlığındaki, boyutları 40 x 200 mm olan deney parçaları (Şekil 8.3), bükme açısı 90°, ıstampa uç yuvarlatması 5 mm, kalıp çeneleri açıklığı 80 mm, yarık derinliği 40 mm olan V-bükme kalıbı ile 4 kademede bükülmüştür (Şekil 8.4 - Şekil 8.5 - Şekil 8.6).

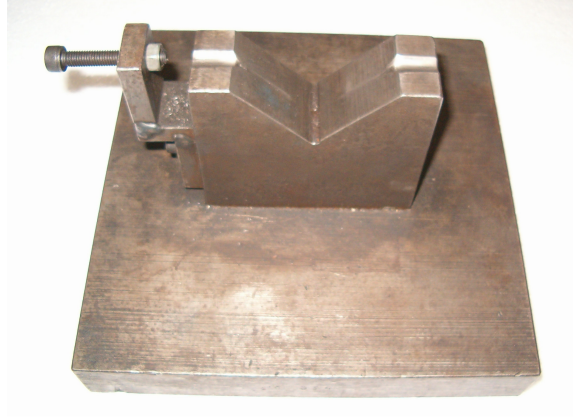


Şekil 8.3 Bükme deneyi numuneleri.

Bükme esnasındaki dış taraftaki liflerin uzaması, iç taraftaki liflerin kısılması, uzayan liflerin, yani parçaların dış tarafındaki genişlikteki azalma, kısalan lifler, yani iç tarafındaki genişliğindeki artma, büküm noktalarındaki incelme ve geri esnemeler karakteristik olarak incelenmiştir.



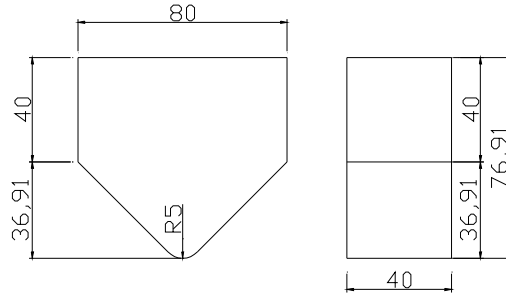
Şekil 8.4 V- bükme kalıbı.



Şekil 8.5 V-bükme kalıbı alt kısım.



Şekil 8.6 I stampa.



Şekil 8.7 I stampa teknik resmi

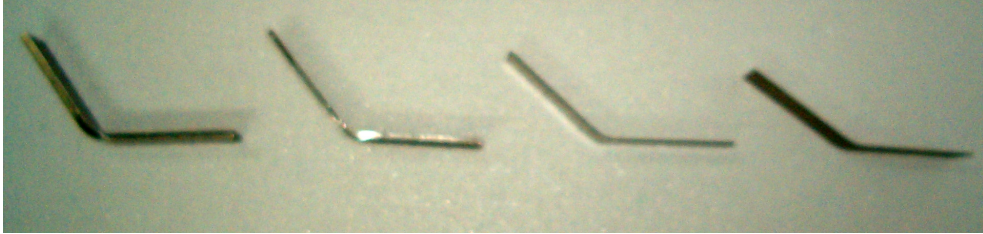
V-bükme kalıbı  $90^\circ$  olduğundan dolayı, son kademe (vurdurma) tam olarak bu açı ile bükülmüştür. Ara kademeler (1.- 2.- 3. kademeler), pres koçu kursunun, ana milden doğru ayarlanmasıyla oluşturulmuştur.

Bu kademelerde parça genişlikleri ve kalınlıkları, büküm açıları, büküm kavisleri değerleri ölçülmüştür.

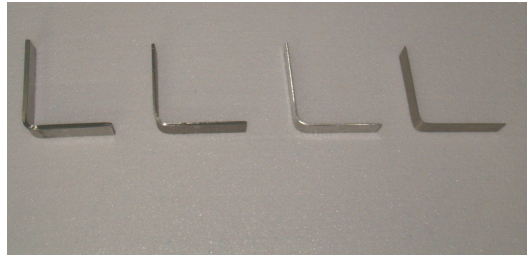


Şekil 8.8 Bükme işlemi

Parça genişlikleri ve kalınlıkları 1/100 hassasiyetindeki elektronik, Mitutoya kumpas ile, büküm kavisleri ise radyüs çakısı ile, parçaların her kademedeki büküm açıları ve geri esneme analizleri ise parçalar teker teker çizildikten sonra gönye ile ölçülerek, değerlerin ortalaması alınarak saptanmıştır.



Şekil 8.9 İlk kademe



Şekil 8.10 Son kademe

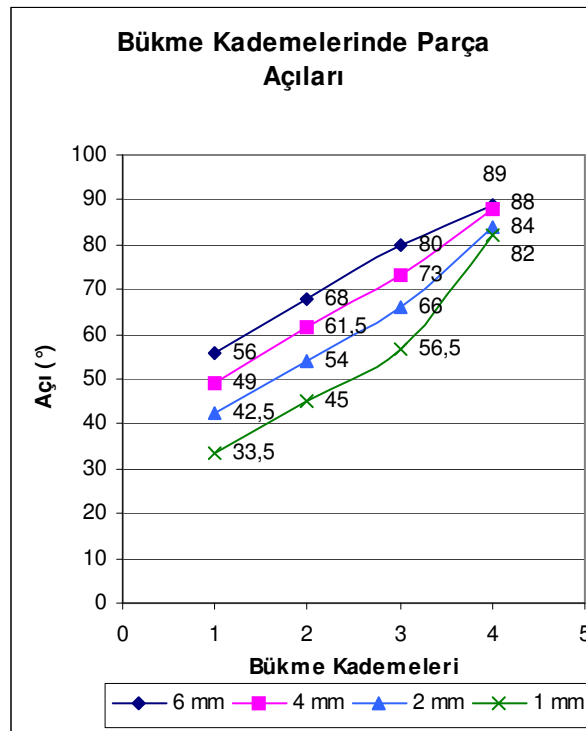


Şekil 8.11 Deney parçaları

6- 5 - 4 - 2 - 1 mm kalınlığındaki numunelerin, bükme esnasında 4 kademede gösterdikleri karakteristikler grafik ile de ifade edilmiştir.

Çizelge 8.2 Kademelerdeki büküm açıları

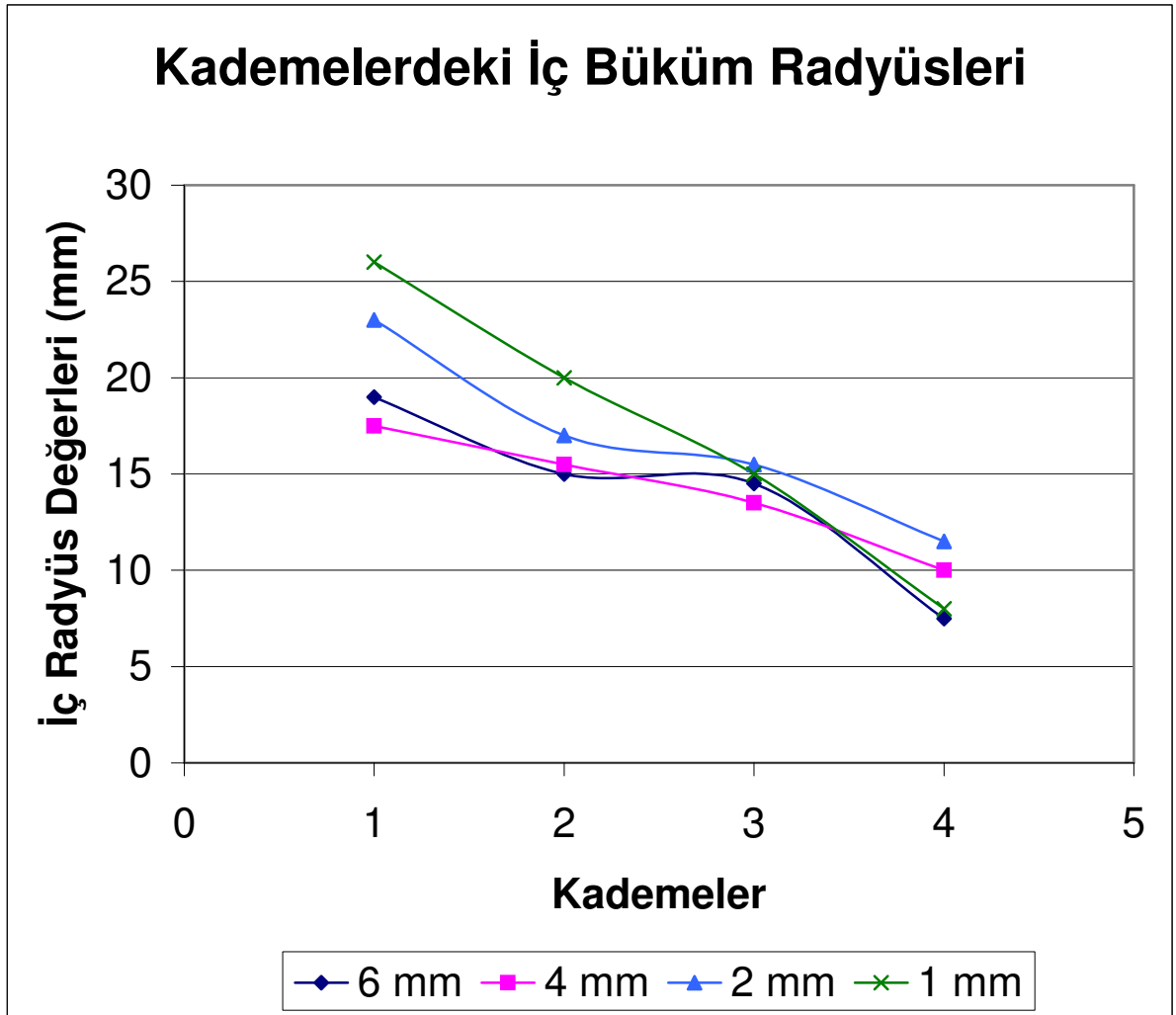
KALINLIK (mm)	Kademelerdeki Büküm Açıları (°)			
	1	2	3	4
6	56	68	80	89
4	49	61,5	73	88
2	42,5	54	66	84
1	33,5	45	56,5	82



Şekil 8.12 Bükme kademelerindeki parça açıları

Çizelge 8.3 Kademelerdeki iç büküm radyüsleri

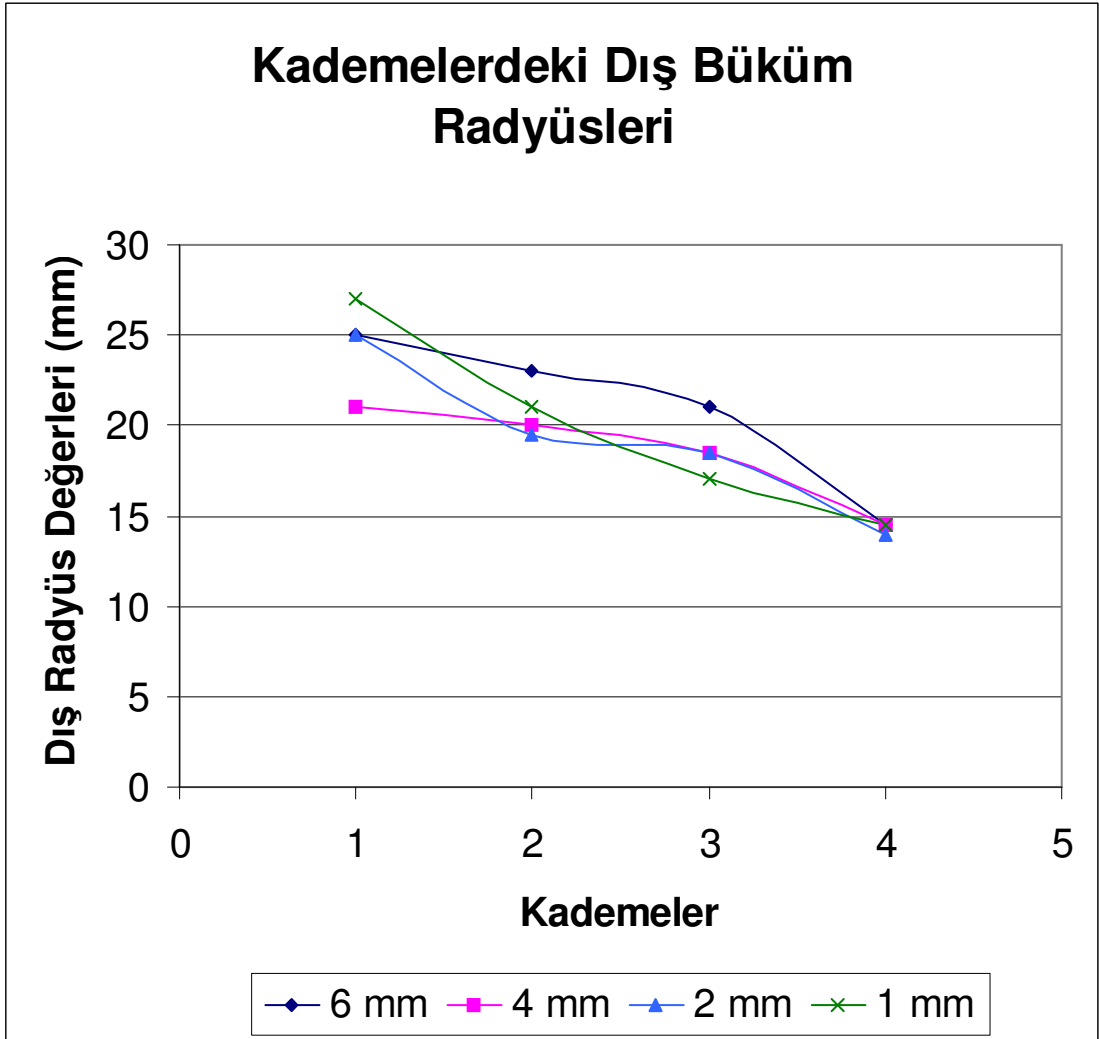
KALINLIK (mm)	Kademelerdeki İç Büküm Radyüsleri (mm)			
	1	2	3	4
6	19	15	14,5	7,5
4	17,5	15,5	13,5	10
2	23	17	15,5	11,5
1	26	20	15	8



Şekil 8.13 Kademelerdeki iç büküm radyüsleri

Çizelge 8.4 Kademelerdeki dış büküm radyüsleri

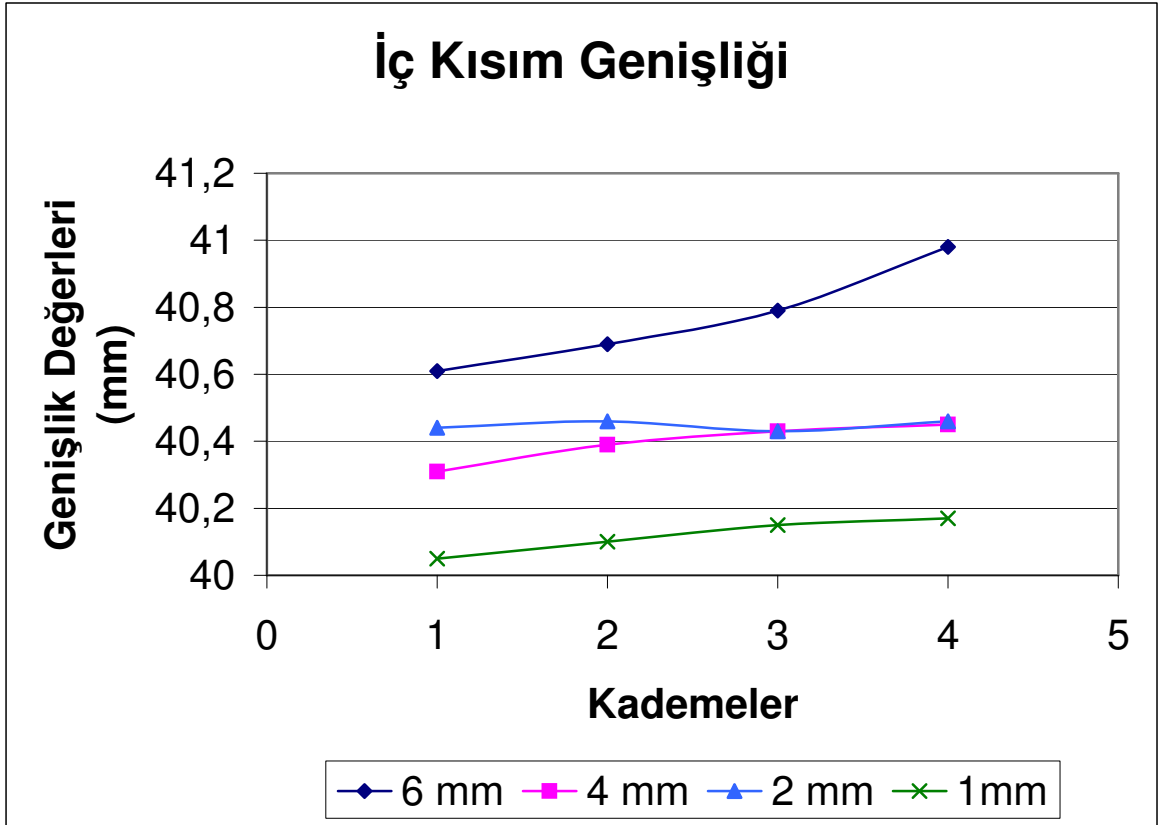
KALINLIK (mm)	Kademelerdeki Dış Büküm Radyüsleri (mm)			
	1	2	3	4
6	25	23	21	14,5
4	21	20	18,5	14,5
2	25	19,5	18,5	14
1	27	21	17	14,5



Şekil 8.14 Kademelerdeki dış büküm radyüsleri

Çizelge 8.5 Büküm sonrası parça iç genişliği

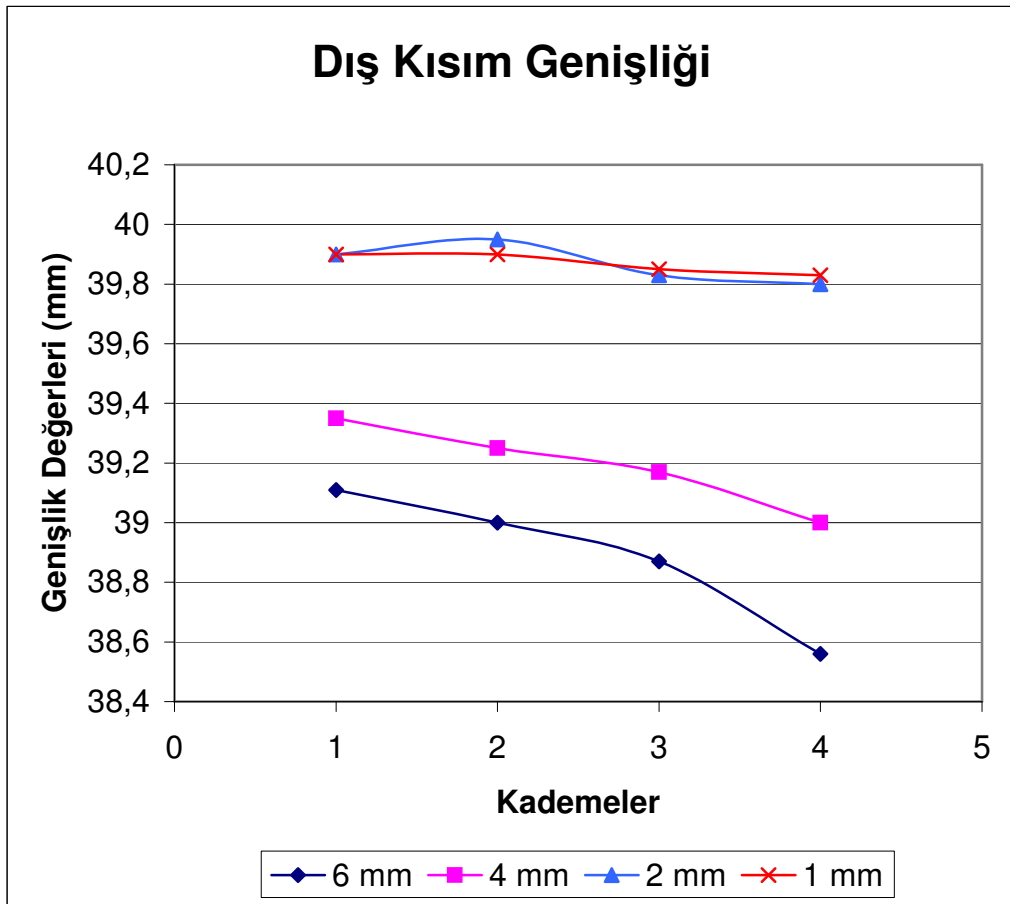
KALINLIK (mm)	Parça İç Genişliği (mm)			
	1	2	3	4
6	40,61	40,69	40,79	40,98
4	40,31	40,39	40,43	40,45
2	40,44	40,46	40,43	40,46
1	40,05	40,1	40,15	40,17



Şekil 8.15 Büküm sonrası parça iç kısım genişliği

Çizelge 8.6 Büküm sonrası parça dış genişliği

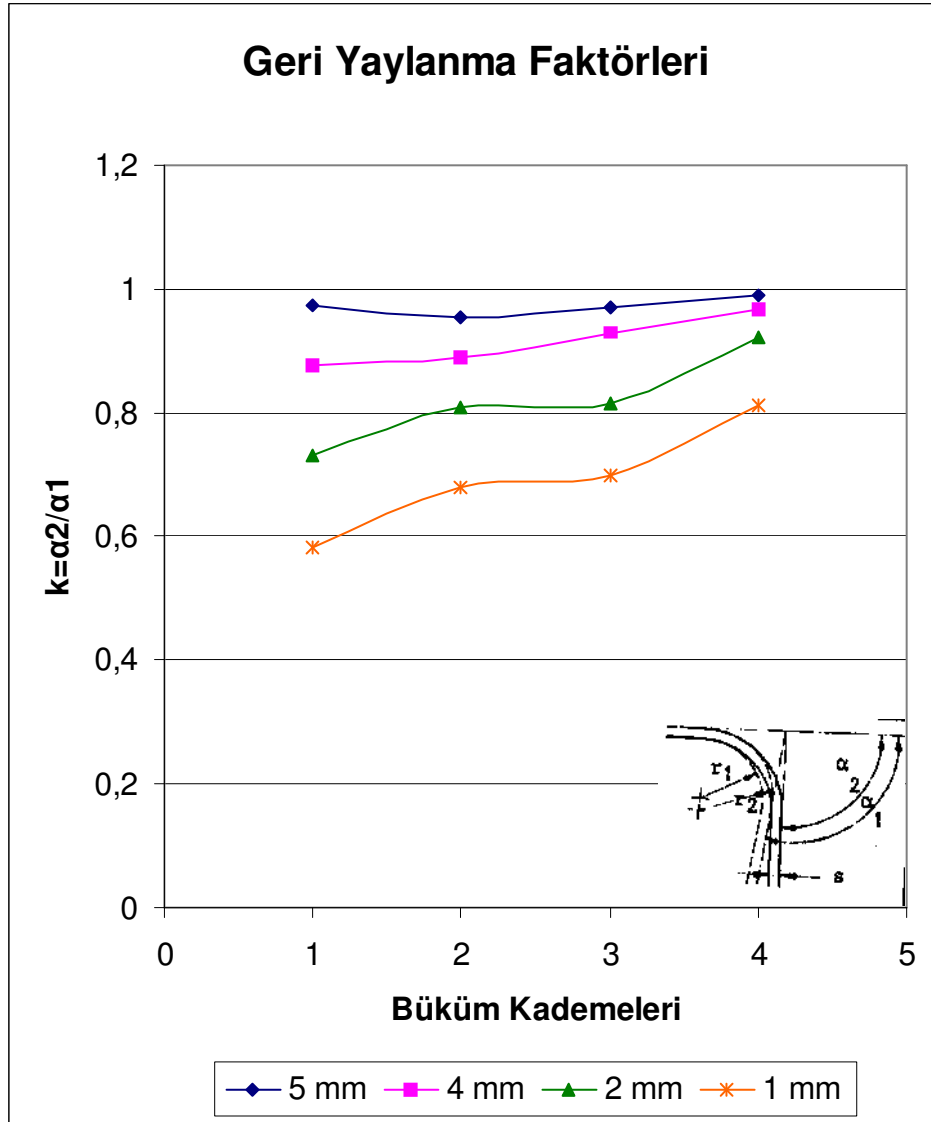
KALINLIK (mm)	Parça Dış Genişliği (mm)			
	1	2	3	4
6	39,11	39	38,87	38,56
4	39,35	39,25	39,17	39
2	39,9	39,95	39,83	39,8
1	39,9	39,9	39,85	39,83



Şekil 8.16 Büküm sonrası parça dış kısım genişlikleri

Çizelge 8.7 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın geri esneme katsayıları

Sac Kalınlıkları (mm)	1. Kademe		2. Kademe		3. Kademe		4. Kademe		$k = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$
	Gerçek Açı ( $\alpha_2$ ) (°)	Teorik Açı ( $\alpha_1$ ) (°)	Gerçek Açı ( $\alpha_2$ ) (°)	Teorik Açı ( $\alpha_1$ ) (°)	Gerçek Açı ( $\alpha_2$ ) (°)	Teorik Açı ( $\alpha_1$ ) (°)	Gerçek Açı ( $\alpha_2$ ) (°)	Teorik Açı ( $\alpha_1$ ) (°)	
5	40	41,112	59	61,92	68	69,984	89	90	0,9888889
4	36	41,112	55	61,92	65	69,984	87	90	0,9666667
2	30	41,112	50	61,92	57	69,984	83	90	0,9222222
1	24	41,112	42	61,92	49	69,984	73	90	0,8111111
<b>Pres Kursu (mm)</b>	<b>15</b>		<b>24</b>		<b>28</b>		<b>40</b>		
<b>Kalıp Açıklığı (mm)</b>	<b>80</b>		<b>80</b>		<b>80</b>		<b>80</b>		



Şekil 8.17 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın geri esneme katsayılarının pres kurslarına göre karşılaştırılması

### 8.3 Çekme deneyleri

AISI-304 kalitesindeki, 1,5 mm anma kalınlığındaki paslanmaz çelik sacın mekanik özellikleri ve şekillendirme karakteristikleri çekme deneyi ile irdelenmiştir.

Bu deneyler Şekil 8-18'de görülen TESTOMETRIC marka 3 ton'luk universal test cihazında TS 138 EN 10002-1/1996 standardına göre yapılmıştır.



Şekil 8.18 Çekme deneylerinde kullanılan TESTOMETRIC- 3 tonluk deney makinası

Değişik mekanik özelliklerin ve şekillendirme karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla uygulanan deneylerin tümünde, aynı tipte ve boyutta; ilk ölçme uzunluğu 50 mm ve genişliği 12,5 mm olan çekme numuneleri, boyutlarının hem EN 10002-1 hem de ASTM E 8M standardına uymasından dolayı kullanılmıştır. Çekme numuneleri, sac plakadan lazer tekniği ile kesilerek hazırlanmıştır. Kesme sonrası deney parçaları zımpara ile temizlenmiştir.

Deneylerden önce numunelerin ölçme uzunlukları içerisinde 5 farklı noktada genişlik ve kalınlık ölçümü yapılarak, bunların ortalaması kullanılmıştır.



Şekil 8.19 Çekme testi



Çizelge 8.8 AISI-304 paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 0°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen bazı mekanik özellikler

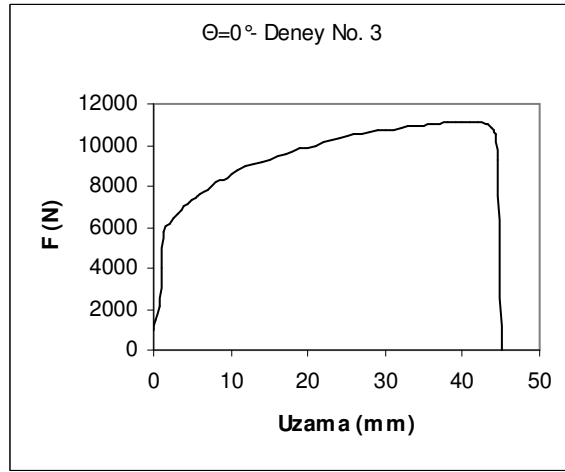
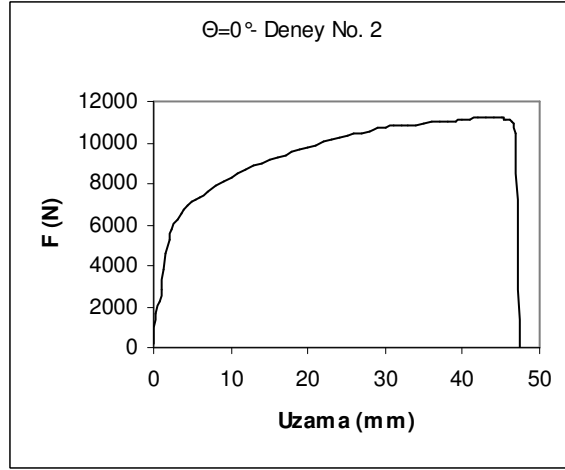
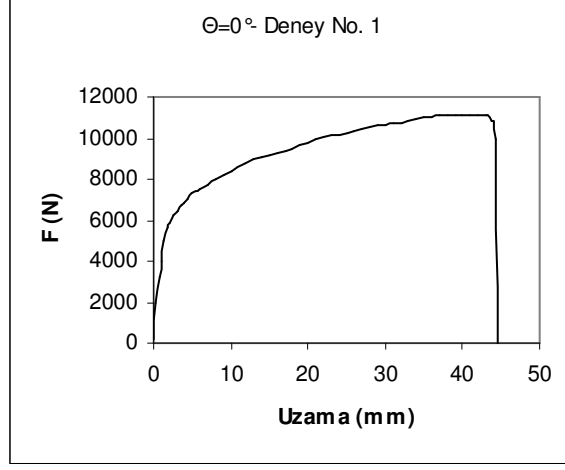
DENEY NO	AKMA YÜKÜ $F_a$ (N)	ÇEKME YÜKÜ $F_g$ (N)	% 0,2 AKMA DAYANIMI $R_{p0,2}$ ( $\sigma_{A0,2}$ ) (MPa)	ÇEKME DAYANIMI		MAKSİMUM ÜNİFORM GERİNİM		KOPMADA UZAMA YÜZDESİ $A_{g,65}$ mm ( $e_f$ ) (%)	YOUNG MODÜLÜ (MPa)
				$R_m$ ( $S_u$ , $S_{max}$ ) (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$e_u$	$\epsilon_u$		
1	5647,38	11104	308,6	606,65	857,8638	0,4141	0,34649329	61,157	16964
2	5825,073	11211	318,31	615,23	883,0396	0,4353	0,36137389	65,975	12702
3	5921,916	11034	325,38	604,07	851,7991	0,4101	0,34366062	68,887	28203
<b>ORT</b>	5798,123	11116,33	317,43	608,65	864,2342	0,419833	0,35050927	65,33966667	19289,67

Çizelge 8.9 AISI-304 paslanmaz çelik sacın, haddeme yönüne 45°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen bazı mekanik özellikler

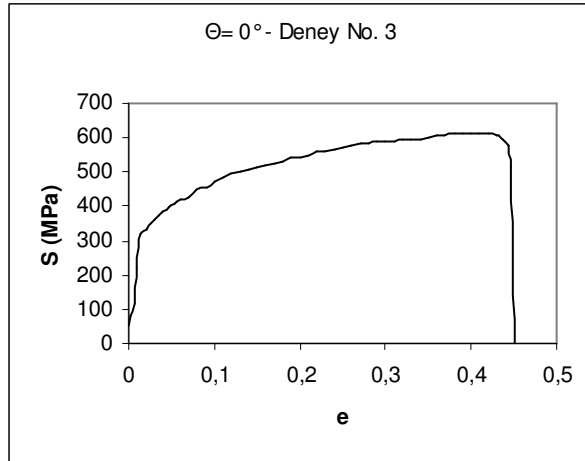
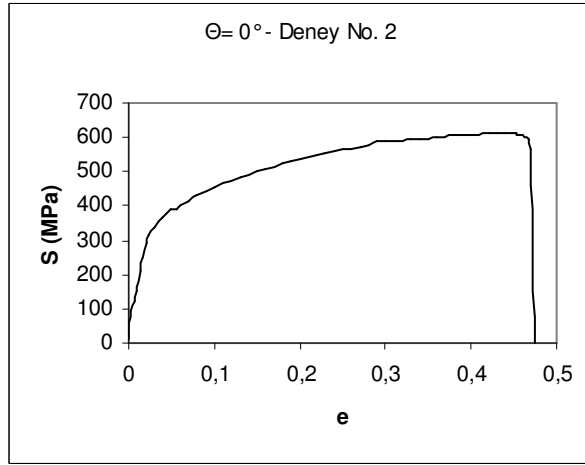
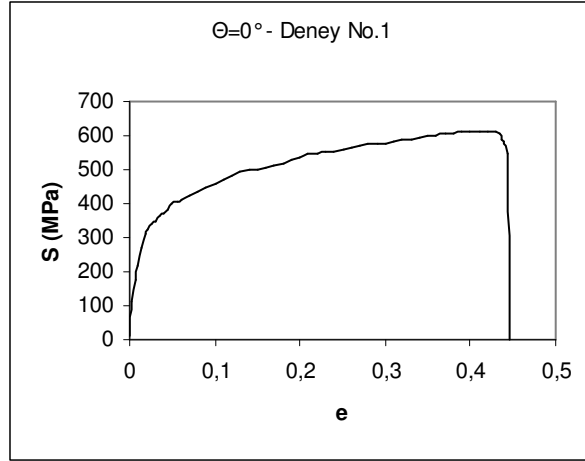
DENEY NO	AKMA YÜKÜ $F_a$ (N)	ÇEKME YÜKÜ $F_s$ (N)	% 0,2 AKMA DAYANIMI $R_{p0,2}$ ( $\sigma_{p0,2}$ ) (MPa)	ÇEKME DAYANIMI		MAKSİMUM ÜNİFORM GERİNİM		KOPMADA UZAMA YÜZDESİ $A_{g,66}$ mm ( $e_f$ ) (%)	YOUNG MODÜLÜ (MPa)
				$R_m$ ( $S_u, S_{max}$ ) (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$e_u$	$e_u$		
1	5688,316	10779	308,37	584,34	813,9272	0,3929	0,3313879	65,432	19569
2	5677,246	10783	313,6	595,02	834,456	0,4024	0,33818505	67,634	19536
3	5631,091	10726	311,11	592,57	830,6646	0,4018	0,33775713	62,083	17178
<b>ORT</b>	5665,551	10762,67	311,02666667	590,64333333	826,3493	0,399033	0,33577669	65,04966667	18761

Çizelge 8.10 AISI-304 paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 90°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen bazı mekanik özellikler

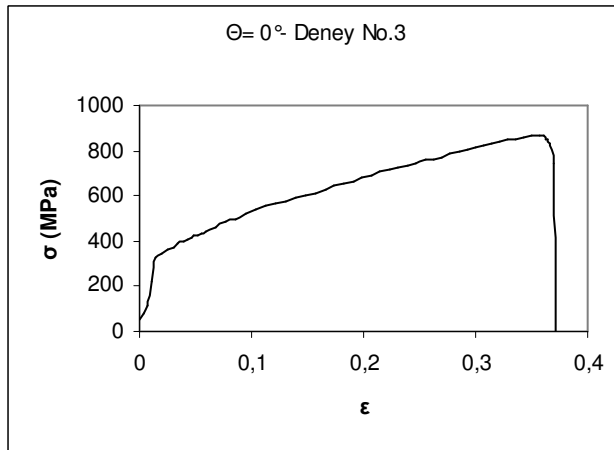
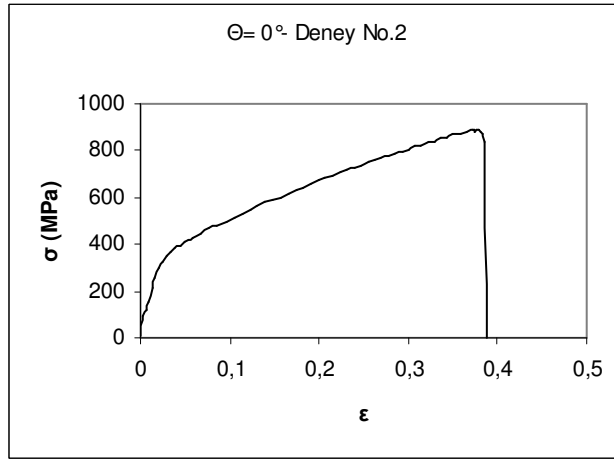
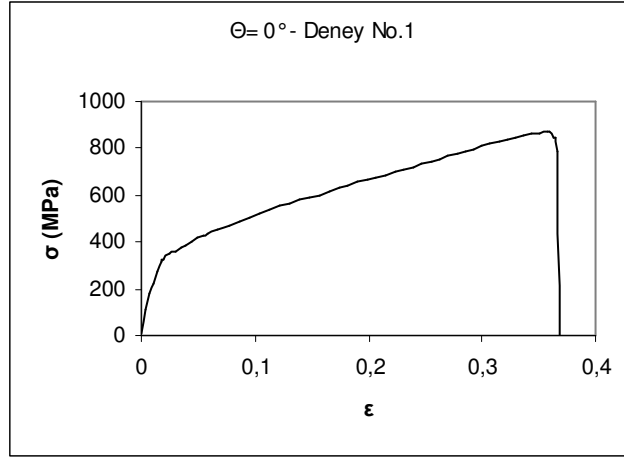
DENEY NO	AKMA YÜKÜ $F_a$ (N)	ÇEKME YÜKÜ $F_{\phi}$ (N)	% 0,2 AKMA DAYANIMI $R_{p0,2}$ ( $\sigma_{A0,2}$ ) (MPa)	ÇEKME DAYANIMI		MAKSİMUM ÜNİFORM GERİNİM		KOPMADA UZAMA YÜZDESİ $A_{\phi,05}$ mm (et) (%)	YOUNG MODÜLÜ (MPa)
				$R_m$ ( $S_u$ , $S_{max}$ ) (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$e_u$	$\epsilon_u$		
1	5949,58	11295	326,9	620,99	868,765	0,399	0,3357577	58,091	10694
2	5633,806	11229	311,26	619,44	858,0483	0,3852	0,32584453	59,336	17542
3	5658,595	11251	305,87	606,75	839,8634	0,3842	0,32512236	62,551	20036
<b>ORT</b>	5747,327	11258,33	314,6766667	615,7266667	855,5589	0,389467	0,32890819	59,9926667	16090,67



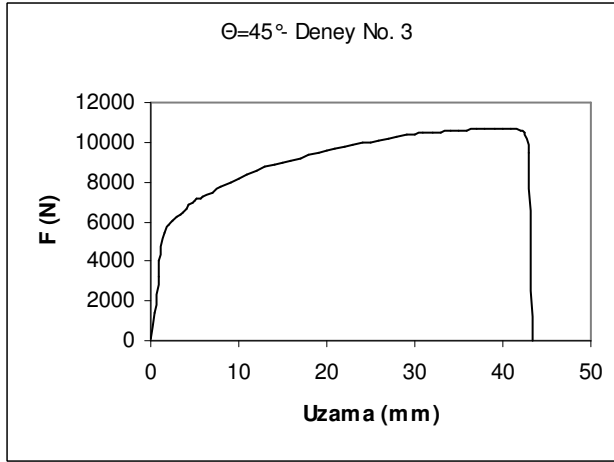
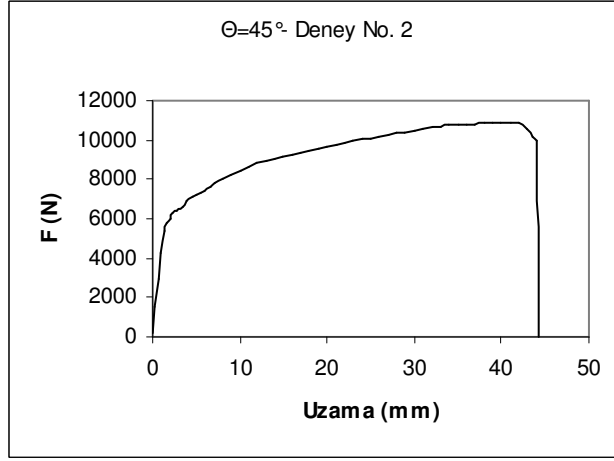
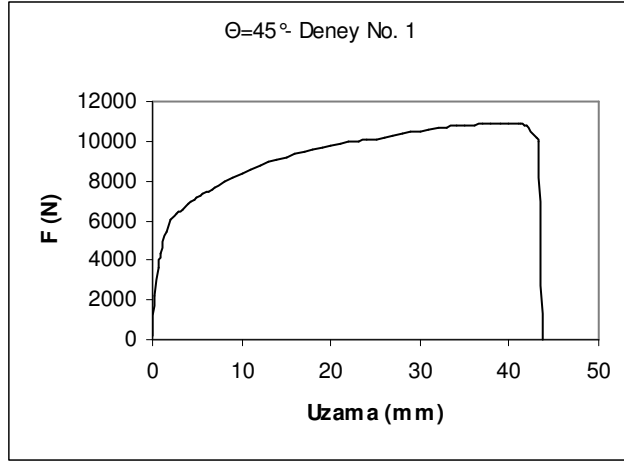
Şekil 8.21 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne  $0^\circ$ 'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen yük-uzama eğrileri ( $v_{\text{çek}}=17$  mm/dak)



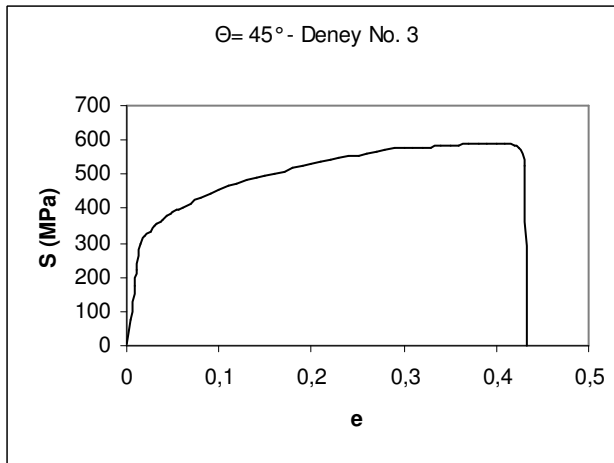
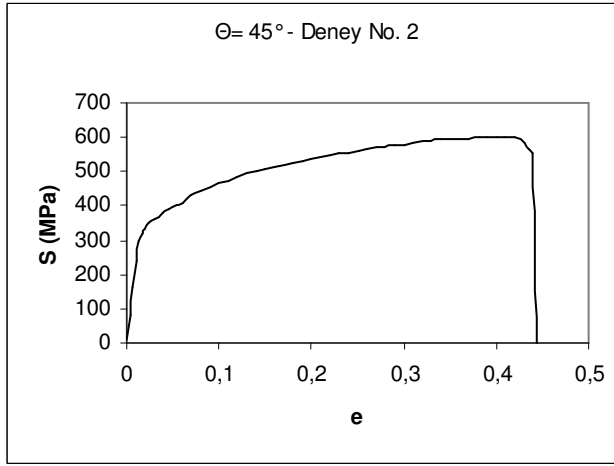
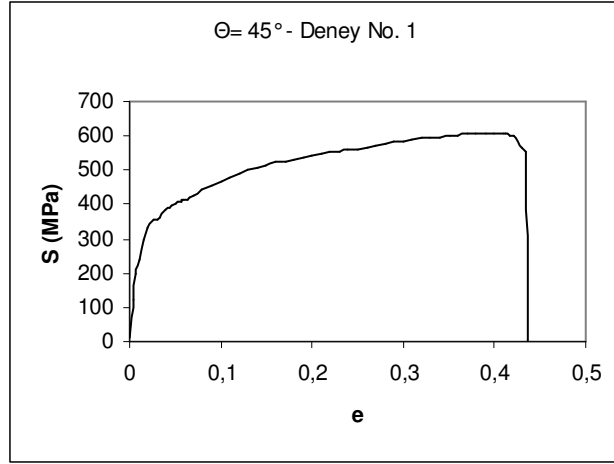
Şekil 8.22 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne  $0^\circ$ 'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim- nominal gerilme eğrileri ( $v_{\text{çek}}=17$  mm/dak)



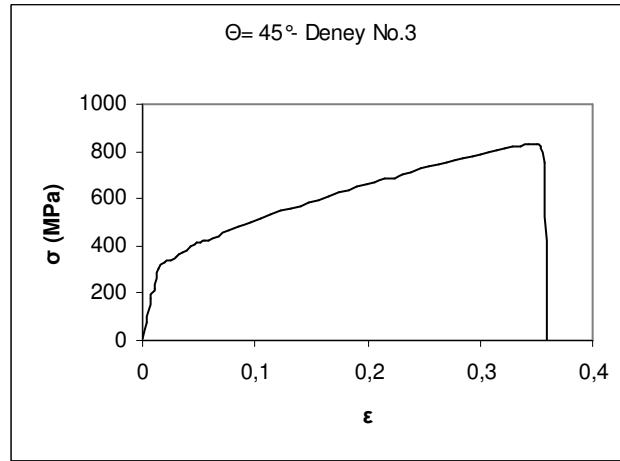
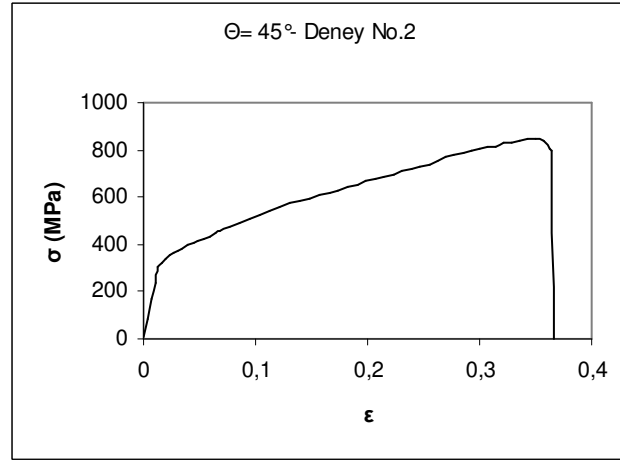
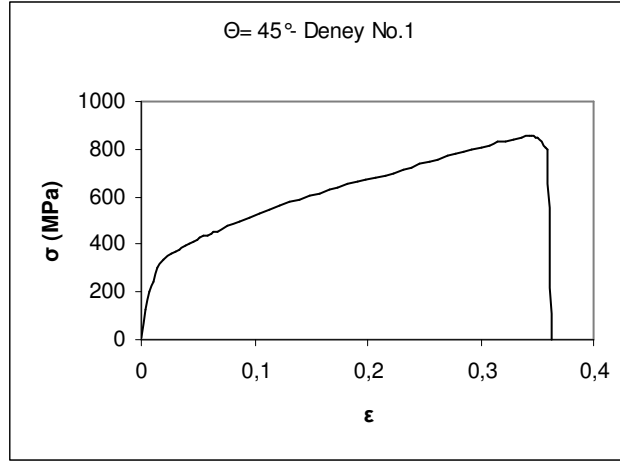
Şekil 8.23 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne  $0^\circ$ 'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen gerçek gerinim- gerçek gerilme eğrileri ( $v_{\text{çek}}=17$  mm/dak)



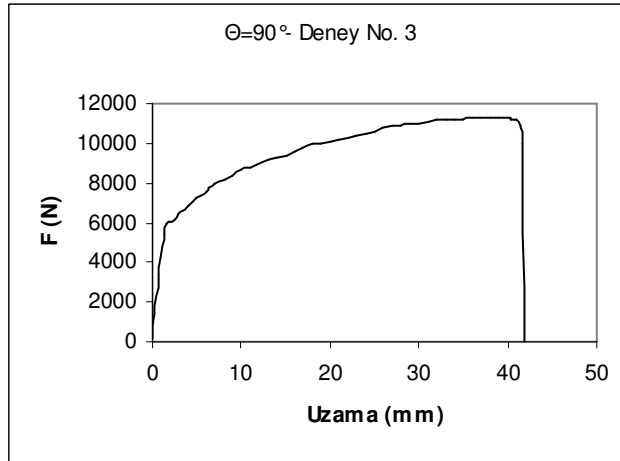
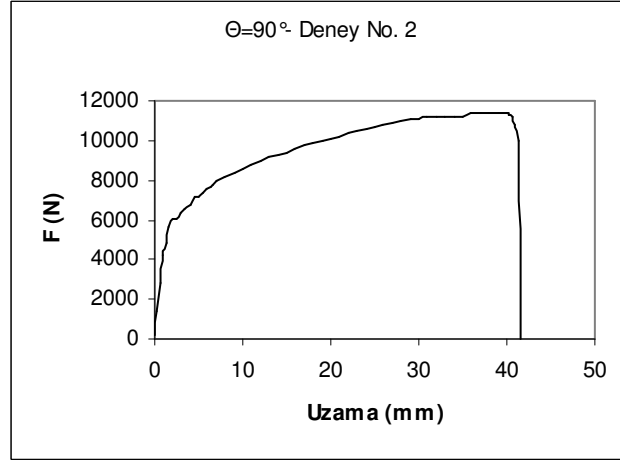
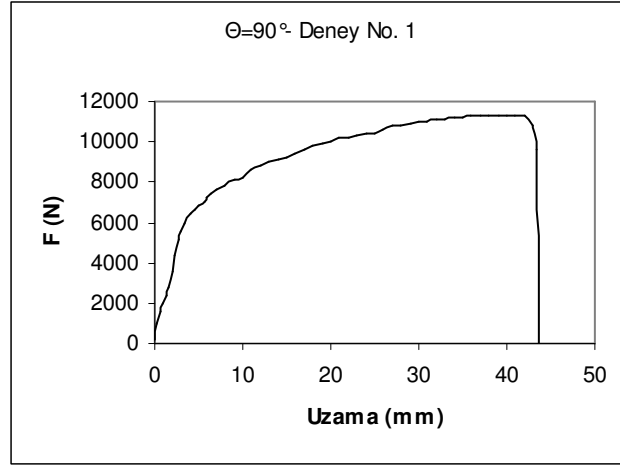
Şekil 8.24 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne  $45^\circ$ 'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen yük-uzama eğrileri ( $v_{\text{çek}}=17$  mm/dak)



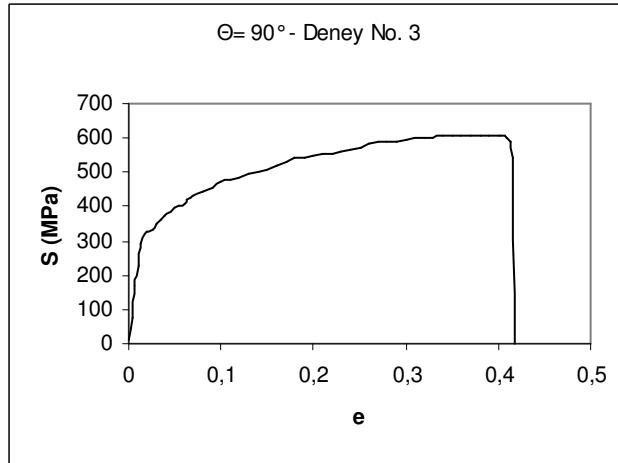
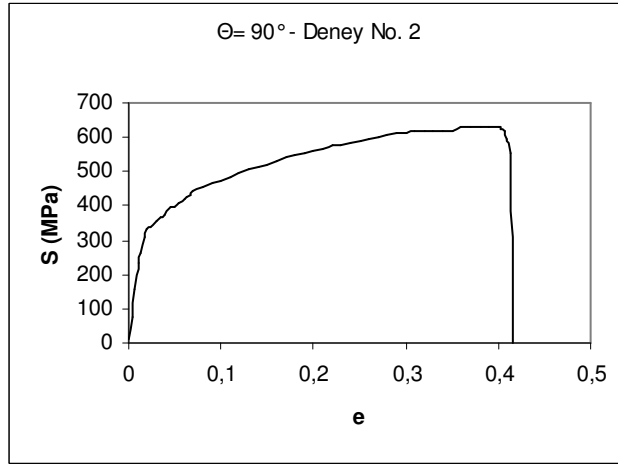
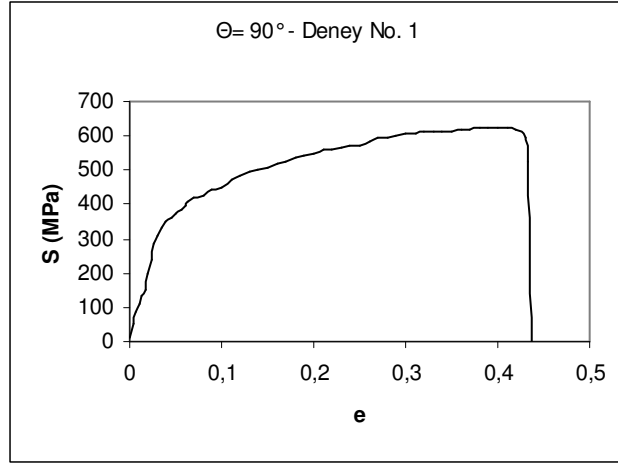
Şekil 8.25 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne  $45^\circ$ 'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim- nominal gerilme eğrileri ( $v_{\text{çek}}=17$  mm/dak)



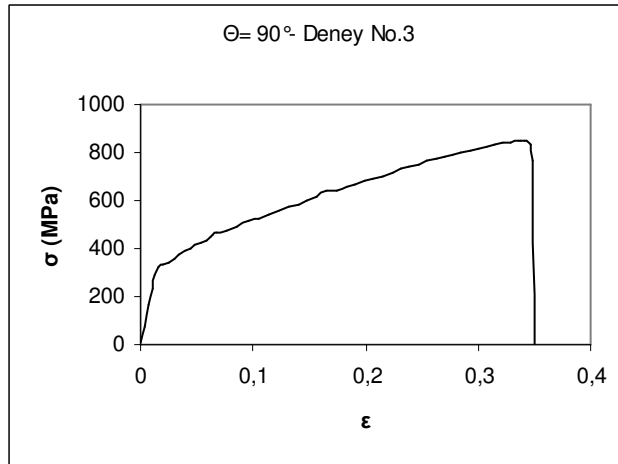
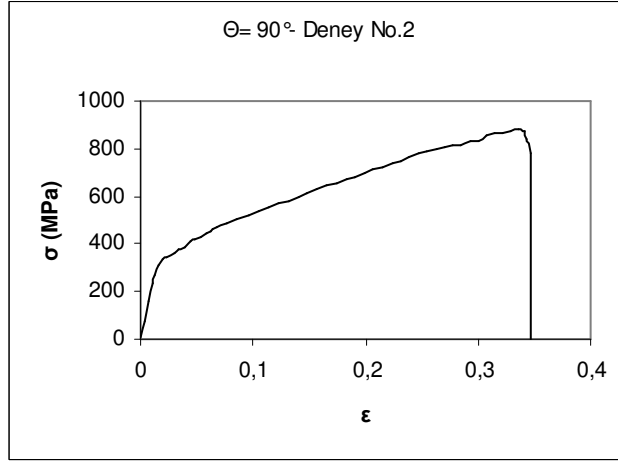
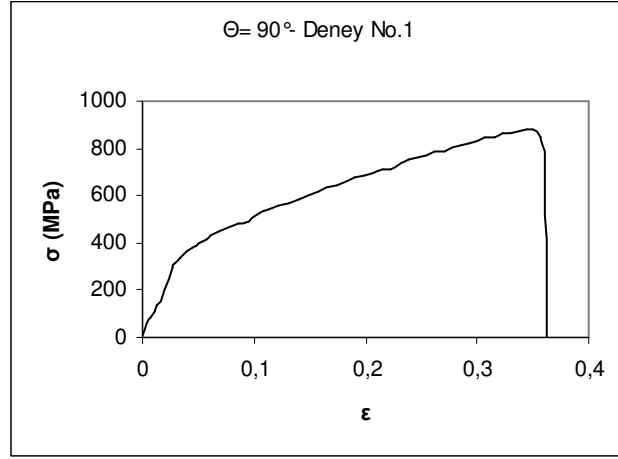
Şekil 8.26 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne  $45^\circ$ 'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen gerçek gerinim- gerçek gerilme eğrileri ( $v_{\text{çek}}=17$  mm/dak)



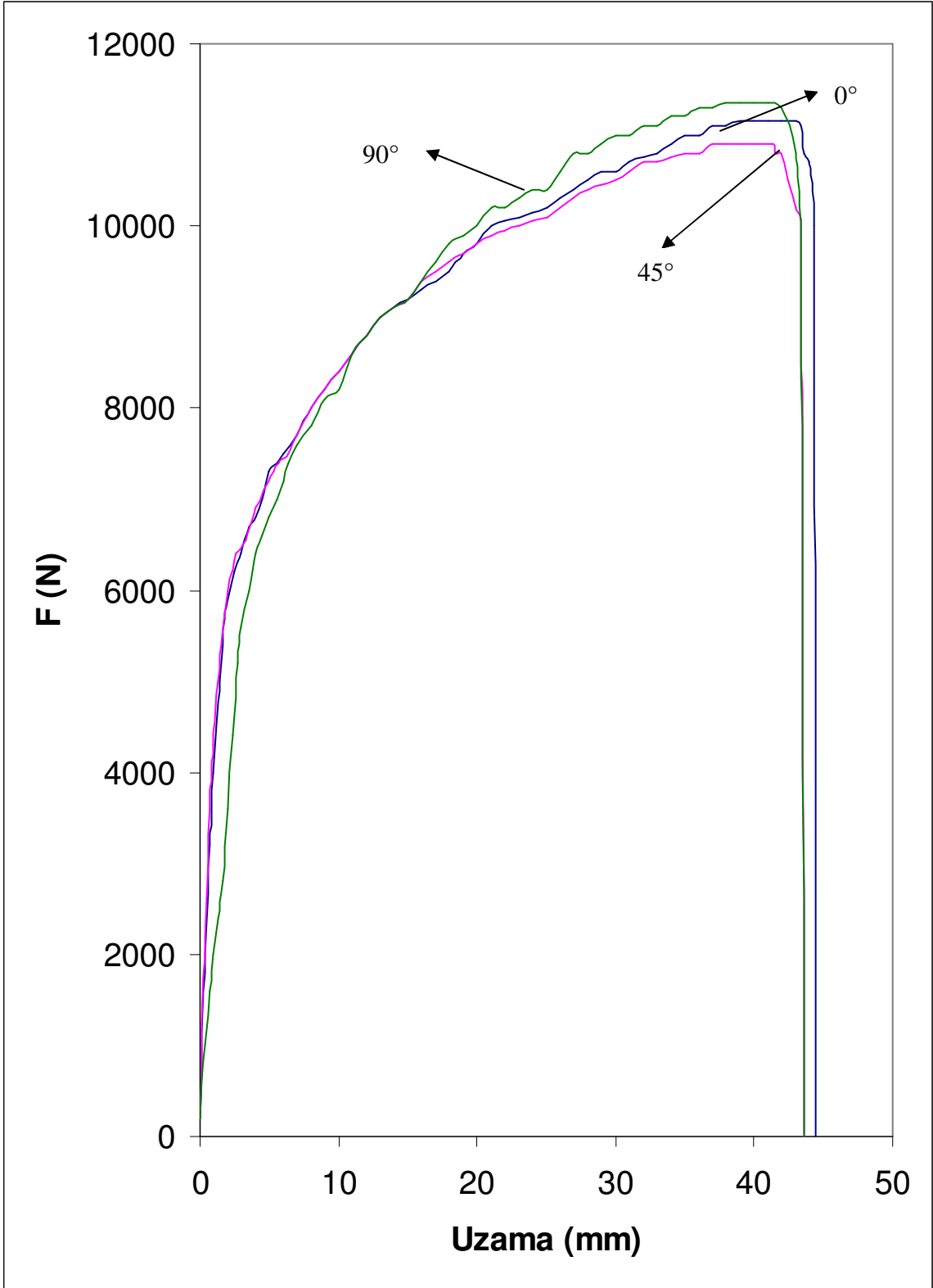
Şekil 8.27 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne  $90^\circ$ 'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen yük-uzama eğrileri ( $v_{\text{çek}}=17$  mm/dak)



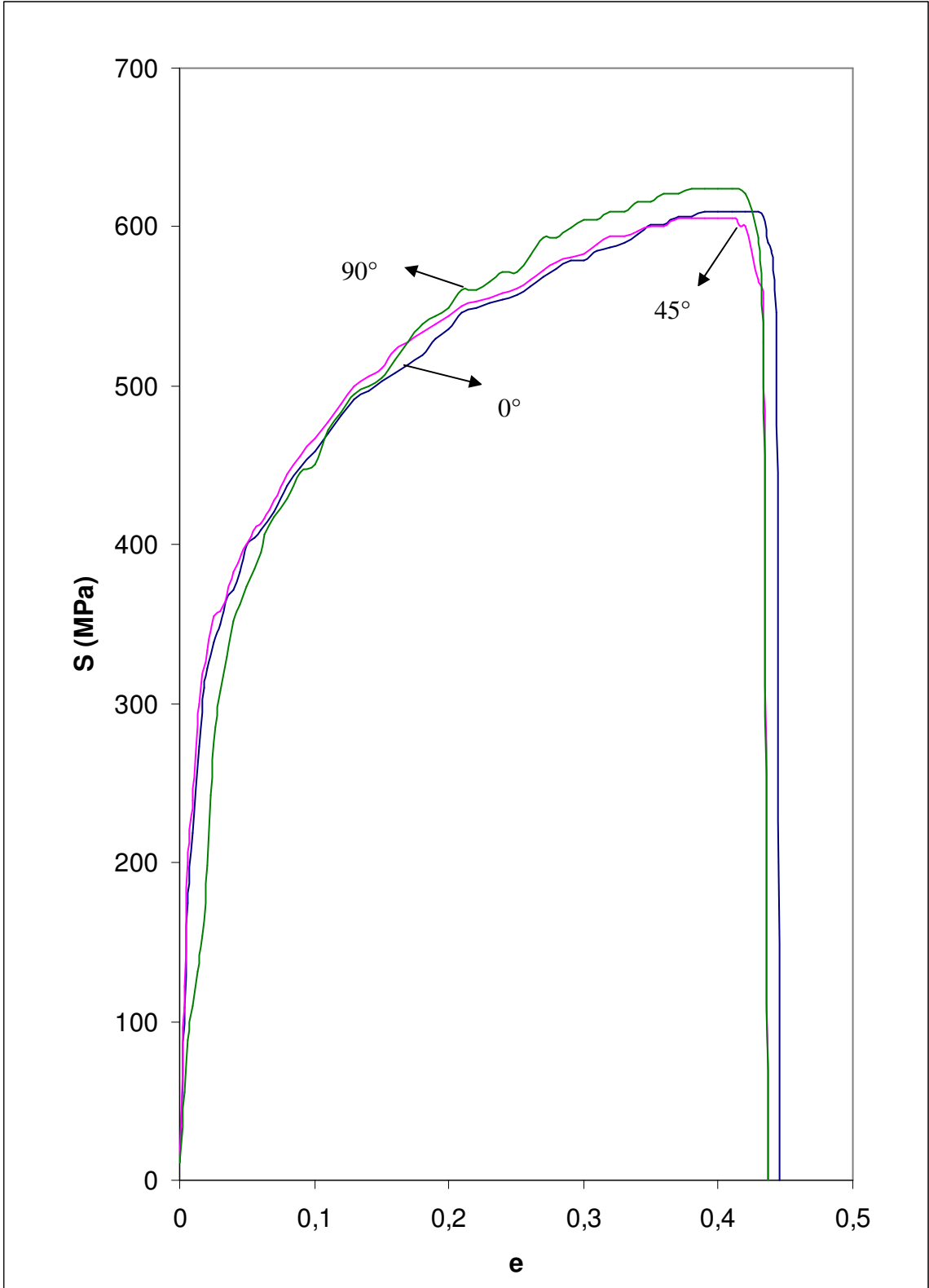
Şekil 8.28 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne  $90^\circ$ 'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim- nominal gerilme eğrileri ( $v_{\text{çek}}=17$  mm/dak)



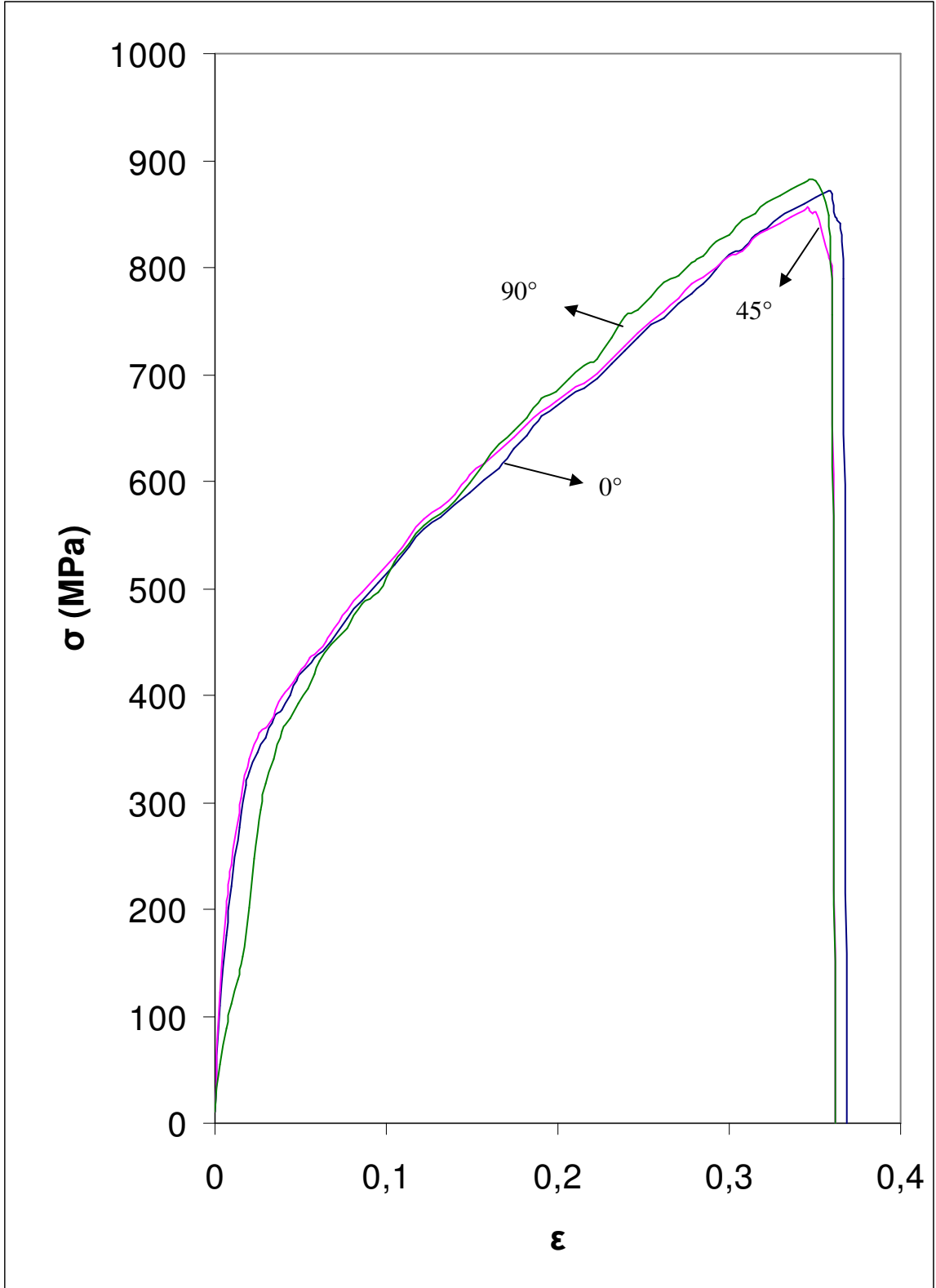
Şekil 8.29 AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne  $90^\circ$ 'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen gerçek gerinim- gerçek gerilme eğrileri ( $v_{\text{çek}}=17$  mm/dak)



Şekil 8.30 AISI- 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın,haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°'lik doğrultularda çekme deneylerindeki yük- uzama eğrileri



Şekil 8.31 AISI- 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın,haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°'lik doğrultularda çekme deneylerindeki nominal gerinim- nominal gerilme eğrileri



Şekil 8.32 AISI- 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın,haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°'lik doğrultularda çekme deneylerindeki gerçek gerinim- gerçek gerilme eğrileri



Şekil 8.33 Boyunlanma



Şekil 8.34 Kopma



Şekil 8.35 Deneylerde kullanılan kopmuş çekme numuneleri



Şekil 8.36 Kopmuş çekme numuneleri

## 9 SONUÇLAR

### 9.1 Genel sonuçlar

Paslanmaz çelik sacların şekil değiştirme karakteristiklerinin incelendiği bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar, aşağıda belirtildiği üzeredir.

1. Paslanmaz çeliklerin dayanımı, sertliği ve sünekliği genellikle daha yüksektir.
2. Daha hızlı pekleşirler yani şekil verdikçe dayanımları artmaktadır.
3. Genel olarak, imalat sırasında daha fazla güç kullanılması ve kullanılan takım, kalıp, aparat ve ekipmanlarının daha sık tamiri veya değiştirilmesi ve yüzeye daha fazla özen gösterilmesi gerekmektedir.
4. Paslanmaz çelik malzeme ile yapılan imalat, karbon ve az alaşımlı çeliklerden daha farklı özellikler taşır. Bu farklılık, genellikle malzemelerin akma dayanımı ile pekleşme davranışlarının değişik olmasından kaynaklanır ve her bir paslanmaz çelik türü için ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir.
5. Paslanmaz çelik sacların kesilmesi, pekleşme özelliklerinden dolayı eşdeğer karbonlu saclarla göre daha fazla kuvvet gerektirmektedir.
6. Malzeme sünek olduğundan kesme boşluğu dar olmamalıdır.
7. Yağlayıcı kullanmadan kalıpta kesme yapılabilir, ancak kullanılması halinde kuvvet ve güç ihtiyacı düşer, dolayısıyla takım ömrü artmaktadır.
8. Kesme kuvvetinin düşürülmesi için kalıp veya zımbanın açılı yapılması gerekmektedir.
9. Paslanmazların bükme ve kenarlama işlemleri de diğer çeliklere oranla daha fazla özen ve % 50-60 daha fazla kuvvet gerektirmektedir.
10. Derin çekme-sıvama kalıplarının tasarımında dikkat edilecek konulardan biri de geri yaylanmadır. Karbon çeliklerine göre yüksek akma ve çekme dayanımı, kalıp tasarımında aynı oranda yüksek geri yaylanma telafisi veya şekillendirme sırasında daha yüksek pot çemberi basıncı gerektirmektedir.

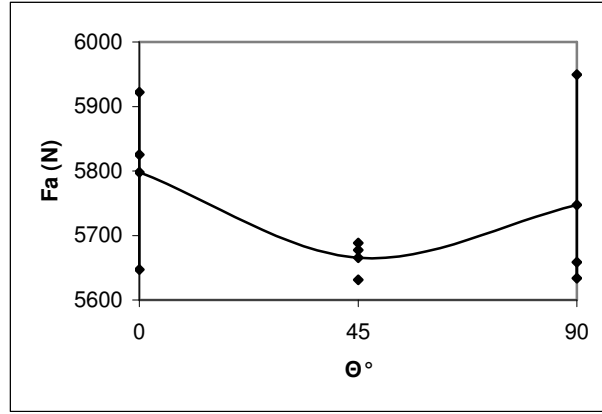
11. Ferritik çeliklerin bükme eksenine haddelene yönüne dik tutulmalı ve bükme radyüsü sac kalınlığının 2 katından az olmamalıdır.
12. Ferritik paslanmaz çeliklerin soğuk şekillendirilmesi, mukavemetlerinin yüksek, sünekliklerinin düşük olması sebebiyle östenitik paslanmaz çeliklere göre daha zordur.
13. Östenitik paslanmaz çelikler, sünek olmaları nedeniyle özellikle soğuk sac şekillendirmede en çok kullanılan türlerdir.
14. Östenitik paslanmaz çeliklere yüksek oranlarda çekme uygulanabilir.
15. Ferritik türlerin de şekil değiştirme kabiliyetleri iyidir; ancak bunlar az sünek olduklarından bu alaşımların şekillendirilme özelliği daha sınırlıdır, dolayısıyla çoğu zaman ara tav gereği ortaya çıkmaktadır.
16. Az alaşımlı martenzitik paslanmaz çeliklerin derin çekmeye uygun olmadığı söylenebilir.
17. Paslanmaz çelik malzemelerin derin çekilebilme kabiliyetini en uygun sınır çekme oranı göstermektedir, bu oran ürünün (pulun) başlangıç çapının, çekme sonrası çapa oranıdır.
18. Pot çemberi basıncı, katlanmaları önleyecek derece yüksek olmalıdır, ilk derin çekme kademesinde sorun çıkmaz ise daha sonraki kademelerde genellikle sorun çıkmaz. Ancak pot oluşmuş ise bunun ilerideki kademelerde giderilmesi mümkün değildir.
19. Ferritik çeliklerde akma ve çekme dayanımları arasındaki fark, östenitik çeliklerden daha azdır, yani daha az pekleşirler. Fakat bunun yanında süneklikleri daha düşüktür.
20. Paslanmaz çeliklerin derin çekmesinde alaşım türü yanında iç yapı özellikleri de önem taşımaktadır. Bunlar arasında tane büyüklüğü en önemlisidir. Tane büyüklüğü arttıkça yüzeyde portakallaşma tehlikesi ortaya çıkmaktadır, çok küçük olduğunda ise akma dayanımı arttığından derin çekme zorlaşarak imkansız hale gelmektedir.
21. Derin çekmede etkili bir diğer özellik de yöne bağımlılıktır (anizotropi), yani malzeme özellikleri haddelene yönünde ve buna dik yönde farklılıklar gösterir. Soğuk haddelenmiş ve ince saclarda, sıcak haddelenmiş kalın saclara göre daha belirgin olarak ortaya çıkabilen bu özelliğin etkileri, derin çekmede pot çemberi basıncının yerel olarak ayarlanması ile kontrol edilmektedir.

22. Plastik şekillendirilebilme özelliğine sac kalınlığının artışı olumlu yönde etki etmektedir.
23. Şekillendirme karakteristiklerinin ölçülmesinde çekme, bükme, Erichsen deneylerinden faydalanılmaktadır.
24. Özellikle karmaşık şekilli parçaların çekilmesinde kritik bölgelerdeki malzeme zayıflamasını artıracak ve yırtılmalara sebep olacak yüksek hızlardan kaçınılmalıdır.
25. Çekme radyüsleri normalden büyük olursa, parça radyüsünün iç kısmında kat teşekkülü; normalden küçük olursa, parça tabanında yırtılmalar olabilir.
26. Tekrar çekme ile sağlanan redüksiyon miktarı; sürtünme miktarı daha fazla olduğundan, ilk çekmede elde edilebilen redüksiyon miktarından her zaman daha az olmaktadır.
27. Paslanmaz çeliklerin yüzeyi, sürtünme nedeniyle diğer çeliklere kıyasla daha kolay çizilir, dolayısıyla şekillendirmede yağlamaya daha fazla özen göstermek gerekir. Bu amaçla kullanılan madeni yağlar çoğu zaman yetersiz kalır, bu nedenle yüksek basınca dayanıklı hidrokarbon ve polimerler içeren yüksek ıslatıcılığa sahip özel kaydırıcı yağlar kullanılmalıdır.
28. Paslanmaz çelik sacların şekil değiştirme hızına duyarlılığı karbon çeliklere göre daha fazla olduğundan, preste şekillendirmede daha düşük hızlar kullanılmalıdır. Bu sayede hem gereken kuvvetler düşer, hem de süneklik de hissedilir derecede artar.

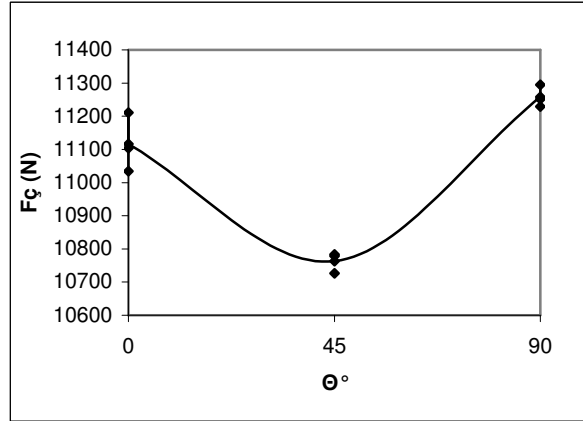
## 9.2 Deneysel sonuçlar

AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacların şekillendirme karakteristiklerini değerlendirmek amacıyla, deneysel çalışmalar planlanarak uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen bulgular, aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir.

1. Sac malzemenin mekanik özellikleri DIN EN 10088 standardına göre ve piyasada yer alan diğer kaynaklarda belirtilen sınırlar dahilinde saptanmıştır. Uygulanan çekme deneylerinden, akma dayanımı  $G_{A0,2}$ , 314.37 MPa; çekme dayanımı  $S_u$ , 605 MPa; kopmada uzama yüzdesi  $R_f$ , %63.64 olarak elde edilmiştir.

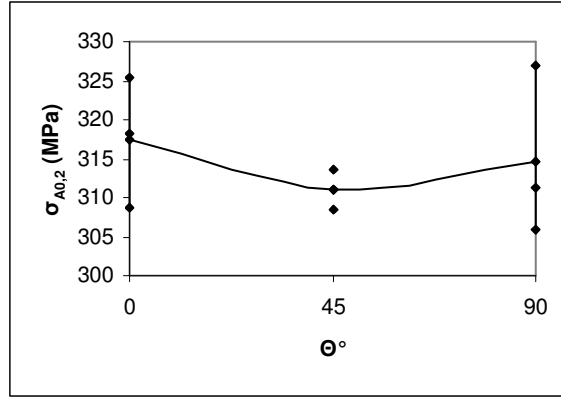


Şekil 9.1 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, akma yükünün ( $F_a$ ) haddeleme yönüne göre değişimi



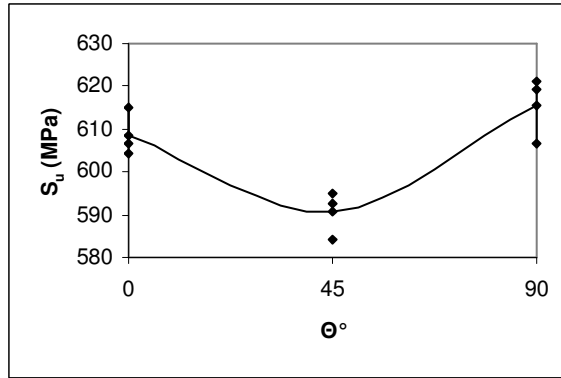
Şekil 9.2 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, çekme yükünün ( $F_ç$ ) haddeleme yönüne göre değişimi

2. AISI-304 kalitesindeki paslanmaz çelik sac malzemelere uygulanan tek eksenli çekme deneylerinden ( $v_{çek} = 17$  mm/dak) elde edilen mekanik özellikler, sac anizotropisinden dolayı, haddeleme yönüne göre değişiklikler meydana gelmektedir. Malzemenin akma dayanımının haddeleme yönü ile  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$  lik açılarda göstermiş olduğu değişimler, Şekil 9.3'de görülmektedir. Tek eksenli çekme deneylerinde, ilerleyen deformasyon seviyelerindeki ve özellikle kopmaya yakın gerinim düzeylerinde, mekanik anizotropi sonucunda liflenmiş yapının da etkisi açıkça ortaya çıkmaktadır. Haddeleme ile bu yönde paralel olarak uzamış inklüzyon ve boşlukların, deformasyon ile birlikte, sacın özellikle haddeleme yönüne dik doğrultudaki dayanımının düşmesine neden olduğu bilinmektedir.

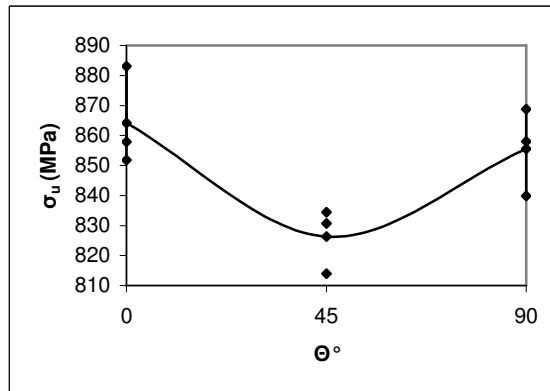


Şekil 9.3 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacın, akma dayanımının ( $\sigma_{A0.2}$ ) haddeleme yönüne göre değişimi

3. Deneylelerden elde edilen dağılımlara göre çizilen Şekil 9.4'de ki eğrilere göre, çekme dayanımının en yüksek değerine, haddeleme yönüne göre 0° ve 90°'lik doğrultularda eriştiği görülmektedir.



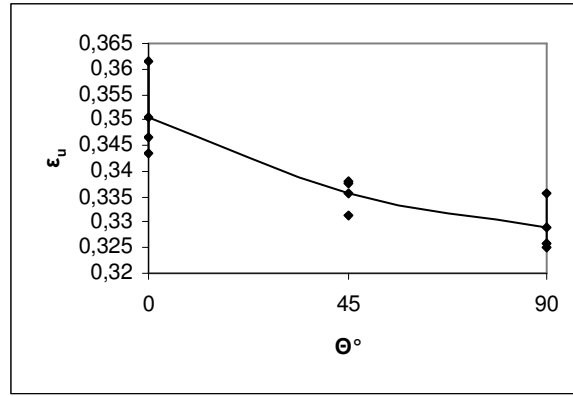
(a)



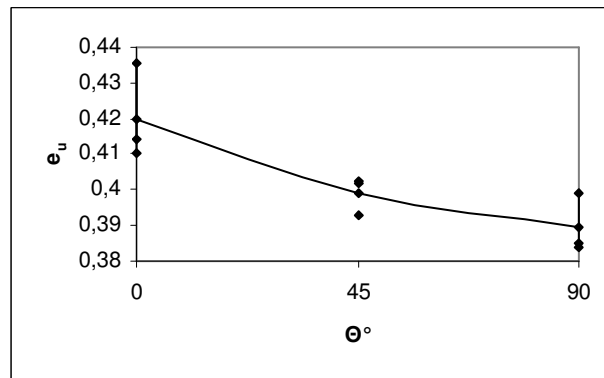
(b)

Şekil 9.4 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacda, çekme dayanımının (a) ve maksimum yükteki gerçek gerilmenin (b) haddeleme yönüne göre değişimi

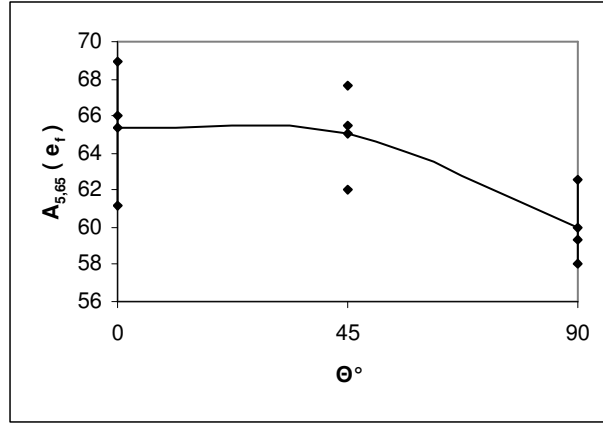
4. Çekme deneylerinde, yükün maksimumuna ulaştığı andaki üniform uzama ve kopma uzaması değerleri de, haddeleme yönüne göre değişim göstermektedir. En yüksek uzama değerleri haddelemeye paralel doğrultularda meydana gelmektedir. Elde edilen Şekil 9.5, Şekil 9.6 ve Şekil 9.7’de ki eğrilere göre, haddelemeye dik yöndeki maksimum üniform uzama ve kopma uzaması değerlerinin, mekanik anizotropi sonucunda en düşük düzeyde kalmaktadır. Bu durum, mekanik liflenmeyi oluşturan ve haddeleme yönünde uzamış olan kalıntılataın, bu yöne dik doğrultularda, kesitte etkin bir süreksizlik oluşturması şeklinde açıklanmaktadır. Bu süreksizlikler, kesitteki boyun oluşumunun ve kopmanın daha erken çıkmasına neden olmaktadır.



Şekil 9.5 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacda, çekme deneylerinden elde edilen maksimum üniform gerinimin haddeleme yönüne göre değişimi



Şekil 9.6 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacda, çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinimin haddeleme yönüne göre değişimi



Şekil 9.7 AISI 304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacda, çekme deneylerinden elde edilen kopmadaki uzama yüzdesi değerlerinin haddeleme yönüne göre değişimi

5. AISI 304 kalitesinde paslanmaz çelik sacın bükülmesinde geri esneme de göz önüne alınmalıdır. Biçimlendirmenin aslının elastoplastik olmasından dolayı işlem sonunda parça üzerindeki kuvvet ortadan kalktıktan sonra gerçekleştirilen bükümden bir miktar geri dönüş görülmektedir. Deneylerden kalın sacların geri esneme katsayılarının ince sacları göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bunun için, kalıptaki büküm açısının, gerçek değerinden geri esneme değeri kadar küçük olması gerekmektedir.
6. Malzeme kalınlığı bükme bölgesinde bir miktar azalmaktadır, bükmeden önce prizmatik şekilde olan parça kesiti iç bükey trapez şeklini almaktadır.
7. Malzeme eni, bükme kavisi tarafından genişlemekte, dış tarafta da daralmaktadır.
8. Şekil değişiminde bükme kavisi ve açısı en büyük rolü oynamaktadır.

**KAYNAKLAR**

Aran, A. , Temel, M.A., (2003), Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller, Sarıtaş.

Avner, S.H., (1974) ,Introduction to Physical Metallurgy,  
McGraww-Hill, London.

Colombier, L. ve Hochmann, J.,Stainless and Heat Resisting Steels, Edward Arnold Publishers Ltd.

Çapan, L., (1977), Plastik Şekil Verme Teori ve Uygulama, Çağlayan Kitapevi.

Çapan, L., (1990), Metallere Plastik Şekil Verme , Çağlayan Kitapevi.

Davis, J.R., ASM Speciality Handbook, Stainless Steels.

Dieter, G.E., (1988), Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, London.

Güneş, A.T., (2003), Pres İşleri Tekniği Cilt-1, MMO.

Güneş, A.T., (2003), Pres İşleri Tekniği Cilt-2, MMO.

Hosford, W.F ve Duncan, J.L., (1999), Sheet Metal Forming, The Minerals, Metals and Materials Society, JOM Journal.

Hosford, W.F ve Cadell, R.M., (1983), Metal Forming-Mechanics and Metallurgy, Prentice-Hall, New Jersey.

Kayalı, E.S ve Ensari, C., (1986), Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.

Kayalı, E.S ve Ensari, C., (1986), Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.

Kayalı, E.S ve Ensari, C., Dikeç, F., (1983), Metalik Malzemelerin Mekanik Deneylemleri, İTÜ Kütüphanesi, İstanbul.

Marciniak, Z. Ve Duncan, J.L., (1992), The Mechanics of Sheet Metal Forming, Edward Arnold, London.

Outokumpu Stainless, (2004), Corrosion Handbook.

Tekin, A., (1981), Çeliklerin Metalurjik Dizaynı, İTÜ.

The ASM-a Commitee, Metals Handbook, Properties and Selection of Metals.

The ASM-b Commitee, Metals Handbook, Metallography and Microstrictures.

The ASM-c Commitee, Metals Handbook, Forming and Forging.

Tülbentçi, K. Ve Kaluç, E. , (1995), Paslanmaz Çelikler ve Kaynaklanabilirliği Seminer Notları, Kocaeli Üniversitesi.

Yurci, M.E., (1991a), Talaşsız Şekil Verme Analizler ve Gelişmeler – 1, Yüksek Lisans Ders Notları.

Yurci, M.E., (1991b), Talaşsız Şekil Verme Analizler ve Gelişmeler – 2, Yüksek Lisans Ders Notları.

Yurci, M.E., (1997a), Talaşsız Şekil Verme, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

Yurci, M.E., (1997b), Kalıp İmal Tekniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

**Özgeçmiş****Doğum tarihi** 28.05.1979**Doğum yeri** İstanbul**Hazırlık** 1990-1991 Özel Göztepe Anakent Lisesi**Orta-Lise** 1991-1997 TED Karabük Koleji**Lisans** 1998-2002 Balıkesir Üniversitesi

Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

**Çalıştığı Kurumlar****2002-2004** İMA Çelik Endüstri Tesisleri İnşaat San ve Tic A.Ş

Kalite Kontrol Mühendisi

**2004-Devam ediyor** U.S.O Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş

K.Y.S &amp; Kalite Kontrol Müdürü