

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇELİK SACLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNDE  
ORTAYA ÇIKAN DEĞİŞİMLER VE NEDENLERİ İLE  
BUNLARIN ŞEKİLLENDİRME PROSESİ ÜZERİNDEKİ  
ETKİLERİ**

Makina Müh. Hakan DEĞİRMENCİ

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

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

İSTANBUL, 2006

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	v
KISALTMA LİSTESİ .....	viii
ŞEKİL LİSTESİ .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xii
ÖNSÖZ.....	xiv
ÖZET .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇELİK SACLARIN ÜRETİMİ .....	6
2.1 Sürekli Döküm Yöntemi ile Slab Üretimi .....	9
2.1.1 Pota, Tandış ve Kalıplar .....	10
2.1.2 Kılavuz Merdaneleri ve Slab Kesme Ünitesi .....	12
2.1.3 Slabların Yüzey ile İçyapı Temizliği ve Kalite Kontrolü.....	12
2.2 Sıcak Haddelme .....	14
2.2.1 Yassı Ürünlerin Haddelenme Prensipleri .....	14
2.2.2 Merdaneler ve Merdane Düzenleri .....	16
2.2.3 Slab Tavlama .....	18
2.2.4 Sıcak Haddelmenin İşleyişi .....	19
2.2.5 Metalürjik Açından Sıcak Haddelme.....	25
2.2.6 Sıcak Haddelmede Kontrol ve Başlıca Kusurlar .....	30
2.3 Soğuk Haddelme.....	35
2.3.1 Dekapaj .....	36
2.3.2 Soğuk Haddelme Teknolojisi ve İşleyişi .....	37
2.3.2.1 Hadde Donanımları.....	39
2.3.2.2 Merdaneler.....	39
2.3.2.3 Soğutma ve Yağlama.....	40
2.3.2.4 İstenen Düzlemselliğin Sağlanması.....	41
2.3.2.5 Kalınlık Farklarının Azaltılması.....	41
2.3.2.6 Yüzey Temizliği .....	42
2.3.2.7 Soğuk Haddelmede Mikroyapı .....	43
2.3.3 Yeniden Kristalleşme Tavlama.....	43
2.3.3.1 Metalürjik İnceleme.....	44
2.3.3.2 Yığın Tavlama .....	45
2.3.3.3 Sürekli Tavlama.....	48
2.3.3.4 Yığın ve Sürekli Tavlamanın Karşılaştırılması .....	50
2.3.4 Temper Haddelme.....	53

2.3.4.1	Amacı ve Uygulanması .....	53
2.3.4.2	Etkileri ve Şekil Değişimi Yaşlanması .....	54
2.3.5	Çelik Sacları Kaplama Yöntemleri .....	56
2.3.5.1	Çinko ve Çinko Esaslı Kaplama Yöntemleri .....	57
2.3.5.2	Kalay Kaplama .....	59
2.3.5.3	Diğer Kaplama Çeşitleri .....	60
2.3.6	Soğuk Haddedeleme Kontrol .....	62
2.3.6.1	Kalıntı Kontrolü .....	64
2.3.6.2	Genişlik ve Kalınlık Kontrolü .....	64
2.3.6.3	İki Boyutlu Ölçümler .....	64
2.3.6.4	Düzlemsellik Ölçümü .....	65
2.3.6.5	Kaplama Kalınlığı Kontrolü .....	65
2.3.6.6	Yüzey Kontrolü .....	65
2.3.6.7	Nihai Özelliklerin Tahribatsız Yöntemlerle Değerlendirilmesi .....	66
2.3.7	Soğuk Haddedeleme Karşılaşılan Kusurlar .....	67
2.3.7.1	Şekil Bozuklukları .....	67
2.3.7.2	Yüzey Kusurları .....	70
3.	ÇELİK SACLARIN SINIFLANDIRILMASI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ..	71
3.1	Çelik Sacların Sınıflandırılması .....	71
3.1.1	Standartlar .....	74
3.1.1.1	Sıcak Haddelenmiş Çelik Sac Standartları .....	74
3.1.1.2	Soğuk Haddelenmiş Çelik Sac Standartları .....	83
3.2	Çelik Sacların Mekanik Özellikleri .....	88
3.2.1	Elastiklik Modülü .....	89
3.2.2	Akma Dayanımı .....	89
3.2.3	Çekme Dayanımı .....	91
3.2.4	Uzama ve Kesit Büzülmesi .....	91
3.2.5	Pekleşme Üsteli .....	93
3.2.6	Plastik Anizotropi Katsayısı .....	94
3.2.7	Gerinim Hızı Duyarlılığı Üsteli .....	96
3.3	Mekanik Özelliklerin Elde Edilmesi .....	98
3.4	Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinde Ortaya Çıkan Değişimler .....	101
3.5	Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinde Ortaya Çıkan Değişimlerin Nedenleri ..	105
3.5.1	İçyapıdan Kaynaklanan Temel Nedenler .....	106
3.5.2	Kimyasal İçeriğin Etkisi .....	113
3.5.3	Üretimden Kaynaklanan Nedenler .....	116
4.	ÇELİK SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ .....	126
4.1	Şekillendirme Yöntemleri .....	126
4.1.1	Bükme .....	126
4.1.2	Germe ile Şekillendirme .....	129
4.1.3	Derin Çekme .....	131
4.2	Çelik Saclara Uygulanan Şekillendirilebilirlik Deneyleri .....	139
4.2.1	Düzlemsel Gerinimli Çekme Deneyi .....	139
4.2.2	İki Eksenli Germe Deneyi .....	140
4.2.3	Bükme Deneyleri .....	141
4.2.4	Germe ile Şekillendirme Deneyleri .....	142
4.2.5	Derin Çekme Deneyleri .....	143
4.2.6	Germe-Derin Çekme Deneyleri .....	144

4.3	Şekillendirme Sınır Diyagramı.....	145
4.4	Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinin Şekillendirilebilirliklerine Etkileri.....	149
4.4.1	Elastiklik Modülünün Etkisi.....	151
4.4.2	Akma Dayanımının Etkisi.....	151
4.4.3	Çekme Dayanımının Etkisi.....	152
4.4.4	Uzamanın Etkisi.....	152
4.4.5	Pekleşme Üstelinin Etkisi.....	153
4.4.6	Plastik Anizotropi Değerinin Etkisi.....	154
4.4.7	Gerinim Hızı Duyarlılığı Üstelinin Etkisi.....	157
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	159
5.1	İncelenen Malzemenin Özellikleri.....	159
5.2	Numune Alma Prosedürü.....	161
5.3	Yapılan Deneyler ve Kullanılan Cihazlar.....	163
5.3.1	Çekme Deneyleri.....	163
5.3.2	Sertlik Deneyleri.....	166
5.3.3	Erichsen Deneyleri.....	167
5.3.4	İçyapının Görüntülenmesi.....	168
5.4	Deney Sonuçları.....	169
5.4.1	Çekme Deneyleri Sonuçları.....	169
5.4.2	Sertlik ve Erichsen Çökertme Deneyleri Sonuçları.....	182
5.5	Deney Sonuçlarının İrdelenmesi.....	183
6.	SONUÇLAR.....	202
	KAYNAKLAR.....	206
	EKLER.....	209
	Ek 1 Deney sonuçlarının ortalamaları.....	210
	Ek 2 Dayanım katsayısının değişimi.....	220
	ÖZGEÇMİŞ.....	221

## SİMGE LİSTESİ

$A_f$	Çekmede kopan yüzeylerin alanı
$A_{r_3}$	Östenit dönüşüm sıcaklığı
$b$	Çekme numunesi genişliği
$C$	Malzeme sabiti
$C_x$	Sac kenarından x mm uzakta olan bir noktayla merkez çizgi arasındaki kalınlık farkı
$c$	Istampa ile kalıp arasındaki boşluk
$D_{max}$	Başarılı olarak derin çekilebilen en yüksek ilkel pul çapı değeri
$D_0$	İlkel pul çapı
$d_k$	Kalıbın delik çapı
$d_0$	Istampa çapı
$E$	Elastiklik modülü
$e$	% nominal gerinim
$\dot{e}$	Nominal gerinim hızı
$e_k$	% kopma uzaması
$\bar{e}_k$	Haddeleme yönüne göre üç farklı doğrultudan alınan numunelerin % kopma uzaması ortalamaları
$e_{n-1}$	Soğuk haddelemenin n. tezgahında çelik sacın merdanelere giriş kalınlığı
$e_n$	Soğuk haddelemenin n. tezgahında çelik sacın merdanelerden çıkış kalınlığı
$e_u$	% maksimum üniform uzama
$\bar{e}_u$	Haddeleme yönüne göre üç farklı doğrultudan alınan numunelerin % maksimum üniform uzama ortalamaları
$e_1$	Dairesel ağılardan ölçülen büyük nominal asal gerinim
$e_2$	Dairesel ağılardan ölçülen küçük nominal asal gerinim
$F_{max}$	Çekme deneyinde en yüksek kuvvet
$F_N$	Pot çemberi kuvveti
$F_y$	Derin çekme deneylerinde yırtılmanın meydana geldiği kuvvet
$h_0$	Slabın merdanelere giriş kalınlığı
$h_1$	Slabın merdanelerden çıkış kalınlığı
$K$	Dayanım katsayısı
$\bar{K}$	Haddeleme yönüne göre üç farklı doğrultudan alınan numunelerin dayanım katsayısı ortalamaları
$k$	Bükmede malzeme sabiti
$L_f$	Kopan parçaların bir araya getirilmesi ile ölçülen boy
$L_0$	Çekme deneyi numunesinin ilk ölçü boyu
$l$	Bükmeden önceki parça eni
$l'$	Bükülme bölgesinde iç kısım genişliği
$l''$	Bükülme bölgesinde dış kısım genişliği
$m$	Gerinim hızı duyarlılığı üsteli
$N$	Merdanelerin saca uyguladığı normal kuvvet

$n$	Pekleşme üsteli
$\bar{n}$	Haddeleme yönüne göre üç farklı doğrultudan alınan numunelerin pekleşme üsteli ortalamaları
$p$	Pot çemberi basıncı
$R$	Merdane yarıçapı
$R_a$	Pürüzlülük değeri
$r$	Plastik anizotropi değeri
$\bar{r}$	Haddeleme yönüne göre üç farklı doğrultudan alınan numunelerin ortalama dikey anizotropi değerleri ortalamaları
$r_b$	Bükme bölgesinde iç kısım yarıçapı
$r_m$	Kalıp köşe yuvarlatması yarıçapı
$r_{st}$	Istampa ucu yuvarlatma yarıçapı
$r_0$	Haddeleme yönüne paralel doğrultunun plastik anizotropi değeri
$r_{45}$	Haddeleme yönüyle $45^0$ açı yapan doğrultunun plastik anizotropi değeri
$r_{90}$	Haddeleme yönüyle $90^0$ açı yapan doğrultunun plastik anizotropi değeri
$S$	Nominal gerilme
$S_A$	% 0,2 uzamadaki nominal akma gerilmesi
$\bar{S}_A$	Haddeleme yönüne göre üç farklı doğrultudan alınan numunelerin nominal akma gerilmesi ortalamaları
$S_C$	Nominal çekme gerilmesi
$\bar{S}_C$	Haddeleme yönüne göre üç farklı doğrultudan alınan numunelerin nominal çekme gerilmesi ortalamaları
$S_0$	Çekme deneyi numunesinin kesit alanının ilk değeri ( $\equiv A_0$ )
$T$	Merdanelerle slab arasındaki sürtünme kuvveti
$t$	Yassı ürün kalınlığı
$v_{çkm}$	Çekme hızı
$v_{max}$	Sıcak haddelemede en yüksek çalışma hızı
$v_{min}$	Sıcak haddelemede en düşük çalışma hızı
$v_{n-1}$	Soğuk haddelemenin n. tezgahında çelik sacın giriş hızı
$v_n$	Soğuk haddelemenin n. tezgahında çelik sacın çıkış hızı
$Z$	Kopmada kesit büzülme yüzdesi
$\alpha$	Çekme eğrisinin elastiklik bölgesinin eğimi
$\alpha$	Ferrit fazı
$\beta$	Gerinim oranı
$\gamma$	Östenit fazı
$\Delta h_{max}$	Kalınlık azalmasında çıkılabilecek en fazla değer
$\Delta r$	Düzlemsel anizotropi katsayısı
$\dot{\epsilon}$	Gerçek gerinim hızı
$\epsilon_l$	Uzunluk gerinimi
$\epsilon_t$	İncelme gerinimi
$\epsilon_u$	% maksimum üniform gerinim

$\varepsilon_w$	Daralma gerinimi
$\varepsilon_1$	Dairesel ağlardan ölçülen büyük gerçek asal gerinim
$\varepsilon_2$	Dairesel ağlardan ölçülen küçük gerçek asal gerinim
$\eta$	Derin çekmede deformasyon verimliliği
$\theta$	Bükme açısı
$\theta_b$	Yerel boyunlanma açısı
$\theta_m$	Haddelemede kavrama açısı
$\mu$	Sürtünme katsayısı
$\sigma_A$	% 0,2 uzamadaki gerçek akma gerilmesi
$\sigma_C$	Gerçek çekme gerilmesi
$\sigma_f$	Derin çekmede flanştaki akma gerilmesi
$\sigma_r$	Derin çekmede radyal gerilme
$\sigma_t$	Derin çekmede çevresel gerilme
$\sigma_w$	Derin çekmede cidardaki akma gerilmesi

## KISALTIMA LİSTESİ

ABS	American Bureau of Shipping
AISI	American Iron and Steel Industry
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards
CCT	Continuous Cooling Transformation
CQ	Commercial Quality
DCR	Double Cold Rolling
DIN	Deutsches Institut für Normung
DQ	Drawing Quality
DQSK	Drawing Quality Special Killed
EÇD	Erichsen Çökertme Değeri
EN	Euronorm
FKKD	Fukui Konik Kap Değeri
GYO	Geri Yaylanma Oranı
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HR	Hot Rolling
HRB	Hardness of Rockwell B
HV	Hardness of Vickers
IF	Interstitial Free
JIS	Japanese Industrial Standards
OÇD	Olsen Çökerme Değeri
PVC	Polivinil Clorid
RY	Redüksiyon Yüzdesi
SAE	Society of Automotive Engineers
SCGA	Steel Plate Cold Rolled Galvannealed
SCR	Single Cold Rolling
SDÇO	Sınır Derin Çekme Oranı
SEM	Scanning Electron Microscopy
ŞSD	Şekillendirme Sınır Diyagramı
TEM	Transmission Electron Microscopy
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TTT	Time Temperature Transformation
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione



## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Yassı çelik ürün elde eden bir entegre tesisin genel olarak üretim akışı.....	6
Şekil 2.2	Haddelenen yassı ürünlerin kesit boyutları için genel sınıflandırma .....	9
Şekil 2.3	Sürekli döküm yöntemi .....	10
Şekil 2.4	Yassı ürünlerin haddelenmesi .....	15
Şekil 2.5	Haddeleme başlangıcında saca etkiyen kuvvetler .....	16
Şekil 2.6	Basit merdane düzenleri .....	17
Şekil 2.7	Destekli haddeler .....	18
Şekil 2.8	Büyük kapasiteli sıcak haddeleme tesisinde üretim akışı .....	20
Şekil 2.9	Statik yeniden kristalleşmenin kinetiği .....	28
Şekil 2.10	Gerinim sertleşmesi ve yeniden kristalleşmeyle meydana gelen ardışık tane incelmesi .....	29
Şekil 2.11	Bir rulo çelik sacın farklı bölgelerinde çökelmiş AIN oranları .....	30
Şekil 2.12	Yassı çeliklerde haddeleme sırasında karşılaşılan başlıca kusurlar .....	32
Şekil 2.13	Sıcak haddeleme sırasında iş merdanelerinin bükülmesi .....	32
Şekil 2.14	Yassı üründe enine kalınlık değişimi .....	34
Şekil 2.15	Sürekli soğuk tandem haddeleme işlemi .....	38
Şekil 2.16	Tavlama ısıtma safhalarının metal özelliklerine etkisi .....	44
Şekil 2.17	Yığın tavlama fırınının şematik kesiti .....	46
Şekil 2.18	Sürekli tavlama hattı .....	49
Şekil 2.19	Sürekli döküm sırasında bir çelik sacın sıcaklık-süre grafiği .....	50
Şekil 2.20	Kalay kaplı bir çelik sacın kalınlık kesitindeki katmanlar ve kalınlıkları .....	59
Şekil 2.21	Sıcak ve soğuk haddelenmiş saclarda karşılaşılan farklı kalınlık kesiti profilleri ..	67
Şekil 2.22	Soğuk haddeleme değişkenlerine bağlı olarak meydana gelen kusurlar .....	68
Şekil 3.1	Mühendislik gerilmesi – mühendislik gerinimi eğrisinin temel nitelikleri .....	88
Şekil 3.2	Tavllanmış bir düşük karbonlu çelikte akma uzaması ve Lüders bantları .....	90
Şekil 3.3	Bir çekme numunesinde ortaya çıkan yayılı ve yerel boyunlanma .....	92
Şekil 3.4	Düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerine pekleşmenin etkisi .....	93
Şekil 3.5	$\bar{r}$ değerinin hesaplanması için çekme numunelerinin alınışı .....	95
Şekil 3.6	Gerinim hızı duyarlılığı üstelinin belirlenmesi için yöntemler .....	97
Şekil 3.7	EN 10002-1 standardına göre tek eksenli çekme deneyi numunesi ve boyutları ..	98
Şekil 3.8	ASTM E 8M standardına göre, saclar için çekme deneyi numunesi ve boyutları ..	99
Şekil 3.9	Toyota firmasının kendi standardına göre çekme deneyi numunesi boyutları .....	99
Şekil 3.10	Sıcak haddelenmiş düşük karbonlu sakınleştirilmemiş çelik sacların tipik mekanik özelliklerinin değişimi .....	103
Şekil 3.11	Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacların tipik mekanik özelliklerinin değişimi .....	103
Şekil 3.12	Metallerin içyapı değişkenleri .....	106
Şekil 3.13	HMK bir kristalin yönelme doğrultularının dayanım üzerindeki etkileri .....	107
Şekil 3.14	Sıcak haddelenmiş, soğuk haddelenmiş ve çift aşamalı soğuk haddelenmiş sacın $\alpha$ - ve $\gamma$ - fiber yapıları .....	108
Şekil 3.15	Soğuk haddelenmiş iki farklı çelik sac türünün, çeşitli oranlardaki haddelemeyle değişen, yönelme yapıları .....	109
Şekil 3.16	Soğuk haddelenmiş çelik sacın kutup biçimli içyapı görüntüsü ve bazı önemli yönelmeler .....	110
Şekil 3.17	Çeşitli malzemelerin tane boyutlarından faydalanılarak hesaplanan akma dayanımları üzerinde deformasyon sıcaklığının etkisi .....	111
Şekil 3.18	Çeşitli malzemelerin içyapı görüntülerinden faydalanılarak elde edilen ortalama $r$ değerleri üzerinde deformasyon sıcaklığının etkisi .....	111

Şekil 3.19 Geliştirilmiş yüksek dayanımlı çeliğin mikroyapısının önceki sıradan çelikle karşılaştırılması.....	112
Şekil 3.20 Titanyumun oluşturduğu bileşiklerin SEM yöntemiyle görüntülenmesi .....	115
Şekil 3.21 Çökeltinin TEM görüntüsü.....	122
Şekil 4.1 En yaygın bükme işlemleri.....	127
Şekil 4.2 Bükme bölgesinde nötr eksenin kayması ve şekil bozuklukları.....	127
Şekil 4.3 Bükme yönünün anizotropiyle ilgisi .....	129
Şekil 4.4 Yarıküresel uçlu ıstampayla germe işlemi .....	129
Şekil 4.5 Yarıküresel ıstampayla yapılan sürtünmeli ve sürtünmesiz germe işleminde sac kalınlığındaki gerinim dağılımı .....	130
Şekil 4.6 Silindirik bir kabın derin çekilmesi.....	131
Şekil 4.7 Derin çekmede oluşan farklı gerilme bölgeleri .....	132
Şekil 4.8 Derin çekme işleminde malzeme akışı ve etkiyen gerilmeler.....	133
Şekil 4.9 Pot çemberi kuvvetinin sınır derin çekme oranına ve kusur bölgelerine etkisi.....	134
Şekil 4.10 Kısmi derin çekilmiş bir kabın analizi için gerekli boyutlar ve eksen takımları... ..	135
Şekil 4.11 Köşeli derin bir parçanın üç boyutlu deformasyon ağı görüntüsü .....	137
Şekil 4.12 Çeşitli derin çekme yöntemleri.....	138
Şekil 4.13 Düzlemsel gerinimli çekme deneyi numunesi .....	139
Şekil 4.14 Malzemenin iki eksenli gerinim durumunu yansıtan hidrolik şişirme deneyi .....	140
Şekil 4.15 ASTM E 290 standardına göre basit bükme deneyi.....	141
Şekil 4.16 Olsen çökertme deney düzeneğinin elemanları ve boyutları.....	142
Şekil 4.17 Düz silindirik ıstampalı Swift deney düzeneğinin elemanları ve boyutları .....	143
Şekil 4.18 Fukui konik kap deney düzeneğinin elemanları ve yırtılmış numune.....	145
Şekil 4.19 Şekillendirme öncesinde yüzeye uygulanan dairesel ağ görüntüsü ve deformasyon sonrasında bunların dönüştükleri elipslerin boyutları.....	146
Şekil 4.20 Değişik endeki sac numunelerin şişirilmesi deneyi .....	147
Şekil 4.21 Şekillendirme sınır diyagramının dört adet deney numunesi ile uygulanması .....	148
Şekil 4.22 Çelik sacların şekillendirilebilirliklerine etki eden faktörler.....	149
Şekil 4.23 Malzemenin belirtilen özelliklerinin sabit kalması koşuluyla, pekleşme üstelinin artımı ile gerilme-gerinim eğrisinin değişimi .....	153
Şekil 4.24 Pekleşme üstelinin $\dot{\epsilon}_{SD0}$ değerine etkisi.....	154
Şekil 4.25 Haddeme yönlerine göre kulaklanmanın ve cidar yüksekliklerinin değişimi ....	156
Şekil 4.26 Malzemenin belirtilen özelliklerinin sabit kalması koşuluyla, gerinim hızı duyarlılığı üstelinin artımı ile gerilme-gerinim eğrisinin değişimi .....	157
Şekil 5.1 Toyota firmasının otomobillerinde kullandığı yağ karteri .....	159
Şekil 5.2 İncelenen yağ karterinin taslak sacı boyutları .....	160
Şekil 5.3 Numune alma prosedürü ve numune taslaklarının adlandırılması .....	162
Şekil 5.4 Çekme deneylerinin uygulandığı Instron 5582 modellenli test makinesi.....	164
Şekil 5.5 Instron-Bluehill yazılım programından bir görüntü .....	164
Şekil 5.6 Çekme deneyleri numunelerinin nominal ölçüleri ve dairesel işaretler .....	165
Şekil 5.7 Deneyler sırasında fotoğraflanan numuneler; kopmuş, uzamış ve çekilmemiş ....	166
Şekil 5.8 Erichsen çökertme deneyi cihazı .....	167
Şekil 5.9 Çökertilmiş Erichsen deney numuneleri .....	168
Şekil 5.10 İçyapısı incelenen, bakalite alınmış, parlatılmış ve dağlanmış numune ile x100 büyütme içyapı görüntüsü .....	168
Şekil 5.11 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 1D1L – 1D2L .....	172
Şekil 5.12 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 1D2M – 1D3M.....	173
Şekil 5.13 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 1D3R – 1D4R.....	174
Şekil 5.14 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 2D1L – 2D2L .....	175
Şekil 5.15 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 2D2M – 2D3M.....	176
Şekil 5.16 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 2D3R – 2D4R.....	177

Şekil 5.17 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 3D1L – 3D2L .....	178
Şekil 5.18 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 3D2M – 3D3M.....	179
Şekil 5.19 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 3D3R – 3D4R.....	180
Şekil 5.20 İmalatta tespit edilen kusurlu parçalara yakın bölgelerden alınan numunelerle yapılan çekme deneyleri grafikleri .....	181
Şekil 5.21 Akma dayanımının döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi .....	186
Şekil 5.22 Akma dayanımının rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi .....	187
Şekil 5.23 Çekme dayanımının döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi .....	188
Şekil 5.24 Çekme dayanımının rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi .....	189
Şekil 5.25 % Üniform uzama değerinin döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi .....	190
Şekil 5.26 % Üniform uzama değerinin rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi.....	191
Şekil 5.27 Kopma uzaması yüzdesi değerinin döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi .....	192
Şekil 5.28 Kopma uzaması yüzdesi değerinin rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi.....	193
Şekil 5.29 Pekleşme üstelinin döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi .....	194
Şekil 5.30 Pekleşme üstelinin rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi .....	195
Şekil 5.31 Plastik anizotropi katsayısının döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi .....	196
Şekil 5.32 Plastik anizotropi katsayısının rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi.....	197

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	Erdemir T.A.Ş.'nin 2003-2004 Yıllarında Sektörlere Göre Müşteri Dağılımı	2
Çizelge 2.1	Sürekli döküm işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri	13
Çizelge 2.2	Sürekli döküm işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri	13
Çizelge 2.3	Hız arttırma yöntemiyle bitiş hadde grubunda örnek haddeleme	23
Çizelge 2.4	Sıcak haddeleme işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri	31
Çizelge 2.5	Sıcak haddeleme işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri	31
Çizelge 2.6	İki farklı atmosferle yapılan yığın tavlama süreçleri ve etkileri	48
Çizelge 2.7	Alüminyumla sakınleştirilmiş iki aynı cinsten malzemenin tavlama yöntemlerine göre mekanik özelliklerinin değişimi	51
Çizelge 2.8	Farklı tavlama şartlarında % 100 yeniden kristalleşen aynı kalitedeki çelik sacların mekanik özelliklerinin değişimi	51
Çizelge 2.9	Şekil değişimi yaşanması sırasında mekanik özelliklerin değişimi	55
Çizelge 2.10	Soğuk haddeleme işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri	63
Çizelge 2.11	Soğuk haddeleme işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri	63
Çizelge 3.1	Sıcak haddelenmiş çelik sac standartları	74
Çizelge 3.2	Soğuk şekillendirmeye ve derin çekme işlemine uygun sıcak haddelenmiş çelik sacların mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri – EN 10111:1998	75
Çizelge 3.3	Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelik sacların mekanik özellikleri – EN 10149-2:1996	76
Çizelge 3.4	Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelik sacların kimyasal içerikleri – EN 10149-2:1996	76
Çizelge 3.5	Yapı çelikleri sınıfındaki sıcak haddelenmiş çelik sacların mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri – EN 10025:1993	77
Çizelge 3.6	Kaynak edilebilir ince taneli sıcak haddelenmiş yapı çeliklerinin mekanik özellikleri – EN 10113-2(-3):1993	77
Çizelge 3.7	Kaynak edilebilir ince taneli sıcak haddelenmiş yapı çeliklerinin kimyasal içerikleri – EN 10113-2(-3):1993	78
Çizelge 3.8	Su verilebilir bor alaşımlı çelik sacların kimyasal içerikleri – EN 10083-3:1995	79
Çizelge 3.9	Su verilebilir bor alaşımlı çelik sacların ortalama mekanik özellikleri	79
Çizelge 3.10	Sementasyon çelikleri sınıfındaki çelik sacların kimyasal içerikleri – EN 10084:1998	80
Çizelge 3.11	Boru çeliklerinin mekanik özellikleri – API 5L:2000	80
Çizelge 3.12	Boru çeliklerinin kimyasal içerikleri – API 5L:2000	80
Çizelge 3.13	Basınçlı kap ve kazan çeliklerinin mekanik özellikleri – EN 10028-2:2003, EN 10207:2005, EN 10028-3:2003 ve EN 10028-5:2003	81
Çizelge 3.14	Basınçlı kap ve kazan çeliklerinin kimyasal içerikleri – EN 10028-2:2003, EN 10207:2005, EN 10028-3:2003 ve EN 10028-5:2003	82
Çizelge 3.15	LPG tüp çelikleri sınıfından çelik sacların mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri – EN 10120:1997	82
Çizelge 3.16	Gemi yapım çeliklerinin mekanik özellikleri ile kimyasal içerikleri – ABS-P2-00	83
Çizelge 3.17	Soğuk haddelenmiş çelik sac standartları	83
Çizelge 3.18	Soğuk şekillendirme ve derin çekme işlemlerine uygun soğuk haddelenmiş çelik sacların mekanik özellikleri – EN 10130:1999	84
Çizelge 3.19	Soğuk şekillendirme ve derin çekme işlemlerine uygun soğuk haddelenmiş çelik sacların kimyasal içerikleri – EN 10130:1999	84
Çizelge 3.20	ASTM Standartlarına göre soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacların mekanik özellikleri	86

Çizelge 3.21 ASTM Standartlarına göre soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacların kimyasal içerikleri .....	86
Çizelge 3.22 Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelik sacların mekanik özellikleri – EN 10268:1999 .....	87
Çizelge 3.23 Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelik sacların kimyasal içerikleri – EN 10268:1999 .....	87
Çizelge 3.24 Soğuk haddelenmiş yapı çeliklerinin mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri – DIN 1623-2:1986 .....	88
Çizelge 3.25 EN 10002-1 standardına göre tek eksenli çekme deneyi numunelerinin çeşitleri ve boyutları .....	98
Çizelge 3.26 Farklı dökümlerden alınan ancak aynı işlemleri görmüş, çok düşük karbonlu çelik sacların mekanik özellikleri.....	105
Çizelge 5.1 SCGA 270 D derecesindeki çelik sacın mekanik özelliklerinin, bazı alt ve üst dereceler ile birlikte gösterilmesi – TSG 3109 G.....	161
Çizelge 5.2 Çekme deneyi numuneleri boyutlarının ölçülmesiyle elde edilen değerlerden alt ve üst sınırlar ile ortalamalar .....	165
Çizelge 5.3 Çekme deneyleri sonuçları .....	169
Çizelge 5.4 İmalatta tespit edilen kusurlu parçalara yakın bölgelerden alınan numunelerle yapılan çekme deneyleri sonuçları .....	182
Çizelge 5.5 Erichsen çökertme ve sertlik deneyleri sonuçları.....	182
Çizelge 5.6 Elde edilen tüm çekme deneyleri sonuçlarının farklı doğrultulara göre ortalamalarının farklı döküm paketleri için gösterilmesi .....	183
Çizelge E.1 Akma dayanımı ortalamaları.....	210
Çizelge E.2 Çekme dayanımı ortalamaları .....	211
Çizelge E.3 Maksimum üniform uzama yüzdesi ortalamaları .....	212
Çizelge E.4 Kopma uzaması yüzdesi ortalamaları .....	213
Çizelge E.5 Pekleşme üsteli ortalamaları .....	214
Çizelge E.6 Ortalama dikey anizotropi değerleri ortalamaları .....	215
Çizelge E.7 Düzlemsel anizotropi değerleri ortalamaları.....	216
Çizelge E.8 Dayanım katsayısı ortalamaları.....	217
Çizelge E.9 Sertlik değerleri ortalamaları .....	218
Çizelge E.10 Erichsen değerleri ortalamaları .....	219

## ÖNSÖZ

Başta otomotiv sanayii olmak üzere, gemi ve uçak endüstrilerini, beyaz eşya üreticileri ile birlikte, makine parçaları ve mutfak eşyaları imalatçıları ve sanayinin daha birçok dalını yakından ilgilendiren çelik sacların şekillendirilmesi konusu, her geçen gün daha çok önem arz etmekte ve araştırılmaktadır. İncelemeler, operasyonlar sırasında karşılaşılan güçlükler odaklanarak, çalışmalar, çelik sac üreticileriyle birlikte müşterilerin koordinasyonunu gerektirmektedir. Çünkü, pres operasyonları için aranan mekanik özellikleri sağlayan; uygun çelik sac seçilmiş olsa bile, şekillendirme sorunsuz devam etmemektedir. Bu sorunlardan en mühim olanı, işlem değişkenlerinden ziyade, malzemenin sahip olduğu mekanik özelliklerdeki tutarsızlıklardır.

Aynı şekillendirme koşulları altında imal edilmiş çelik sac rulosunun farklı bölgelerinde ortaya çıkan özellik değişimlerinin nedenleri araştırılırken, öncelikle çelik sac üretimi için gerekli olan bilgi birikiminin üzerinde durulması gerekmektedir. Diğer taraftan, bu mekanik özellik değişimlerinin şekillendirme proseslerine etkileri konusunun incelenmesi için ise şekillendirme işlemlerinin ve şekillendirilebilirliğin incelenmesinde fayda vardır.

Yüksek lisans tezimin tez danışmanlığını yürüten ve bu önemli konuyu incelemem için bana öneren, ayrıca deneysel çalışmalarımın gerçekleşmesi için bana zemin hazırlayan değerli hocam Sayın Prof. Mehmet Emin YURCİ'ye teşekkürü bir borç bilirim. Bünyesinde tezimin deneysel çalışmalarını yürüttüğüm Ermetal A.Ş.'nin giriş-kalite bölümünün çalışanlarına ve fizik laboratuvarı çalışanlarına, bilhassa yüksek mühendis Sayın Cemil Günhan ERHUY'a ve laboratuvar sorumlusu Sayın Rahmi ŞAHİNBAŞ'a teşekkür ederim.

Ayrıca son olarak, hayatım boyunca en zor zamanlarımda desteklerini benden esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bildiğimi buradan ifade etmek isterim.

## ÖZET

Çelik saclar çok çeşitli biçimlerdeki parçalara şekillendirilirler ve sanayinin birçok dalında geniş kullanım alanına sahiptirler. Şekillendirme işlemi sırasında sacda meydana gelen yırtılma veya bölgesel boyunlanma gibi nedenlerle oluşan ıskartalar, imalatın sürekliliğini, ekonomikliğini ve kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle üretim kayıpları, iyi şekillendirilebilirliğe sahip uygun çelik sacın seçilmesiyle ve ayrıca tekbiçim mekanik özelliklere sahip çelik sacın kullanılmasıyla denetim altında tutulmalıdır. Aynı kalite derecesinde olan çelik sacın mekanik özellikleri, üretildiği firmadan firmaya, aynı firmada dökümden döküme, aynı dökümden rulodan ruloya ve rulonun değişik bölgelerine göre çeşitlenmektedir. Dar değişim aralıklarında mekanik özelliklere sahip şekillendirilebilir çelik saclar; metalürjik faktörlerin denetimi, sıcak ve soğuk haddeme ve tavlama gibi çelik üretim aşamalarının optimum kontrolüyle üretilirler.

Bu çalışmada, ilk olarak çelik sacların üretim aşamaları incelenmiş ve her bir aşamada, mekanik özelliklerin değişimlerine neden olan etkenlere değinilmiştir. Çelik sac standartları araştırılmış ve sıcak ve soğuk haddelenmiş çelik saclar olarak iki grupta açıklanmıştır. Çelik sacların tipik mekanik özellikleri ve elde edilme yöntemleri anlatılmıştır. Çeşitli üretim aşamalarıyla farklı kalitelerde üretilen sacların mekanik özelliklerinin değişimleri, önceden yapılmış çalışmaların da yardımıyla incelenmiştir. Mekanik özelliklerin değişim nedenlerinin anlaşılabilmesi için, bazı temel metalürjik kavramlara değinilmiştir. Buna ek olarak, sac metalin kimyasal içeriğinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi açıklanmış ve mekanik özelliklerin arzu edilen değerlerden sapmalarına neden olan bütün üretim aşamalarının işlem değişkenleri özet halinde listelenmiştir. Daha sonra, çeşitli sac metal şekillendirme yöntemleri, bazı mekanik deneyler ve şekillendirme sınır eğrilerine değinilmiştir. Mekanik özelliklerin çelik sac şekillendirilebilirliğine etkisi anlatılmıştır.

Malzemenin şekillendirilme kabiliyetini gösteren parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla, geliştirilen numune alma prosedürüne bağlı olarak, aynı standart kalitesindeki saclar arasında dökümden döküme, rulonun değişik bölgelerinde ve haddeme doğrultusuna göre farklı açılarda mekanik özelliklerin nasıl değiştiği incelenmiştir. Tek eksenli çekme deneyi makinesi kullanılarak incelenen çelik sac, 1,2 mm kalınlığında ve SCGA 270 D kalite derecesinde soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacdır. Malzemenin tane boyutunun bulunması için, yalnızca bir numune üzerinde elektron mikroskopu analizi uygulanmıştır. Yapılan diğer deneyler, sertlik ve Erichsen deneyleridir. Tanımlanan bütün durumlarda mekanik özelliklerin farklılaştıkları gözlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Tekbiçim, tutarlılık, şekillendirilebilirlik, sıcak haddelenmiş, soğuk haddelenmiş, içyapı değişkenleri, şekillendirme sınır eğrileri.

## ABSTRACT

Steel sheets are formed into various shapes and have a wide usage in many industries. The scrapping caused by the breaking or the localized necking of the sheet during the forming process affects the continuity, economy and quality of the production in a negative way. Therefore, the production losses must be controlled by selection of proper steel sheet with good formability and also by using steel sheets that have uniform mechanical properties. The mechanical properties of the same quality steel sheets differ from company to company, from cast to cast of the same company, from coil to coil of the same cast and in different regions of the coil. Formable steel sheets with tight range of mechanical properties are produced by controlling metallurgical factors and optimizing steelmaking, hot rolling, cold rolling and annealing processes.

In this study, the production stages of steel sheets were studied first. The factors in each sector that cause mechanical properties to change were mentioned. The steel sheet standards were studied and they were classified in two groups as hot rolled and cold rolled steel sheets. Typical mechanical properties of steel sheets were explained and the methods to attain them were mentioned. The ranges of mechanical properties typical of sheet produced by various production stages in different qualities were investigated with the aim of the studies which were made beforehand. To understand the reasons of the changes of mechanical properties, some fundamental metallurgical concepts were mentioned. In addition to this, the act of chemical composition of sheet metal in mechanical properties were described and process variants of all production stages that cause mechanical properties to deviate from desired values were summarized. Several sheet metal forming methods, some mechanical tests and forming limit curves were mentioned then. The affects of mechanical properties to steel sheet formability were explained.

In order to determine the parameters indicating the formability of the material, by the help of new developed sampling method, it was searched if the material properties differ from cast to cast, in different regions of the coil and in orientations relative to the rolling direction. The steel sheet investigated by using a uniaxial tensile test was 1,2 mm in thickness and SCGA 270 D in quality degrees as cold rolled low-carbon steel sheet. To find the grain size of the material, an electron microscope analysis was applied to only one sample. The other tests were hardness test and Erichsen test. It was observed that the mechanical properties differ in all defined situations.

**Keywords:** Uniform, consistency, formability, hot rolled, cold rolled, microstructure variables, forming limit curves.



## 1. GİRİŞ

Çelik saclar, günümüz modern toplumunun artan ihtiyaçlarını karşılama doğrultusunda çok büyük öneme sahiptir. Kara, deniz, hava ve uzay taşıtları, çeşitli ev eşyaları ve makineleri, endüstriyel araç-gereçler, endüstriyel yapılar ile makine imalatı, inşaat sektörü ve daha birçok alanlardaki uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Bu şekilde yaygın kullanılmalarının dikkat çeken nedenlerinden bazılarını sıralayacak olursak; diğer alternatif malzemelere nazaran daha dayanımlı, daha ucuz olmaları, kolay işlenebilme, şekillendirilme ve birleştirilebilme özelliklerine sahip olmaları ile güzel görünüm özellikleri başta gelir. Ancak çok çeşitliliğe sahip olması da not edilmesi gereken ayrı bir özelliktir. Gerçekten de belirli bir iş için çok önemli ve zor bir görev olan en iyi malzemeyi seçme işini yapan tasarımcının, hesaba katacağı birçok etkenden biri olan mekanik özellikler bakımından düşünürsek, çelik sacların bu konuda nasıl geniş bir yelpazeye sahip olduğu karşımıza çıkmaktadır. Örneğin, soğuk şekillendirmeye uygun düşük karbonlu çinko-demir alaşımı ile kaplanmış galvanile DIN-EN 10142-00 standardındaki çelik sacın akma dayanımı ortalama  $150 \text{ N/mm}^2$ , çekme dayanımı ortalama  $310 \text{ N/mm}^2$  ve % uzama değeri 36 iken, sıcak haddelenmiş yüksek karbonlu alaşımsız yapı çeliği olan DIN-EN 10025-94 standardındaki çelik sacın akma dayanımı ortalama  $350 \text{ N/mm}^2$ , çekme dayanımı ortalama  $800 \text{ N/mm}^2$  ve % uzama değeri 8'dir. Piyasada ve standartlarda bu iki uç örnek çelik sac arasında yüzlerce çeşit sac bulunmaktadır.

Dünyada çelik üretimi her yıl bir önceki yıla oranla sürekli artmaktadır ve üretimin miktarına bakıldığında, 2004 yılında 1 milyar tonun üzerinde çeliğin üretildiği görülür. Çin, Japonya, ABD ve Rusya gibi dev ülkeler sırasıyla dünya ham çelik üretiminde başı çekmektedirler. 2004 yılına göre 16,6 milyon ton çelik tüketen Türkiye ise 20,5 milyon tonluk üretimiyle dünya ham çelik üretiminde 12. sırada yer almıştır, dolayısıyla tükettiğinden fazla üretip, çelik ihraç eden ülke konumuna gelmiştir. Çin'den sonra % 11,9'luk üretim artışıyla dünyada en hızlı büyüme başarısını gösteren ikinci ülke konumunda olan Türkiye'nin çelik sektöründe; yılda 3,6 milyon tonluk nihai ürünle ülkemizin ilk ve en büyük yassı çelik üreten kuruluşu Erdemir T.A.Ş.'nin katkıları büyüktür. Çelik sac üretimi denilince ülkemizde ilk akla gelen bu kuruluşun 2003-2004 yıllarında sektörlere göre müşteri dağılımı tablosuna bakıldığında (Çizelge 1.1) göze çarpan iki ana sektör; otomotiv ve yan sanayisi ile boru ve profil imalatı sektörleri olarak karşımıza çıkmaktadır [1].

Ülkemizdeki bu iki sektör arasında ise, otomotiv ve yan sanayisi sektörünün çelik sac kullanımında, çarpıcı bir biçimde artışı görülmektedir.

Çizelge 1.1 Erdemir T.A.Ş.'nin 2003-2004 Yıllarında Sektörlere Göre Müşteri Dağılımı [1]

	Çelik Servis Merkezleri ve Tüccarlar	Boru ve Profil İmalatı	Otomotiv ve Yan Sanayisi	İkincil Üreticiler	Isıl Gereçleri, Ev ve Büro Eşyaları İmalatı	Ambalaj Malzemeleri İmalatı	Makine, Elektrikli Ev Aletleri, Gemi, Konteynır İmalatı
2003	% 32,3	% 22,8	% 11,9	%12	%11,9	% 11,9	% 3,1
2004	%21,2	% 19	% 17,5	% 17,1	% 14,4	% 6,8	% 4

Otomotiv endüstrisinde kullanılan parçalar çok çeşitlidir, ki bir otomobil karoseri oluşturmak için yüzlerce küçük parçanın kaynakla birleştirilmesi gereklidir. Ayrıca bu çeşitliliğin arasında karmaşık şekilli parçaların oranı büyüktür; örneğin, şekillendirilirken içinde derin çekme işlemi de barındıran beş operasyonlu bir otomobil yağ karteri dış sacı gibi. Bu tip parçalar yoğun araştırma-geliştirme çalışmaları sonrasında tasarlanıp imal edilirken, şekillendirilebilirliklerine etki eden faktörlerden malzeme faktörünün incelenmesi doğrultusunda uygun malzemeyi seçmek için yapılan araştırmalar sırasında çelik üretici firmalarla temas halinde olunur ve dolayısıyla onlar da sık sık yeni tipte malzemeler üretmeye sevk edilirler. Bir örnek vermek gerekirse, 2004 yılına kadar Erdemir T.A.Ş.'de 189 olan çelik kalitesi adedine ilaveten 2004 yılında 61 adet yeni çelik kalitesi geliştirilmiştir ve bunların 26 tanesi ülkemizde üretim yapan otomotiv fabrikalarının isteği doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, otomotiv ve yan sanayisi, imalatında titizlik gerektiren, kaliteli çelik sac üretiminin öncü sektörü olmuştur [1].

Çelik saclar, sıcak haddelenmiş ve soğuk haddelenmiş olarak iki gruba ayrılırlar. Sıcak haddelenmiş rulo ve saclar, sıvı çeliğin, sürekli döküm yöntemiyle katılaştırılması sonucu meydana gelen ve slab olarak adlandırılan, dikdörtgen kesitli yarı ürünün, sıcak olarak haddelenmesi ile elde edilirler ve bunların kalınlıkları 1,50 - 5,00 mm arasında değişir. Soğuk haddelenmiş çelik saclar da piyasada rulo veya dilinmiş-paketlenmiş sac olarak bulunurlar ve sıcak haddelenmiş yassı çeliklerin soğuk haddehanede soğuk olarak haddelenmesi sonucunda elde edilirler. Kalınlıkları, 0,30-2,00 mm aralığında değişmektedir. Soğuk haddelenmiş çelikler de genel olarak kaplamalı ve kaplamasız olarak iki grupta toplanabilir. Galvanizli çelik saclar, soğuk haddelenmiş yassı çeliklerin sıcak daldırma yöntemiyle çeşitli ağırlıklarda çinko kaplanması ile üretilen ve kalınlıkları 0,3-2,00 mm aralığında değişen kaplamalı yassı çeliklerdir. Bir diğer çeşit kaplamalı çelik saclar da kalay / krom kaplı rulo ve saclardır.

Bunlar da soğuk haddelenmiş yassı çeliğin elektroliz yöntemiyle çeşitli ağırlıklarda kalay veya krom kaplanması ile üretilir ve kalınlıkları 0,20-0,60 mm aralığında değişir [4], [6].

Haddeleme yöntemine göre gruplamanın yanı sıra, ayrıca kimyasal bileşimlerine göre de çelik saclar; düşük karbonlu, yüksek karbonlu, alaşımlı veya alaşımsız olarak adlandırılabilirler. Ancak belli bir standart numarası olan herhangi bir sacın tam olarak tanımlanabilmesi için adlandırılması, çoğunlukla tüm sınıflandırma biçimlerini içerir. Mesela, “ekstra derin çekme işlemine uygun çok düşük karbonlu otomotiv endüstrisine yönelik soğuk haddelenmiş çelik sac” gibi uzun ve açıklayıcı bir tanımla piyasada yaygın olarak karşılaşılır.

Sıcak haddelenmiş sacların yüzeylerindeki oksit tabakaları, az miktar korozyona karşı koruma sağlasa da, pres operasyonlarında dökülmesi ile dezavantaj teşkil ederler. Bu sebepten, yüzeylerindeki oksit tabakasının dekapaj yöntemi ile temizlenmesi gerekmektedir. Soğuk haddelenen saclar ise pekleşme nedeniyle sünekliklerini kaybederler, dolayısıyla süneklik özellikleri, haddeleme sonrası tavlama ile yeniden kazandırılmaktadır. Soğuk haddeleme ile daha düşük kalınlıkların yanında sacların yüzey kalitesi ve malzeme özellikleri de daha kontrollü olarak elde edilmektedir.

Sıcak ve soğuk olarak haddelenen çelik saclar pres operasyonlarında; bükme, germe, derin çekme gibi temel şekillendirme prensiplerinden birinin (örneğin bir makine gövdesi dış sacının basit bükme işleminde olduğu gibi) veya aynı anda bir kaçının (otomobil yakıt tankının imalatındaki gibi) uygulamaya maruz bırakıldığı yöntemlerle biçimlendirilmektedirler. Özellikle, bu temel şekillendirme işlemlerinden her birini de içinde barındıran karmaşık şekillendirme proseslerinin hatasız olarak başarılabilmesi için, elde edilecek parçanın şekillendirilmesine etki eden faktörlerin önceden bilinmesinde fayda vardır.

Sac metalden imal edilen parçanın şekillendirilebilirliğini etkileyen bir çok faktör vardır. Bunlar, işlem faktörleri ve malzeme faktörleri olarak iki ana gruba ayrılabilir. İşlem faktörleri; kalıp-ıstamp geometrisi, pres değişkenleri, sıcaklık ve yağlama gibi faktörleri içererek, genelde saca uygulanacak olan zorlanmanın cinsini saptar. Malzeme faktörleri ise; mekanik özellikler, sac geometrisi, kimyasal ve metalürjik özellikleri kapsayarak, bu zorlanmaya karşı dayanabilecek malzemenin cinsini saptamaktadır. Dolayısıyla, zorlanmanın cinsi veya malzemenin cinsi, hangisi değiştirilecek olursa olsun parçanın şekillendirilebilirliği etkilenecektir.

Sacların şekillendirilebilirliği, malzemelerin mekanik ve metalürjik özellikleri ile büyük değişimler göstermektedir. Bu özellikler, malzemelerin kimyasal bileşimi, döküm tekniği ve

haddelenmesi ile uygulanan ısıt işlemlerden oluşan termo-mekanik geçmişlerine bağlıdır. Bu nedenlerden ötürü, çelik sacların birbirlerinden farklılaşmalarının, şekillendirme açısından ele alınıp karşılaştırılmalarına olanak sağlayan şekillendirme karakteristikleri, çeliğin, tek eksenli çekme testinden elde edilen mekanik özelliklerinin analizi vasıtasıyla belirlenmektedir. Bu tip tek eksenli çekme testi, piyasadaki herhangi bir şekillendirme işlemi açıklamak için tek başına yeterli olmasa da, bu testlerden elde edilen sonuçlar evrensel olarak yıllar boyu şekillendirilebilirliği değerlendirmede kullanıla gelmiştir. Basit çekme testinden elde edilen mekanik özellikler; akma dayanımı, çekme dayanımı, % uzama (maksimum üniform uzama ve kopma uzaması), elastiklik modülü, pekleşme üsteli, plastik anizotropi katsayısı, gerinim hızına duyarlılık üsteli ve dayanım katsayısından ibarettir. Bunlara ilave olarak, sertlik deneylerinden elde edilen malzemenin sertlik değeri de mekanik özellikler arasında telaffuz edilir. Çekme testlerinden elde edilen uzama değerlerinin artması, sünekliliğin artımı ve bu nedenle de şekillendirilebilirliğin artımı anlamındadır. Ancak uzama değeri arttıkça, dayanım ve sertlik azalır. Sac parçanın kullanımı sırasında, ondan asgari olarak bir dayanım değerine sahip olması beklendiğinden dolayı, isteklerle en iyi şekilde örtüşen uzama değeri ile dayanıma aynı anda sahip çelik sacın seçilmesi gereklidir.

Malzeme değişkenlerinin yürütülecek proses için uygun olduğu saptanan ve işlem değişkenleri de o koşullara optimum şekilde ayarlanan bir çelik sacın şekillendirilmesi, bazen beklenildiği gibi sorunsuz gerçekleşmemektedir. Bu beklenmedik durumlar çoğu zaman, aynı standart kalitesindeki çelik sacın mekanik özelliklerinin; üretildiği firmadan firmaya, aynı fabrikada bir dökümden (şarj) diğer döküme, bir rulodan diğerine göre ve aynı rulonun değişik bölgelerinde farklılıklar göstermesinden ileri gelmektedir. Mekanik özelliklerde bu bakımlardan ortaya çıkan değişimler, çelik sac üreten firmaları, standartlarında, mekanik özelliklerin belli aralıklarda, belli sınırlar dahilinde beyan edilmesine zorlamaktadır. Şöyle ki, örneğin, DIN-EN 10111-98 standardına uygun, kullanım alanı jant çelikleri olan düşük dayanımlı sıcak haddelenmiş çelik sacı, Erdemir T.A.Ş.; akma dayanımı  $170-360 \text{ N/mm}^2$ , çekme dayanımı en fazla  $440 \text{ N/mm}^2$  ve % uzama değeri ilk ölçü boyu  $L_0=80\text{mm}$  için en az 23 toleranslarında sunmaktadır [1]. Bu örnekten anlaşılmaktadır ki, satın alınan çelik sacın akma dayanımı  $170 \text{ N/mm}^2$  ile  $360 \text{ N/mm}^2$  arasında herhangi bir değerde olabilir. Bu büyük bir tolerans aralığıdır ve çelik sacın takip eden şekillendirme operasyonlarında ve belli standartlarda ürün çıkarma konusunda üreticilere sorunlar çıkarabilmektedir.

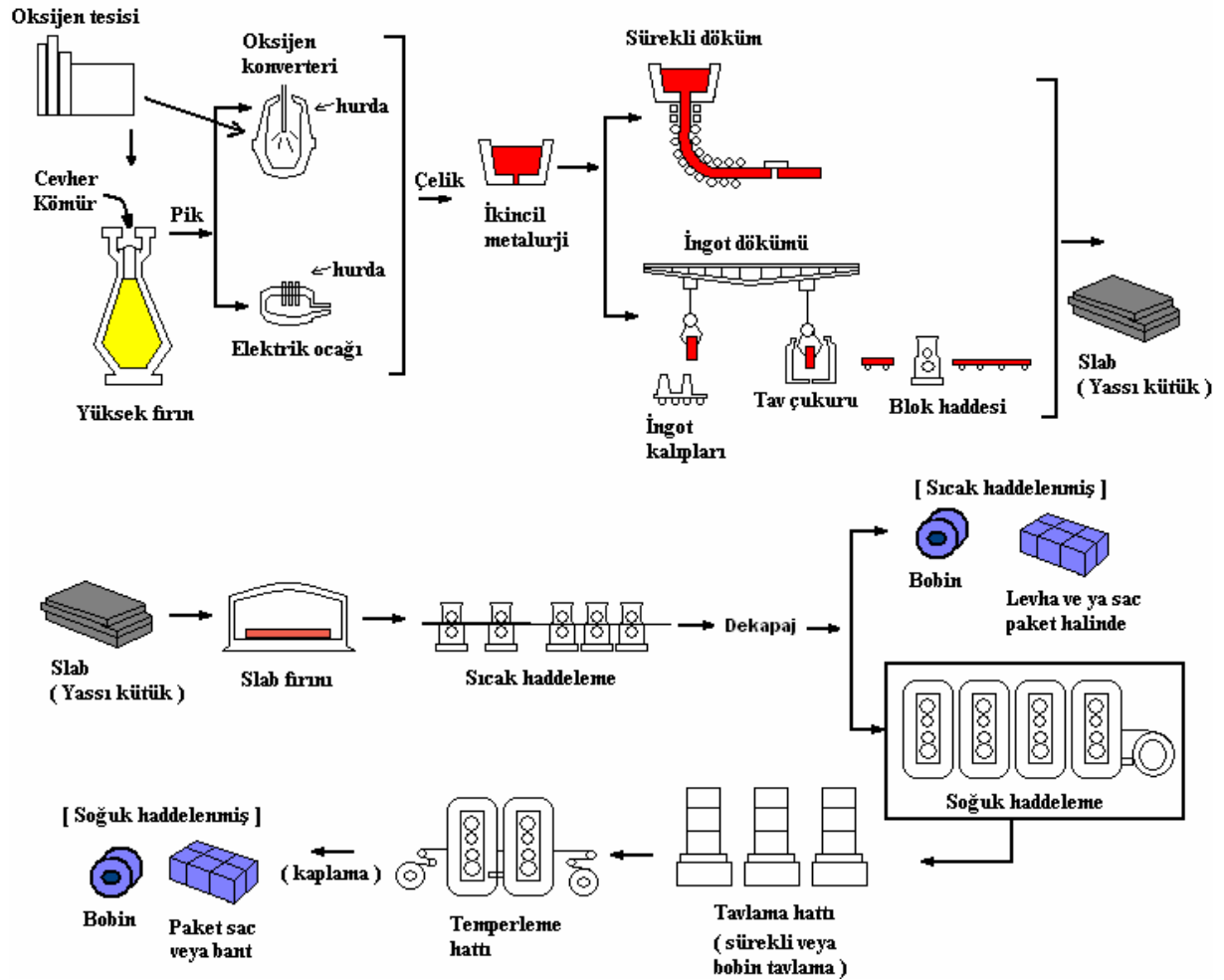
Sac malzemenin kimyasal bileşimi ve alaşım elemanlarının oranı, slab üretiminden sıcak ve soğuk haddelemeye kadar üretim proseslerinin koşulları, üretim sırasında sıcaklık değişimleri,

tavlama, soğutma şartları, rulo sarma aşamaları ve ürünlerin pres operasyonlarında şekillendirilmesine kadar depolarda bekletilme koşulları ve süreleri, çelik sacların mekanik özelliklerinin değişimlerinin en genel nedenleridir.

Çelik sacların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimlerin nedenlerini ve bunların şekillendirme prosesi üzerindeki etkilerini kavrayabilmek için şüphesiz hem çelik sacın üretim proseslerini ve özellikle haddelemeyi hem de çelik sacın pres operasyonlarında şekillendirilebilmesi konusunu ayrıntılı bir şekilde incelemek gerekmektedir.

## 2. ÇELİK SACLARIN ÜRETİMİ

Çelik saclar, ingot dökümü veya ingot dökümünden daha üstün teknolojiyi bünyesinde barındıran sürekli döküm tesislerinden elde edilen dikdörtgen kesite sahip, slab adı verilen ara mamul çeliğin haddelenmesi ile üretilirler. Üretim, demir cevherinden çelik saca kadar çok aşamalı olup sayıları oldukça fazla olan, birbirlerinden farklı üretim yapan tesislerin organizasyonlarının yardımıyla gerçekleştirilerek, devasa büyüklükte bir fabrikayı gerektirmektedir. Şekil 2.1’de, yassı çelik elde edebilmek için yapılan üretimlerin genel olarak aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Yassı çelik ürün elde eden bir entegre tesisin genel olarak üretim akışı

Yüksek fırın ürünü olan pik, 4 ila 6 saatte bir uygun yükseklikte açılan delikten kuru kum yatağına kaba ingot olarak dökülür veya sıvı metal taşıyan özel arabalar (torpido) ile çelik tazeleme fırınlarına gönderilir. Pik, saf demir değildir, zira redükleme sırasında cevherden, katkılardan ve koktan; doymaya yakın oranda karbon, yüksek oranlarda kükürt, fosfor,

mangan ve silisyum gibi elementler içerir (Kaluç, 2002).

Çelik eldesinin esası, bahsedilmiş olan bu yabancı elementlerin ham demirden arındırılmasıdır ki bu işleme tazeleme denilmektedir. Bu tazeleme, Bessemer-Thomas konverterlerinde, Siemens-Martin ocaklarında, oksijen konverterlerinde ve elektrik ark-endüksiyon ocaklarında yapılmaktadır. Ancak günümüzde çelik eldesi, daha kaliteli ürün verdiklerinden ve verimli çalıştıklarından dolayı genellikle, Şekil 2.1’de de gösterildiği gibi iki tip çelik tazeleme ocağında (oksijen konverteri ve elektrik ocağı) gerçekleştirilmektedir.

Konverterde veya ocakta üretilen çelik, potalara alınır ve bu potalarda ikincil metalürji işlemlerinden geçer [1]. İkincil çelik yapımı da denilebilen bu yöntem, gaz giderme, dekarbürizasyon, deoksidasyon, alaşımlama, kükürt giderme, sıcaklık ayarlama ve çeliği homojen hale getirme işlevlerini barındırır (Kaluç, 2002). Bu işlemlerde, çeliğe istenen kimyasal alaşım elementleri katılır ve böylece çeliğin kimyasal içeriği ayarlanarak, satın alınacak nihai yassı çelik mamulün kalite standardı özelliklerinden birinin ortaya çıkarılmasında ilk adım atılmış olunur.

Slabların elde edilmesinde kullanılan iki yöntemden biri olan sürekli dökümün temel prensibi, ergimiş metali dipsiz, alt kısmından soğutulan bakır bir kalıba dökerek, kalıp cidarlarında kuvvetli bir kabuk oluşturmak ve bu kabuk içersinde katılaşma tamamlanana kadar sıvı metali muhafaza etmektir. İşlem adından da anlaşılacağı gibi sürekli yani kesintisiz devam eder. İkinci ve yıllardır süregelen yöntem olan ingot dökümünde ise slab, blok halinde parça parça dökülen ara ürünlerden haddelenerek elde edilir. Uygulamada ingot içinde katılaşma sonucu ortaya çıkan segregasyon ve baş kısmında görülen kendini çekme lunkeri, kalitesiz çeliğin oluşmasına sebebiyet verir. Kaliteli çeliklerin eldesi için ise ayrıca sakinleştirme işlemlerine gereksinim duyulması, işlemde ek maliyet teşkil eder. Aynı zamanda yüksek kapasiteli, büyük yatırım gerektiren blok haddeleri kullanılmaktadır ki bu sürekli döküme göre dezavantajdır. Zaman tasarrufu ve işçilik de sürekli dökümün diğer bir avantajıdır. Bunlara ek olarak, ingot dökümünde her işlem kademesinde yeni kayıplar ve ıskartalar oluşumu, üreticileri, daha verimli olan sürekli dökümle slab üretimine yönlendirmiştir. Dolayısıyla bugün slab üretimi yapan büyük firmaların neredeyse tamamı, sürekli döküm yöntemini tercih etmektedirler (Cantor ve O’Reilly, 2003; Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Sürekli döküm esnasında kesilerek alınan veya ingot dökümünden sonra blok haddelerinden elde edilen slablar, sıcak olarak haddelenmeden önce bir takım hazırlık işlemlerinden geçirilirler. Haddelenenin her safhasında yüzey şartlarının önemi büyüktür. Bu nedenle

haddelenecek malzeme yüzey kusurlarından tamamen arındırılmış olmalıdır. Genellikle ingotlar blok haddesinden önce ısıtılmak amacıyla tav çukurlarına yerleştirilmek üzere zaten sıcak durumda sevk edilirler. Bu nedenle çoğu zaman ingotlara herhangi bir yüzey temizleme işlemi uygulanmaz. Yüzey kusurları, blok hadde tezgahlarında üretilen ve yarı mamul niteliğinde olan slablara uygulanan yüzey temizleme işlemleri ile giderilir. İngotlar, nadir olarak, bazı özel çelikler için, sıcak durumda veya soğuduktan sonra yüzey temizleme işlemine tabi tutulabilmektedir. Ayrıca ingotların katılaşması sırasında sıvı seviyesinin düşmesiyle oluşan kafa lunkerinin kesildiği de belirtilmelidir (Kaluç, 2002).

Sıcak haddelemeden önce malzemenin ısıtılması da önemli bir üretim aşamasıdır ve çeliğe en iyi plastik özelliklerin kazandırılması ve hadde mamulünün istenen kaliteye sahip olması amaçlarını taşır. Isıtma işleminin başlıca iki parametresi vardır, bunlar; sıcaklık ve süredir. Malzemeye bağlı olmak üzere gerek sıcaklık aralığının seçilmesi, gerek bu sıcaklıkta tutma süresi doğrudan doğruya mamule yansıyan sonuçlar doğurur. En yüksek ısıtma sıcaklığı solidüsün  $100 - 150^{\circ}\text{C}$  altında olmalıdır. Tutma süresinin gereğinden uzun olması ise yakıt harcamasını arttırdığı gibi örneğin çelik malzemede demir kaybına ve dekarbürizasyona yol açar (Çapan, 1999).

Haddeleme işleminin başlıca parametrelerinden biri sıcaklıktır. Haddelemenin başlangıcında sıcaklık malzemeye bağlı olmak üzere olabildiğince yüksek seçilmelidir. Bu sıcaklık solidüsün  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  altındadır. Haddeleme sonundaki sıcaklık ise, ötektoid altı çelikler için  $A_3$  sıcaklığının  $50 - 100^{\circ}\text{C}$ , ötektoid üstü çelikler için de  $A_1$  sıcaklığının biraz üstünde olmalıdır. Genel olarak, haddeleme sonundaki sıcaklığın mamulden istenen özelliklere göre seçildiği söylenebilir (Çapan, 1999).

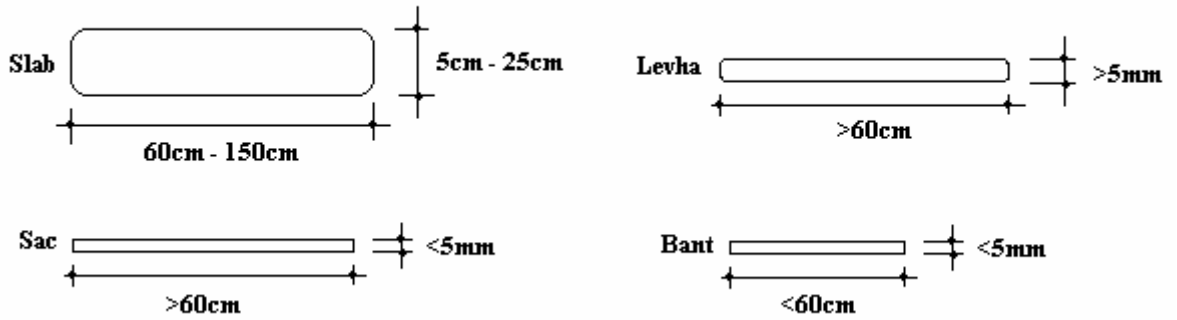
Haddelenen malzeme, kalite kontrol amacıyla bir seri tamamlama işleminden geçirilir. Bu işlemlere örnek olarak doğrultma, yüzey temizleme, ultrasonik ve yüzey çatlak test cihazlarından geçirme gösterilebilir. Yüzeylerdeki oksit tabakalarının temizlenmesi, sıklıkla asitleme işlemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Malzemede iç kusuru bulunan kısımlar kesilerek ayrılır. Yüzey çatlakları ise kabuk soyma veya taşlama ile giderilir (Çapan, 1999).

Bu işlemlerden sonra, mamuller sıcak haddelenmiş olarak piyasaya sunulacaksa bobin hazırlama hattına gönderilir. Sıcak bobin hazırlama hattı, sıcak haddelenmiş ruloların baş ve sonlarındaki tolerans harici kısımların kesildiği ve yüzey düzgünlüğü için temperleme işleminin yapıldığı yerdir. Daha sonra saclar, makaslarda istenilen boylarda kesilirler, yada dilme hatlarında bölünerek bant rulo şeklinde tüketicilere sunulurlar [1].



Diğer taraftan soğuk haddelenmiş sacların eldesi için işlem devam etmektedir. Dekapaj hatlarında yüzeylerindeki oksit tabakası temizlenip yağlanan sıcak haddelenmiş rulolar, tandem hatlarında soğuk olarak istenilen kalınlıklara haddelenir ve yeniden sarılırlar. Soğuk haddeleme sonucu oluşan oldukça gevrek yapının giderilmesi amacıyla soğuk haddelenmiş rulolar, tavlama hattındaki fırınlarda belirlenen tavlama sıcaklığına kadar ısıtılıp bekletilirler. Bu yöntem rulo tavlama yöntemidir. Ayrıca aynı işlemlerin, soğuk haddehanede sürekli asitleme, tandem hattında soğuk haddeleme ve hemen ardından sürekli tavlama hattında kesintisiz olarak tavlama şeklinde ardı ardına yapılabildiği düzenekler de mevcuttur. Çelik saclara son yüzey özelliklerini kazandırmak amacıyla, tavlama soğutulmuş rulolar temperleme hattında temperlenirler. Son olarak, soğuk haddelenmiş çelik saclar; kalay, krom, çinko veya çinko-demir alaşımı gibi kaplama malzemeleri ile kaplanmak amacıyla kaplama hatlarına sevk edilirler ve makaslarda istenilen ebatlarda kesilir yada dilme hatlarında dilimlenip paketlenirler.

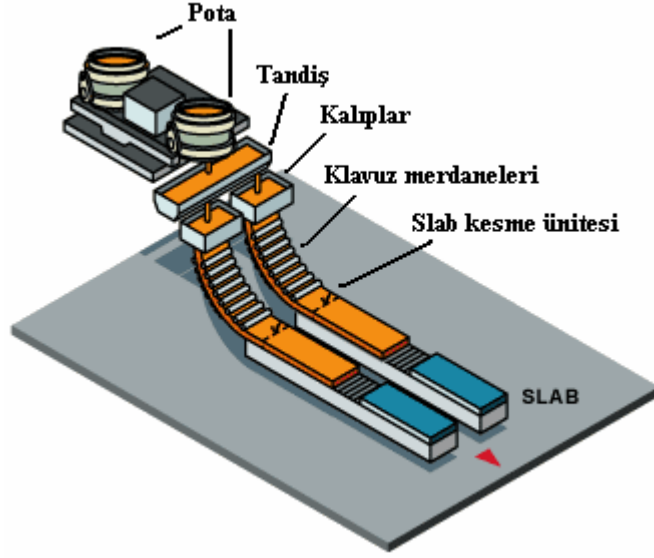
Bir entegre tesiste imal edilip piyasaya sunulan yassı çelik ürünler, kesit geometrilerine göre, slab, levha, sac ve bant olmak üzere dört genel gruba ayrılırlar. Haddelenen slabların yada slabtan haddelenerek elde edilen daha küçük kesitli diğer grup yassı ara ürünlerin tanımlanmasında kesit boyutları ile ilgili değerlerin kesin sınırları olmamasıyla birlikte Şekil 2.2'deki gibi bir genellemenin yapılması mümkündür (Çapan, 1999).



Şekil 2.2 Haddelenen yassı ürünlerin kesit boyutları için genel sınıflandırma

## 2.1 Sürekli Döküm Yöntemi ile Slab Üretimi

Sürekli döküm yöntemi, ingot içinde katılaşma sonucu ortaya çıkan segregasyon ve baş kısmında oluşan kendini çekme lunkerini ortadan kaldırmak suretiyle, gerek hadde verimini ve gerekse de çeliğin kalitesini arttırmak amacıyla geliştirilmiş yöntemdir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Sürekli döküm yöntemi [6]

Özellikle 1970'li yılların öncesine kadar, yassı çelikler, 500 mm civarındaki kalınlıklarda ingot olarak dökülürlerdi. Soğutma işleminden ve kalıplardan alınma işlemlerinden sonra ingotlar,  $1250^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklara kadar ısıtılırlar ve tekrar soğuyana kadar 200-250 mm kalınlıklarda olan slablara haddelenirlerdi. Ancak 1970'lerden sonra sürekli dökümün gelişimiyle beraber, ingot haddeme işlemi önemini yitirdi ve slablar doğrudan, 200-250 mm kalınlıklara kadar sürekli işlem olarak dökülmeye başlandı (Llewellyn ve Hudd, 1998).

Sürekli dökümün temelinde, sıvı haldeki çeliğin, alt kısmı su ile soğutulan bakır bir kalıba dökülmesi işlemi yatar. Katılma hızına paralel olarak alt kısım aşağı doğru hareket eder. Kalıbın altından dışına çıkan ingot sürekli olarak soğutulur ve tam katılaştıktan sonra istenen boylarda kesilir. Bu şekilde üretilen slabda katılma lunkeri, gözenek oluşmaz, segregasyon yok denecek kadar azdır (Cantor ve O'Reilly, 2003).

### 2.1.1 Pota, Tandış ve Kalıplar

İçleri refrakter malzeme ile döşenmiş potalar, çeliğin, çelik üretim ocaklarından alınarak, sürekli döküm bölümünde tandışlere boşaltılması amacıyla kullanılırlar. Bölmeli, ibrik şekilli veya silindirik olmak üzere başlıca üç yapıda bulunurlar. Üstten ve alttan döküm yapan çeşitleri vardır. Alttan dökmenin avantajları, cürufun sıçrama yoluyla metale karışmasını önlemesi, dolayısıyla mamul kalitesini iyi yönde etkilemesi ve döküm hızının kontrolünü kolaylaştırmasıdır. Potalar, ray üzerinde, vinçle veya kaldıraçla taşınabilirler (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Şekil 2.3’de görülen pota taretı üzerinde iki pota kullanımı oldukça yaygındır. Pota taretı karşılıklı olarak iki pota taşıyabilmekte, kendi çevresinde dönebilmekte ve sahip olduğu hidrolik sistem sayesinde potaları indirip kaldırabilmektedir. Birinci pota, altındaki nozul sayesinde tandişi sıvı çelikle beslerken, sıvıyla dolu ikinci pota döküme hazırlanmaktadır. Bu sayede tandişin sıvı çelikle sürekli dolumu sağlanmaktadır [6].

Tandişin görevleri, sıcak metalin, slab kalıbına kesintisiz olarak girebilmesini mümkün kılmak, kalıba giren çelik miktarını ayarlamak ve curuf ile metalik olmayan kalıntıların ve malzemelerin slab kalıbına geçmesini engellemektir. Bu görevlerini yerine getirirken, çeliğin ısısının tandiştten geçerkenki kaybının en aza indirgenmesi ön koşuldur. Bu nedenle, dökümden önce tandiş, 1050-1250<sup>0</sup>C sıcaklıkları arasında üç saat gibi bir süre gazla yada mazotla ısıtılır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Tandişlerin iç duvarları sağlamlık bakımından büyük önem teşkil etmektedirler. Bu yüzden, tuğla yerine, refrakter çamurlarının basınç altında sıkıştırılmasıyla elde edilen, 80-100 mm’lik duvarlar kullanılır (Cantor ve O’Reilly, 2003).

Döküm sırasında tandiştten kaynaklanan aksaklıklar şöyle sıralanabilir. Tutucunun hatalı üretilmiş olması, yerinden sapması ve tutucu borusunun sıcakta dayanımının yetersiz olması sonucu, döküm başlangıcında tutucu, nozul ağzını tamamen tıkamayabilir. Tıkacın aşınmasının ve refrakter özelliğinin kötü oluşu nedeniyle, döküm bitiminde de tutucu, nozul kanalını kapamayabilir. Nozul yerleştirmedeki hatalar da istenmeyen hallerde metal sızmasına neden olabilir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Slab kalıpları, slablara ilk şeklini vererek ve yüzeylerinde kabuk oluşumuna yardımcı olarak sürekli döküm yönteminde mühim bir yer teşkil ederler. Örneğın bu kısımda oluşabilecek bir hata, döküm sisteminin ilerleyen kısımlarında artarak devam eder.

Kalıptan geçerek aşağı doğru akan çelik dökümün dağılmaması için, dış kısmının çabuk soğuyarak bir kabuk oluşturması gerekir. Bu nedenle, kalıbın çalışma bölgesinin, yani çelikle temas eden bölgenin ısı geçirgenliğı mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Dolayısıyla, kalıp cidarları daha çok bakırdan imal edilir. Fakat nikel-krom alaşımları da kalıp malzemesi olarak denenmiştir. Kalıp duvarlarının arka tarafı, yeterli mukavemeti sağlamak amacıyla, çelik ceketlerle desteklenir. Kalıp yüksekliğı 1200 mm civarında, bakır duvarlar ise 50 – 70 mm et kalınlıklarındadır (Cantor ve O’Reilly, 2003).

Dökümün başlangıcında oluşan kabuğın bakır duvarlara yapışmaması ve döküm

sürekliliğinin muhafaza edilmesi için bir titreşim mekanizması uygulanır ve kalıp cidarları oksidasyonu azaltmak için yağlanır.

Ayrıca elektromanyetik kalıp karıştırma düzenekleri de sürekli döküm kalıplarının donanımlarından biridir. Homojen bir iç yapı elde etmede bu karıştırma düzeneklerinin önemi büyüktür (Kaluç, 2002).

### **2.1.2 Kılavuz Merdaneleri ve Slab Kesme Ünitesi**

Kılavuz merdaneleri, döküm esnasında ürünü sabit bir hızla aşağıya doğru çekmek ve yatay doğrulamak üzere tasarlanmışlardır. Dikey tip sürekli döküm makinelerinde bu kısmın yalnız çekme görevi vardır.

Çekme merdaneleri büyük yüke maruz kaldıklarından dolayı, dayanıklı bir konstrüksiyona sahip olmalıdırlar. Ancak merdaneler arası uzaklığın azalması ve segmanlar arası bırakılan küçük mesafeler, merdane başına düşen gerilmeleri azaltmaktadır ve işlemin daha iyi şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Makinenin ağır ana gövdesi tüm kuvvetleri doğrudan temele aktarır.

Dökülen çelik kalitesine bağlı olarak, slabın soğutulma işlemleri, optimum bir sıcaklık grafiğine uymalıdır. Bu amaçla, ayarlanabilir ve hassas bir su püskürtme kontrolüne gereksinim vardır. Döküm hızı, katılma zamanı, kalite ve boyut gibi döküm parametreleri proses bilgisayarı tarafından işlenir ve bağımsız kontrol çevrimlerine iletilen kumanda sinyallerine dönüştürülür (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Slab haline gelen çelik, belli bir uzunluğa ulaştığı zaman kesilerek yarı ürün olarak slab bekletme depolarına yada slab ısıtma fırınlarına gönderilir. Belli boyutlarda yapılan bu kesme işlemi, hidrolik veya gazla kesme esaslı çalışan mekanizmalar gerçekleştirir [5].

### **2.1.3 Slabların Yüzey ile İçyapı Temizliği ve Kalite Kontrolü**

Çelik sacların şekillendirilebilirliğini etkileyen malzeme parametrelerinden mekanik özelliklerinin aynı rulo içindeki değişimlerinin nedenleri hususunda, malzeme iç temizliği seviyesinin önemi büyüktür. Nihai ürün iç temizliğinden kasıt, kalıntıların mevcudiyeti, boşluklar, çatlaklar ve segregasyonlardır. Bu tip kusurların oluşum nedenleri araştırılacak olursa, yassı ürünün imalatının ilk aşamalarına, yani sürekli döküm prosesinde döküm sırasındaki işlemlerin incelenmesine odaklanılır. Çünkü slabda başlayan bir kusur, denetlenip yok edilemezse, takip eden haddeleme operasyonlarında artarak devam eder. Bu nedenle, sürekli döküm esnasında yapılan kontroller çelik sacların kalitelerini belirlerler. Çizelge 2.1

ve 2.2’de sürekli döküm sırasında yapılan kontroller ve ölçüm teknikleri verilmektedir.

Çizelge 2.1 Sürekli döküm işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

<b>İşlem Kontrol Değişkenleri</b>	<b>Ölçme Tekniği</b>
Pota ve tandiştteki çelik sıcaklıkları	Termokupul çubuklar
Kalıp soğutma suyu akışı ve sıcaklığı	Termokupul proplar
İkincil akış kontrolü	Akış ölçer
Çekme hızı	Mekanik duyarga
Kalıp düzeyi	Optik ölçüm, gama ışını ve Eddy-akımı ölçümü

Çizelge 2.2 Sürekli döküm işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

<b>Ürün Kalite Değişkenleri</b>	<b>Ölçme Tekniği</b>
Segregasyonlar	Numune alımı ( sülfür baskısı, X-ışını mikro flüoresan )
Kalıntı içeriği	Numune alımı ( MIDAS tekniği ile ölçüm )
Yüzey durumu	Eddy-akımı kontrolü, Manyetik parçacık denetimi
Yüzey sıcaklığı	Pirometre

Slablarda mevcut bulunan kusurlar, yüzey ve içyapı kusurları olarak ikiye ayrılır. Yüzey bozukluklarından gözle görülür olanların, elle idare edilen gazlı kesicilerle slabdan koparılmaları, uygulanan alışlagelmiş yöntemdir. Gaz alevi ile ergitme işlemi, öncelikle şüpheli görünen yüzeylerde yapılır. Söz konusu işlem sonucunda yüzeyin hemen altına kadar etki etmiş hatalar ortaya çıkarılmaktadır. Sonuçta 10 ila 40 mm derinliğe kadar değişen kontrolde bozukluk bulunmazsa o bölge sağlam kabul edilir. Operasyonların sürekliliği nedeniyle denetimler sıcak olarak sürdürülmektedir ve burada tespit edilen hatalar geri beslemeli olarak sürekli döküm prosesine bildirilir. Kontrollerin otomatik olanlarının en uygunu “Eddy-akımı” testidir. Duyargaların uygun yerleştirilmesi ile 1 mm derinliğinde, slab boyuna ve enine göre 50 ila 100 mm uzunluğunda çatlaklar belirlenir. Ancak bu gibi yöntemlerde teknik uygulama zorluklarının varlığı, yöntemlerin endüstriyel kullanımlar için yeterince hazır olmaması sonucunu doğurur (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Sürekli döküm yönteminde kalıntı (inklüzyon) miktarları, potadan tandişe ve tandiştten kalıba döküm sırasında değişmektedir. Metal kirliliğinin önlenmesi ve kalıntıların yüzdürülerek sistemden uzaklaştırılması gereklidir.

Metal kirliliğini azaltmak yada yok etmek için yapılması gerekenler aşağıdaki gibidir (Cantor ve O'Reilly, 2003).

- Metal atomlarıyla tepkimeye girmeyen ısıl dayanımlı pota, tandiş, kalıp malzemeleri kullanımı,
- Cüruf algılayıcıları ile cürufun potadan tandişe taşınımını sınırlandırmak,
- İnert cüruf örtüleri kullanarak tandişteki ve kalıptaki metal yüzeyinin dış etkenlere kapatılması,
- Tandış donanımları içinde kalıntı yüzdürülmesine yardım edecek cihazlar kullanımı,
- Derin ve çok bölmeli tandiş tasarımları kullanarak cürufun kalıba geçmesinin önlenmesi.

Slabda oluşan kalıntıların belirlenmesinde en uygun yöntem, Mannesmann tarafından geliştirilen ve akustik tarama esaslı olan "Midas" tekniğidir. 20 MHz'lik çevirici için kusur tespit sınırları 60 mikron, 50 MHz'lik çevirici için ise 30 mikrondur. Tüm testler, nihai slablardan alınan rutin örnekler üzerinde yapılır.

## 2.2 Sıcak Haddelenme

Sıcak haddelenme, metal ve alaşımlarının sünekliklerinin yüksek olduğu yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılan deformasyon işlemidir. Çeliklerin haddelenmesi sıcak haddelenme ile başlar ve gerekli olduğu takdirde bu işlemi soğuk haddelenme takip eder. Sıcak haddelenmede slablara verilen deformasyon miktarı bir hayli yüksektir. Örneğin, 20-25 cm kalınlığındaki bir slab sıcak haddelenerek, 2,5 mm kalınlığında sac haline gelebilmektedir.

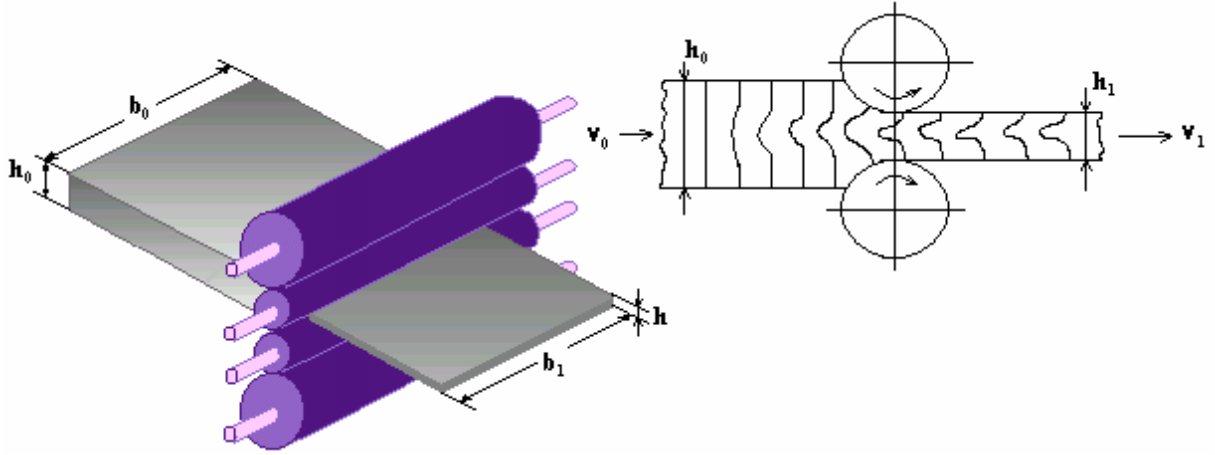
### 2.2.1 Yassı Ürünlerin Haddelenme Prensipleri

Yassı ürün haddelenme işlemi, iş parçasının eksenleri etrafında ve birbirlerine zıt yönde dönen merdanelerin (silindirlerin) arasından geçirilerek, uygulanan basma kuvvetlerinin etkisiyle kalınlığının düşürüldüğü plastik şekil verme işlemidir (Şekil 2.4) (Yurci, 2003).

Haddelenme işlemi ile slabın kalınlığı  $h_0$ 'dan  $h_1$ 'e azalırken, uzunluğu ve genişliği artar. Fakat boy, genişliğe oranla çok fazla artmaktadır.

Kalınlık doğrultusundaki gerinim, aşağıdaki 2.1 eşitliğinden bulunur:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (2.1)$$



Şekil 2.4 Yassı ürünlerin haddelenmesi [3]

Plastik şekillendirmede hacim sabitliği kuralı nedeniyle kalınlıktaki incelme, uzunluk ( $\varepsilon_2$ ) ve genişlikteki ( $\varepsilon_3$ ) artış ile karşılanır.

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad , \quad \varepsilon_3 = 0 \quad (2.2)$$

Genişlik artışı sadece bölgesel olarak ve kenarlara yakın yerlerde, köşe yakınlarında gözlenir (Çapan, 1999).

Merdanelerle malzeme arasındaki sürtünme kuvvetleri, giriş bölgesinde malzemeyi merdaneler arasına sürüklemeye, çıkış bölgesinde ise merdaneler arasında tutmaya çalışır.

Haddeleme işleminin başlayabilmesi için merdanelerle malzeme arasındaki sürtünme kuvvetleri, malzemeyi merdaneler arasına çekebilmelidir. Bir merdanenin saca uyguladığı normal kuvvet  $N$  ile gösterilirse (Şekil 2.5), sürtünme kuvveti;

$$T = \mu.N \quad (2.3)$$

olduğundan, haddeleme işleminin başlaması koşulu, 2.4 eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$N.\sin \theta_m \leq \mu.N.\cos \theta_m \quad (2.4)$$

Bu denklemden,

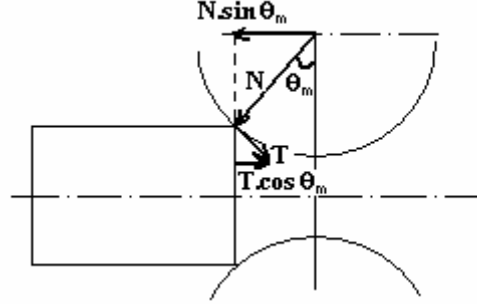
$$\tan \theta_m \leq \mu \quad (2.5)$$

veya küçük  $\theta_m$  açıları için (örneğin ince sacların soğuk haddelenmesinde  $\theta_m \leq 9^\circ$ )

$\tan \theta_m \cong \theta_m$  alınarak, aşağıdaki 2.6 eşitliği elde edilir.

$$\theta_m \leq \mu \quad (2.6)$$

Bu basit formül haddeleme şartıdır. İş parçası merdane boşluğuna doğru itilmeden, serbestçe beslenir ve bu şart sağlandığı takdirde, silindirler iş parçasını yakalar ve kısıtırlar. Aksi halde, iş parçası geri itilir, haddeleme mümkün olmaz (Çapan, 1999).



Şekil 2.5 Haddeleme başlangıcında saca etkiyen kuvvetler

Malzeme ve yağlayıcıya bağlı olarak değişen sürtünme katsayıları ( $\mu$ ), sıcak haddelemede 0,2 ~ 0,7 gibi büyük değerler arasında iken, soğuk haddelemede 0,02 ~ 0,3 arasında değişmektedir.

Yassı ürünlerin haddelenmesinde kalınlık azalmasının çıkılabilecek en fazla değeri aşağıdaki 2.7 eşitliğiyle gösterilebilir (Çapan, 1999).

$$\Delta h_{maks.} = \mu^2 \cdot R \quad (2.7)$$

### 2.2.2 Merdaneler ve Merdane Düzenleri

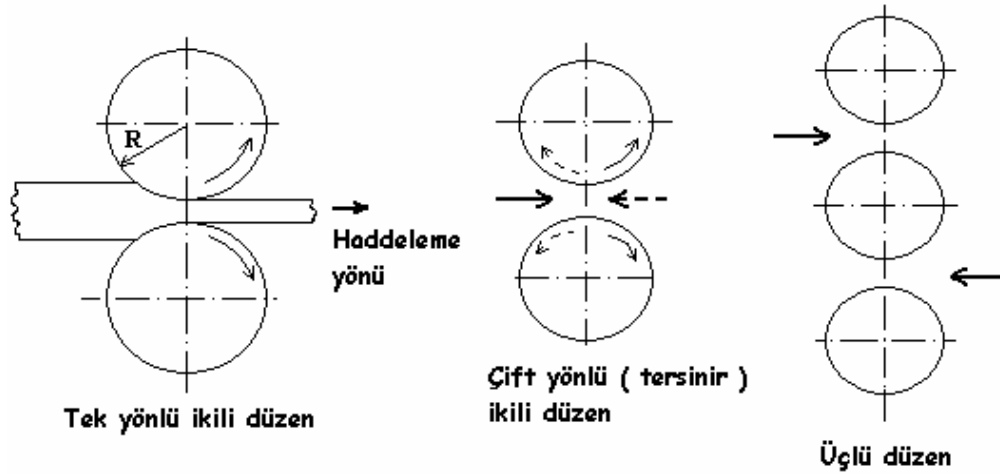
Yassı ürünlerin haddelenmesinde kullanılan merdaneler, düz ve silindirikler. Başlıca üç kısımdan oluşurlar; haddelenen malzeme ile doğrudan temas eden gövde, yataklarda çalışan kısımlar (muylular) ve mile bağlanan kavrama kısmı.

Merdane malzemesi olarak genellikle dökme demir ve dökme çelik kullanılmaktadır. Çelik merdaneler, alaşımlı ve alaşımsız malzemedan döküm yoluyla üretilebildikleri gibi dövme yoluyla da şekillendirilebilmektedir. Yerine göre merdanelere ıslah işlemleri de uygulanmaktadır (Yurci, 2003).

Merdanelerin hadde ayakları üzerindeki düzenleniş şekilleri, konumları ve sayıları itibarıyla farklılıklar göstermektedir. Yassı ürünlerin haddelenmesinde en basit merdane düzeni tek yönlü ikili düzendir (Şekil 2.6). Bu hadde düzeninde, haddelenen slabın her pasodan sonra



yeniden ön tarafa geçirilmesi nedeniyle, zaman, iş ve ısı kayıplarına yol açtığı belirlenmiş ve iki tarafa da çalışabilen, çift yönlü (tersinir) ikili hadde düzeni geliştirilmiştir. Ekonomik olmamaları nedeniyle genellikle büyük ebatlı yassı ürünlerin haddelenmesinde kullanılmaktadırlar. Tek yönlü olanlar ise, modern haddehanelerde, arka arkaya hadde tertiplerinde çelik sacların haddelenmesinde kullanılmaktadır. Üçlü hadde tezgahında, üç merdane üst üste aynı eksende dizilidir ve malzeme iki yönde de haddelenebilir (Şekil 2.6) (Çapan, 1999).



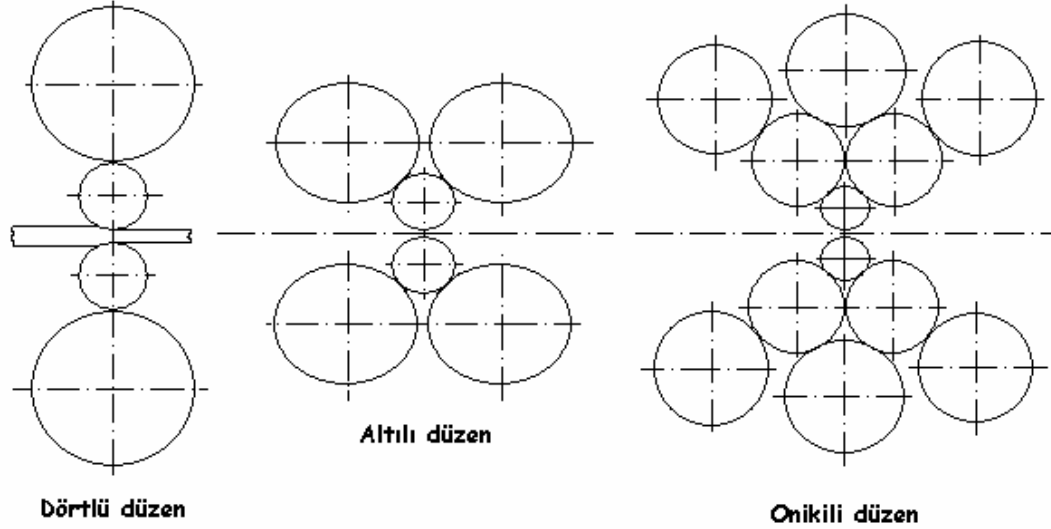
Şekil 2.6 Basit merdane düzenleri

İnce sacların ve sertlikleri yüksek olan malzemelerin haddelenmesi için iş merdaneleri çaplarının ufaldığı, ancak eğilmelere karşı destek merdanelerinin bulunduğu dördü, altı, on ikili ve yirmili hadde düzenleri geliştirilmiştir (Şekil 2.7). Yüksek dayanımlı ince sacların dar toleranslarla soğuk haddelenmesine uygun olan yirmili hadde düzeninde, tungsten karbür iş merdanelerinin çapı 6 mm'ye kadar düşürülebilmektedir (Kalpakjian ve Schmid, 2001).

Merdane çapları küçültülürken, optimum bir çap değeri ayarlanmalıdır. Aksi takdirde, gereğinden küçük çaplı bir silindir kullanımı, haddelenen malzemenin yalnızca yüzey tabakalarının şekillenmesine, orta içteki kısmının şekillenmemesine neden olmaktadır. Uygun çaplı silindirlerin kullanımı ile iş parçasının tüm kesiti yoğrulur ve homojen biçimlendirme elde edilir. Yassı ürünlerin haddelenmesinde homojen olmayan plastik şekil değişimi malzemede kalıntı gerilmelerin doğmasına neden olur (Çapan, 1999).

Bir pasoda elde edilen kalınlık azalmasını arttırmak amacıyla planet hadde düzeni adıyla apayrı bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde dış taraftaki küçük merdaneler, içteki büyük

destek merdanelerinin etrafında planet gibi dönerler. Alışıl gelmiş bir sıcak haddeleme tezgahında, bir pasoda en fazla %30 ~ 40 gibi kalınlık azalması olurken, bu tertiple beraber %90'lara ulaşılabilmiştir.



Şekil 2.7 Destekli haddeler

### 2.2.3 Slab Tavlama

Sıcak haddelemeden önce slablar yaklaşık  $1250^{\circ}\text{C}$  sıcaklığına kadar slab tavlama fırınlarında ısıtılırlar. Bu işlem, merdanelere gelen kuvvetleri azaltarak şekillendirme işlemini kolaylaştırmanın yanı sıra dendrit döküm yapısını ortadan kaldırmak, alaşımlama elementlerinin bir çoğunu çözmek ve haddelemeden önce yapıda üniform sıcaklık sağlamak amacıyla yapılır.

Yeniden ısıtılacak ürünler, 5 ila 30 ton ağırlığında, 4 ila 14 metre uzunluğunda, 1 ila 2 metre genişliğinde ve 180 ila 250 mm kalınlığında, dikdörtgen slablardır. Fırına giren ürünler, giriş sıcaklıklarına göre, soğuk ( $\sim 15^{\circ}\text{C}$ ), ılık ( $\sim 400^{\circ}\text{C}$ ) veya sıcak ( $> 700^{\circ}\text{C}$ ) olabilir [2].

En yaygın kullanılan fırın çeşidi, arabalı fırınlardır. Bunlar slabı, fırın girişinden çıkış tarafına kadar ileten ve aşağıya yukarıya indirip kaldırabilen hareketli mekanizmaya sahip fırınlardır. Bu fırınlarda slablar, birbirlerine değmediklerinden yapışmaları söz konusu değildir. Sistem ters yönde de rahatlıkla çalışabildiği için fırının her iki ucundan da boşaltma yapılabilir. Boyutları genellikle 10-12 m genişliğinde ve 30-65 m uzunluğunda değişmektedir. Fırın genişliği, yükleme sırasında oluşabilecek kaza olasılıkları düşünülerek, ısıtılacak slabın maksimum genişliğine ek olarak iki yandan 30 cm bırakılacak şekilde tasarlanmaktadır. Fırın

uzunluğu ise ısıtma süresince yeterli miktarda ısı alışverişi sağlanacak şekilde düzenlenir. Isı alışverişine; üretim hızı, slab boyutları, çelik cinsi, yükleme ve çıkış sıcaklıkları, işlek olan fırın bölümü, brülör kapasitesi ve izin verilebilir en yüksek ısıl dayanım gibi değişkenler etki etmektedir.

Slab fırınlarının enerjileri, yüksek fırın, kok fırını ve çelikhaneden gelen gazların karışımından oluşmaktadır. Bu nedenle, gazların içeriği karmaşıktır. Gerektiği hallerde içlerine doğalgaz da katılmaktadır. Dolayısıyla, bu gazlar operasyon esnasında hemzamanlı olarak analiz edilmeli, içlerindeki istenmeyen maddeler belirlenmeli ve zorunlu hallerde müdahalede bulunulmalıdır. Kullanılan gazlar, kullanımdan sonra içlerinde hala enerji barındırdıklarından dolayı, ısı tutucularından geçirilir ve tekrar sisteme ilave edilerek yeniden kullanılırlar. Fırınların farklı bölgelerindeki farklı sıcaklık değerleri, otomatik ısıtma kontrolü mekanizması sayesinde gerçek zamanlı ölçülür ve hava ile gaz akışı hızlarının ayarlanmasıyla otomatik olarak en aza indirgenmeye çalışılır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Metaller ısı aldıkça, dolayısıyla sıcaklıkları yükseldikçe oksijenle bileşik oluşturma meyilleri artmaktadır. Başka bir deyişle, daha kolay ve hızlı bir şekilde oksitlenmektedirler. Oksitlenen slablar da diğer oksitlenen metaller gibi kütle kaybına uğradıklarından, yüzeylerinde oluşan oksit tabakasının en aza indirilmesi, sistem veriminin artırılması bakımından ana hedefdir. Bu amaca ulaşmak için ise, fırın atmosferinin bileşenlerinin kontrolü ve gazlar içersinde oksitlenmeye yol açan elementlerin miktarlarının azaltılması gereklidir. Aynı zamanda oksit tabakasının seviyesinin düşürülmesi için, slabın yüksek sıcaklıkta kaldığı süre mümkün olduğunca daraltılmalıdır. Bunların yanında sistemin verimi; fırın içindeki ürünlerin farklı ısınma profilinde olmalarının engellenmesiyle ve çıkış sıcaklıklarının mümkün olduğunca düşürülmesiyle artırılabilir (Cantor ve O'Reilly, 2003).

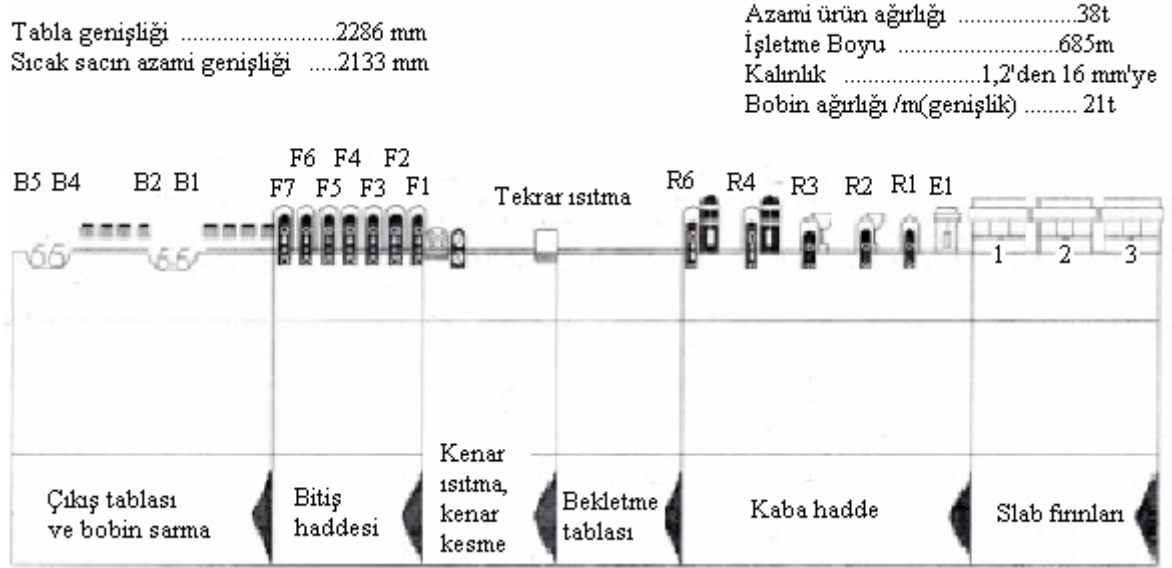
#### **2.2.4 Sıcak Haddelenin İşleyişi**

Şekil 2.8'de yassı ürünlerin, slab ısıtma fırınlarından çıkmalarıyla sıcak bobin sarma işlemine kadar süregelen üretim akışı görülmektedir.

Bu şekilden de görüleceği gibi sıcak haddeleme hattı, kaba hadde ve bitiş haddesi olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Sıcak haddeleme tesisinin verimli çalışabilmesi ve çıkan ürünlerin belli kaliteleri sağlaması için ürün kalınlığı mümkün olan en kısa sürede azaltılmalıdır ve haddeleme ani olmalıdır. Düzlemsellik toleranslarını yakalayabilme ve haddeleme kuvveti ile motor tork değerlerini

sağlayabilmenin bir pasodaki azami kalınlık azalmasını sınırlaması, çeşitli hadde tezgahlarıyla çoklu paso kullanımını gerektirmektedir. Hadde tezgahları arasındaki mesafeler, ısı kayıplarını azaltmak için en kısa düzeyde (yaklaşık 6 m) tutulmalıdır (Burtsev, 1973).



Şekil 2.8 Büyük kapasiteli sıcak haddeleme tesisinde üretim akışı  
(Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

Kaba haddelemenin görevi, bitirme grubuyla uyumlu boyutlarda olacak şekilde slab kalınlıklarını azaltmak ve istenilen genişlik değerlerini vermektir. Kaba haddeler üç düzenleniş şekline sahiptir;

- Tandem hadde düzeni, bir hat üzerinde 4 yada 5 haddeden oluşur ve haddeler arası mesafeler, ürünün uzaması nedeniyle gittikçe artmaktadır. Bu nedenle devamlı değildir. Yatay haddeler ürün genişliğini ayarlamak amacıyla yan haddelerle desteklenir.
- Tersinir hadde düzeni, tek bir yatay haddeden oluşur ve motorların dönüş yönlerinin tersine çevrilmesiyle her iki yönde de haddeleme yapabilir. Kenarlarda kenar merdaneleri vardır.
- Karışık hadde düzeni, en az biri tersinir hadde tezgahı olmak üzere, iki ila dört arasında haddesi olan tandem hatlarından oluşur.

Isıtılmış slablar fırın çıkışında hareketli tabla üzerine alınırlar. Bu tabla üzerinde slablar, kaba haddeleme grubunun oksit kırıcılarına teslim edilirler. Yatay hadde düzenlerinden ibaret olan oksit kırıcılarda, ısınmadan kaynaklanan oksit kırılır ve slab kalınlıkları aynı zamanda % 10 ~ 25 gibi bir oranla azaltılırlar. Önceleri, büyük kalınlık azalmaları sırasında oksitlerin slab

içine doğru haddelenebileceği düşünülmekteydi ve sakıncalı görünürdü, fakat son eğilimler, kalınlık azalmalarını, yatay hadde oksit kırma tezgahlarında arttırmaya yöneliktir. Yatay haddeler, oksit kırmayı kolaylaştırmak için yivli yapılırlar. Dikey haddeler de nadir olarak oksit kırmak için kullanılmaktadırlar. Levha haddelerinde olduğu gibi, burada da oksit, yüksek basınçla bırakılan su ile uzaklaştırılır. Hidrolik jetli oksit gidericinin otomatik kontrolünün doğru yapılması önemlidir. Ayrıca, iş parçası yüzeyine göre oksit gidericilerin memelerinin doğru yerleşimine ve haddelenen metalin sıcaklığına göre su akışı düzenlenmesinin yeterli olması da önem verilmesi gereken diğer hususlardır (Burtsev, 1973).

Silindirler dar slablarla beslendikten sonra, oksit kırıcılardan gönderilen iş parçaları dörtlü geniş-taraf haddeleme düzenine girer ve hareketli tablaya monte edilmiş, havayla yada elektrikle çalışan kaldırma ve döndürme tertibatlarıyla  $90^0$  döndürülürler. Çoğu haddehanelerde, geniş-taraf hadde düzenine giren iş parçası, tek bir geçişte % 40-50 arasında kalınlık redüksiyonu ile haddelenir. Ancak tersinir çalışan geniş-taraf hadde düzenlerinde, sacın istenilen genişlik değeri bazen, birkaç pasoda elde edilir. Geniş-taraf hadde düzeninden ayrılan iş parçalarının, kenar bozukluklarını ortadan kaldırmak için, önceleri, güçlü yatay presler ve sıkıştırıcılar kullanılırdı. Günümüzde, bu presler tamamıyla kullanım dışıdır ve kenar bozuklukları düşey haddeler ile giderilir. Yeni merdaneler prensip olarak, geniş slablarla beslenirler ve bu yüzden ne geniş-taraf hadde düzenlerini ne de sıkıştırıcıları içerirler (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Kaba haddeleme grubundan çıkan yassı ürün levha olarak adlandırılır. Haddelemeden ayrılan levhaların boyut farklılıklarının sıklığını en az seviyede tutmak için çaba sarfedilir. Haddehanelerin çoğunluğunda, kaba hadde tertiplerinde haddeleme hızı sabittir. AC hadde motorları ayarlanabilir cinsten değildir ve verilen hızda haddeleme zamanı her düzende aşağı yukarı aynıdır (Burtsev, 1973).

Bitiş haddelerinin istikrarlı operasyona sahip olmasını sağlamak için, levhanın sıcaklığının  $5-10^0C$  gibi bir dalgalanmadan daha fazla olmayacak şekilde  $1160-1180^0C$  arasında olması gerekmektedir. Levha sıcaklığı, kaba ve bitirme hadde gruplarının arasına kurulan 150 m uzunluğa kadar ulaşabilen ara hareketli tablanın üzerindeki foto-elektrik pirometre vasıtasıyla ölçülür. Eğer levha sıcaklığı önceden belirlenen seviyenin üzerinde ise levha tabla üzerinde tutulur. Sıcaklığı düşürmek ve aynı zamanda oksitleri tekrar gidermek için, hava veya su soğutmalı özel donanımlar kullanılır (Burtsev, 1973).

Çelik levhanın diğer kısımlarına göre daha düşük sıcaklığa sahip baş kısmı, bitiş hadde

grubunun giriş bölümüne monte edilmiş makaslarla kırılır. Kırılan çelik levha, % 2 ~ 10 (0,5-2 mm) aralığında değişen kalınlık azalmasıyla çalışan, aynı zamanda oksit kırıcı görevini üstlenen son yatay hadde tezgahına girer (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Birçok modern fabrikanın haddehanelerinde bitiş grubu altı adet dörtlü hadde düzeninden kuruludur. Daha ince sac üreten yeni tip haddehanelerde bu grup yedi tezgah içerebilir (Şekil 2.8'de F1 ile F7 arası). Merdaneleri soğutma işlemini geliştirmek ve servis ömrünü uzatmak amacıyla, iş merdanelerinin çapları 600-650 mm'den 700-800 mm gibi değerlere arttırılır. Çapları 1600 mm'ye varan destek merdanelerinin ise boyları 1700-2000 mm aralığındadır. Tezgah yapıları da buna bağlı olarak sağlamlaştırılır. İnce saclar üretmek için slab kalınlıkları 120-150 mm'ye düşürülür ve kaba hadde grubu ürünleri olan levhaların da kalınlıkları 16-18 mm'ye indirilir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Sürekli bitiş hadde grubunda sacın, tüm tezgahlarda hemzamanlı olarak şekillenmesi sebebiyle, proses içi haddelerinin ayarları en çok dikkat edilmesi gereken hususlardır. Sac uzunluğu boyunca sıcaklık gradyanlarının neden olduğu ölçü farklılıklarını azaltmak için çaba sarfedilir.

F1 tezgahındaki levhanın hızı ve genişliği, levhanın son ucunun F1 tezgahına girmeden önceki zamanın ve aynı zamanda soğuduğu süreç olan bekleme zamanının belirlenmesindeki etmenlerdir. Bu nedenle, ürünün baş ve son kısımlarının bu tezgaha girerken sıcaklıklarında farklılık olacaktır. Örneğin bir dakikada, 1100<sup>0</sup>C sıcaklıktaki 32 mm kalınlığında bir levhada yaklaşık 95<sup>0</sup>C ısı kaybı oluşmaktadır. Soğuk metal daha dayanımlı ve deformasyonla beraber daha büyük adiyabatik ısıya maruz kaldığından dolayı, bu büyük sıcaklık farkı azaltılmaya çalışılır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Tam anlamıyla dikdörtgen kesite sahip bir yassı ürün imal etmenin yanında, ürünün her noktasında tutarlı yapı ve özellikler elde etmek de ana hedeflerdendir. Açıkça görüldüğü gibi, bitiş hadde grubu boyunca yassı ürünün baş ve son kısımları, aynı termomekanik yolları izlememektedir. Çelik çeşidine bağlı olarak, bu değişimleri sınırlamakta fayda vardır. Masraflı da olsa, çelik sacın boyunu azaltmak ve böylece istenilen genişlikte daha hafif rulo elde etmek bir çözüm olarak sayılabilir. Başka bir çözüm ise, soğutma yöntemindeki iyileştirmelerle sıcaklık farklarını düzeltmektir. Ancak bu yeniden oksitlenmeye neden olmaktadır. Bekletme tablasındaki ısı kayıpları çeşitli yalıtım yöntemleriyle giderilebilir, fakat geçiş şartlarından dolayı uygulama oldukça zordur. En yaygın kullanılan fakat pahalı olan yöntem, yassı çeliğin ön tarafı rulo sarım makinesine girene kadar bitiş hadde

grubundaki haddeleme hızını arttırmaktır. Bu da hadde tezgahlarının güç ve dayanım özelliklerini arttırmayı ve yüksek performanslı hız kontrol düzeneklerinin kullanımını gerektirir (Çizelge 2.3). Bu yüzden denilebilir ki, haddeleme hızı sıcaklığı belirler ve ivmelenme tekbiçimliliği kontrol eder. Üstelik, soğutma verimliliğinde titiz bir düzenleme yapılmadığı takdirde, yöntem tamamlanmamış ve hatta dezavantajlı olacaktır.

Çizelge 2.3 Hız artırma yöntemiyle bitiş hadde grubunda örnek haddeleme  
(Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

Tezgah	Kalınlık mm	Kalınlık azalması		Çıkış hızı		Paso s	Enerji tüketimi		Güç (kW)			
		mm	%	ilk	son		paso kWh/t	toplam kWh/t	Haddeleme		Aritmetik ortalama	
				m/s	m/s				ilk	son		
F1	16	16	50,00	1,125	2,283	130	5,33	5,33	4789	7720	5844	
F2	9,05	6,95	43,44	1,989	4,036	-	5,88	11,22	5073	8021	6337	
F3	5,90	3,15	34,81	3,051	6,190	-	5,88	17,10	5398	8021	6500	
F4	4,17	1,73	29,32	4,317	8,759	-	5,88	22,98	5714	8021	6659	
F5	3,10	1,07	25,66	5,806	11,782	-	5,88	28,87	6038	8021	6964	
F6	2,35	0,75	24,19	7,660	15,542	-	5,88	34,75	7159	8021	7409	
F7	2,00	0,35	14,89	9,000	18,262	-	2,76	37,51	3427	3760	3511	
Başlangıç slabı				: 240 x 1400 x 14 000 mm <sup>3</sup> ; ağırlık 36,245 t ve kalınlık 32 mm								
Nihai ürün				: 2 x 1375 x 1 679 00 mm <sup>3</sup>								
İlk F7 çıkış hızı				: 9000 m/s								
İvmelenmeden sonra F7 çıkış hızı				: 18 262 m/s								
İvmelenmeden önceki uzunluk				: 122 m ; süre 13,55 s								
İvmelenmeden sonraki uzunluk				: 1557 m ; süre 116,45 s								
Toplam süre ( aritmetik ortalama )				: 135 s ( levhalar arası 5 s dahil )								
Saatlik üretim				: 966 t								

Tezgahlar arası sac gerilimini düşürmek amacıyla bazen, bombeleyiciler tarafından kontrol edilen ufak bombelerden yararlanılmaktadır. Sürekli bitiş hadde grubunda haddeleme hızının ve kalınlık indirgemesinin otomatik kontrolünün doğru yapılabilmesi, bombe tablası yatırma açısının takibine ve bombe basıncına bağlıdır. Toplam kalınlık azalmasında da olduğu gibi bitiş grubundaki her bir tezgahta meydana gelen kalınlık redüksiyonu, şu şartların sağlanabilmesi doğrultusunda belirlenir;

- Haddelenen sacın, mümkün olan en az yanal ölçü farklılıkları ile beraber doğru ebatlarda elde edilmesi,
- Son tezgahlardaki merdanelerin çalışan yüzeylerinin sürekliliğini arttırmak,
- Haddeleme sonunda olması gerektiği düşünülen metal sıcaklığını korumak için (bu amaç, istenilen metal yapısının ve tane boyutunun korunması için zaruridir.)

Yüzde olarak kalınlık azalması, on tezgahlı sürekli haddeleme işleminin altı tezgahlı bitiş

grubunun son tezgahında 10-15, dokuzuncu tezgahta 20-25, sekiz, yedi ve altıncı tezgahlarda 30-40'tır ve beşinci tezgahta 50'ye kadar çıkabilmektedir (Burtsev, 1973).

Son tezgahtan ayrılan sacın kalınlığı temassız çalışan mikrometreler ile kontrol edilir. Çalışma prensipleri, metalin içinden geçen X ışınlarının yoğunluğunun değişimini ölçmeye yöneliktir. Bu kalınlık değerleri, hemzamanlı olarak bilgisayara kaydedilmektedir ve ekrandan görülebilmektedir. Ayrıca yeni tip haddelerde foto-elektrik yöntemle temassız sac genişliği kontrolü de otomatikleştirilmiştir. Hadde boşluğu kontrolü, sisteme bağlı bulunan özel bir cihaz yardımıyla yapılır. Tezgahlardan geçen metal miktarları, çıktı verisi olarak işlenir. Hadde boşluğu göstergeleri, tüm tezgah parçalarının elastik deformasyonları dikkate alınarak monte edilir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Değişimlerine bağlı olarak hadde ayarları, yatay ve dikey düzlemlerdeki pozisyonlarının doğrulanmasından ibarettir.

Yanal ölçü farklılıklarını ortadan kaldırmak için, bitiş hadde tezgahları, ufak kalınlık azalmalarıyla temper haddeleme şartları altında çalışırlar. Merdanelerin eğikliği, iş ve destek merdanelerinin ısıl genişleme, aşınma ve elastik deformasyonlarının dikkate alınmasıyla saptanır. Bitiş grubunun iş merdanelerinin, 0,1-0,3 mm gibi parabolik dışbükey bozukluğu vardır. Bazı durumlarda, ufak bozukluklara sahip iş merdaneleri, destek haddesi olarak kullanılabilir. Destek haddeleri silindirik yapıdadır [3].

Bitiş grubunun son tezgahında haddeleme hızı 12-15 m/s'yi bulur ve yeni haddelerde bu 15-20 m/s'ye ulaşmaktadır. Bitiş tezgahının ana sürücüsü, geniş hız aralıklarında ayarlanabilir olmalıdır. Bazı ekstra hızlara da ayrıca, geniş bombelerin hızlı düzenlerini sağlamak için gereksinim duyulabilir. Genellikle çalışma hızının,  $1,08.v_{\min}$  ile  $0,92.v_{\max}$  aralığında değiştirilebilmesi önerilir (Burtsev, 1973).

Tüm haddeleme hızı, sacın baş kısmının rulo sarıcıya geçirilebileceği mümkün olan en yüksek hızda sınırlandırılır. Haddeleme hızının artırılması kademeli olarak, sürekli hadde grubunun uygun hadde soğutma şartlarını koruma ve uzunlamasına ile genişlemesine ölçü değişimlerinin artmasını engelleme amaçlarından taviz vermeden yapılmalıdır (Lenard, Pietrzyk ve Cser, 1999).

Haddeleme hızı ve hadde soğutma koşulları, haddeleme sonundaki ve sac sarılırkenki metal sıcaklığını belirler. Düşük karbonlu çeliğe ince taneli mikroyapı sağlamak, çeliği eş-eksenli tekbiçim taneli yapmak ve iyi yayılmış sementite sahip olmasını sağlamak, onun iyi



şekillendirilebilirliğini korumak anlamına gelmektedir ve bu da haddeleme sonundaki sıcaklığın 860-890<sup>0</sup>C arasında tutulduğunda, son tezgahta yüzde kalınlık azalmasının 10'dan az olmaması ve sarma sıcaklığının 680<sup>0</sup>C'nin altında olmaması sağlandığı zaman elde edilir.

İstenilen sarma sıcaklığını elde etmek için bir su püskürtme tertibatı, son tezgahtan sonra çıkış tablasında monte edilmiş vaziyettedir. Su, üst ve alt kısımlardaki memelerden püskürtülür. Ayrıca soğutma işlemi, kontrollü soğutma, adım adım soğutma yada özel hadde tablalarında hava ile soğutma olarak da yapılabilir (Burtsev, 1973).

Önceden saptanan sıcaklığa kadar soğutulduktan sonra rulo saclar, sarıcılardan alınır ve depolanmak yada soğuk haddeleme bölümüne gönderilmek üzere taşınır.

### 2.2.5 Metalürjik Açıdan Sıcak Haddeleme

Sıcak haddeleme işleminin metalürjisi, elde edilen ürünlerin mekanik özelliklerini belirlemektedir. Bitiş haddesinde deformasyon programının kontrolü, bekletme tablasında soğutma ve bütünüyle sarma sıcaklığı, termomekanik işlemlerin unsurlarıdır. İstenilen mekanik özelliklerin mümkün olan en az sapma ile elde edilmesi doğrultusunda, tane boyutunun ve ikincil faz parçacıklarının hacim oranının kontrolü buradaki genel metalürji amaçlarıdır.

Faz dönüşümleri bakımından sıcak haddelemenin metalürji konuları, ısıl işlemler konusunun kapsadığı gibi; metal bileşimi, alaşım elementlerinin durumu (çökelmiş yada bileşik halde), östenit tane boyutu ve termal çevrimlerden ibarettir. Bu etmenlerin tümü, nihai ürünün metalürjik yapısını belirlemektedir.

Bir plastik şekil değiştirme işlemi, yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda meydana gelirse soğuk, aksi durumda sıcak şekil değiştirme söz konusudur. Sıcak şekil değiştirme sıcaklıklarının üst sınırı, şekil değişiminde asgari güç artışı ile çeliğin en iyi plastik özelliklere sahip olacağı şekilde seçilmelidir. Bu doğrultuda türdeş katı çözeltilinin oluşum sıcaklığı bir miktar aşılabilir. Ancak işleme sıcaklığının alt sınırı, hiçbir zaman ötektoid noktadan daha düşük olmamalıdır. Çünkü metaller haddelenebilme kabiliyetlerine en iyi, yeniden kristalleşme ve ergime sıcaklıkları arasındaki seviyelerde sahiptirler (Yurci, 2003).

Sıcak haddelemenin başlangıcı ve sonu, yumuşak karbonlu çeliklerin çoğunda 1260-950<sup>0</sup>C, takım çeliklerinde 1150-850<sup>0</sup>C, orta karbonlu çeliklerde 1200-900<sup>0</sup>C aralığındaki sıcaklıklarında yapılır. Haddeleme işlemi için yüksek hızlı modern makine düzenekleri geliştirildikçe, haddeleme başlangıcı ve sonu sıcaklıkları birbirlerine yaklaşmaktadır.

Sıcak şekil verme, yeniden kristalleşme sıcaklıklarının üstünde yapıldığı için, şekil değiştirme sırasında bozulan yapı hemen yeniden kristalleşir. Sıcaklığın etkisiyle malzemenin akma sınırının düşmesi, sıcak şekil verme işleminin soğuk şekil vermeye kıyasla daha düşük bir kuvvetle yapılabilmesini sağlar. Sıcak şekil verme sırasında döküm yapısındaki büyük ve çubuksu taneler küçük ve eşksenli tanelere dönüştüğü gibi ayrıca slabdaki, dökümden kaynaklanan gaz boşlukları da kapanır ve kaynar. Ancak metal ile gaz tepkimeye girmiş ve gözeneğin iç duvarlarında tepkime ürünleri oluşmuşsa, kaynama olmaz ve hatta haddeleme sırasında malzeme ayrılmaları görülür (Çapan, 1999).

Sıcak haddeleme işleminin başında slab yüksek sıcaklıklara ısıtıldıktan sonra, çözünebilir ürünler ve çökeltme kinetiği, alüminyum-nitrit, titanyum, niyobyum-karbür ve karbo-nitritler gibi nispeten çözülmesi güç bileşiklerin tam olarak çözünmesini sağlar. Slabda büyüyen tanelerin boyutları fırından ayrılma sırasında yaklaşık  $200\mu m$  civarındadır. Ancak sıcak haddeleme sırasında kayda değer bir tane küçülmesi meydana gelir ve işlem sonucu değişime uğrayan östenit ilk yapıdakine oranla daha incedir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Haddeleme esnasında, 1200 ile  $900^{\circ}C$  arasında, zayıf çözünebilirliğe sahip elementler parçacıklara ayrılmış haldedir, takip eden doyma haline doğru, östenit içinde çözünebilir potansiyelleri açığa çıkar. Ancak kinetik sebeplerden ötürü sıcaklık, çözünmeye sebep olma açısından yeterli değildir ve bu olgu deformasyon tarafından epeyce hızlandırılır. Bu, gerinim-nedenli çökeltme mekanizmasıdır.  $1000^{\circ}C$  civarında çözünemez hale gelen niyobyum-karbürlerin mevcudiyeti durumunda, sıcak haddeleme ile deforme olmuş östenitteki çökeltme kinetikleri, hiç vuku bulmayan yada dikkate alınmayacak kadar önemsiz çökeltme durumundaki gibidir.  $900^{\circ}C$ 'de yüksek niyobyum ve karbon içerikli bir çelik sac sınıfında, gerinim-nedenli çökeltme yaklaşık 10 saniye sonra başlar. Faz dönüşümü sırasında, östenit tane boyutu ve dislokasyon yoğunluğu bu nedenle termomekanik çevrime bağlıdır. Isıl işleme zıt olarak, yüksek sıcaklıkta çökeltmiş elementler, östenit içindeki çözelti içinde kalırlar (Lenard, Pietrzyk ve Cser, 1999).

Östenitin deformasyona uğraması,  $Ar_3$  sıcaklığını yükseltir, fakat ferritteki çekirdeklenme oranlarını arttırarak, nihai tane boyutunun baştan başa incelmeye neden olur. Üstelik, CCT diyagramındaki faz alanlarını iyileştirerek, bir anlamda sertleşebilirliği düşürür (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

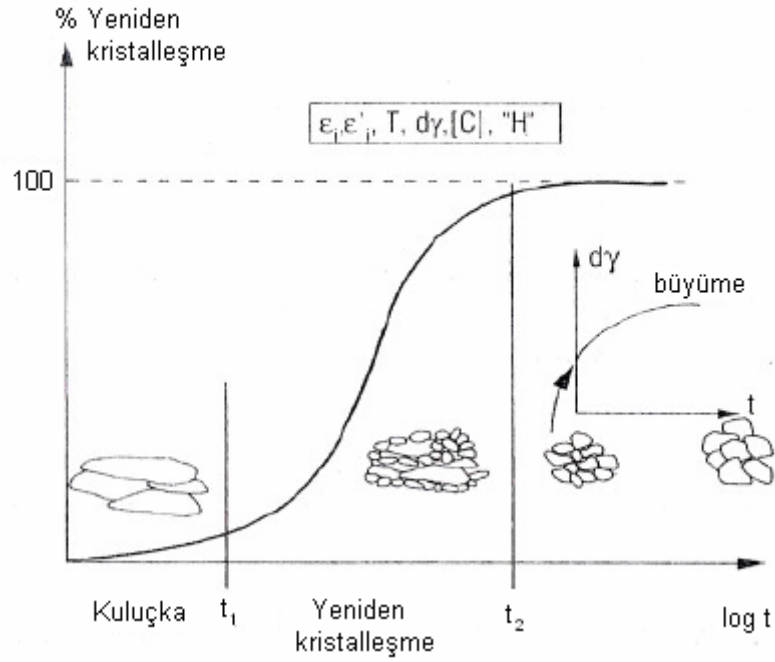
Tane boyutundaki en önemli küçülme bitiş hadde grubunda meydana gelir ve sıcak metal plastik şekil değiştirdiğinde, başlangıçta poligonal olan östenit taneleri metal gibi biçim

değiştirerek düzleşir ve uzarlar. Böylece ortaya çıkan mikroyapıya keksel yapı denir. Metalin akış gerilimi, mikroyapıdaki değişimi yansıtır. Ani gerinim sertleşmesi, kristal hatalarının (dislokasyonların) varlığından dolayı deformasyon başlangıcında meydana gelir. Bu olgu, kusurların yeniden düzenlenmesi ve kısmen yok edilmesine yol açmasıyla ilgili olan yeniden toparlanma mekanizmasının yüksek sıcaklıklarda etkin olması dışında, soğuk işlem sırasında vuku bulan olaya oldukça benzerdir. Tane sınırları yüksek sıcaklıklarda büyük etkiye sahiptir ve sınır düzlemi boyunca oluşan kayma ile (tane sınırı kayması) toplam gerinime katkıda bulunurlar.

Sıcak şekil vermede işlem sıcaklığı, işlemin tamamlanma süresine bağlıdır. İşlem süresi ve buna bağlı olarak yeniden kristalleşme için gerekli zaman kısaldıkça yeniden kristalleşme ve dolayısıyla işlem sıcaklığı da yükselir. Bu durumda dinamik yeniden kristalleşme söz konusudur. Dinamik yeniden kristalleşme, çok yüksek gerinimlerde er yada geç başlar, ancak sıcak haddede bu koşullara, yüksek gerinim oranları da dahil yeterli olmayan gerinimlerden dolayı ulaşamaz (Çapan, 1999).

İki paso arasında metalde depolanan gerinim enerjisi, yeniden toparlanmanın devam etmesine olanak tanır ve eğer yeterli ise statik yeniden kristalleşmenin başlamasına yol açabilir (Şekil 2.9). Gerinim birikmesinin en yüksek olduğu tane sınırlarında yeni taneler oluşmaya başlar ve eski tanelerin içine doğru büyürler. Tepkime kinetiği şöyle açıklanabilir; yeni tanelerin, sıcak işlenmiş ve yeniden toparlanmış bölgelerinin her ikisinin de bir arada var olduğu süreç esnasında kısmi yeniden kristalleşme ve daha sonra, yeniden kristalleşme, ortalama tane boyutuna bağlı olarak bittiğinde alışılmış tane büyümesi oluşmaktadır. Bu olgular, bir önceki hadde geçişi sırasındaki deformasyon koşullarına (gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık) ve biçim değiştirmiş ortalama tane boyutuna oldukça bağlıdır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Katı çözeltilerdeki tüm elementler, yeniden kristalleşme kinetiklerini geciktirici yönde davranırlar, ancak 100 ppm düzeyinde bile olsa çok güçlü etkileri olan özellikle niyobyum ve titanyum gibi mikroalaşım elementleri diğerlerine göre daha engelleyicidirler. Örneğin, düşük karbonlu çeliğin 950°C'de 1 saniyede yeniden kristalleştiği koşullarda, yapıda niyobyum varlığı 200 ppm'e çıkarsa gerekli zaman 60 saniye olacaktır. Niyobyum gibi elementlerin ilavesi, tane incilmesi ve çökeltme sertleşmesine neden olur ve dolayısıyla çeliğin malzeme dayanımının artmasında rol oynar. Diğer alaşım elementlerinden titanyum ve vanadyumun ise tane incelmesinde daha az etkisi olurken, bu elementler çökeltme sertleşmesini arttırarak çeliğe dayanım kazandırır (Lenard, Pietrzyk ve Cser, 1999).



Şekil 2.9 Statik yeniden kristalleşmenin kinetiği

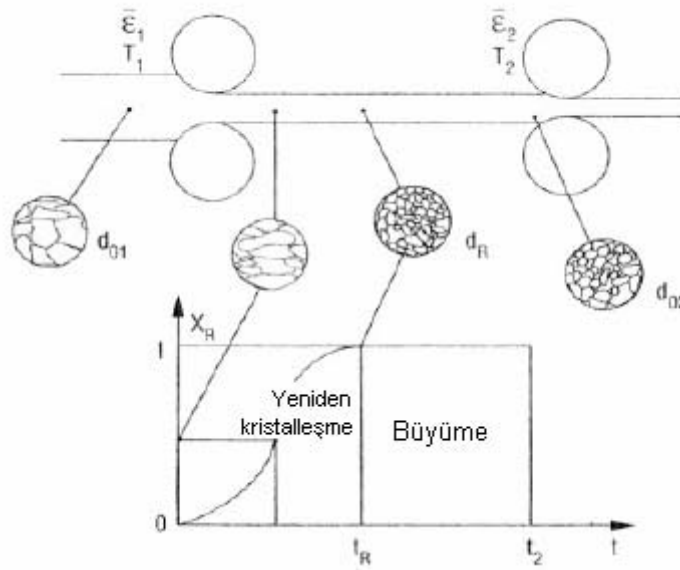
Çok yüksek sıcaklıkta haddeleme yapıldığında malzeme çok çabuk yeniden kristalleşmeye uğramakta ve bu arada şekillendirmeyle ilgili tüm değişimler ortadan kalkmaktadır. Buna karşın ortalama sıcaklık bölgesinde haddeleme yapıldığı takdirde, malzeme daha yavaş yeniden kristalleşmekte ve malzemenin nihai kristal boyutlarına ulaşması daha uzun zaman almaktadır. Bu durumda, hadde merdanelerini terk eden malzemede yeniden kristalleşme safhaları devam etmektedir.

Haddeleme sırasında levhalara verilen kısa geçiş zamanlarında, metal bir sonraki merdane boşluğuna girerken çoğunlukla, sadece kısmi yeniden kristalleşmeye uğrar. Mekanik yönden metal, kısmen gerinim sertleşmesine uğramış, yeniden toparlanmış tanelerden ve kısmen de yeniden kristalleşmiş daha ince tanelerden ibaret olan heterojen malzemedir (ilk durum ikinci duruma göre daha yüksek akış gerilimine sahiptir). Genel gerinim akışı, karışımlar kanununa uymaktadır. Bu etki ihmal edilemez ve eğer yeniden kristalleşen hacim oranı küçükse, ortalama akış gerilimini yaklaşık % 30 oranında arttırabilir. Sıcak haddeleme esnasındaki akış geriliminin aslında yüksek gerinim oranları içermesinden dolayı, büyük sıklıkla oda sıcaklığındaki akma gerilmesinden daha büyük olabileceği dikkat çeken ilginç bir durumdur (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Gerinim sertleşmesi, statik yeniden kristalleşme ve östenit tane büyümesi durumlarının birbirlerini izlemesi, bitiş haddesine doğru her defasında tekrarlanır ve bu, mikroalaşım

elementlerine sahip olmayan çelikler için büyük çapta tane incelmeye yol açar (levhada  $30-50\mu m$  arası, bitiş haddesinden çıkışta yaklaşık  $15\mu m$ ) (Şekil 2.10). Bitiş haddelerinde mikroalaşımli saclarda, yeniden kristalleşme tamamlanmamış durumdadır.

Haddelemenin  $A_{r3}$  sıcaklığının altında sona ermesi durumunda, ferrit ve östenit bir arada bulunur. Eğer metal yüksek sıcaklıklarda rulo halinde yeterli süre kalırsa, ferrit içinde biriken gerinim, metalin yeniden kristalleşmesine sebep olur. Dolayısıyla bu da yapıda, tekbiçim olmayan yada kaba ferrit tanesi oluşmasına yol açar (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).



Şekil 2.10 Gerinim sertleşmesi ve yeniden kristalleşmeyle meydana gelen ardışık tane incelmeye (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

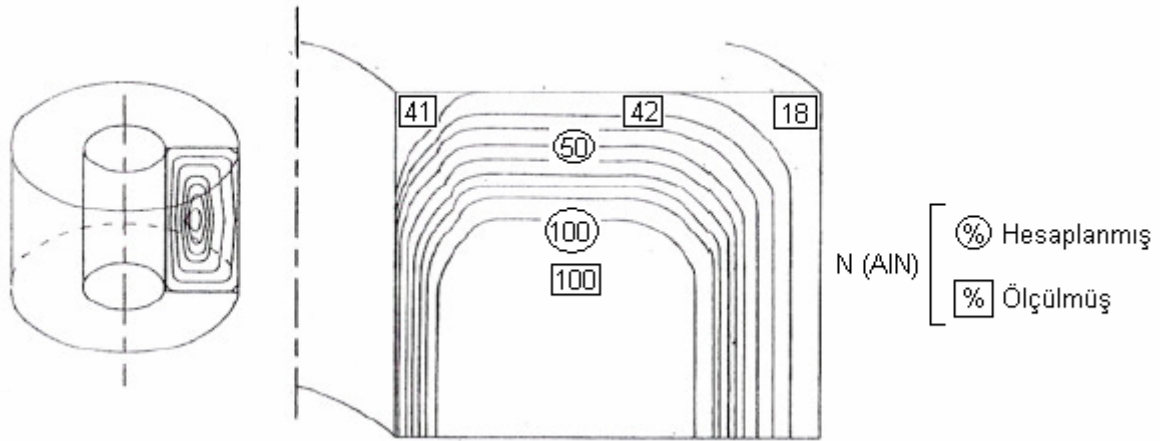
Plastik şekil değişimi belirli sıcaklık alanlarında ve zaman sınırları içinde yapıldığı takdirde çeliklere çok yüksek mukavemet özellikleri kazandırılabilir. Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (TTT) diyagramlarından faydalanılarak yapılan bu tür şekil verme işlemleri termomekanik olarak adlandırılır.

Soğuma ise sıcak haddeleme esnasında üç kısımda incelenebilir. Bunlar; haddeleme sırasında devamlı hızlandırılmış, püskürtme anında düzenli ve rulo sarma esnasında ise kesik kesiktir.

Faz geçişleri bakımından, soğutma tablasındaki koşullar CCT diyagramına benzerken, rulodaki soğuma koşulları TTT diyagramlarına daha yakındır. Çünkü, rulo merkezi 1-2 saat arasında bir süre sabit sıcaklıkta kalır ve oldukça yavaş soğur. Aslında, rulo halinde tekbiçim soğutma elde edilemez, çünkü dış kısımlarda ve özellikle kenarlarda soğuma, iç kısımlara

göre daha hızlıdır (Burtsev, 1973).

Su ile soğutma esnasında, ferritteki düşük çözünürlüğe sahip elementlerin ara faz çökmesi, ani çekirdeklenme kinetiği ile meydana gelir. Buna karşın, yavaş çekirdeklenme kinetikli fazlar, uygun sıcaklık sağlandığı takdirde bobin içinde çökeceklerdir. Örneğin, alüminyum-nitrit, 720°C gibi yüksek sarma sıcaklıklarında çöklerken, 600°C'nin altında çökme olmaz. Sıcaklığa olan bu yüksek duyarlılık nedeniyle, rulonun tekbiçim olmayan soğuma şartı, farklı alanlarda değişen miktarlarda AlN oluşmasına yol açar (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Bir rulo çelik sacın farklı bölgelerinde çökelmiş AlN oranları (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

Sıcak haddelemenin son bölümü olan rulo sarma işlemi, ikincil faz parçacıklarının miktarını ve dağılımını ve böylece çökme sertleşmesi miktarını belirler. Yüksek sarma sıcaklığı kaba ikincil faz parçacıklarına neden olurken, düşük sarma sıcaklığı, ikincil faz parçacıklarının daha düzgün dağılımlı olmasını sağlar. Sarma sıcaklığı, çekme dayanımı ve uzama gibi mekanik özellikleri etkiler. Yüksek bir sarma sıcaklığı, hem uzamada hem de çekme dayanımında düşüğe neden olur (Burtsev, 1973).

Ruloda tutma zamanı, diğer bileşikler açısından bakıldığında, tanecik irileşmesi veya morfoloji değişimine (örneğin demir karbür oluşumuna) neden olur. Karbon gibi hızlı difüzyona uğrayan elementler kendi denge durumlarına ulaşabilirler (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

## 2.2.6 Sıcak Haddelemede Kontrol ve Başlıca Kusurlar

Sıcak haddeleme işlemi sırasında yapılan kontrollerin ve ürün kalite parametrelerinin ölçüm

teknikleri sırasıyla, Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5'te belirtilmiştir.

Çizelge 2.4 Sıcak haddeleme işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

<b>İşlem Kontrol Değişkenleri</b>	<b>Ölçme Tekniği</b>
Yeniden ısıtma fırını atmosfer analizi	Çözümleme pili
Slab sıcaklığı	Pirometre
Gerilme kuvvetleri	Elektriksel ölçüm, uzama-ölçer
Tezgah ayarları	Mekanik duyarlar
Genişlik, şekil	Optik ölçüm
Kalınlık ve kalınlık profili	X-ışını ölçümü
Düzlemsellik	Üç-açılı ölçüm yöntemi
Sıcaklık dağılımı ( Kaba ve bitiş haddeleme çıkışları ve sarıcı girişinde )	Pirometre

Çizelge 2.5 Sıcak haddeleme işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

<b>Ürün Kalite Değişkenleri</b>	<b>Ölçme Tekniği</b>
Boyutlar ( genişlik, kalınlık )	Optik ve X-ışını ölçümü
Düzlemsellik	Üç-açılı ölçüm yöntemi
Mekanik ve yapısal nitelikler	Bobin Sarma sıcaklığının ölçümü
Yüzey durumu	Görsel denetim

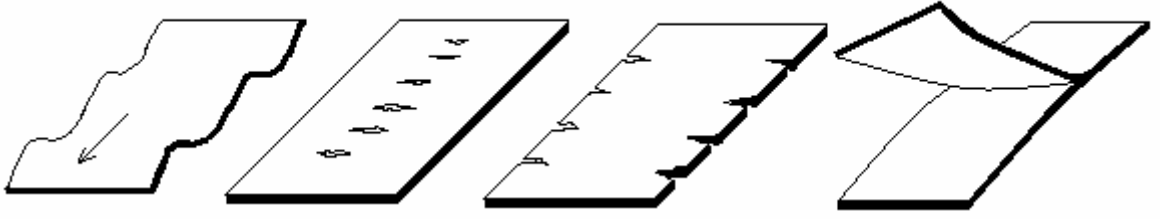
Sıcak haddeleme işleminin kusursuz yapılabilmesi için, öncelikle hammaddelerin hatasız üretilmiş olması gerekmektedir. Haddeleme işlemi sırasında ise sıcaklık ve hız kontrolü, oksit oluşumu, merdanelerin geometrileri ile yüzey durumları ve yağlama gibi etmenlerin gözetim altında tutulması gereklidir.

Yassı ürün hammaddesi olan slabların yüzey kusurları arasında çatlaklar ve çubuklar sayılabilir. Sürekli döküm tesisinin kontrol bölümünde giderilen bu kusurlar gözden kaçarsa haddeleme sırasında kusurlu bölgeler büyüyerek uzun yarıklara, hatta malzeme ayrılmalarına neden olur. Slabların pota, tandış ve kalıp dökümlerinden kaynaklanan iç kusurlarından gözenek ve gaz boşluklarının ise haddeleme sırasında kaynarak kapanmaması, ürünün kusurlu olmasına yol açar.

Tufal batması, çatlak, katmer ve merdane izleri gibi yüzey kusurları haddeleme işleminden kaynaklanan kusurlardır. Saclardaki katlanmalar, çıkış tablasının ve son tezgahtan ayrılan

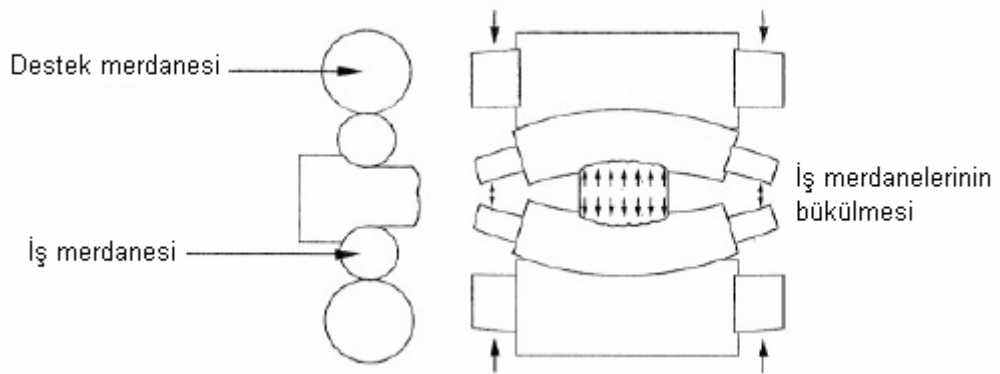
sacın aralarındaki hız farkından kaynaklanmaktadır. Merdane izleri ise, devamlı aynı genişlikteki malzeme ile çalışma sonucu o genişliğe göre aşınan merdanelerin daha geniş malzeme için kullanılmalarından sonra malzeme üzerinde bıraktıkları izlerdir. Merdane üzerine kaynayan oksit gibi yabancı maddeler de malzeme üzerinde iz yapabilir.

Dalgalı kenarlar, ortada enlemesine çatlaklar, kenar çatlakları ve timsah ağzı gibi malzeme kusurları da haddeleme işlemi esnasında ortaya çıkar ve büyük çapta ıskartalara neden olur (Şekil 2.12) (Çapan, 1999).



Şekil 2.12 Yassı çeliklerde haddeleme sırasında karşılaşılan başlıca kusurlar (Soldan sağa; dalgalı kenarlar, ortada enlemesine çatlaklar, kenar çatlakları, timsah ağzı)

Dalgalı kenar kusuru, özellikle destek haddelerinin kullanılmadığı ikili düzen merdanelerde oluşan düşey doğrultuda eğim ve bombe geometrisi sonucu meydana gelir (Şekil 2.13). Sacın ortasında kalınlığı, kenarlara nazaran daha büyüktür. Bu nedenle kenarlar fazla uzarlar ancak serbestçe yayılamazlar ve böylece kenarda dalgalanmalar oluşur. Bu sakıncayı ortadan kaldırmak amacıyla özel bombeli merdaneler kullanılır.



Şekil 2.13 Sıcak haddeleme sırasında iş merdanelerinin bükülmesi (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

Malzeme sünekliğinin düşük olması ve merdanelerde meydana gelen eğilme ortada ve



kenarlarda enlemesine çatlakların oluşmasına neden olur. Öncelikle merdane eğilmesi sacın kenar kısmında basma, orta kısmında çekme gerilmeleri doğurur. Orta kısımdaki çekme gerilmesi sonucu oluşan fazla uzamayı kaldıramayan sac malzeme çatlaklar.

Bilindiği gibi haddeleme sırasında malzemede kalınlık azalırken, uzunluk ve genişlik artar. Kenar kısımlarda merdanelerle malzeme arasındaki sürtünmenin orta kısma göre azlığı, kenarların daha çok genişlemesine neden olur. Orta kısım boyca daha çok uzar ve dolayısıyla sacın başı ve sonu yuvarlaklaşır. Homojen olmayan bu şekil değişimi kenarda çekme, ortada basma şeklinde kalıntı gerilmelere yol açar. Eğer malzeme, sac kenarlarındaki gerilmelere yeterli dayanımı gösteremezse kenar çatlaklarına engel olamaz. Orta kısımdaki fazla uzama ayrıca sacın ortadan ikiye ayrılmasına neden olabilir (Çapan, 1999).

Timsah ağzı kusuru, çeliklerde çok nadir görülen karmaşık bir metalürjik kusurdur. Slabta bulunan gaz boşluğu, tekbiçim olmayan yeniden kristalleşme veya homojen olmayan şekil değişimi başlıca oluşma nedenleridir.

Yassı ürünlerin sıcak haddelenmesi sonunda elde edilmesi istenen kalınlık, genişlik ve düzlemsellik gibi geometrik özelliklerin belli toleranslar dışında olmaları da haddeleme kusurlarındandır. Bu geometrik kusurlardan en önemlisi olan kalınlık kusuru, sacın boyu ve/veya eni doğrultusunda değişmesi şeklinde açığa çıkar. Kalınlık değişiminin belirli sınırlar dışına taşması, kalıpta kesilmesi, derin çekilmesi v.s. gibi şekillendirme işlemlerinde önemli sorunlar doğurur (Kalpakjian ve Schmid, 2001).

Kenarlarda ve ortada enlemesine çatlaklar konusunda da bahsedildiği gibi özellikle destek haddelerinin kullanılmadığı ikili hadde düzenlerinde merdanelerin hadde yönüne dik olarak bükülmesi ve bombeli bir geometride çalışmaları sonucu sacın kalınlığı ortada kenarlara kıyasla daha fazla olmaktadır. Bu sorunun çözümü için, geniş çaplı destek haddeleri kullanmak, otomatik kontrollü hidrolikler yardımıyla karşı bükme kuvveti oluşturan özel hadde sistemleri kullanmak veya özel şekillendirilmiş silindirik olmayan merdaneler kullanmak gibi önlemler alınabilir. Enine kalınlık değişiminin ölçümünde  $C_x$  ile gösterilen parametreden yararlanır [ $C_x$  : sac kenarından x mm uzakta olan bir noktayla merkez çizgi arasındaki kalınlık farkı] (Şekil 2.14). Çelik kalitesine ve sac genişliğine göre farklılaşır ancak enine kalınlık değişimi,  $C_{40} \leq 60 \mu m$  şartı ile sınırlandırılabilir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).



Şekil 2.14 Yassı üründe enine kalınlık değişimi (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

Saclarda boyuna doğrultuda kalınlık değişimine yol açan nedenler, haddeleme işlemine, malzeme heterojenliğine ve merdanelere bağlı olarak çeşitlenmektedir. Haddeleme sırasında hızın değişimi, uygulanan gerilmenin değişimi (geri ve ileri çekme) ve merdane sıcaklığının değişimi, sac kalınlığını boy doğrultusunda değiştirir. Malzeme heterojenliğine bağlı neden, giriş kalınlığı ile malzeme sertliğinin değişmesidir. Sacın boyu doğrultusunda kalınlık değişimi sebeplerinin bir diğer kısmı olan merdanelere bağlı nedenler ise oval işlenmiş haddeler, kaçık işlenmiş gövde ve muylular ve yataklama hatalarını içerir. Haddeleme sırasında boy yönünde kalınlık değişimi X ışını duyargaları yardımıyla devamlı denetim altındadır. 2,5 mm kalınlığının altındaki saclarda, gövdenin % 98'i, uç kısımların % 92'si  $\pm 50\mu m$  toleransı dahilinde ölçülmektedir.

Kalınlık kusurlarının yanı sıra, yassı ürünlerin genişlik değerlerinin de belli toleranslar dışında olması genişlik kusurlarını doğurur. Nitekim sabit bir genişlik aralığı elde etmek oldukça zordur. Özellikle genişlik değişimi alt sınır değeri aşmamalıdır. Kaba haddelemede genişlik, özel kenar donanımları ile ayarlanır (Burtsev, 1973). Otomatik genişlik kontrol düzenekleri de genellikle bir önceki tezgahdaki genişlik değerine bağımlı olarak kaba haddeleme biriminin son tezgahında işlemektedir. İstenilen genişlik değerine kaba haddeleme sırasında ulaşılır ve bitiş hadde biriminden sarıcılara kadar bu değer korunmasına çalışılır. Bu da haddeler arasında oluşabilecek hız farklılıklarını ortadan kaldırmak için düzenlenen, haddelenen ürünün gerginliğini devamlı kontrol eden ve hızını ayarlayan motorlu birimler sayesinde başarılıdır. Genişlik fazlalıkları bu tip birimler sayesinde 8,5-10 mm arasında değişmektedir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Çelik levhaların ve sacların düzlemsellik değerleri de kusur teşkil etmemesi bakımından

devamlı denetlenen geometrik özelliktir. Düzlemsellik denetimi, ürünün referans düzlemine yatırılması ile bünyesindeki bel verme yada hadde yönüne dik ve bölgesel dalgalanmaların ölçülmesinden ibarettir. Bu tip kusurlar, yassı ürün yüzeyinin değişik bölgelerindeki farklı lif uzunluklarından kaynaklanmaktadır. Özellikle soğutma tablasında ürünün soğutulması sırasında sıvının yüzeyde bazı bölgelerde kalması ve farklı soğuma koşulları oluşturması buna sebeptir. Ayrıca hadde merdanelerinin karşılıklı paralel ve örtüşen profillerde olması bu kusurları engeller. Haddelenmiş ürünün % 80'lik kısmında düzlemsellik değeri % 1'den düşüktür (Burtsev, 1973).

Kıvrılan sacların ezilip iç içe geçmesiyle rulonun, rulo eksenine doğrultusunda uzaması, bobinlerde teleskobik şekil bozukluğudur. Bu hataya, bobin sarıcıların uygun olmayan şartları, sarıcıya sac beslemenin hatalı yapılması ve sacın kenar gerinimi neden olabilir (Burtsev, 1973).

Bunun dışında bazı hatalar da haddelerin yanlış montajı, malzemenin haddelere yanlış beslenmesi, yağlayıcılar ve sac yüzeylerinin kirlenmesinden kaynaklanabilir.

Üretim modelinin uygun organizasyonu ile beraber ve daha önemlisi hadde ve hadde donanımlarının bakımı ile beraber tutarlı ve tam kontrollü haddeleme programı, çelik saclardaki çeşitli kusurları azaltan veya yok eden kati etmenlerdir.

### **2.3 Soğuk Haddeleme**

Soğuk haddeleme, metal veya metal alaşımlarına yeniden kristalleşme sıcaklıklarından daha düşük sıcaklıklarda uygulanan plastik şekillendirme işlemidir. Soğuk haddeleme ile çelik saclara asgari boyutsal tolerans aralıkları, kaliteli yüzey durumu, daha iyi mekanik özellikler ve ayrıca birtakım belirgin fiziksel özellikler kazandırılarak, 1,5 mm'den daha düşük kalınlıklara ulaşmak mümkündür.

Düşük kalınlık, yüzey düzgünlüğü, yüksek şekillendirilebilirlik ve özellikle derin çekilebilirlik özellikleri soğuk haddelenmiş çelik sacların metal ve plastik kaplamalarla beraber çok geniş imalat alanlarında kullanılmalarını sağlamaktadır. Çelik sacların soğuk haddelenmesi aşağıdaki aşamaları içerir;

- 1) Dekapaj, 2) Haddeleme, 3) Tavlama, 4) Temper Haddeleme, 5) Kaplama, 6) Kontrol ve Paketleme.

### 2.3.1 Dekapaj

Sıcak haddelenmiş şerit üzerinde, üç tabaka halinde oksit vardır. En üst tabakada hematit ( $Fe_2O_3$ ), bunun altında manyetit ( $Fe_3O_4$ ) ve en alt tabakada ise demir oksit ( $FeO$ ) bulunur. Yassı ürün üzerinde bulunan bu tabakalar soğuk haddelemeye uygun olmayan farklı bir kabuk teşkil ettiğinden, bu kabuğun işlem sırasında ürünün iç kısmına karışabileceği ve hadde rulolarına zarar verebileceğinden dolayı yok edilmesi gerekmektedir. Bu tufali yok etmek için çeşitli asit ve alkali (en yaygın kullanılabilecek sülfürik asittir) solüsyonları içersine yassı ürün daldırılır. Ancak öncelikle, sıcak haddelenmiş bobinler asitleme hatlarında açılır ve yüzeylerindeki tufal tabakaları kırılır. Bunun nedeni, sülfürik asitin hematit ve manyetit tabakalarını geçip en alt tabakadaki demir oksite etki etmesinin zor olmasıdır. Oksit tabakalarının kırılması bir bakıma asit tepkimesinin hızlanması ve işlem verimliliği için önemlidir. Burada şerit sürekli bir gerilim gücü altında küçük yatay rulo serilerinden geçirilip ileri ve geri bükülerek oksit tabakasının mekanik olarak parçalanması sağlanır (Ersoy, Köroğlu, Günday, Pehlivan ve Yaşacan, 1991).

Oksit kırıcı merdanelerin sonundaki doğrultma silindirleriyle şerit, doğrultma işleminden geçirilir. Sac rulonun baş ve sonlarındaki bozuk kısımlar uç kesme makaslarında kesilirler. Birbiri ardı sıra gelen bobinlerin uç kısımları, kaynak makinesinde birleştirilerek devamlı şerit haline getirilir [1].

Çelik sac, kesintisiz olarak asitleme işlemine maruz bırakılır (dekapaj). Bu kısımda kullanılan asitleme tanklarının çelik konstrüksiyonu, asite dayanıklı plastik ile kaplanmış ve 30 cm kalınlığında asit tuğlalarıyla örülmüştür. Her bir havuzun boyu 20-23 m, genişliği 2 m, derinliği 1-1,5 m civarındadır ve bir asitleme hattında 3-4 adet havuz bulunur. Tuğlaların altına yerleştirilen “manyetik bombeleştirici sistemi” şeritin havuza dalarak gitmesini sağlar. Tankın içindeki karışım, buharla ısıtılarak 90°C sıcaklık civarında tutulan %6-26 sülfürik asit içeren su + sülfürik asit karışımıdır. Son teknolojilere sahip asitleme hatlarında, asit ve şeritin tam temasını sağlamak amacıyla havuz şiddetli biçimde çalkalanır. Karışım oranını sabit tutmak için asit, karışıma otomatik olarak beslenir (Ersoy, Köroğlu, Günday, Pehlivan ve Yaşacan, 1991).

Asit tanklarından ayrılan şeritin altına ve üstüne soğuk ve minerallerinden arındırılmış su püskürtülerek yüzeydeki asit bulaşıkları yıkanır. Şerit sıcak su tankına girer ve buranın çıkışında da lastik sıyırma merdanelerine girerek yüzeye yapışan asit bulaşıkları sıyırılır ve şerit yüzeyi bir nebze kurur. Tam kurutma ise, takip eden kurutma sistemindeki fanlardan

geçen buharın, şeritin alt ve üst kısımlarına teması ile sağlanır (Burtsev, 1973).

Kurutma sisteminin çıkışında, dekapaj sırasında oluşabilecek hız farklarından doğan aksaklıklardan şeritin etkilenmemesi için geliştirilmiş bombeleştiriciler kullanılır.

Sıcak haddelenmiş ruloların her iki kenarlarından 15-20 mm gibi bir miktar, dekapaj hatlarında dairesel bıçaklarla kesilir. Bunun nedeni, kenarlarda oluşan ezilme, çentik, yanık gibi kusurları ve genişlik farklılıklarını yok etmektir. Uzun şerit bu işlemde sonra çıkış makasında, kaynak edildiği yerlerden bölünerek başlangıçtaki bobinlerine ayrılır. Daha sonra yağlama makinesinde yağlama merdaneleri ile şeritin alt ve üst yüzeyleri homojen bir biçimde yağlanır. Yassı çelik, tekrar rulo haline getirilir, tartılır ve asitleme hattından çıkarılır (Ersoy, Köroğlu, Günday, Pehlivan ve Yaşacan, 1991).

Buraya kadar anlatılan asitleme amaçlı işlemler, hem doğrudan kullanıma yönelik sıcak haddelenmiş rulolar hem de soğuk haddeleme bölümüne gönderilecek çelik saclara uygulanabilir. Ancak yalnızca doğrudan kullanıma yönelik sıcak haddelenmiş sac rulolar için itme-çekme hatları adı verilen, nispeten daha az yer kaplayan dekapaj bölümü mevcuttur. İtme-çekme hatları, daha yüksek kalınlıklara sahip (2-12 mm) ve kaynak edilmeyen bobinlere uygulanır. Dolayısıyla, her rulonun ayrı dekape edildiği, küçük ve orta kapasiteli daha ucuz hatlardır. Şerit, rulo çözücü tarafından itilir ve rulo sarıcı tarafından çekilir. Sistemin tankları fazla derin değildir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

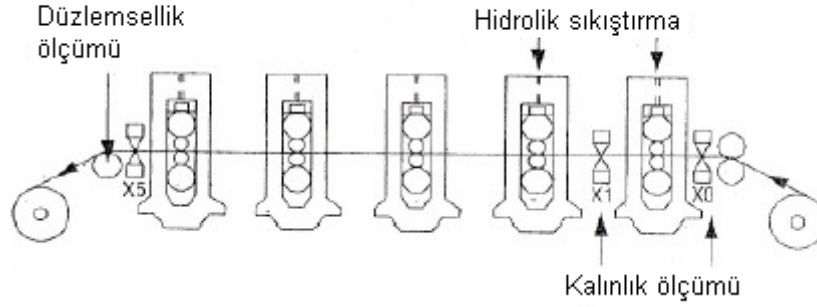
### **2.3.2 Soğuk Haddeleme Teknolojisi ve İşleyişi**

Asitleme hatlarından çıkan temizlenmiş, kenarları kesilmiş ve yağlanmış sac rulolar, tersinir tek tezgahta ileri-geri yönlerde veya beş haddeden oluşan sürekli tandem tezgahlarda tek yönde soğuk olarak inceltilecek sıcak haddelenmiş bobinlere nazaran çok daha düzgün bir yüzey elde edilir. Sürekli tezgahların verimliliklerinin tersinir düzenlere göre çok yüksek olması nedeniyle ülkemizdeki Erdemir A.Ş.'de dahil tüm büyük kapasiteli işletmelerde soğuk haddeleme, sürekli tandem hadde düzenleri ile yapılmaktadır.

Soğuk haddeleme giriş konveyörüne gelen bobinler uygun şekilde döndürülür, bobin hazırlama ve besleme grubunda bobin ucu, üstü tahrikli altı avare çekici merdane vasıtasıyla ilk tezgahın iş merdanelerinin arasına kadar yürütülür. İş merdaneleri, bobinin ucunu kaptıktan sonra, girişteki üst çekici merdane yukarı kaldırılır.

Şekil 2.15 sacın soğuk haddeleme işlemini göstermektedir. Haddeleme işlemi normal şartlarda bilgisayar denetimi altında yapılır. Haddeleme için gerekli ön bilgiler (malzemenin

giriş ve çıkış kalınlıkları, genişlikleri, kalite cinsi, merdanelerin yüzey durumları ve bobin numarası) hattın girişindeki kontrol terminalinden girilir. Bu bilgilere göre hesaplanan hız değerleri ve hadde aralıkları ile sistem işler. Şekil 2.15'ten de görülebildiği gibi kalınlık ve düzlemsellik ölçümleri geri beslemeli olarak çalışır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).



Şekil 2.15 Sürekli soğuk tandem haddeleme işlemi (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

Her n tezgahında kalınlık, giriş  $e_{n-1}$  değerinden çıkış  $e_n$  değerine azalır. Kalınlık incilmesi ve boydaki artış yanıl bir yayılma meydana gelmeden olur. Sacın n. tezgah girişinde hızı  $v_{n-1}$  ve çıkışta hızı  $v_n$  olursa kalınlık akış hızları arasındaki ilişki 2.8 eşitliğindeki gibi olur;

$$v_{n-1} \cdot e_{n-1} = v_n \cdot e_n \quad (2.8)$$

Böylece sac, hadde geçişlerinde sürekli hızlanır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996). Tandem olarak soğuk haddelemede, 0,4 ila 3 mm arasındaki kalınlıklarda, en yüksek çelik sac hızı, 600 ile 1500 m/d arasında değişmektedir (Erdemir A.Ş.'de 1441 m/d). 1200 mm genişliğinde, 0,13-0,4 mm arasındaki kalınlıklardaki ince paketleme şeritlerinin haddelenmesinde kullanılan hız değerleri ise 1500-2300 m/d arasında değişir (Ersoy, Köroğlu, Günday, Pehlivan ve Yaşacan, 1991).

Haddeleme enerjisi çok yüksek tork gerektiren çalışma merdaneleri ile nakledilir. Bir tezgahın gücü 3 ile 8 MW arasında değişir. Birinci tezgahın motorları en az güç üretirken, tezgahların güç değerleri sırayla artmaktadır ve son tezgahta en yüksek güç gereklidir (1. tezgah 2000 BG, 5. tezgah 5000 BG). Günümüzde hadde tezgahları, doğru ve alternatif akımlı elektrik motorları ile tahrik edilmektedir. Motor milleri üzerinde volan bulunmaktadır ve böylece haddeleme sırasındaki azami yükler karşılanabildiği gibi gerekli motor gücü de düşürülebilmektedir. Devir düşürücü dişli, yüksek hızlı elektrik motorunun devir sayısını merdanelerinkine indirgemektedir (Roberts, 1978).

### 2.3.2.1 Hadde Donanımları

Sürekli tandem soğuk haddeleme grubunda bulunan tezgahlar şu donanımlara sahiptir;

- Otomatik kalınlık kontrol sistemi,
- 1. ve 5. tezgahlarda, otomatik kalınlık kontrol sisteminden gelen bilgilere göre hareket ederek baskıyı sağlayan hidrolik silindirler,
- Haddelerdeki ezme kuvvetlerini ölçen yük hücreleri,
- Tezgahlar arasındaki sacın gerginliğini sağlayan gergi merdaneleri,
- 4. ve 5. tezgahlarda iş merdanelerinin hidrolik kuvvetlerle iki yöne bükülmesini sağlayan düzeneç,
- 4. ve 5. tezgahlarda hızlı merdane değiştirilmesini sağlayan merdane değiştirme arabaları.

Bilindiği gibi gergi kuvveti ile haddeleme sırasında, haddeleme basıncı düşer. Bu nedenle soğuk haddelemede sac gerginliğini uygun olarak seçmek ve onu sabit tutmak çok önemlidir. Sac gerilimi, merdaneler ve sarıcıların hızlarının kontrolü vasıtasıyla otomatik olarak sabit tutulur. Bu yüzden otomatik kontrol sistemi, duyurga olarak gerginlikölçer cihazlar da içermektedir (Burtsev, 1973).

### 2.3.2.2 Merdaneler

Soğuk haddelemede kullanılan merdaneler % 3 – 5 arası krom içeren dövülmüş veya dökülmüş çelikten imal edilirler. Daha yüksek alaşımlılar geliştirilmektedir. Merdane yüzeyleri taşlanır ve hatta özel uygulamalar için parlatılır. Bu uygulama, kullanılmış merdanelerde, haddelemenin neden olduğu sertleşmiş yüzeyi yok eder ve istenen pürüzlülük değerini korur. Orta kaliteli tezgahlarda  $R_a$  pürüzlülük değeri  $0,5\mu m$  civarındadır. İnce çelik sac haddeleme sırasında son tezgahta,  $3 - 5\mu m$  gibi çok daha yüksek  $R_a$  pürüzlülük değerlerine ulaşmak amaçlanır. Bunun nedeni; yüksek pürüzlülük, sıcak daldırarak galvanizleme yöntemi sırasında çinko kaplamanın yapışma oranını yükseltir, gaz devirdaymını kolaylaştırır ve tavlama sırasında yapışmaya izin verir. Her taşlama sonrasında merdaneler krom kaplanabilir. Bu işlem aşınmayı sınırlar, bir dahaki taşlama süresini geciktirir (Roberts, 1978).

İş merdaneleri olarak adlandırılan saca temas halindeki rulolar, haddeleme basıncına maruz kalırlar ve bükülmeleri, büyük çaplara sahip, daha sağlam destek merdaneleri ile sınırlandırılmıştır. İş merdanelerinin çaplarının küçültülmesi temas yayının boyunu ve böylece haddeleme kuvvetini düşürür. Ancak, iş merdanelerinin sacı sürtünme kuvvetleri vasıtasıyla çektiğinden, temas alanı, haddenin metali kapması için yeterince geniş olmalıdır.

Bu yüzden bu gücün haddeleme kararlılığına kritik bir etkisi vardır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

### 2.3.2.3 Soğutma ve Yağlama

Haddeleme sırasında sürtünmeyi azaltmak ve merdanelerde oluşan ısıyı almak için malzeme ve merdaneler üzerine düşük miktarda haddeleme yağı içeren (% 1-5) emülsiyon tatbik edilir. Soğuk haddeleme işleminin sıcaklığı genellikle 60<sup>0</sup>C ile 130<sup>0</sup>C arasında tutulmalıdır (paketleme çelikleri için bazen 180<sup>0</sup>C kadar olabilir). Düşük kalınlıklarda sürtünme katsayısı arttığında haddeleme kuvveti artar. Bu nedenle, sac ne kadar ince olursa, yağlama o kadar verimli olmalıdır. Bazı durumlarda, yüksek yağ yoğunluklu (% 6-15) istikrarsız mekanik emülsiyonlar uygulanabilmektedir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996). Hayvansal, bitkisel yağlar ve sentetik petrol yağları gibi bir çok çeşit yağ, emülsiyonların içersinde kullanılabilir. Kullanılan emülsiyonlardan, soğutma ve yağlama görevlerinin yanında ısıl işlem öncesi kolayca temizlenebilme özelliği de beklenmektedir. Su ve çözülebilir yağ karışımları, yalnızca basınçlı havayla bile kolayca temizlenebilir. Çok ince sacların soğuk haddelenmesinde su ve çözülemez yağ karışımları kullanılır ve bu emülsiyonların haddeleme sonrası temizlenmesi oldukça güçtür. Tavlama öncesi bu kalıcı yağları ortadan kaldırmak için alkali temizleme işlemi uygulanır (Ersoy, Koroğlu, Günday, Pehlivan ve Yaşacan, 1991).

Soğuk haddelemede soğutucu ve yağlayıcı olarak görev yapan sıvıların etkileşim içinde olduğu konular aşağıdaki gibidir (Roberts, 1978);

- Haddeleme kuvveti, farklı merdanelerdeki bükülmelerin derecesini belirler. Çelik sacla temas halindeki iş merdanelerinin düz olması; metalin akış gerilimine, sürtünme katsayısına ve böylece yağlayıcıya bağlıdır.
- Hadde vuruşlarındaki sıcaklık, soğutma verimliliği ile kontrol edilir. Aşırı ısınma yağlayıcı filminin bozulmasına neden olacak ve hadde basıncındaki geri tepmeyle birlikte, sac ve merdane arasındaki mikro sürtünmeler nedeniyle lekeler oluşacaktır.
- Sacların yüzey pürüzlülüğünü, iş merdanelerinin yüzey durumu ve ayrıca yağlama etkiler. Aşırı yağlama kalın film oluşturur, çelik-merdane temasını azaltır ve çelik sac üzerinde daha iyi pürüzlülük değeri sağlar. Ancak aşırı yağlama diğer taraftan durağan olmayan, titreşimli haddelemeye ve dolayısıyla sac kalınlığında farklılıklara neden olur.
- Merdanelerdeki ısıl şekil bozuklukları haddeleme hızına ve ayrıca soğutma yoğunluğuna bağlıdır.



#### 2.3.2.4 İstenen Düzlemselliğin Sağlanması

Sıcak haddelemede oluşan kusurlar konusunda da bahsedilen dalgalı kenarlar ve ortada enlemesine çatlaklar kusurlarının oluşum nedeni olan malzemenin kenar veya merkez liflerinin fazla uzaması, soğuk haddelemede de söz konusudur. Bunun nedeni merdane ve malzeme arasındaki profil farklarından kaynaklanmaktadır ve yeterli düzlemsellik sağlamak adına kalınlık profili, soğuk haddeleme boyunca korunmalıdır.

İşlem sırasında gelen yüke dayanamayan merdanelerin bükülmesi, başlangıçta zaten kötü işlenmiş merdane veya ısıl genişleme farklılıkları, malzeme ile merdane arasında oluşan kalınlık profili farklarının nedenleridir. Örneğin ısıl genişmeden kaynaklanan hataların ortadan kaldırılması için bölgesel soğutma sistemi kullanılır. Bükülmeyi ortadan kaldırmak için ise, tersine bükme momenti oluşturan düzeneklerin kullanımı başta gelir. Bundan başka, altılı veya daha fazla sayıda hadde tertipleri kullanmak, dördütlü hadde düzenlerinde yanal doğrultularda hareket edebilen iş merdaneleri kullanmak, birbirlerine göre ufak yer değiştirmeler yapabilen üst ve alt iş ve destek merdaneleri kullanarak genişlik boyunca basınç dağılımını düzenleyen donanımlar kullanmak diğer önlemlerdir (Burtsev, 1973).

Bahsedilen düzlemsellik hataları, haddeleme esnasında malzemedeki gerginlik sebebiyle gözükmebilir. Malzeme üzerindeki gerilmenin kalkmasından sonra ortaya çıkan dalgalanmaları ortadan kaldırmak için, işlem sırasında malzemenin her bir bölgesinin gerginlik bakımından incelenmesi ve bunun bir kontrol sistemine bağlanması üstün sonuçlar verir. Bu amaçla özel gerilme-ölçerler kullanılır (Roberts, 1978).

#### 2.3.2.5 Kalınlık Farklarının Azaltılması

Soğuk haddelemenin amacı, dar toleranslarla verilen sac kalınlıklarını elde etmektir. Sac kalitesinde kalınlık düzenliliği önemli bir etmendir. Gelişen teknoloji ile beraber soğuk haddelemede, aynı döküm numarasına ait çelik sacların aynı rulo içindeki kalınlık farkları birkaç mikron mertebesine indirgenmiştir.

Çelik sacın kalınlığı bir hadde çıkışında, yüksüz haldeki hadde aralığı ile merdanelerin yük altında esnemesinden kaynaklanan aralığın toplamına eşittir. Hadde yükü, çeliğin akış gerilimine, sac genişliğine ve o haddedeki kalınlık indirgenmesine bağlıdır. Diğer parametreler değiştirilemeyeceğinden, kalınlık indirgenmesi ve dolayısıyla hadde aralığı ayarlanarak sabit kalınlık elde edilmelidir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Akış kanunundan giriş-çıkış, kalınlık ve hızlarının birbiriyle bağlantılı olduğu aşıkardır. Bu

nedenle kalınlıktaki değişim, hadde çıkışlarında hızları değiştirir. Nihai kalınlığı etkilememesi bakımından, bir haddedeki hız farkı diğer bitişik haddelere nakledilir. Kalınlığın ölçümü, X veya gama ışınları yardımıyla ve temassız çalışan ölçü aletleriyle yapılır.

Birinci ve ikinci tezgahların arasına yerleştirilen kalınlık ölçü aleti, ilk tezgahtaki hadde aralığı ayarını sağlayan vidalı mili kontrol eder. Birinci tezgah girişine başka bir ölçü aleti monte edilebilir ama bu ölçü aleti, metalin mekanik özelliklerindeki değişimlere duyarlı olmayacaktır. Sabit bir ilk tezgah hızı için, birincil kalınlık değişimleri, giriş hızı  $v_0$ 'ın iyileştirilmesi ile telafi edilir.

Kalıcı olabilecek kalınlık değişimleri ilk tezgahın çıkışında fark edilir ve bu tezgahın hızı ayarlanarak düzeltilir (Ersoy, Köroğlu, Günday, Pehlivan ve Yaşacan, 1991).

### **2.3.2.6 Yüzey Temizliği**

Soğuk haddeleme birimini terk eden sacların yüzeylerinin temizlik derecesi, demir ve karbon tortularının miktarlarıyla ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) nitelendirilir. Bu iki değer çoğunlukla yağlama ve soğutma şartlarına ve iş merdanelerinin pürüzlülüğüne bağlıdır.

İlk tezgahlardaki merdanelerin pürüzlülüğü yapışmayı arttırır. Bu nedenle düşük pürüzlülük değerlerine sahip olmaları tercih edilir. Son tezgahta, ince sacda istenen nihai pürüzlülük değeri yüksektir, ancak verilen kalınlık azalması düşüktür. Böylece meydana gelen yapışma önemsizdir (Roberts, 1978).

En iyi yağlama koşulları, sac kalınlığına ve indirgenme oranına bağlıdır. Bu nedenle ilk, orta ve son tezgahların, birbirlerinden ayrı yağlama ve soğutma sistemlerinin olması arzu edilir.

Rulo sac içine taşınan emülsiyon; havayla temizleme ve ısıtarak kurutma yöntemleriyle yok edilir. Rulo sarma gerilimi ve pürüzlülük; nihai temizlik ve fırın tavlamadaki yapışma için çok önemlidir. Bu parametreler, rulo sarma anında atmosferik gazların devirdayımı ile gelen rulonun yüzeyindeki karbonun yok edilmesini kolaylaştırır. Sacın düzgünlük değerinin kötü olmasından dolayı, düşük pürüzlülük ve aşırı veya düzensiz rulo sıklığı, ısıtarak kurutma temizliğine engel teşkil eder. Bu, takip eden yüksek sıcaklıktaki fırın tavlama işlemi sırasında meydana gelecek olan yapışmayı destekler, rulo açma anında çatlama ve kırılma gibi kusur oluşumuna yol açar ve yüzeydeki artık karbon varlığının fazla olmasına sebep olur (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Paketleme işlerinde kullanılan çok ince çelik saclarda, yüksek kalınlık azaltması için gereksinim duyulanlar, takip eden yüzey kaplama işlemleri için istenen temizlik değerleri ile uyuşmaz. Yağ oranı fazla olan haddeleme emülsiyonları, sıcaklık tesiri ile yanıcı ve uçucu özelliğe sahip olmadığı için tavlama hattına gönderilmeden önce temizlenmelidir. Bu nedenle çelik saclar, alkali temizleme hattında sıcak alkali banyosuna daldırma ve sıcak su püskürterek fırçalama yöntemleri ile temizlenir. Hattın çıkışında sıcak hava üfleme suretiyle şerit kurutulur (Burtsev, 1973).

### **2.3.2.7 Soğuk Haddelemede Mikroyapı**

Soğuk haddeleme sırasında malzemenin mikroyapısı özellikle, tane şekli değişikliğine uğramaktadır. Taneler, deformasyon yönünde uzarlar ve böylece özellikler yöne bağımlı hale gelir. Soğuk haddeleme oranı arttıkça malzemenin akma ve çekme mukavemeti ile sertliğinin artması deformasyon sertleşmesi olarak adlandırılır. Deformasyon sertleşmesi, sünekliğin azalmasına yol açtığından, metal sacların soğuk haddeleme oranı sınırlıdır. 1,5 mm kalınlığındaki yumuşak çeliğin % 30 oranında kalınlık azalmasında genel gerilme  $60 \text{ kgf/mm}^2$ , sert çelikte aynı oranda  $90 \text{ kgf/mm}^2$ 'dir. Soğuk haddeleme, haddelenen metalin genel gerilmesinin  $90 \text{ kgf/mm}^2$ 'ye ulaşmasına kadar devam ettirilir. Bu yumuşak çelikte %80 toplam kalınlık azalmasına, yüksek karbonlu çeliklerde %30'a varan oranlara ve alaşımlı çeliklerde % 15-20 arasındaki oranlara tekabül eder. Belirli haddeleme oranlarında ise malzemenin sünekliği sıfıra iner ve haddeleme sırasında çatlamaya sebep olur. Çatlak oluşumunu önlemek ve soğuk haddeleme ile azalan sünekliği arttırmak amacıyla malzemeye zaman zaman ara tavlama işleminin uygulanması gerekir. Artarda yapılan soğuk haddeleme ve tavlama işlemleri genellikle "soğuk haddeleme + tavlama" çevrimi olarak isimlendirilir.

Bu çevrimde uygun bir düzenleme ile, malzemeye istenilen mekanik özellikler kazandırılabilir. Çelik sacın tam tavlı malzemedan daha yüksek dayanımlı olması istendiğinde, son işlem, aranan dayanımı sağlayacak deformasyon oranında yapılan soğuk haddeleme olacaktır. Eğer ürünün tamamen yumuşatılmış olması istenirse son soğuk haddeleme kademesini yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde yapılan bir tavlama izlemelidir (Burtsev, 1973).

### **2.3.3 Yeniden Kristalleşme Tavlaması**

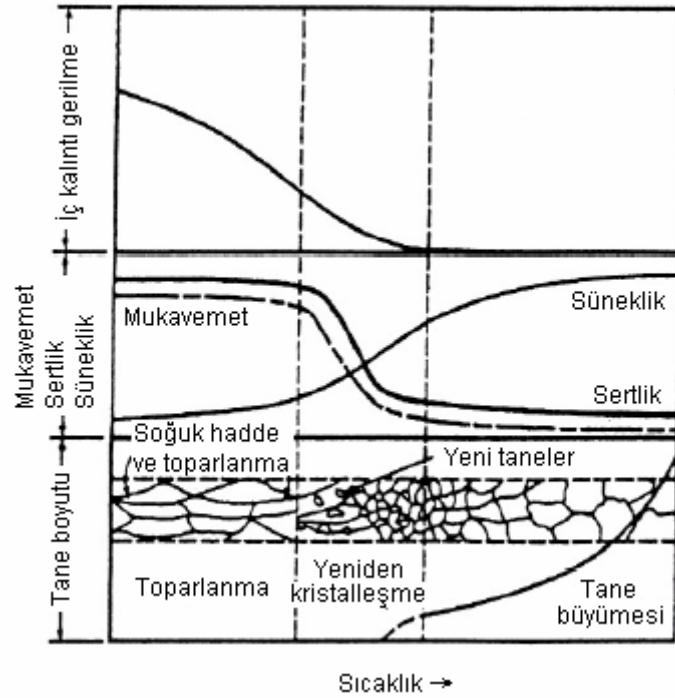
Düşük karbon içeren (% 0,06-0,10 arası) çelik sac ve bantlar; yumuşatılmak, soğuk işlem sertliğini gidermek, sünekliği arttırmak, yeni ve ince taneli bir içyapı elde etmek ve daha sonra kullanılacağı alanlarda göreceği şekillendirme işlemlerine uygun mekanik özellikleri

kazandırmak amacıyla, soğuk haddelemeden sonra 650 – 720<sup>0</sup>C sıcaklıkları arasında yeniden kristalleşme tavına tabi tutulurlar. Bu işleme kısaca tavlama denilmektedir.

Yeniden kristalleşme tavlaması çelik saclara iki farklı yöntemle uygulanabilmektedir. Bunlar; çelik sacın rulo halinde sarılmış olarak kontrollü bir fırın içinde birkaç bobin üst üste tavlандığı yığın tavlama ve rulo sacın açılarak bir fırından geçirildiği sürekli tavlama şeklindedir. İki yöntemin de ayrıntıları ve birbirlerine göre artıları ve eksileri mevcuttur ancak bu konudan önce, yeniden kristalleşme konusunun metalürjik olarak incelenmesinde fayda vardır.

### 2.3.3.1 Metalürjik İnceleme

Soğuk haddeleme sonucunda çelik malzemede sertleşen ferrit kristalleri yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca tane yapıları bozulur, iç gerilmeler ve anizotropi meydana gelir ve dolayısıyla mekanik ve fiziksel özellikler değişir. Yeniden kristalleşme tavlama ile malzemeye istenen özellikler kazandırılır. Yeniden kristalleşme sıcaklığı, bu olayın bir saat içinde tamamlandığı sıcaklık olarak tanımlanır.



Şekil 2.16 Tavlama ısıtma safhalarının metal özelliklerine etkisi (Çapan, 1999)

Yeniden kristalleşme tavlama sırasında malzeme iç yapısında Şekil 2.16'da da gösterildiği gibi; toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi olmak üzere üç safha halinde değişimler

baş gösterir.

Toparlanma, soğuk haddelenmiş malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığına varmayan sıcaklıklara maruz bırakılması ile iç gerilmelerinin azaldığı ve büyük ölçüde ortadan kalktığı tavlama safhasıdır. Bu sırada sertlikte önemli bir düşme ve mikroyapıda da gözlenebilir bir değişim olmaz. Ancak elektrik ve ısı iletkenlik gibi fiziksel özellikler artarak şekil değişiminden önceki değerlere ulaşır. Mekanik özellikler neredeyse sabit kalır. Bu olaya poligonizasyon yada gerilme giderme tavlama da denilmektedir.

Isıtılmaya devam edilen çelik sacın sıcaklığı, o malzemeye özgü bir sıcaklığa geldiğinde malzemenin mikroyapısında ve mekanik özelliklerinde değişimler başlar. Yeniden kristalleşme sıcaklık aralığında yapılan tavlama sırasında, şekil değişimi yönünde uzamış olan tanelerin yerine, onların arasından, aynı bileşim ve kristal yapıda yeni eşeksenli taneler oluşmaya başlar. Yeniden kristalleşme ile malzemenin mukavemet ve sertliğinin azalması, sünekliğinin artması şeklinde mekanik özelliklerinin değişiminin sac üretiminde önemi çok büyüktür (Mielnik, 1991).

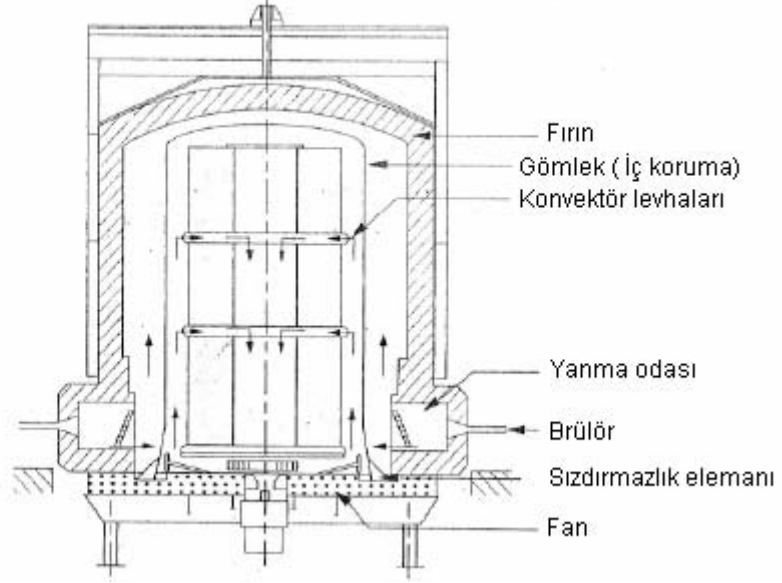
Yeniden kristalleşme sıcaklığına, soğuk haddeleme miktarı, ilk tane boyutu, kimyasal bileşim ve tav süresi gibi etkenler tesir ederler. Bunun yanı sıra şu genellemeler yapılabilir;

- Soğuk haddeleme miktarı arttığında yeniden kristalleşme sıcaklığı azalır.
- Soğuk haddeleme miktarı ne kadar fazla ise tavlama sıcaklığı ne olursa olsun yapı daha ince taneli olur.
- Tavlama sıcaklığı yükseltilirse tavlamanın tamamlanma süresi kısalmır.
- Metalin saflığı arttıkça yeniden kristalleşme sıcaklığı azalır.

Yeniden kristalleşen taneli yapıya sahip malzemeler, tavlama süresince artan sıcaklıklarda uzun süreler daha tutulursa yapıdaki taneler büyür. Aşırı tane büyümesi, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler. İri taneli bir çelik sac plastik şekil değiştirdikten sonra, yüzeyi portakal kabuğu görünümünde pürüzlü olur. Bu nedenle derin çekme, bükme, gererek şekillendirme gibi şekil verme işlemlerinde çelik sacların iri taneli olmaması istenir.

### **2.3.3.2 Yığın Tavlama**

Yığın tavlama yada kullanılabilen diğer adlarıyla fırın veya bobin tavlama Şekil 2.17'de gösterilen fırınlarda yapılır. Aynı tav derecesinden olan bobinler, en büyük çapa sahip olanı alta gelmek üzere, göbek delik eksenleri düşey olacak şekilde, bir kaide üzerine istif edilirler.



Şekil 2.17 Yığın tavlama fırınının şematik kesiti  
(Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

Azami bobin yükleme yükseklikleri bu fırınların 3 ila 4,3 m arasındadır (Erdemir’de 4,2 m civarında). Dolayısıyla bobin genişliğine göre fırınların yüklendikleri bobin sayıları 2 ila 5 arasında değişir. Oksidasyonu önlemek için, hidrojen-azot karışımı yada saf hidrojen içeren koruyucu atmosfer gazları kullanılır. Koruyucu atmosfer gazının daha iyi devirdayımı ve gömleğin rahatlıkla yerleştirilebilmesi için rulo sacların aynı ekseninde yüklenilmesine dikkat edilir. Kaide üzerine yerleştirilmiş gömlek içindeki gaz devirdayımını ve bobin sargıları arasındaki ısı iletimini kolaylaştırmak amacıyla, her iki bobin arasına dairesel, ısı yüzeylerinde dilimler olan konvektör plakası konulur. Gömlek içindeki koruyucu gazın sızdırmazlığını temin etmek için, gömlek etek kısımlarının yerleştirildiği kaide yuvasına, sızdırmazlık elemanı seramik elyaf serilir (daha ekonomik sızdırmazlık elemanları; kum yada su-yağ karışımı kullanılabilir) (Ersoy, Köroğlu, Günday, Pehlivan ve Yaşacan, 1991).

Malzeme yükleme işi bittikten sonra paslanmaz çelik sacdan imal edilmiş gömlek yerleştirilir. Daha sonra içerdeki havanın dışarı atılması için koruyucu atmosfer gazı verilir ve bir yandan da dışarı alınır. Bu işleme gömlek içindeki atmosferde % 1 oranında oksijen kalana dek devam edilir ki bu da 1,5 – 2 saat zaman alır. Atmosfer hazırlama işlemi tamamlandığında gömlek üzerine çan şeklindeki fırın yerleştirilir. Fırın ve kaide sıcaklıkları malzeme kalitesine göre ayarlanır. Değişik kalitelerdeki malzemelerin farklı tav dereceleri vardır (Ersoy, Köroğlu, Günday, Pehlivan ve Yaşacan, 1991).

Fırın tabanı, atmosferin, bobinlerin dış yüzeylerinden ve konvektör plakalarından geçerek devirdaymını sağlayan bir fan ile donatılmıştır. Isısını bobine veren gaz, ısı dönüştürücülerine girerek yeniden ısıtılır. Bobinin içi, dışı ve köşeleri taşınım yoluyla ısınırken, aynı zamanda çan şeklindeki fırın duvarları da bobinin dış yüzeyini radyasyon yoluyla ısıtır, ancak bu ısıtma oranı nispeten düşüktür. Koruyucu atmosfer gazı olarak kullanılan saf hidrojenin diğer gaz, hidrojen-azot karışımına göre radyal geçirgenliği daha yüksektir (saf hidrojen % 0,15, diğeri %0,06) (Burtsev, 1973).

Fırın sıcaklığı  $700^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerine çıktığında aşırı tane büyümesi, metal içyapısında baş göstermektedir. Özellikle hidrojen-azot karışımının koruyucu gaz olarak kullanıldığı durumda, azot yapıdaki artık alüminyumla etkileşir ve nitrit oluşturur. Aşırı ısınma, sıcaklığın otomatik kontrolü ile önlenerek,  $750^{\circ}\text{C}$  üst sıcaklık sınırını aşmayacak şekilde ayarlanır. Hidrojen-azot karışımı ile bu sıcaklığa 5 ila 10 saat arası, saf hidrojen ile 10 ila 20 saat arası ısıtma periyodunda ulaşılır. Soğutma anında ise hidrojenin kullanımı, düşük yoğunluğa sahip olduğundan daha hızlı gaz akışını beraberinde getirir. Böylece, hızlandırılmış soğutma ile bobinlerde daha tekbiçim sıcaklık dağılımı ve daha üstün verimlilik elde edilir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Yüksek radyal geçirgenliğe sahip saf hidrojen kullanımı, bobinin yüzey ve iç kısımları arasındaki sıcaklık farkını en aza indirir ve bu da daha tekbiçim mekanik özellikler elde edilmesini sağlar.

Isıtma çevriminin başlangıcında haddelme işleminden gelen yüzeye yapışmış yağlar yanar. Azot bazlı atmosferlerde, bu aşamada, bobin merkezi ve kenarları arasındaki geniş sıcaklık farkı, daha sıcak kenarlarda oluşan yağın buharı nedeniyle meydana gelen çatlakları tetikler ve böylece siyah kenarlar oluşur. Isıtma hızı bu nedenle sınırlandırılmalıdır. Tabiki bu risk saf hidrojen atmosferinde oluşmaz (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Hidrojen-azot karışımlı koruyucu gazlar ile yapılan yığın tavlama sonucu, yapıya azot geçişi nedeniyle malzeme daha yüksek dayanıma sahip olur. En yüksek sıcaklık elde edildiği zaman, hidrojen-azot karışımı ile metaldeki en fazla sıcaklık farkı 6 saat sonunda  $500^{\circ}\text{C}$  iken saf hidrojen ile 12 saat sonunda  $200^{\circ}\text{C}$ 'dir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Fırın atmosferinde çeşitli yerlerde ve bobin tabanında bulunan ısı ölçerlerden alınan verilere göre işleyen bilgisayar kontrollü sıcaklık çevriminde, her bir fazın süreç ayarı tamamen otomatiktir. Bobinin her tarafında istenen sıcaklığa ulaşıldığında fırının dış kısmı alınır ve bobinler gömlek içinde koruyucu atmosfer altında soğutulur (Burtsev, 1973).

İki farklı koruyucu atmosfer gazının uygulama çevrimleri ve aynı malzeme üzerindeki etkileri Çizelge 2.6’da bir örnekle gösterilmiştir. Buna göre her iki atmosferle de uzun çevrimlerde iyi yüzey temizliği kalitesi elde edilmektedir. Ancak düşük sıcaklıktaki kısa çevrimlerde saf hidrojenin üstünlüğü çarpıcı bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 2.6 İki farklı atmosferle yapılan yığın tavlama süreçleri ve etkileri (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

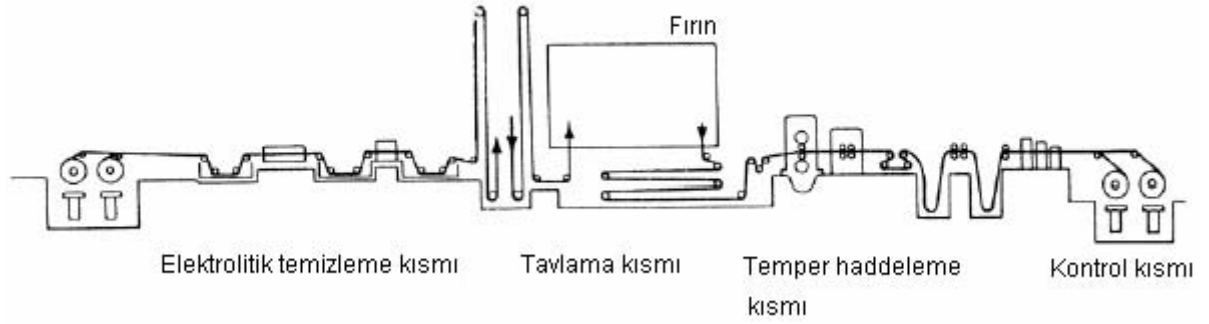
Koruyucu atmosfer	Tavlama en düşük sıcaklık	Isıtma süreci (10 saat - temizlemek için bekleme süresi de dahildir)	Soğutma süreci	Verimlilik (ton/saat)	Yüzey temizliği (mg/m <sup>2</sup> )	Akma dayanımı (MPa)
H <sub>2</sub>	650 <sup>0</sup> C	20 saat	22,5 saat	1,27	10	190-210
HN <sub>x</sub>	650 <sup>0</sup> C	30 saat	28 saat	0,93	30	190-230
H <sub>2</sub>	700 <sup>0</sup> C	26 saat	22,5 saat	1,15	5	160-180
HN <sub>x</sub>	700 <sup>0</sup> C	46 saat	28 saat	0,73	7	160-190

### 2.3.3.3 Sürekli Tavlama

Sürekli tavlama işlemi ilk olarak 1972 yılında, Japonya’nın “Nippon Steel” firmasının Kimitsu İşletmesi’nde, sac ürünler için hayata geçirilmesinden günümüze kadar olan süreçte, barındırdığı birçok avantajı ile yığın tavlama işlemine alternatif yöntem olarak çelik sac teknolojisindeki yerini almıştır (Llewellyn ve Hudd, 1998). Sürekli tavlama işleminin beraberinde getirdiği en büyük artışı şüphesiz işlemin çabukluğudur. Şöyle ki, aynı hat üzerinde tavlama ile beraber barındırdığı temper haddeleme ve denetleme işlemleri de dahil yalnızca 10 dakika kadar sürmesi, yığın tavlama göre günler mertebesinde zaman kazancı sağlar ve depolama sırasında yapılacak işlerden tasarruf getirir. Ayrıca sürekli tavlama hattında bobinin açılması, artık hadde yağlarının ve bobinlerdeki istenmeyen maddelerin çok iyi şekilde arındırılmasına olanak tanınması da getirdiği ikinci önemli artıdır. İki yöntemin daha ayrıntılı karşılaştırılması bir sonraki konuda (2.3.3.4) yapılmaktadır.

Sürekli tavlama hattı öncelikle, şematik olarak Şekil 2.18’de de gösterildiği gibi yüzey temizliği bölümünde bahsedilen temizleme işlemleri ile başlar. Tavlama işlemi dikey fırınlarda yapılır. Sürekli tavlama fırınının giriş ve çıkış bölümlerinde bulunan biriktirme kısımları, fırın içinde veya kaynak ve kesme işlemleri sırasında meydana gelecek duraklamalar ile sacın etkilenmemesini sağlar. Bu bölümlerin uzunlukları, fırından geçen sacın en yüksek hızının fonksiyonu olarak hesaplanır. Fırın içersinde meydana gelecek bir duraklama sacın kırılarak ayrılmasına neden olur (Roberts, 1978).





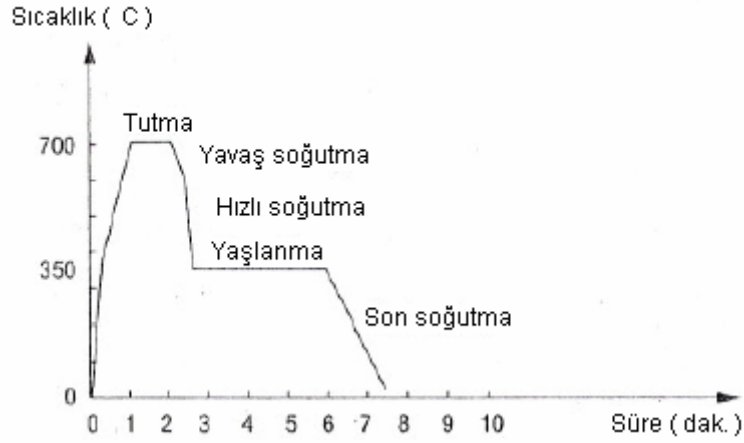
Şekil 2.18 Sürekli tavlama hattı (Roberts, 1978)

Başlangıç bölümünde nöbetleşe çalışan bobin çözücüler, bobin başı ve sonu bölgelerini kesen makaslar, kaynak makineleri, elektolitik yağ çözücü, fırçalama, temizleme ve kurutma bölümü ve sac biriktirici kısımları yer alır. Çıkış bölümünde ise sistem, sac biriktirici, makaslar ve iki adet bobin sarıcıya ek olarak genellikle temper haddeleme tezgahlarını, kenar kesme makaslarını, kaplamasız teslim edilecek sac cinsi için yağlama ünitesini ve kalite gözlem donanımlarını barındırır (Ersoy, Köroğlu, Günday, Pehlivan ve Yaşacan, 1991).

Şekil 2.19'deki sıcaklık-zaman grafiğine göre işleyen sürekli tavlama fırınları şu bölümlerden oluşmaktadır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996);

- Ürüne göre 620-850<sup>0</sup>C sıcaklıkları arasında değişen yeniden kristalleşme sıcaklıklarına ulaşmayı sağlayan ısıtma bölgesi,
- Yeterli tane büyümesine izin verecek kadar bir süre (yaklaşık 30 saniye) sıcaklığın sabit tutulduğu tutma bölgesi,
- İçyapı kontrolüne imkan veren, yavaş soğutma bölgesi ( $\approx 10^0 C/s$ ),
- Aşırı doymuş çözeltideki yeterli karbon miktarını koruyarak çeliği yaşlanma işlemine hazırlamak amacını taşıyan hızlı soğutma bölgesi,
- Çözülmemiş karbonu çökeltmek için ilerde olması muhtemel yaşlanma tepkimelerini önleyen yaşlandırma bölgesi,
- Metali oksidasyona uğratmadan sıcaklığını oda sıcaklığına indiren son soğutma bölgesi.

Fırınlar bütünüyle, ısıya dayanıklı tuğlalarla çevrilidir. İçlerindeki atmosfer, % 1 - 2 H içeren azot-hidrojen karışımından ibarettir. Fırın içindeki kılavuz merdaneler, düşük ısıl genişleme gösteren ısı dayanımlı çeliktir. Merdanelerin geometrilerinde buna rağmen, sac merdane ve ortam sıcaklıklarındaki farklılıklardan dolayı değişimler olabilir. Bu etkiyi telafi etmek için taşlama işlemleri ile merdanelere özel biçimler verilir (Burtsev, 1973).



Şekil 2.19 Sürekli döküm sırasında bir çelik sacın sıcaklık-süre grafiği (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

Hat boyunca ve özellikle de fırın içersinde merdane aralarından akan sacın eksantrikliği kaçınılmazdır. Bu amaçla aksel kaçıklığı yer değiştirmelerle telafi eden hareketli merdaneler ve bunları kumanda eden cihazlar kullanılır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Malzeme iç yapısını belirleyen soğutma süreci yeniden kristalleşme tavlamasında oldukça önemli bir konudur. Gelişen teknoloji,  $30^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 'lik soğutma hızlarının üzerine çıkabilmeyi olanaklı kılmaktadır. Ancak soğutma hızından çok sıcaklık kontrolünün hassaslığı önemlidir. Soğutma yüksek basınçlı gaz püskürtme yöntemi ve içten su soğutmalı merdanelerin kullanımı ile yapılırken, optik pirometreler kullanarak sıcaklık ölçümü  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  aralığında gerçekleştirilir. Aynı zamanda tavlama ile yaşlandırma sıcaklıklarının  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 'lik aralıkta kontrol edilmesi büyük oranda tekbiçim metalürjik kalite sağlar (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

#### 2.3.3.4 Yığın ve Sürekli Tavlamanın Karşılaştırılması

Yığın ve sürekli tavlama yöntemlerinin en önemli teknik farkı, ürünlerin tane boyutlarını etkileyerek nihai özelliklerini değiştiren ve son derece mühim konu olan ısıtma ve tutmadaki sıcaklık-süre çevrimlerindedir. Yığın tavlama yönteminde esas itibarıyla ısıtma koşulları yavaş ısıtma çevrimine uygundur. Şöyle ki, yığın tavlama yönteminde ısıtma ve tutma çevrimi 40 - 70 saat arasında değişir ve  $600^{\circ}\text{C}$ 'nin üstündeki yeniden kristalleşme sıcaklıklarına saatte aşağı yukarı  $10^{\circ}\text{C}$ 'lik ısıtma hızıyla ulaşılır. Diğer taraftan sürekli tavlama yönteminde ise işlem süresi 90 - 120 saniye arasındadır. Bu hızlı ısıtma çevrimi ile,  $700^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindeki yeniden kristalleşme sıcaklıklarına saniyede  $10^{\circ}\text{C}$ 'lik hızlarla ulaşılır. Çizelge 2.7'de alüminyum ile

soğuk haddelenmiş aynı iki çelik sacın mekanik özelliklerinin, ısıtma hızına ve dolayısıyla tavlama yöntemine göre nasıl değiştiği açıklanmaktadır.

Çizelge 2.7 Alüminyumla soğuk haddelenmiş iki aynı cinsten malzemenin tavlama yöntemlerine göre mekanik özelliklerinin değişimi (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

Mekanik özellikler \ Tavlama yöntemi	Yığın tavlama	Sürekli tavlama
Tane boyutu	7 - 9 ASTM	10 - 11 ASTM
Akma dayanımı	160 - 190 MPa	230 - 270 MPa
Çekme dayanımı	290 - 315 MPa	330 - 400 MPa
% uzama	40 - 44	31 - 38
Anizotropi katsayısı	1.6 - 2.1	1.0 - 1.4

Bu çizelgeden de görüldüğü üzere, tavlama yöntemlerinin farklılaşmasıyla aynı kalitede sac malzemeden farklı mekanik özellikler elde edilir. Dolayısıyla iki farklı tavlama yöntemi sonucunda aynı mekanik özelliklerin elde edilmesi için, farklı çeşitte sac malzeme kullanılmalıdır.

Çizelge 2.8 Farklı tavlama şartlarında % 100 yeniden kristalleşen aynı kalitedeki çelik sacların mekanik özelliklerinin değişimi (Mendoza vd., 2003)

Tavlama şartları	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	% Uzama	r	n
Hedef özellikler	170	345	46	$\geq 2$	$>0,21$
Yığın tavlama, 670°C	169 ± 17	318 ± 20	43,8 ± 2,8	1,98 ± 0,03	0,24 ± 0,01
Sürekli tavlama, 700°C	327 ± 25	383 ± 18	43,4 ± 3,5	1,35 ± 0,12	0,32 ± 0,05
Sürekli tavlama, 750°C	344 ± 11	373 ± 9	50,3 ± 0,7	1,62 ± 0,04	0,31 ± 0,03
Sürekli tavlama, 800°C	261 ± 9	361 ± 16	51,2 ± 0,5	2,21 ± 0,07	0,30 ± 0,01

Not: Değerler, 20'şer adet ölçümün ortalamalarıdır.

Mendoza vd. yapmış oldukları araştırmada, otomotiv endüstrisine yönelik düşük karbonlu çelik sacın (% 0,01 C) farklı tavlama koşullarındaki mekanik özelliklerini incelemişlerdir. İmalat aşamaları; slabın 1100°C'de tekrar ısıtılması, 2,6 mm'ye % 91'lik toplam kalınlık azalmasıyla 870°C son sıcaklığa kadar sıcak haddelenmesi, 600°C'de sarılması ve 0,7 mm'ye % 73'lük kalınlık azalmasıyla soğuk haddelenmesi şeklindedir. Çizelge 2.8'de, bu işlemlerden sonra çeşitli sıcaklıklarda yeniden kristalleşme tavlmasına tutulan çelik sacların

mekanik özelliklerinin değişim aralıkları verilmiştir (Mendoza vd., 2003).

İki tavlama yönteminin metalürjik farklarından bir tanesi, AlN çökmesinin oluşma zamanıdır. Yığın tavlama, AlN çökmesi yeniden kristalleşmeden önce oluşur. Bu, içyapı oluşumunu destekler, tane büyümesini ve içyapı gelişimini engellemez. Sürekli tavlama AlN çökmesi yeniden kristalleşmeden sonra yer alır ve 850<sup>0</sup>C gibi pratikte ulaşılabilen en yüksek seviyeden daha aşağı sıcaklıklarda tane büyümesini güçlü bir biçimde engeller. Dolayısıyla çok ince tane boyutlarına ulaşılır, yüksek akma mukavemeti ve l'den çok da fazla olmayan gerinim oranı elde edilir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Sürekli tavlamanın yığın tavlama göre bir artısı, tavlama sonrası malzeme yüzeylerindeki karbon azlığıdır. Sürekli tavlama  $C < 3mg/m^2$  iken yığın tavlama  $7mg/m^2$ 'den daha az seviyelere inmektedir. Yüzeydeki karbon miktarının azlığının önemi, çıplak metalin fosfatlama yeteneğini arttırmada ve fosfatlanmış ve boyanmış sacın korozyon dayanımını arttırmada kendini göstermektedir (Roberts, 1978).

Yığın tavlama bünyesinde gerekli olan bobin taşıma ve transferi gibi işlemler, bobinin sıklığından dolayı, mekanik darbeler ve çizikler gibi kusurların potansiyel kaynaklarıdır. Sürekli tavlama bu işlemlerin olmaması avantajıdır. Ancak sürekli tavlama da kendi içersinde, örneğin kullanılan merdanelerin çokluğu nedeniyle çizikler ve izler gibi risk oluşturan etkenler vardır. Buna rağmen deneyimler sürekli tavlamanın, kusurlarının azlığı ve işlemin güvenilirliği bakımından daha iyi düzeyde olduğunu doğrulamaktadır (Burtsev, 1973).

İki yöntemin de birbirlerine göre artılarını sıralamak gerekirse, yığın tavlamanın artıları;

- Düşük yatırım maliyeti,
- Vakumlama yada titanyum ve niyobyum gibi elementlerle stabilize etme işlemlerini gerektirmeyen alüminyumla sakınleştirilen çeliklerin kullanımı,
- Yeniden üretilebilmeye müsait mekanik özellikler ve iyi yüzey temizliği garanti edilen kaliteli standartların güvenilir şekilde üretimi.

Sürekli tavlamanın artıları;

- Depolama ve ilgili işlerden meydana gelen zaman kayıplarının çok çarpıcı şekilde azalması,
- Mekanik özelliklerinde ufak dayanım aralığına sahip, yüksek dayanımlı ve çok iyi derin çekilebilir çelik sacların üretimi,

- Özel uygulamalar için akma dayanımı dar bir aralıkta garanti edilen yada çekme işlemleri için teneke sac kalitelerinin üretimi,
- Çok yüksek yüzey temizliğine sahip sacların üretimi,
- Düşük karbonlu, elektrik uygulamaları amaçlı çelik sacların üretimi.

Sürekli tavlamanın artılarının çokluğuna ve giderek daha yaygın kullanılmasına rağmen, yığın tavlamanın yukarıda sıralanan avantajları nedeniyle, yakın gelecekte ortadan kalkması söz konusu değildir.

### 2.3.4 Temper Haddelme

#### 2.3.4.1 Amacı ve Uygulanması

Temper haddelme, tavlama işlemlerinden sonra yapılan düşük kalınlık azalmasına sahip haddelme işlemidir. Amacı, işlenen ürünün cinsine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin (karbon, azot gibi elementlerin bulunduğu) arayer katı çözeltilerini içeren çeliklerde temper haddelmenin birinci amacı yeterli gerinim miktarı oluşturarak dislokasyon yoğunluğunu arttırmak ve dolayısıyla akma dayanımı uzamasını ortadan kaldırmaktır. Diğer amaçları, tavllanmış çelik sacın yüzey düzgünlüğünü sağlamak ve yüzeye matlık yada parlaklık gibi istenilen nihai özellikleri vermektir.

Malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler, haddelme sırasında malzemeye uzama olarak verilen deformasyon miktarına bağlıdır. Derin çekme uygulamalarında kullanılacak malzemelere % 0,25 - 1,00 arası uzama, daha az süneklik gerektiren uygulamalarda kullanılacak malzemelere ise % 1,00 - 1,50 arası uzama verilir (Ersoy, Köroğlu, Günday, Pehlivan ve Yaşacan, 1991).

Temper hadde düzenleri, soğuk haddelmede de olduğu gibi ikili, dördü veya altılı olabilir. Haddelenen ürünün yüzeyi haddelmede kullanılan iş merdanelerinin yüzeylerinin durumuna göre sonuçlanır. Ancak uygulanan basınç, nihayetinde haddelme kuvveti ve merdane çapı, ayrıca çeliğin akış gerilimi de yüzey görünümünü etkiler. Belirli kalitelere çelik saclar için (IF çelikleri gibi) haddelme kuvvetleri düşüktür. Basıncı sınırlamak için, merdane çapları olabildiğince geniş tutulmalıdır. Bu amaçla dördü hadde düzenleri en uygundur. Yüksek uzama değerlerinin gerektiği durumlarda altılı hadde düzenleri kullanılır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Temper haddelmede meydana gelen küçük kalınlık azalmaları nedeniyle gerçekte kayda değer ısınma oluşmaz. Buna rağmen temper haddelme, merdanelerin su ve kimyasal madde

karışımları ile yağlanmasıyla ıslak olarak uygulanır. Saclardaki gerilme kuvvetlerinin olabildiğince sabit tutulabilmesi için; bobin çözücü, temper haddeleme tezgahı ve bobin sarıcı birimlerinin aralarında birer adet gerilim ölçer parçaları bulunur. Sac düzlemselliğini doğrulamak amacıyla, merdane büken pistonlar kullanılır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Temper haddelemenin temel işlevlerinden biri, daha önce de bahsedildiği gibi çelik saca, boyama ve çekme gibi ileriki işlemler için istenilen pürüzlülük değerini vermektir. Bu amaç doğrultusunda, iş merdanelerinin yüzeylerine, mekanik darbe ile aşındırma yöntemi, lazer dokulama, elektriksel yük boşaltarak dokulama ve elektron ışın dokulama teknikleri ile yivli şekiller verilir (Burtsev, 1973).

#### **2.3.4.2 Etkileri ve Şekil Değişimi Yaşlanması**

Çekme testlerinin gerilme-gerinim diyagramlarında belirgin akma gösteren çelik sacların üst akma sınırlarından sonra şekil değişimleri eşeksizli olmaktan çıkar ve akma boyunca çubukta çekme doğrultusu ile yaklaşık  $45^{\circ}$  açı yapan bantlar oluşur. Bu bantlar Lüders-Hartmann bantları olarak adlandırılır ve akma süresince malzemeye yayılır. Bu olay çelik sacın sonraki deformasyonları sırasında (pres operasyonlarında) açığa çıkarak gözle görülebilen yüzey kusurları oluşturur. Bu nedenle, birçok amaç kapsamında plastik şekillendirilmesi gereken sacların belirgin akma göstermeleri istenmez.

Temper haddelemenin etkilerinden biri, bir önceki konuda da bahsedildiği gibi, tavllanmış çoğu ticari çelik saclarda rastlanan belirgin akma noktasını ortadan kaldırmaktır.

Belirgin akmanın nedeni, metalürjik temele inildiğinde, “Cottrell atmosferi” diye tabir edilen durumla açıklanır. Cottrell atmosferi, çözeltinin ana kafesinde arayerlere yerleşen çözünen karbon ve azot gibi atomlar tarafından, enerji bakımından en uygun yerler olan kenar dislokasyonlarının hemen altındaki çekme gerilmesi bölgesindeki atom yığılmalarıdır. Bu yığılmalar, şekil değişimi sırasında dislokasyonun hareketine engel oluşturur. Dolayısıyla gerilmenin normalde yığılma olmayan durumdaki akma gerilmesi değerinden daha yukarılara çıkmasıyla üst akma gerilmesi ve engelin ortadan kalkmasının hemen ardından da gerilmenin ani olarak akma bölgesinde en aza indiği alt akma gerilmesi oluşur (Dehghani, 1999).

Temper haddeleme işleminin sonrasında malzemedeki belirgin akma uzamalarının ortadan kalkması, işlem sırasında meydana gelen deformasyonların, hidrojen ve azot atomlarından oluşan Cottrell atmosferini dağıtarak bu atomların tekrar, önceki yerleri olan ana kafesin ara yerlerine yayılması nedeniyledir. Ancak şekil değişiminden sonra, sıcaklığa, malzeme

özelliklerine ve daha birçok nedene bağlı olarak değişen bir süre zarfında karbon ve azot atomları yayınarak, dislokasyonlar etrafında tekrar atom yığılmalarını oluştururlar. Bu olaya şekil değişimi yaşlanması denir. Çizelge 2.9'da mekanik özelliklerin şekil değişimi yaşlanması boyunca değişimleri dört aşamada açıklanmaktadır.

Çizelge 2.9 Şekil değişimi yaşlanması sırasında mekanik özelliklerin değişimi (Roberts, 1978).

Mekanik özellikler	1. Aşama	2.Aşama	3.Aşama	4.Aşama
Alt akma noktası	Artar	Artar	Yavaşça artar	Yavaşça azalır
Akma uzaması	Artar	Değişmez	Değişmez	Artabilir
Akma dayanımı	Değişmez	Artar	Yavaşça artar	Azalabilir
Çekme dayanımı	Değişmez	Değişmez	Artar	Yavaşça azalır
Pekleşme üsteli	-	-	Artar	Yavaşça azalır
Toplam ve üniform uzama	-	-	Azalır	Yavaşça artar

Soğuk şekil değiştirmiş malzemenin yaşlanma amacıyla oda sıcaklığında bekletilmesine doğal yaşlanma denir. Doğal yaşlanma haftalar, aylar ve hatta yıllar sürebilmektedir. Buna karşılık sıcaklığın artması atomların yayınma hızını yükselttiğinden, malzeme yüksek sıcaklıkta bekletilirse yaşlanma süresi de kısalarak saatler mertebesine iner. Bu durumda da yapay yaşlanma söz konusudur (Çapan, 1999).

Şekil değiştirme yaşlanması ile ilgili en önemli etkenler, ferrit içinde çözülmüş karbon ve azot miktarı ile ön-gerilmenin cinsidir. Sakinleştirilmiş ve tavlanmış çelik saclar, çok az miktarda çözülmüş karbon ve azot içerirler. Bu nedenle bu cins çelik saclar, ortam sıcaklıklarında yaşlanmazlar (Dehghani, 1999).

Karbon ve azot atomlarının şekil değişimi yaşlanmasına etkileri, demir alaşımlarındaki çözülebilirlik değerlerinden dolayı farklılaşmaktadır. Yapıdaki karbonların çözülebilirliği, 720<sup>0</sup>C sıcaklıkta yaklaşık 200 ppm iken oda sıcaklığında 0,001 ppm değerine azalır. Azotun çözülebilirliği ise 585<sup>0</sup>C sıcaklıkta 1000 ppm değerlerinden oda sıcaklığında 0,1 ppm değerlerine düşer (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Çelik saclara alüminyumun eklenmesiyle şekil değişimi yaşlanmasının durması, tavlanan malzemede durağan alüminyum nitritlerin oluşumu ile açıklanır. Çünkü alüminyum nitritlerin oluşumu ile beraber katı çözeltide serbest azot miktarı sıfıra iner. Alüminyum ile beraber, vanadyum, titanyum, niyobyum, kolombiyum ve bor gibi elementlerin de nitrit oluşturma ve şekil değişimi yaşlanmasına etkisini azaltma özellikleri vardır ancak yaygın

kullanılmazlar (Llewellyn ve Hudd, 1998).

Yaşlanma etkisinin, çekme gerinimine sahip çeliklerde temper haddelenmiş malzemelerdekinden daha hızlı olması dikkat çeken bir özelliktir. Haddeleme yada gerinme doğrultusuna göre alınan çekme testi numunelerinin doğrultuları, bazı ilginç etkiler ortaya çıkarır. Haddeleme yönüne paralel doğrultuda çekilen temper haddelenmiş malzeme numunesi, hadde yönüne dik doğrultuda alınan numuneden daha yavaş yaşlanma etkisi sergiler. Ancak çekme gerinimli saclarda bunun tersi doğrudur. Bu etki, büyük ölçüde kalıntı mikro gerilmelerin heterojen şekildeki dağılım düzenine yorulmaktadır (Roberts, 1978).

### 2.3.5 Çelik Sacları Kaplama Yöntemleri

Çelik sac ve bant ürünler, paslanmaya ve korozyona karşı dayanımlarının artırılması ve kullanılacakları ortamlarda memnun edici derecelere sahip olmaları amacıyla çeşitli tiplerde koruyucu malzemeler ile kaplanırlar. Çinko, kalay, krom, alüminyum gibi elementler ve bazı organik bileşikler kullanılan başlıca kaplama malzemeleridir.

Koruyucu malzemelerin çelik sacların yüzeylerine uygulanma şekilleri, sıcak daldırma, elektroliz veya vakumlama gibi üç temel yöntemle yapılır. Kaplama yöntemi ne olursa olsun, kaplama malzemesi tekbiçim şekilde yüzeye dağılmalı, kaplama kalınlığının değişimini kontrollerle sınırlandırılmalıdır.

Sıcak daldırma işleminde, kaplanacak çelik sac öncelikle esaslı bir şekilde temizlenir ve eriyik haldeki kaplama metali banyosuna daldırılır. Çinko, kalay, alüminyum ve kurşun bu yöntemle uygulanan kaplama malzemeleridir.

Elektrolizle kaplama malzemeleri (çinkonun dışında), çeliğe göre katodiktir. Kadmiyum, krom, bakır, altın, kalay, kurşun, nikel, gümüş, çinko ve çinko alaşımları pirinç ve bronz; elektroliz yöntemiyle çelik saclara kaplanabilir.

Vakumla kaplama yönteminde ise çelik saclar, alüminyum gibi hafif kaplama malzemelerinin buharını içeren ve basınçları farklılaşan vakum odaları serisine girer ve çıkar. Böylece en yüksek vakum odasında sacın her iki tarafının da akıcı kaplama metalinin etkisine maruz kalmasıyla ve metal buharının yoğunlaşarak sac yüzeylerinde tekbiçim bir şekilde sıvılaşmasıyla kaplama oluşur.

Soğuk haddelenmiş çelik sacların % 55'inden fazlası özel sürekli hatlarda kaplanmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisindeki artan talep nedeniyle son on yıl içerisinde oran ikiye



katlanmıştır. 1993 yılı itibarıyla, Avrupa Birliği'nin 12 ülkesinde 50 sıcak daldırarak galvanizleme, 25 elektrolitik galvanizleme ve 40 organik kaplama hattı işlemekteydi. Ülkemizde ise Erdemir A.Ş.'de şu anda faaliyette bir sürekli sıcak daldırarak galvanizleme hattı ve birer adet de elektrolitik kalay ve krom kaplama hatları bulunmaktadır [1].

### 2.3.5.1 Çinko ve Çinko Esaslı Kaplama Yöntemleri

Çinko kaplama yada diğer adıyla galvanizleme işlemiyle oluşan kaplama malzemesinin çelik sacı, şu iki esas üzerine koruduğu bilinmektedir (Llewellyn ve Hudd, 1998);

- Çevre ve çelik sac arasında fiziksel engel oluşturması,
- Elektromanyetik seride çinkonun demirden daha elektronegatif olması nedeniyle kurban anot gibi davranması ve galvanik koruma oluşturması.

Çinko kaplamalar, daha önce de bahsedilen sıcak daldırarak galvanizleme ve elektro-galvanizleme yöntemleriyle uygulanır. Bunlardan sıcak daldırma işlemi, sürekli bantlara uygulanabileceği gibi belli ebatlardaki çelik saclara tek tek de uygulanabilir. Ancak elektro-galvanizleme işlemi sürekli işlemdir, yalnızca uzun sac ve bantlara uygulanır (Roberts, 1978).

Sıcak daldırma ile galvaniz kaplama yöntemi birçok farklı çeşitte tasarlanmaktadır. En basitinde, yağın tavlama yapılmış ve temper haddelenmiş sac öncelikle uzun bir hidroklorik asitle temizleme banyosundan geçirilir ve üzerindeki sıvı katmanıyla beraber galvanizleme potasına daldırılır. Daha ayrıntılı bir tasarımda, sac temizleme biriminden sonra durulama ve kurulama işlemlerine maruz kalır ve ondan sonra çelik sac galvanizlenir.

Çelik sac, sıcak daldırma banyosuna girmeden önce inert atmosfere sahip bir ısıtma fırınından geçirilir. 730 - 850<sup>0</sup>C arasında bir sıcaklığa ulaşır ve yeniden kristalleşmeye uğrar. Koruyucu atmosfer altında çelik sac, gaz buharı yardımıyla hızlı bir şekilde soğutulur. Daha sonra da 465<sup>0</sup>C sıcaklığındaki çinko banyosuna daldırılır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Çinko kaplı sacın soğuk şekillendirilme davranışı, öncelikle ana malzemenin sahip olduğu şekillendirilme karakteristikleri temeline dayalıdır. Sıcak daldırma yöntemi ile galvanizleme işleminde, yukarıda da bahsedildiği gibi çelik sac hızlı ısıtma ve soğutma çevrimlerine maruz kalır. Bu çevrimler esas itibarıyla sürekli tavlama çevrimlerine benzese de, aslında yaşlanma sürecini içermediğinden tam olarak sürekli tavlama çevrimleriyle örtüşmemektedir. Bu yüzden, sıcak daldırma ile galvanizlenmiş çelik sacın şekillendirilebilirliği, yağın tavlama yapılmamış ve kaplamasız malzemeninkinden daha kötüdür. Ancak üzerinde değişiklik yapılarak iyileştirilmiş tavlama çevrimlerinin kullanılmasıyla sıcak daldırma ürününün

şekillendirilebilirliği iyileştirilebilir. Arayer atomu içermeyen (IF çelikleri) ve şekillendirilebilirliği çok iyi olan çelik sacların kullanılmasında kaplama işlemindeki bu kötü etki ortadan kalkar (Llewellyn ve Hudd, 1998).

Galvanizleme sırasında, % 0,15 gibi çok küçük oranda alüminyum, çinko-demir katmanı kalınlığını kısıtlamak amacıyla banyoya katılır. Alüminyumun etkisi burada,  $FeAl_3$ ,  $Fe_2Al_5$  gibi bileşiklerinden katman oluşturarak, demir-çinko tepkimelerini geciktirmesi şeklindedir. Bu işlem, daha sonraki şekillendirilme operasyonlarındaki büyük gerinimlerde sorun teşkil etmeyen bir kaplama sağlar. Metal banyosunun içeriğindeki kurşun miktarının artması da çinkonun kristal boyutunu arttırdığından yüzeydeki pullu görüntüyü artırır. Bunu önlemek için banyodaki kurşun miktarı % 0,15'ten az tutulmalıdır.

Kaplama işleminden sonra sac malzemenin yüzeylerine basınçlı gaz uygulanır. Hava, azot veya buhar içeren bu gazın kullanımının amacı, çelik sac yüzeyindeki çinko miktarının daha düzenli olarak dağılmasını sağlamaktır.

Yukarıda bahsedilen yöntemle elde edilen çinko kaplamanın içeriğinde % 5 dolaylarında arayüzey çinko-demir alaşımı mevcuttur. Ancak, çinko kaplamalı çelik sac ısıtıldığında, tamamıyla çinko-demir ara metal alaşımından ibaret olan kaplamanın üretilmesi mümkündür. Elde edilen bu tür kaplamalara galvanil kaplama denilmektedir. Galvanil kaplamaların galvaniz kaplamalara göre avantajları, daha iyi kaynak edilebilme kabiliyetleri ve boyamadan sonra daha güzel görünüm sağlamasıdır. Ancak dezavantajları ise, daha az sünek olması ve şekillendirme işlemlerinde yüzeye daha az yapışma sağlamasıdır. Bu iki kaplama türünün paslanmaya karşı koruma düzeyleri birbirine çok yakındır (Llewellyn ve Hudd, 1998).

Galvanizli kaplamalar, elektrolitik olarak da uygulanabilmektedir. bu yöntemde yüzeylerde pullanma olmaz, malzemeye kolay işlenebilme sağlar ve ağırlık bakımından hafif ve kontrol edilebilir kalınlıklar elde edilir. Özellikle yalnız bir yüzeyin çinko kaplandığı ince kaplamalar için kullanışlı bir yöntemdir. Bu kaplama işleminin ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilmesi dolayısıyla şekillendirilme davranışı üzerinde kaplama işleminin çok düşük etkisi vardır. Öncelikle sacın kimyasal ve elektrolitik temizleme banyolarından geçirilerek üzerindeki kirler ve yağlar giderilir. Kaplama çözeltisinde çinko genellikle, çinko oksit veya çinko karbonat gibi bileşiklerin eklenmesiyle biriktirilir ve anotlar kurşundur. Kaplama işleminden sonra çelik sac, elektriksel ve kimyasal açılardan etkinliğinin giderilmesi için kromat banyosundan geçirilir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

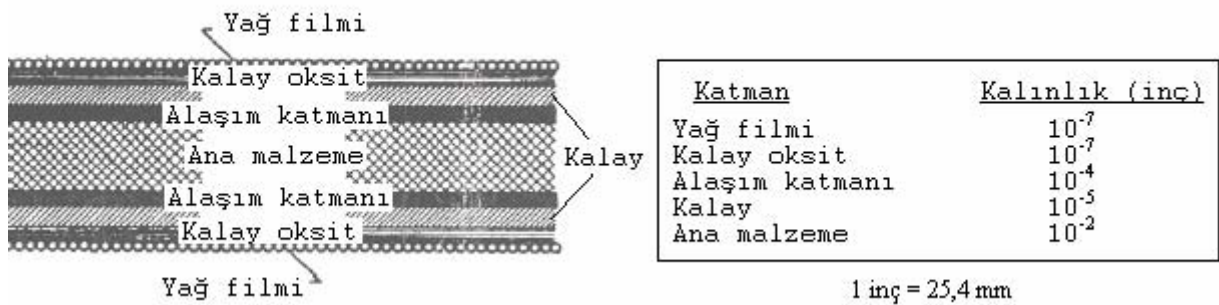
Plastik şekil verme ve kaynak işlemlerinden doğan problemlerin çözümü, çinko kaplamaların

daha kalın ve ağır olmasını öne sürmektedir. Bu nedenle, araştırma-geliştirme faaliyetleri, daha iyi korozyon dayanımlı ince kaplamaların geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla da % 87 çinko - % 13 nikel içeren kaplamalar özellikle otomotiv endüstrisinde kullanılmak için geliştirilmiştir [2].

### 2.3.5.2 Kalay Kaplama

Çeşitli gıda maddelerinin ve madeni yağların ambalajlanmasında kullanılan, kutu imalatından oyuncak yapımına kadar çok çeşitli kullanım yerleri olan kalay kaplanmış çelik saclar (tenekeler), elektrolitik veya sıcak daldırma yöntemleriyle kaplanabilmektedir. Elektrolitik kalay kaplama hatları ekonomik olmaları ve daha kontrollü kaplama kalınlığı sağlamalarından dolayı, daha eski yöntem olan sıcak daldırma işleminin yerini almaktadır. Yöntem dahilinde çelik sac, temizlenir, dekape edilir, kaplanır, yıkanarak temizlenir, yağlanır ve kontrol edilir. Şekil 2.20’de kalay kaplı bir tenekenin kalınlık doğrultusunda katmanları gözükmemektedir (Ersoy, Köroğlu, Günday, Pehlivan ve Yaşacan, 1991).

Standart elektrolitik kaplama esaslarına göre kaplanan çelik sacın kaplanma işleminden sonra yüzey görünümü mattır ve kullanıma uygun değildir. Bu nedenle kaplamanın ergiyebileceği bir sıcaklığa kadar ısıtılarak, genel parlak teneke yüzeyi elde edilir. Sacın ısıtılması, elektriksel direnç, yüksek frekans indükleme ve ışın yayan (radyant) ısıtma yöntemleriyle yapılır.



Şekil 2.20 Kalay kaplı bir çelik sacın kalınlık kesitindeki katmanlar ve kalınlıkları (Roberts, 1978).

Kalayın ergime noktası  $232^{\circ}\text{C}$  olduğundan ısıtma  $260 - 270^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığına kadar yapılır. Ardından su ile soğutma işlemi takip eder. Bu ısıtma soğutma operasyonu ile yansıtıcı bir yüzey ve ayrıca demir-kalay bileşiği ( $\text{FeSn}_2$ ) oluşturulur. Bu bileşik, katmanların kaynamasında ve korozyon dayanımında önemli rol oynar.

Çelik sacın mekanik özellikleri elektrolitik kalay kaplama işleminden sonra değişmemektedir (Roberts, 1978).

### 2.3.5.3 Diğer Kaplama Çeşitleri

Kalay kaplamaların kullanıldığı özellikle gıda maddelerinin ambalajlanması gibi alanlardaki imalat yöntemlerinin geliştirilmesi ve çeşitlenmesiyle birlikte kalaydan farklı kaplamalı ince çelik sacların kullanımı mümkün olmuştur. 1960'ların ortalarında çok ince krom ve krom oksit kaplamalar bu doğrultuda kullanılmaya başlanmıştır. Bu kaplamaların çelik saclara uygulanabilmesi için elektrolitik kaplama yönteminde iyileştirilmeler yapılmıştır. Böyle bir uygulamada, çelik sac önce alkali temizleyici kullanılarak temizlenir, fırçalanır ve sülfürik asit kullanılarak dekape edilir. Sonra yüzeyler elektrolitik hücrelerde krom kaplanır, kurulanır ve yağlanır [1].

Krom, çelik yüzeyine yüksek sıcaklıkta difüzyon esasına dayanarak yapışır. İyi korozyona direnç özelliklerinin yanında, krom kaplamanın derin çekme, sıvama gibi çoğu nitelikli şekillendirilme işlemlerine dayanacak kapasitede yeterli sünekliği ve yüzeye yapışma kabiliyeti vardır. Ayrıca bu tür kaplamalar standart kaynak edilebilme prosedürlerine uymaktadır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Krom kaplamanın uygulandığı malzemeler, yüzey karbonu alınan yada titanyumla stabilize edilen sıcak haddelenmiş çelik saclar veya tavlı soğuk haddelenmiş çelik saclardır. Kaplama malzemesinin karışımı ise değişen krom oranına sahip krom ve demir tozları karışımıdır. Malzeme ekonomikliği ve ürün kalitesi konularının uzlaştığı en etkili ana malzeme ve kaplama malzemesi birleşimi, titanyumla stabilize edilmiş çelik sac ve % 68 - 72 krom içeren demir-krom toz karışımıdır (Llewellyn ve Hudd, 1998).

Galvaniz, galvanil ve kalay kaplamalı çelik saclardan sonra piyasada karşılaşılan kaplamalı ürünlerden biri, patentinin ilk olarak 1972 yılında alındığı galvalum kaplamadır. Bu kaplamanın içeriği; %55 Al, %43,5 Zn, %1,5 Si'den ibarettir. Çinko kaplamak için kullanılan sıcak daldırma yöntemi esas olarak, galvalum kaplamada da kullanılır. Kaplama banyosundan sonra soğutmada, alüminyumca zengin faz ilk olarak katlaşır ve kaplama hacminin % 80'ini oluşturur. Arta kalan ise çinkoca zengin faz ve Al/Fe/Zn/Si karışımından oluşan ve kaplamayı ana malzemeye bağlayan metaller arası bileşiktir. Bu karışım ayrıca korozyona karşı ileri düzey koruma sağlamaktadır. Al - Zn alaşımına silikon eklemenin amacı, gevrek metaller arası katmanın büyümesini kısıtlamaktır. Kaplama işleminin sonunda meydana gelen kaplama malzemesi çelik saca, alüminyumun uzun ömür dayanımı ve

çinkonun galvanik koruma özelliklerini vererek üstün dayanım sağlar (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Bu kaplama, standartlarda AZ150 ve AZ185 olarak belirtilen  $150 \text{ g/m}^2$  ve  $185 \text{ g/m}^2$  değerlerinde kaplama ağırlıklarıyla uygulanır. Bu değerler de her iki yüzey için sırasıyla 20 ve  $25 \mu\text{m}$ 'lik kaplama kalınlıklarına tekabül etmektedir. Kaplamalı malzemenin mekanik ve dolayısıyla şekillendirilme özellikleri genellikle sürekli tavllanmış ve sıcak daldırma ile galvanizlenmiş çelik sacın özellikleriyle benzerdir. Ancak şekillendirme sırasında malzemenin geri yaylanmaya karşı eğilimi daha yüksektir ve sıcak daldırma ile yapılan çinko kaplamanın kendinden yağlayıcı özelliğinden yoksundur. Etkin bir yağlayıcının uygulanması bu nedenle gereklidir (Llewellyn ve Hudd, 1998).

Sıcak daldırma yöntemi ile çelik saca uygulanan kaplamalardan biri de alüminyumdur. Alüminyum kaplama ile, çeliğin şekillendirilebilme ve dayanım özelliklerinin alüminyumun korozyona uzun süre dayanım özelliğiyle birleştirilebilmesi amaçlanır. Ana metal, alüminyumla sakınleştirilmiş çelik olabilir ancak IF çeliğinin kullanımı yüksek şekillendirilme kabiliyeti ve yüksek sıcaklıkta oksitlenmeye dayanımı sağlar.  $500^\circ\text{C}$  sıcaklıklara kadar uzun süreli kullanımlarda alüminyum kaplı çelikler orijinal yüzey görünümlerini devam ettirirler. Daha yüksek sıcaklıklarda kaplama yavaşça demir-alüminyum alaşım katmanına dönüşse de üstün ısıya-dayanım özelliklerini sürdürür (Roberts, 1978).

Alüminyumla kaplamada, kaplama malzemesi iki katmandan oluşur. Bunlardan en dıştaki saf alüminyum veya alüminyum-silikon alaşımı, ana malzemeye yakın iç katman ise alüminyum-demir-silikon alaşımından ibarettir. Bu üç elementli alaşımın kalınlığı çarpıcı bir şekilde sünekliği, yapışmayı, tekbiçimliği, pürüzsüzlüğü ve yüzey görünümünü etkiler. Sıcak daldırma ile alüminyum kaplanmış çelik sacın mekanik özellikleri, sıcak daldırma ile galvanizlenmiş çelik sacın özellikleriyle aynıdır.

Kurşun kaplanmış çelik saclar da endüstride çok sık olmasa da (örneğin otomobil yakıt deposu imalatında) kullanılmaktadır. Kurşun kaplama işlemi, alışlagelmiş sürekli sıcak daldırma yöntemi ile uygulanmaktadır. Kaplama sırasında kurşun ile demirin alaşım oluşturmamaları nedeniyle banyoya kalay gibi elementler katılabilir (Burtsev, 1973).

Kurşun oranının % 3 ila 15 arasında değiştiği kurşun-kalay karışımı kaplamalarda kalay kaplı çelik saclara oranla daha donuk yüzey görünümü elde edilir. Ancak, bu kaplamalarda diğerine göre daha fazla korozyona dayanım, daha iyi şekillendirilebilirlik, kaynaklama ve

boyanabilme özelliklerinde artış göze çarpar. Sıcak daldırma ile kurşun-kalay karışımı kaplanmış çeliklerin mekanik özellikleri, kaplanmamış çelik saclar ile benzerdir (Roberts, 1978).

1980'li yıllarla beraber, çeşitli boya veya plastik kaplı, tam işlenmemiş çelik sacların üretiminde çarpıcı büyüme göze çarpar. Geniş renk ve doku çeşitliliğindeki bu kaplamaların en büyük avantajı, korozyon dayanımının yanında dekoratif görünümüdür. Atmosfere maruz dış uygulamalarda uzun paslanmazlık ömürlerinin yanında, iyi derin çekilebilirlik karakteristikleri, ısıya ve kimyasal etkilere karşı dirençleri göze çarpmaktadır (Llewellyn ve Hudd, 1998).

Organik kaplamalar, sıvı film olarak yada ince tabakalar halinde yapıştırılmak suretiyle yüzeylere uygulanır. Her iki durumda da yüzeylere iyi yapışma sağlanması için, çelik sacların çok iyi temizlenmesi gerekir. Bir başka yöntemde de toz halinde polimer malzemeler kullanılır. Sac yüzeyleri çok iyi temizlendikten sonra, yüksek yoğunluklu elektrik alanına sahip polimerler yüzeye uygulanır. Daha sonra yüzeyler ısıtılır ve merdaneler arasından geçirilir.

Organik kaplamalı saclar Euronorm 169-85'te düzenlenmiştir. Bu standarda göre kullanılan organik kaplamalar parantez içinde kullanıldıkları kalınlıklarla beraber şöyledir; PVC plastisol (200  $\mu m$ ), PVC organasol (50  $\mu m$ ), akrilik (25  $\mu m$ ), epoksi (5-15  $\mu m$ ), polyester (25  $\mu m$ ), PVF<sub>2</sub> (27  $\mu m$ ). Kaplamaların çoğu iyi şekillendirilebilirliğe sahiptir ve pres işlemleri, rulolarla şekillendirme ve derin çekme uygulamalarına uygundur (Llewellyn ve Hudd, 1998).

### **2.3.6 Soğuk Haddede Kontrol**

Genel olarak soğuk haddeleme başlığı altında toplanan asitleme, soğuk haddeleme, tavlama, temper haddeleme ve kaplama işlemleri çelik sacların imalat akışının son kısmı olduğundan ve çelik sacların kimyasal içerikleri dışında tüm özelliklerini belirlemelerinden dolayı, tanımlanmalarını etkileyen nihai operasyonlardır. Bu nedenle soğuk haddelemenin her bir işletmesinde yapılan tüm kontrollerin önemi büyüktür. İşlem denetim duyargaları sağlıklı çalışmalı, güvenilir olmalı ve kolay korunmalıdır. Bu taktirde, yaşlanmadan dolayı ve organizasyona giren ürünlerin tekbiçim olmamaları ile çoğunlukla karakteristiklerinin bilinmemesi nedenleriyle, imalat düzeneklerindeki sapmalar hesaba katılmalıdır. Bu da ürünün devamlı olarak monitörlenmesini gerektirdiği gibi düzeneklerin ölçülmesini de lüzumlu hale getirir.

Çizelge 2.10 Soğuk haddeleme işlemlerinde işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

İşlem	İşlem Kontrol Değişkenleri	Ölçme Tekniği
Asitleme	Banyo içeriği	Hat üzerinde numune alımı ile analiz (X-ışını flüoresan)
Soğuk haddeleme	1) Çekme kuvveti 2) Tezgah ayarları 3) Ürün genişliği 4) Ürün Kalınlığı ve kalınlık profili 5) Ürün Düzlemselliği 6) Hız ve kayma	1) Elektriksel ölçümler, uzama ölçerler 2) Mekanik duyargalar 3) Optik ölçüm 4) X-ışını ölçümü 5) Mekanik, optik, manyetik ve X-ışını 6) Optik ve takometrik ölçümler
Tavlama	1) Tavlama fırını atmosferi 2) Tavlama sıcaklığı	1) Çözümleme pili 2) Pirometre
Temper haddeleme	1) Yeniden kristalleşme ölçümü 2) Yüzey karakteristikleri	1) Ultrasonik ve manyetik denetim 2) Pürüzlülük ölçümü
Kaplama	1) Fırın atmosferi 2) Sıcaklık 3) Kaplama kalınlığı 4) Kaplama bileşimi	1) Çözümleme pili 2) Pirometre 3) X-ışını ve beta ışını ölçümü Kızılötesi ölçüm 4) X-ışını ölçümü

Çizelge 2.11 Soğuk haddeleme işlemlerinde ürün kalite değişkenleri ve ölçme teknikleri (Béranger, Henry ve Sanz, 1996)

Ürün Kalite Değişkenleri	Ölçme Tekniği
1) Boyutsal uzunluklar (genişlik, kalınlık, kalınlık profili) 2) Düzlemsellik	1) Optik, mekanik ve X-ışını ölçümleri 2) Mekanik, optik, manyetik ve X-ışını ölçümleri
Mekanik ve yapısal karakteristikler	Hat üzerinden NDE sistemi esasına göre numune alma
1) Yüzey karakteristikleri 2) Yüzey durumları	1) Pürüzlülük ve parlaklık ölçümleri 2) Görsel denetim
Yapıdaki kalıntı içeriği	Hat üzerinde denetim (Ultrasonik, sızıntı akışı yöntemleri ile) ve numune üzerinde denetim (esnek-çekme, manyetik parçacık denetimi)
1) Kaplama kalınlığı 2) Kaplama bileşimi 3) Yüzey durumu	1) X-ışını ve beta ışını ölçümleri Kızılötesi ölçüm 2) X-ışını ölçümü 3) Görsel denetim

Prosesin işleyişini ve sonuçlanan ürünü karakterize eden temel değişkenler ayrıntılı incelenmelidir. Çizelge 2.10'da soğuk haddelemenin kapsadığı tüm işlemlerle beraber işlem kontrol değişkenleri ve ölçme teknikleri açıklanmıştır. Çizelge 2.11'de ise çeşitli soğuk

haddeleme operasyonlarında ürün kalite değişkenlerine göre yapılan ölçme teknikleri sıralanmaktadır.

### 2.3.6.1 Kalıntı Kontrolü

Çelik sacların bünyesinde bulunan ve azlığı kalite göstergesi olan kalıntıların dağılımının ve boyutunun sınırlandırılması amaçlı kontrol işlemleri, mümkün olduğunca imalatın erken safhalarında yapılmalıdır. Nitekim “slabların yüzey ile içyapı temizliği ve kontrolü” bölümünde bu doğrultuda yapılan teftişlerden bahsedilmiştir.

Ancak günümüzde asitleme ve soğuk haddeleme bölümleri arasında “Sollac” ve “IRSID” diye adlandırılan test yöntemleriyle yapılan kontrol işlemleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemlerde ultrasonik “Lamb” dalgaları kullanılır ve sınırlı sayıda duyurga ile geniş kapsamlı kontrol yapılabilir. Yöntem 1 mm ve üzeri kalınlıklardaki çelik saclara iyi uyum sağlar.  $500\mu\text{m}$  boyutundaki kalıntılar, haddeleme öncesinde tespit edilebilmektedir. “Sperry” çarkı olarak bilinen teknikten ibaret olan yöntemde, su ile dolu bir çemberin iç kısmına yerleştirilmiş ultrasonik transduser çalışır ve bu çember, sacın hareketine bağlı olarak döner. 5 m/s’lik sac hızına kadar memnun edici sonuçlar alınabilmektedir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

### 2.3.6.2 Genişlik ve Kalınlık Kontrolü

Soğuk haddeleme sırasında genişlik ölçümünde temel prensip, ürün kenarlarının optik olarak taranmasıdır. Fotodiyot ışınları ve hızlı sinyal transferlerindeki gelişmelerin artmasıyla sacın genişliğinin 1/1000’i oranında doğruluğun elde edilmesi mümkündür. Stereoskop düzenleme, dikey sac hareketlerinden kaynaklanan hataları önler.

Kalınlık ölçümünde ise iki sac yüzeyi arasındaki mesafeyi ölçen optik veya mekanik düzenekler olsa da en yaygın kullanılan ölçüm yöntemi, iyonize radyasyonun soğurulması esasına dayanır. Radyo-izotop veya X-ışını tüplerinden ibaret olabilen radyasyon kaynağının seçimi, ölçülen kalınlığın dağılımına ve istenilen doğruluğa bağlı olarak değişir. 0,1 – 6 mm arası kalınlıklarda çalışan düzeneklerle  $\pm\%0,1$  doğruluk aralığında çalışılabilmektedir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

### 2.3.6.3 İki Boyutlu Ölçümler

Şekilsel düzgünlük kontrolü, ürün yer değiştirmesinin ölçümü ile ilişkili genişlik ölçüm sinyallerinin işlenmesi ile yapılır. Fotodiyot ışınları kullanarak bir harita yada iki boyutlu



görüntü oluşturmak amaçlanır.

Genişlik boyunca sac kalınlıkları değişim toleranslarının müşteri isteklerinde yer alması nedeniyle bu kalınlık profillerinin çıkartılması da iki boyutlu ölçüm işlemidir. Bu doğrultuda bir çok ölçüm teknolojisi kullanılsa da günümüzde en çok kullanılan sistem, tıp alanında da kullanılan radyografik teftiş esasına dayanır (Roberts, 1978).

#### **2.3.6.4 Düzlemsellik Ölçümü**

Sıcak haddeleme sırasında meydana gelen düzlemsellik kusurları, şekil bozuklukları olup açıkça görülebilirken, bu kusurlara sebebiyet veren fiber uzunlukları farklarını doğuran çekme kuvvetleri, soğuk haddeleme sırasında genellikle elastik uzamalar tarafından hapsedilir. Bu durumda düzlemsellik kusurları gizlidir ve sonraki şekillendirme operasyonlarında açığa çıkar. Fiberlerdeki uzunlamasına gerilme farklarını ölçen şu anki en yaygın teknik, tensiyometrik merdaneler kullanma tekniğidir. Optik ve X-ışınli teknikler araştırma ve geliştirme aşamasındadır (Roberts, 1978).

#### **2.3.6.5 Kaplama Kalınlığı Kontrolü**

Çinko veya kalay gibi metalik kaplamaların kalınlıklarının ölçümü X-ışını flüoresan tekniğine dayanır. Endüstriyel gelişimin bu yöntem bazında günümüzde ulaştığı mevki, 100 ms gibi yanıt zamanlarına olanak tanır. Bu hızlı ölçüm sayesinde ölçü kafası, çelik sacın genişliği boyunca bir baştan diğer başa geçerek kalınlık profilini hemzamanlı olarak çıkarmaktadır. Ancak metaller arası bileşiklerin bulunduğu kaplama malzemelerinde bu yöntemin kullanılamaması yeni yöntemlerin geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu yöntemlere ek olarak, kaplama hattı üzerinde yapılan, tavlama fırınında ürün sıcaklığının ölçümü ve düzenlenmesi kontrolü ile daha sağlıklı alایشımlama ve kaplama malzemesi elde edilebilir (Roberts, 1978).

Organik kaplamalarda kalınlık kontrolü için X-ışını flüoresan yöntemi, atom numaralarının düşük olması sebebiyle kaplamalardaki kadar uygun değildir. Bu nedenle bu tür kaplamalarda beta ışınları kullanılır. Böylelikle 20 m/s ürün hızlarında, bir saniyeden daha kısa yanıt zamanları ile  $\pm 25\mu m$  hassaslık derecesinde kontrol yapılabilmektedir (Llewellyn ve Hudd, 1998).

#### **2.3.6.6 Yüzey Kontrolü**

Kaplamalı veya kaplamasız, yassı ürünler için yüzey görünümü son derece önemli bir işlevsel parametredir. Ancak çoğu işletmelerde yüzey kontrolü görsel olarak, bizzat operatörler

tarafından yapılır. Görsel denetimin hataları sezmek ve seçmek bakımlarından ve niteliksel içeriklerinin saptanması açısından avantajları bulunsa da dezavantajları büyüktür. Özellikle güvenilir değildir ve birçok etkene bağlı olarak farklılaşabilir. Ayrıca 1 m/s üretim hızlarının üstünde görsel denetim çok güçleşir. Bu nedenle, sürekli tavlama hattından ayrılan sac ve teneke gibi ürünler için otomatik yüzey denetim düzenekleri geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu düzenekler, lazer tarama yada doğrusal çalışan kameraları içerirler. Tespit edilen hatalarla ilgili tüm açıklamalar ve görüntüler, operatörün çıkardığı sonuçlarla karşılaştırılabilir ve bir hata bilgi bankasında saklanabilir. Gelecekte karşılaşılabilecek kusurların bilgi bankası ile mukayese edilebilmesi, otomatik tanımlama ve sınıflandırmaya olanak tanımaktadır. Böylece sistemi durduracak yanlış ikazlardan kaçınılması kontrolün güvenilirliği artırılmış olur (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

#### **2.3.6.7 Nihai Özelliklerin Tahribatsız Yöntemlerle Değerlendirilmesi**

Derin çekilebilirlik, sertlik ve pürüzlülük gibi işlevsel ve nihai özelliklerin değerlendirilmesi, temel olarak numunelere uygulanan standart testlerin saptanması ile gerçekleştirilir. Modern laboratuvarlarda robotların kullanılması, yanıt sürelerini oldukça kısaltsa da ne yazık ki, numune alınması ve test sonuçlarının elde edilmesi arasında belli bir zaman kaybı kaçınılmazdır. Bunlara ek olarak, numunelerin genellikle sacın son kısmından alınması dolayısıyla, alınan numuneler muhakkak ki tüm üretim boyunca sacın özelliklerini temsil edememektedir. Bu nedenle, ilk önce sacın tekbiçimliliğinin teftişinin yapılması, daha sonra da numunelerin tahribatlı testlerinden ölçülen değerlerin elde edilmesi gereklidir.

Sacların tekbiçimliliğinin denetimi için kullanılan yöntemde, tahribatsız testlerle beraber hemzamanlı olarak elde edilen parametreler, mekanik özelliklere ve dolayısıyla metalürjik karakteristiklere uyarlanır. Örneğin bir dizi imalat teknikleri ile üretilen ferritik paslanmaz çelik sacın yeniden kristalleşme durumunun geniş kapsamlı bir şekilde ortaya konması, tavlama fırını çıkışına yerleştirilen ve hat üzerinde ölçüm yaparak çalışan manyetik esaslı yöntem ile mümkündür. Mekanik özelliklerin değerlerinin tam olarak elde edilmesi talep edildiğinde sorun daha da zorlaşır. Bağlılaşmalar, yani parametreler arasında dönüşüme izin veren fonksiyonlar, birçok farklı durum göz önüne alınarak, tahribatsız deneyler ve onlara özdeş mekanik parametrelerdeki değişimlerin bağlı bulunduğu fiziksel kuralların kullanımı ile kurulmalıdır. Buna ek olarak mekanik zorlayıcı birim ve mekanik sertlik arasındaki bağlantı, çeşitli ısı işlemleriyle farklılaşan her bir karbon çelik kalitesi için deneysel olarak doğrulanmaktadır. Sertlik, örneğin “Bauhausen Ses Tekniği” esasına göre, zorlayıcı kuvvetin hat üzerinde ölçülmesi işlemi vasıtasıyla saptanabilir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

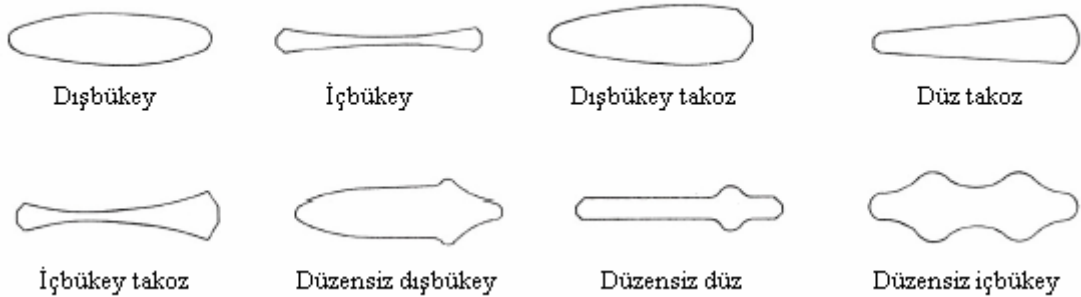
Sac yüzey düzlemindeki üç doğrultuda (haddeme yönüne  $0^0$ ,  $90^0$  ve  $45^0$ ) farklılaşan ultrasonik dalga hızlarının ölçümü ve X-ışını kırınımının ölçümü yöntemleriyle içyapı anizotropisinin nitelendirilmesi, son yıllardaki gelişmelerle mümkün olmaktadır. Bu tekniklerle, kristalografik yönelmelerin dağılım fonksiyonunun hesaplanması ve mekanik bir modelin uygulanmasıyla da plastik anizotropi değeri  $r$ 'nin  $\mp 0,1$  yaklaşımla ve düzlemsel anizotropi katsayısı  $\Delta R$ 'nin  $\mp 0,2$  yaklaşımla saptanması mümkündür (Fouraghi, 1995; Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

### 2.3.7 Soğuk Haddemede Karşılaşılan Kusurlar

Soğuk haddeme işleminde meydana gelen kusurlar, şekil bozuklukları ve yüzey kusurları olarak iki başlık altında açıklanabilmektedir. Bu kusurlar çok ince tolerans aralıklarında, önceki konuda anlatılan kontrol yöntemleriyle ayıklanmaktadır.

#### 2.3.7.1 Şekil Bozuklukları

Haddelenen saclara tanımlanan “şekil düzgünlüğü” teriminden kastedilen iki farklı anlamdan biri, sacın haddeme doğrultusunda kalınlık kesiti geometrisinin düzgün olması ve ikincisi ise sacın yatay düzlem bir yüzey üzerinde tam temas halinde yatabilme kabiliyetidir. Açıklanan bu iki temel şekil düzgünlüğü toleransının dışında kalan kusurlardan birincisine verilebilecek örnek, en sık karşılaşılan taçlaşmadır. Bu kusur, sıcak haddemede kusurlar konusunda da değinildiği gibi, sacın kenarları ve ortasındaki kalınlık farkıdır. Diğer taraftan ikinci tip kusur, geometrik şeklini çarpıtma eğilimde olan denetimsiz iş parçasındaki hataların varlığı ve yokluğu ile ilgilidir (Roberts, 1978).

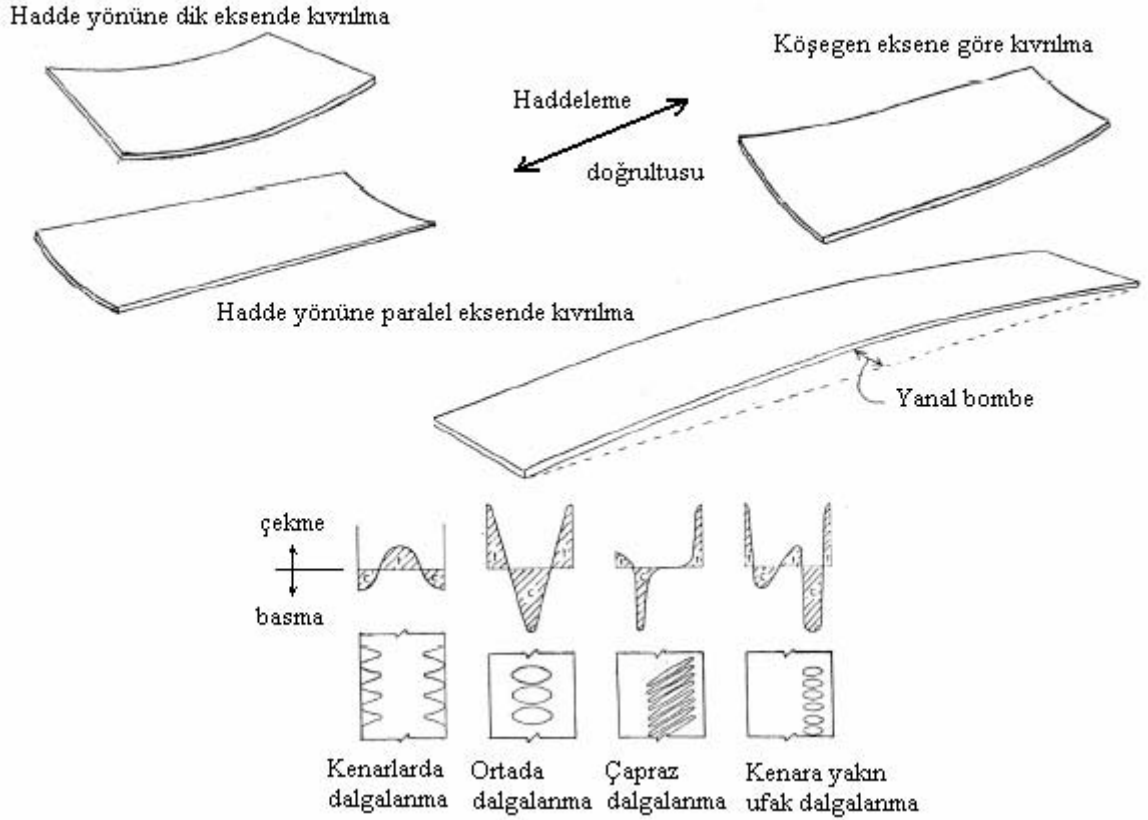


Şekil 2.21 Sıcak ve soğuk haddelenmiş saclarda karşılaşılan farklı kalınlık kesiti profilleri

Soğuk haddemede şekil bozukluklarının ortaya çıkmasında, hem şekil bozukluğu olan sıcak haddelenmiş sacların kullanımının hem de soğuk haddeme parametrelerinin etkisi vardır.

Soğuk haddelemeyi etkileyerek aynı profillerde kusurlu sac imaline yol açabilen sıcak haddelenmiş saclardaki şekil bozuklukları Şekil 2.21'deki gibidir.

Bu farklı kalınlık kesiti profillerinden soğuk haddeleme için kabul edilebilir olanlardan en uygunu dışbükey olandır. Dışbükey kalınlık profilinin, sacın tandem hadde ve diğer proses hatlarını kolayca izlemesini sağlamasına rağmen gene de düz profile sahip sıcak sacın sahip olduğu kadar sorunsuz haddelenebilme özelliklerine sahip değildir. Sıcak saclardaki takoz ve içbükey profiller ise şiddetle istenmeyen profillerdir. Bunun nedeni, yalnızca şekil bozukluklarının soğuk haddelenmiş sacda da devam edecek olmasından değil, aynı zamanda dalgalı kenar, kambur ve kalınlıktaki ani ölçü değişimleri gibi birçok çeşit düzensiz şekil bozuklukları oluşturmasıdır (Roberts, 1978).



Şekil 2.22 Soğuk haddeleme değişkenlerine bağlı olarak meydana gelen kusurlar (Roberts, 1978)

Soğuk haddeleme işleminin uygulanacağı sıcak haddelenmiş saclardan şu özellikler beklenir (Béranger, Henry ve Sanz, 1996);

- Taçlaşma oranı, yani sacın orta kısmı ile kenar kısımları arasındaki kalınlık farkı, % 1 veya daha düşük olmalıdır.
- Bölgesel kalınlık farkı  $10\mu m$  veya daha az olmalıdır.
- Sıcak haddelenmiş sacın sertlik dağılımı farkı 5 HRB'yi geçmemelidir.

Sacların soğuk haddeleme parametrelerine bağlı olarak meydana gelen şekil bozuklukları Şekil 2.22'de gösterilmektedir.

Hadde yönüne dik ekseninde kıvrılma kusuru, haddeleme operasyonu sırasında çelik sacın normal bir paso hattına göre oluşan asimetric koşullarından kaynaklanır. Alt ve üst merdaneler arası çap farkı, iş merdanelerinin konum hataları, yüzey koşulları, hız yada yağlama farkları bu kusurun oluşmasına yol açan asimetric koşullardır (Béranger, Henry ve Sanz, 1996).

Hadde yönüne paralel ekseninde kıvrılma kusuru, literatürde az karşılaşılmışına rağmen uygulamada en çok rastlanan kusurlardandır. Kusur, sacın iki kenarının da kıvrılması suretiyle simetric biçimde olabileceği gibi yalnız bir kenarının kıvrıldığı asimetric biçimde de vuku bulabilir. Oluşum nedenleri, iş merdanelerinin yatay bükülmeleri sonucu meydana gelen taçlaşma biçimi, yağlama yetersizliği ve düşük gergi kuvvetinden ibarettir.

Köşegen eksene göre kıvrılma kusurunun temel nedeni, haddeleme ve haddeleme yönüne dik doğrultu arasındaki bir doğrultuda etkiyen ve iki yüzeyde farklı büyüklüklerde ortaya çıkan kalıcı yüzey gerilmeleridir. Bu kalıcı gerilmelere yol açan etmen ise iş merdanelerinin birbirlerine göre ve son iş merdanesinin gergi merdanesine göre hizasız konumlarıdır.

Yanal bombe yada diğer adıyla yanal eğilmenin oluşum nedeni, tekbiçim hadde boşluğuna sahip merdanelerin üzerindeki takoz şekilli bir kısmın varlığı veya tekbiçim olmayan hadde boşluğuna sahip ancak kabul edilebilir merdane şekli ile sacın haddelenmesidir (Roberts, 1978).

Kenarlarda ve ortada dalgalanmanın nedeni, sıcak haddelemede kenar ve ortada enlemesine çatlaklar kusurlarında da bahsedildiği gibi kusur oluşan bölgedeki fazla uzamadan meydana gelmektedir, ki buna da sebep olan temel etmen merdanelerin eğilerek taç biçimini almasıdır. Ayrıca yağlamanın eksik yapılması da bu oluşumları arttırmaktadır.

Son olarak, Şekil 2.22'de geri kalan, çapraz dalgalanma ve kenara yakın ufak dalgalanmalar gibi bölgesel ve sacın tümünde görülmeyen kusurların oluşum nedenleri ise şöyledir;

- Hadde merdanelerinin biri veya daha fazlasında oluşan fiçilaşma,

- Haddeleme yağının sınırlı bölgelerde fazlaşması,
- Hadde aralığına giren sacın bir bölgesinin geri kalan kısımdan daha yumuşak ve/veya daha kalın olması.

### **2.3.7.2 Yüzey Kusurları**

Azaltılmadığı veya yok edilmediği takdirde, kimi zaman erken kopma kimi zaman dayanım azalması şeklinde sacların mekanik özelliklerini ve dolayısıyla şekillendirilebilirliğini etkileyen önemli üretim hatalarıdır. Literatürde ve üretildikleri işletmelerde farklı tanımlarla kullanılabilen ve çoğu zaman birbirlerine karıştırılan yüzey kusurları, “çelik sacların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimlerin nedenleri” kısmında on yedi madde altında sıralanmıştır.

### 3. ÇELİK SACLARIN SINIFLANDIRILMASI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

#### 3.1 Çelik Sacların Sınıflandırılması

Gelişen endüstri ve devamlı artan ihtiyaçlar üretilen çelik sacları, kullanılacakları alanlarda beklenen özellikleri karşılamaları amacıyla günden güne çeşitlendirmektedir. Bu çeşitlilikten kaynaklanabilecek olan dünya çapında tanım karmaşasının önüne geçmek için, her alanda olduğu gibi çelik saclar konusunda da standardizasyona gidilmektedir.

Çelik sacların sınıflandırılması, Avrupa standartlarındaki gibi ülkeler topluluğu bazında olabildiği gibi, ülke standartları ve hatta şirketlerin oluşturduğu standartlar olarak da karşımıza çıkmaktadır. Ülkemizin standartlarından TSE çelik saclar konusunda, çoğu ülkenin de uyguladığı gibi, Avrupa standardı EN'ye göre hareket etmektedir. Diğer ülke standartlarından en önemlileri; Amerikan standartları (ASTM, AISI, SAE), Alman standardı (DIN), İngiliz standardı (BS), Japon standardı (JIS), İtalyan standardı (UNI) şeklindedir. Çelik saclar konusunda şirket standartlarına örnek vermek gerekirse de; Toyota, Renault, Ford, vb gibi otomotiv imalatçılarının standartları ve çelik sac üretici firmalarının standartları (örneğin Erdemir, Arcelor, Corus Kalite Standartları gibi) göze çarpmaktadır. Bu standartların genelinde, birbirlerine göre küçük farklılıklar göze çarpsa da, temelde çelik saclar, kimyasal bileşim, üretim türü ve kullanım amacına göre sınıflandırılırlar. Standartları açıklamaya geçmeden önce, uygulamada var olan tüm çelik sacların, üretim türü ve kullanım alanlarına göre sıralanmasında fayda vardır.

#### 3.1.1 Üretim Türü ve Kullanım Alanına Göre Sınıflandırma

- **Sıcak haddelenmiş çelik saclar** [1], [4], [6];
  - Sıcak haddelenmiş alaşımsız yapı çelikleri
  - Katlamaya uygun sıcak haddelenmiş alaşımsız yapı çelikleri
  - Katlamaya uygun sıcak haddelenmiş yapı ve şasi çelikleri
  - Sıcak haddelenmiş yüksek karbonlu alaşımsız yapı çelikleri
  - İnce taneli kaynaklanabilir normalize edilmiş yapı çelikleri
  - Yüksek mukavemetli yapı çelikleri
  - Alaşımlı yapı çelikleri
  - Soğuk haddelemeye, sürekli tavlama prosesine ve derin daldırma yöntemi ile galvanize yapı çeliklerinin üretimine uygun sıcak haddelenmiş çelikler
  - Sıcak haddelenmiş emaye çelikleri

- Sıcak haddelenmiş karbon çelikleri
- Sıcak haddelenmiş ticari kalite çelikler
- Soğuk haddelemeye uygun sıcak haddelenmiş çelikler
- Soğuk şekillendirmeye uygun düşük karbonlu sıcak haddelenmiş çelikler
- Soğuk şekillendirmeye uygun yüksek akma dayanımlı sıcak haddelenmiş çelikler
- Soğuk haddelemeye, sürekli tavlama prosesine ve derin daldırma yöntemi ile galvanizlenmeye uygun sıcak haddelenmiş çelikler
- Soğuk haddeleme ve sürekli tavlama prosesine uygun sıcak haddelenmiş çelikler
- Soğuk haddelemeye, sürekli tavlama prosesine ve derin daldırma yöntemi ile galvanize fırın sertleşmeli çeliklerin üretimine uygun sıcak haddelenmiş çelikler
- Basınç altında kullanıma uygun çelikler
- Amerikan (ASTM) standardına göre üretilen basınçlı kap çelikleri
- LPG tüp çelikleri
- Yüksek sıcaklık ve basınç altında kullanıma uygun ince taneli normalize yapılmış çelikler
- Gemi yapım çelikleri
- Boru çelikleri
- Petrol borusu çelikleri
- Petrol sondaj boru çelikleri
- Düşük dayanımlı jant çelikleri
- Erdemir standardına göre üretilen jant çelikleri
- Orta dayanımlı jant çelikleri
- Yüksek dayanımlı jant çelikleri
- Atmosfer korozyonuna dayanıklı çelikler
- Kazan çelikleri
- Isıl işleme uygun bor alaşımli sıcak haddelenmiş çelikler
- Isıl işleme uygun düşük alaşımli sıcak haddelenmiş çelikler
- Elektrik çeliği yapımına uygun sıcak haddelenmiş çelikler
- Japon (JIS) standardına göre üretilen otomotiv çelikleri
- Şekillendirme işlemlerine uygun yüksek akma dayanımlı otomotiv endüstrisine yönelik sıcak haddelenmiş çelikler
- Şekillendirme ve çekme işlemlerine uygun düşük karbonlu sıcak haddelenmiş çelikler
- Sıcak haddelenmiş yüksek mukavemetli otomat kasası çeliği



- Yüksek dayanımlı sıcak haddelenmiş çelikler
- Savunma sanayi için kullanıma uygun çelikler
- **Soğuk haddelenmiş çelik saclar** [1], [4], [5];
  - Soğuk haddelenmiş yapı çelikleri
  - Soğuk haddelenmiş yüksek karbonlu çelikler
  - Soğuk haddelenmiş yüksek karbonlu özel çelikler
  - Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelikler
  - Soğuk haddelenmiş emaye çelikleri
  - Soğuk haddelenmiş ticari kalite çelikler
  - Soğuk şekillendirmeye uygun yüksek akma dayanımlı soğuk haddelenmiş çelikler
  - Çekme işlemine uygun soğuk haddelenmiş çelikler
  - Derin çekme işlemine uygun düşük karbonlu soğuk haddelenmiş çelikler
  - Derin çekme işlemine uygun çok düşük karbonlu otomotiv endüstrisine yönelik soğuk haddelenmiş çelikler
  - Derin çekme işlemine uygun çok düşük karbonlu beyaz eşya üretimine yönelik soğuk haddelenmiş çelikler
  - Ekstra derin çekme işlemine uygun çok düşük karbonlu otomotiv endüstrisine yönelik soğuk haddelenmiş çelikler
  - Yüksek mukavemetli ve şekillendirmeye uygun otomotiv endüstrisine yönelik soğuk haddelenmiş çelikler
  - Atmosfer korozyonuna dayanıklı çelikler
  - Elektrik motoru yapımına uygun soğuk haddelenmiş laminasyon çelikleri
- **Galvaniz kaplı çelik saclar** [1], [3];
  - Çinko ile kaplanarak galvanize edilmiş yapı çelikleri
  - Çinko ile kaplanarak galvanize edilmiş fırın sertleşmeli çelikler
  - Yüksek akma dayanımlı ve soğuk şekillendirme işlemine uygun sürekli sıcak daldırma yöntemiyle çinko kaplanarak galvanize edilmiş fırın sertleşmeli çelikler
  - Yüksek akma dayanımı olan ve soğuk şekillendirme işlemine uygun sürekli sıcak daldırma yöntemiyle çinko kaplanarak galvanize edilmiş refosforize çelikler
  - Soğuk şekillendirmeye uygun düşük karbonlu çinko ile kaplanmış (galvanize) çelikler
  - Soğuk şekillendirme ve derin çekme işlemlerine uygun düşük karbonlu galvanize çelikler

- **Galvanil kaplı çelik saclar** [1], [3];
  - Çinko-demir alaşımı ile kaplanarak galvanile edilmiş yapı çelikleri
  - Çinko-demir alaşımı ile kaplanarak galvanile edilmiş fırın sertleşmeli çelikler
  - Şekillendirme işlemine uygun çok düşük karbonlu fırın sertleşmeli galvanile çelikler
  - Soğuk şekillendirmeye uygun düşük karbonlu çinko-demir alaşımı ile kaplanmış (galvanile) çelikler
  - Soğuk şekillendirme ve derin çekme işlemlerine uygun düşük karbonlu galvanile çelikler
- **Kalay veya krom kaplı tenekeler.**

### 3.1.1 Standartlar

Endüstride yaygın kullanılan ve bir önceki kısımda sıralanan tüm çelik sac tiplerini içeren standartlardan, başta çelik sac üreticileri olmak üzere, dünyada ve ülkemizde en yaygın kullanılanı “EN” Avrupa standartlarıdır. Bu nedenle, bu kısımda açıklanan çelik sac standartları ve standartların gruplanması, EN baz alınarak oluşturulmuştur. Ancak buna ek olarak, çoğu çelik sac grubunun, belirtilen birtakım başka standartlardaki karşılıkları verilmiştir.

Üretim yöntemlerine göre çelik sac standartlarını, sıcak haddelenmiş ve soğuk haddelenmiş çelik sac standartları olarak iki genel kısma ayırmak mümkündür. Her bir standart kendi içinde çelik sacların boyutsal, düzlemsellik, yüzey görünümü, mekanik özellikler ve kimyasal içerik toleranslarını belirtmektedir. Ancak çelik sacların çeşit bakımından çok zengin olması nedeniyle, bu tezin kapsamı da dikkate alınarak standartlarında, mekanik özellikler ve kimyasal içerik dışındaki toleranslarından bahsedilmesine gerek görülmemiştir.

#### 3.1.1.1 Sıcak Haddelenmiş Çelik Sac Standartları

Sıcak haddelenmiş çelik sacların kimyasal içerik, üretim türü ve kullanım amaçlarına göre ayrılan çeşitlerinin EN’ye göre düzenlenmiş standartlarının numaraları ve eşdeğer bazı standartları Çizelge 3.1’de belirtildiği gibidir.

Çizelge 3.1 Sıcak haddelenmiş çelik sac standartları

Çelik sac türü	İlgili Standart	Eşdeğer standartlar
Soğuk şekillendirme ve derin çekmeye uygun çelikler	EN 10111:1998	TS EN 10111:2001 ASTM A1011-01a
Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelikler	EN 10149-2:1996	TS EN 10149:1999 ASTM A1011-01a
Yapı çelikleri	EN 10025:1993	TS EN 10025:2006

Çelik sac türü	İlgili Standart	Eşdeğer standartlar
Yapı çelikleri (devamı)	EN 10113-2(-3):1993	TS EN 10113-2(-3):1996 ASTM A1011-01a
Atmosferik korozyon dayanımı iyileştirilmiş çelikler	EN 10155:1993	TS EN 10155:2002 ASTM A242 / A606
Yüksek karbonlu çelikler	EN 10083-1:1997 EN 10132-4:2000	TS EN 10132-1(-4):2002 DIN 17200
Su verilebilir bor alaşımlı çelikler	EN 10083-3:1995	DIN 1654 Teil 4
Sementasyon çelikleri	EN 10084:1998	ISO 683-11:1987
Boru çelikleri	EN 10208-2:1996	TS 6047 EN 10208-2:2005 API 5L:2000
Basınçlı kap ve kazan çelikleri	EN 10028-2:2003 EN 10207:2005 EN 10028-3:2003 EN 10028-5:2003	TS EN 10028:2003 TS EN 10273:2003 ASTM A285 / A414 / A299
LPG tüp çelikleri	EN 10120:1996	TS EN 10120:1999 JIS G3116:1991
Gemi yapım çelikleri	-	ABS-P2-00

Soğuk şekillendirmeye ve derin çekme işlemine uygun çelik saclar, azami akma, azami çekme dayanımı ve asgari uzama değerleriyle garanti edilirler (Çizelge 3.2). Düşük oranda karbon ihtiva ederler ve çok iyi kaynak kabiliyetleri vardır. DD11'den DD14'e kadar olan kalite derecelerinin numarası arttıkça sacların derin çekilebilirliği artar. Otomotiv sanayisi, çeşitli ev ve endüstri eşyaları, başlıca uygulama alanlarıdır [4],[6].

Çizelge 3.2 Soğuk şekillendirmeye ve derin çekme işlemine uygun sıcak haddelenmiş çelik sacların mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri – EN 10111:1998

Kalite No.	Mekanik özellikler						Bükme testi mandrel çapı [en az]
	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az-en fazla]		Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en fazla]	Uzama (%) [en az]			
				$L_0 = 80mm$		$L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$	
	$1,5 \leq t < 2$	$2 \leq t < 8$		$1,5 \leq t < 2$	$2 \leq t < 3$	$3 \leq t < 8$	
DD14	170-310	170-290	380	31	32	36	1 t
DD13	170-330	170-310	400	28	29	33	0 t
DD12	170-340	170-320	420	25	26	30	0 t
DD11	170-360	170-340	440	23	24	28	0 t
Kalite No.	Kimyasal içerik						
	%C [en fazla]	%Mn [en fazla]	%P [en fazla]	%S [en fazla]			
DD14	0,08	0,35	0,025	0,025			
DD13	0,08	0,40	0,030	0,030			
DD12	0,10	0,45	0,035	0,035			
DD11	0,12	0,60	0,045	0,045			
Test numuneleri hadde yönüne dik doğrultudadır.							

Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelik saclar, iyi derecede süneklik, kontrollü içyapı temizliği, ince taneli içyapı ve düşük karbon içeriği özellikleriyle nitelendirilirler. Üstün mekanik özellikleri (yüksek dayanım, sertlik, yorulma dayanımı), iyi şekillendirilebilirlik ve kaynak edilebilirlik özellikleriyle birleşir (Çizelge 3.3 – 3.4). Yük taşıma makinelerinin ana gövdeleri, tarım makineleri, jantlar, hava yastığı parçaları, köprü inşaatları, konteynır imalatları başlıca uygulama alanlarıdır. Bu çelik sacların kullanılmalarıyla, ağırlık tasarrufu amaçlanır [4], [6].

Çizelge 3.3 Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelik sacların mekanik özellikleri – EN 10149-2:1996

Kalite No.	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az]	Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az-en fazla]	Uzama (%) [en az]		Bükme testi mandrel çapı [en az]
			$L_0 = 80mm$ $t < 3$	$L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$ $t \geq 3$	
S315MC	315	390-510	20	24	0 t
S355MC	355	430-550	19	23	0,5 t
S420MC	420	480-620	16	19	0,5 t
S460MC	460	520-670	14	17	1 t
S500MC	500	550-700	12	14	1 t
S550MC	550	600-760	12	14	1,5 t

Test numuneleri hadde yönüne dik doğrultudadır.

Çizelge 3.4 Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelik sacların kimyasal içerikleri – EN 10149-2:1996

Kalite No.	%C [en fazla]	%Mn [en fazla]	%P [en fazla]	%S [en fazla]	%Si [en fazla]	%Al-toplam [en az]	%V [en fazla]
S315MC	0,12	1,30	0,025	0,020	0,50	0,015	0,20
S355MC	0,12	1,50	0,025	0,020	0,50	0,015	0,20
S420MC	0,12	1,60	0,025	0,015	0,50	0,015	0,20
S460MC	0,12	1,60	0,025	0,015	0,50	0,015	0,20
S500MC	0,12	1,70	0,025	0,015	0,50	0,015	0,20
S550MC	0,12	1,80	0,025	0,015	0,50	0,015	0,20

Yapı çelikleri sınıfındaki sıcak haddelenmiş çelik saclar, çok iyi kaynak edilebilme kabiliyetlerinin yanında asgari akma ve çekme dayanımları garanti edilen, tatmin edici sünekliğe sahip karbon-mangan çelikleridir (Çizelge 3.5). Başlıca uygulama alanları, inşaat endüstrisi ve makine konstrüksiyonlarında çeşitli bina parçaları, konteynırlar, depolama tankları şeklindedir. Kaynak edilebilir ince taneli sıcak haddelenmiş yapı çelikleri, EN'de diğer yapı çeliklerinden ayrı standart numaralarında gösterilmektedir (Çizelge 3.6) [3], [6].

Çizelge 3.5 Yapı çelikleri sınıfındaki sıcak haddelenmiş çelik sacların mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri – EN 10025:1993

Mekanik özellikler								
Kalite No.	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az]		Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az-en fazla]		Uzama (%) [en az]			
	$t \leq 16$	$16 < t \leq 20$	$t \leq 3$	$3 < t \leq 20$	$L_0 = 80mm$		$L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$	
					$1,5 < t \leq 2$	$2 < t \leq 2,5$	$2,5 < t < 3$	$3 \leq t \leq 20$
S185	185	175	310-540	290-510	10	11	12	16
S235	235	225	360-510	340-470	17	18	19	24
S275	275	265	430-580	410-560	14	15	16	20
S355	355	345	510-680	490-630	14	15	16	20
Test numuneleri hadde yönüne dik doğrultudadır.								
Kimyasal içerik								
Kalite No.	%C [en fazla]	%Mn [en fazla]	%P [en fazla]	%S [en fazla]	%Si [en fazla]	%Nb [en az-fazla]	%V [en az-azla]	
S185	-	-	-	-	-	-	-	
S235	0,22	1,60	0,050	0,050	0,50	-	-	
S275	0,25	1,60	0,050	0,050	0,50	-	-	
S355	0,23	1,60	0,050	0,050	0,50	0,003-0,10	0,003-0,10	

Çizelge 3.6 Kaynak edilebilir ince taneli sıcak haddelenmiş yapı çeliklerinin mekanik özellikleri – EN 10113-2(-3):1993

EN 10113-2:1993				
Kalite No.	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az]		Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az-en fazla]	Uzama (%) [en az]
	$t \leq 16$	$16 < t \leq 20$	$t \leq 20$	$L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$ $3 \leq t \leq 20$
S275N	275	265	370-510	24
S355N	355	345	470-630	22
EN 10113-3:1993				
S355M	355	345	450-610	22
S420M	420	400	500-660	19
S460M	460	440	530-720	17
Test numuneleri hadde yönüne dik doğrultudadır.				

Çizelge 3.7 Kaynak edilebilir ince taneli sıcak haddelenmiş yapı çeliklerinin kimyasal içerikleri – EN 10113-2(-3):1993

EN 10113-2:1993						
Kalite No.	%C [en fazla]	%Mn [en az-en fazla]	%P [en fazla]	%S [en fazla]	%Si [en fazla]	%N [en fazla]
S275N	0,18	0,50-1,40	0,035	0,030	0,400	0,015
S355N	0,20	0,90-1,65	0,035	0,030	0,500	0,015
EN 10113-3:1993						
S355M	0,14	1,60 [en fazla]	0,035	0,030	0,500	0,015
S420M	0,16	1,70 [en fazla]	0,035	0,030	0,500	0,020
S460M	0,16	1,70 [en fazla]	0,035	0,030	0,500	0,025

Atmosferik korozyon dayanımı iyileştirilmiş çelik saclar, EN 10155:1993 standardına göre gösterilse de mekanik özellikler bakımından EN 10025-5:2004 standardının özelliklerini taşımaktadır. Asıl itibarıyla ince taneli yüksek dayanımlı yapı çelikleridirler ve iyileştirilmiş şekillenebilme özelliklerine, atmosferik korozyona maruz alanlarda kullanılabilme özelliği eklenmiştir. Bu tip çelik sacların mekanik özellikleri bahsedilen standardın S355 kalitesine uymaktadır [3], [6].

Yüksek karbonlu çelik saclar, ısıt işlemlerinden sonraki yüzey sertlikleri ile nitelendirilirler. Yüksek dayanımlıdır ve yorulma dayanımları iyidir. Bu nedenle yüksek dayanım gerektiren (örneğin tarım makinelerinin toprak işleyen kısımlarının imalatı gibi) yoğun darbeli uygulamalarda kullanılırlar. Kullanılacakları yerlere göre soğuk haddelenebilir veya ısıt işleme maruz kalabilirler. Başlıca kullanım alanları, mekanik parçalar, kavramalar, testere ve tarım bıçaklarıdır. Yeniden haddelendiklerinden veya ısıt işlem gördüklerinden dolayı, mekanik özellikleri çok çeşitlenmektedir. Bu nedenle çelik sac üretici firmalar bu tip saclar için mekanik özellikleri garanti edememektedir. Kimyasal içeriklerindeki karbon oranları, en az karbon oranlı kalitesinde (C40E) % 0,37 iken en yüksek karbon içeren kalitesinde (C100S) %1,050'ye kadar çıkabilmektedir. Kimyasal bileşiminde Cr, Ni, Mo gibi elementler de bulunmaktadır [3], [5].

Su verilebilir bor alaşımlı çelik saclar, içeriklerindeki bor elementi sayesinde sertleşmeye müsait malzemelerdir. Kontrollü ergitme, tazeleme ve termo-mekanik sıcak haddeme

sayesinde bu tip çelik sacların, sertliklerinde olağanüstü değerlerle beraber çok iyi tekbiçim mikroyapıya ulaşmaları ve bu saclardan imal edilen parçaların ısıtılma işlemlerinden sonra mükemmel mekanik zorlanma performansına sahip olmaları sağlanır. Yapı ve otomotiv parçalarında kullanılmaları, örneğin ince taneli yüksek dayanımlı çeliklerle karşılaştırıldıklarında bile % 50'ye varan, kayda değer ağırlık azalmasına yol açmaktadır. EN 10083-3:1995 standardında, 20MnB5 ve 30MnB5 olmak üzere iki kalite derecesi mevcuttur. Kimyasal içerikleri Çizelge 3.8'de gösterildiği gibidir. Bu kalitelerde üretilen çelik saclardan yapılan çekme testlerinden bir sonuç Çizelge 3.9'da verilmektedir. Bu çizelge, 6 mm kalınlığındaki yalın ve su verilmiş saclardan haddeleme doğrultusunda alınan numunelerin sonuçlarını karşılaştırmaktadır [3].

Çizelge 3.8 Su verilebilir bor alaşımlı çelik sacların kimyasal içerikleri – EN 10083-3:1995

Kalite No.	%C [en az – en fazla]	%Mn [en az – en fazla]	%P [en fazla]	%S [en fazla]	%Si [en az – en fazla]	%Al [en az]	%Ti [en az – en fazla]	%B [en az – en fazla]
20MnB5	0,20-0,25	1,10-1,40	0,025	0,008	0,15-0,35	0,015	0,02-0,05	0,002-0,005
30MnB5	0,27-0,33	1,15-1,45	0,025	0,004	0,20-0,30	0,015	0,02-0,05	0,001-0,005

Çizelge 3.9 Su verilebilir bor alaşımlı çelik sacların ortalama mekanik özellikleri

Kalite No.	Yalın halde			Su verilmiş halde		
	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ )	Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ )	Uzama (%)	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ )	Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ )	Uzama (%)
20MnB5	320	500	28	1100	1500	10
30MnB5	360	550	25	1200	1700	8

Sementasyon çelikleri sınıfındaki çelik saclar, ısıtılma işleme uygun çelikler grubundan olmakla birlikte iyi derin çekilebilme özelliklerinin yanında, yüzey sertlik değerlerinin yüksek olduğu çelikler şeklinde tanımlanırlar. Yüzeyleri sertleşirken mekanik özelliklerinde değişim olmamaktadır. Isıtılma işleminden sonra yüzeyde kazanılan yüksek sertlik sayesinde, aşınma direncinin iyi olması aranan uygulamalarda kullanılır. Çarpışma bariyerleri, şanzıman ve çeşitli dişli çark parçaları gibi mekanik aşınma ve güç iletimi gerektiren uygulamalar başlıca kullanım alanlarıdır. Bu gruptaki malzemelerin, son şeklini almış parçalar için EN 10084:1998 standardı mevcuttur. Kimyasal içerikleri Çizelge 3.10'daki gibidir [4].





Basınçlı kap ve kazan imalatı amaçlı kullanılan çelik sacların temel özellikleri, farklı sıcaklıklar içeren farklı atmosferler altında yüksek basınçlara dayanabilmeleridir. Yüksek basınçlara, standart yapı çeliklerden daha iyi dayanım gösteren bu tip çelik saclar, özel karbon-mangan çelikleridir. Kaynak edilebilme kabiliyetleri iyidir, normalizasyon ile gerilme giderme tavlamalarının uygulanmasına ve mekanik şekillendirmeye elverişli malzemelerdir. Buhar kazanları, variller, basınçlı buhar içeren borular, ısı değıştirgeçeri başlıca kullanılmayan alanlardır. Belirtilmiş yüksek sıcaklıklarda belli özelliklerini koruyan çelikler, basit basınçlı kap çelikleri, kaynak edilebilir ince taneli normalize edilmiş çelikler ve kaynak edilebilir ince taneli termo-mekanik haddelenmiş çelikler olmak üzere EN standartlarında sırasıyla; EN 10028-2:2003 (P235GH, P265GH, P295GH, P355GH) , EN 10207:2005 (P235S, P265S, P275SL), EN 10028-3:2003 (P275NH/NL1/NL2, P355N/NH/NL1/NL2) ve EN 10028-5:2003 (P420M/ML1) standart numaralarıyla gruplanmışlardır. Çizelge 3.13'te mekanik özellikleri ve Çizelge 3.14'te kimyasal içerikleri sıralanmaktadır [5], [6].

Çizelge 3.13 Basınçlı kap ve kazan çeliklerinin mekanik özellikleri – EN 10028-2:2003, EN 10207:2005, EN 10028-3:2003 ve EN 10028-5:2003

Kalite No.	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az]	Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az-en fazla]	Uzama (%) [en az]		
			$L_0 = 80mm$		$L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$
			$2 < t \leq 2,5$	$2,5 < t < 3$	$3 \leq t \leq 20$
P235GH	235	360-480	19	20	25
P265GH	265	410-530	17	18	23
P295GH	295	460-580	16	17	22
P355GH	355	510-650	15	16	21
P235S	235	360-480	20	21	26
P265S	265	410-530	17	18	22
P275SL	275	390-510	18	19	24
P275NH/NL1/NL2	275	390-510	18	19	24
P355N/NH/NL1/NL2	355	490-630	17	18	23
P420M/ML1	420	500-660	14	17	20

Test numuneleri hadde yönüne dik doğrultudadır.

Çizelge 3.14 Basınçlı kap ve kazan çeliklerinin kimyasal içerikleri – EN 10028-2:2003, EN 10207:2005, EN 10028-3:2003 ve EN 10028-5:2003

Kalite No.	P235 GH	P265 GH	P295 GH	P355 GH	P235 S	P265 S	P275 SL	P275 NH/NL1/NL2	P355 N/NH/NL1/NL2	P420 M/ML1
%C	<0,16	<0,2	0,08-0,2	0,1-0,22	<0,16	<0,2	<0,16	<0,16	<0,18	<0,16
%Mn	0,6-1,2	0,8-1,4	0,9-1,5	1,0-1,7	0,4-1,2	0,5-1,5	0,5-1,5	0,8-1,5	1,1-1,7	<1,7
%P	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
%S	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,025	<0,025	<0,020	<0,015	<0,015	<0,015
%Si	<0,35	<0,4	<0,4	<0,6	<0,35	<0,4	<0,4	<0,4	<0,5	<0,6
%Al	>0,02	>0,02	>0,02	>0,02	>0,02	>0,02	>0,02	>0,02	>0,02	>0,02
%Cu	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	-	-	-	<0,3	<0,3	-
%Cr	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	-	-	-	<0,3	<0,3	-
%Ni	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5
%Mo	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	-	-	-	<0,08	<0,08	<0,2
%Nb	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	-	-	-	<0,05	<0,05	<0,05
%V	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	-	-	-	<0,05	<0,1	<0,1
%Ti	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	-	-	-	<0,03	<0,03	<0,05
%N	<0,012	<0,012	<0,012	<0,012	-	-	-	<0,012	<0,012	<0,020

LPG tüp çelikleri sınıfına dahil olan çelik saclar, basınçlı kap çeliklerinin özel bir kategorisine aittirler. Temel özellikleri derin çekilebilir olmaları ve yaşlanmamalarıdır. Çok iyi kaynak edilebilme özelliklerinin yanında, kaynak bölgesinin ısıl işleminden sonra mukavemetlerini muhafaza etme özellikleri de başta gelir. Çizelge 3.15'te mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri verilmektedir [6].

Çizelge 3.15 LPG tüp çelikleri sınıfından çelik sacların mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri – EN 10120:1997

Kalite No.	Mekanik özellikler								
	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az]			Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az-en fazla]			Uzama (%) [en az]		
							$L_0 = 80mm$ $t < 3$	$L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$ $3 \leq t \leq 5$	
P245NB	245			360-450			26	34	
P265NB	265			410-500			24	32	
Kalite No.	Kimyasal içerik								
	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Al	%N	%Nb	%Ti
P245NB	<0,16	>0,30	<0,025	<0,015	<0,25	>0,02	<0,009	<0,050	<0,03
P265NB	<0,19	>0,40	<0,025	<0,015	<0,25	>0,02	<0,009	<0,050	<0,03

Test numuneleri hadde yönüne dik doğrultudadır.

Gemi yapım çelikleri tüm dünya genelinde ABS P2-00 standardına göre, A ve B kaliteleri olmak üzere iki kalite halinde üretilirler. Gemi yapımı için sıcak haddelenmiş yapı çeliklerinin çok iyi kaynak edilebilirlik özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Çizelge 3.16'da gemi yapım çeliklerinin mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri gösterilmektedir [3], [4].

Çizelge 3.16 Gemi yapım çeliklerinin mekanik özellikleri ile kimyasal içerikleri – ABS-P2-00

Kalite No.	Mekanik özellikler				
	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az]	Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az-en fazla]	Uzama (%) [en az] $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$		
A	235	400-520	22		
B	235	400-520	22		
Kalite No.	Kimyasal içerik				
	%C	%Mn	%P	%S	%Si
A	<0,21	<0,525	<0,035	<0,035	<0,5
B	<0,21	>0,80	<0,035	<0,035	<0,5
Test numuneleri hadde yönüne dik doğrultudadır.					

### 3.1.1.2 Soğuk Haddelenmiş Çelik Sac Standartları

Soğuk haddelenmiş çelik sacların kimyasal içerik, üretim türü ve kullanım amaçlarına göre ayrılan çeşitlerinin EN'ye göre düzenlenmiş standartlarının numaraları ve eşdeğer bazı standartları Çizelge 3.17'de belirtildiği gibidir.

Çizelge 3.17 Soğuk haddelenmiş çelik sac standartları

Çelik sac türü	İlgili Standart	Eşdeğer standartlar
Soğuk şekillendirme ve derin çekmeye uygun çelikler	EN 10130:1999	TS 3813 EN 10130:2003 ASTM A366 CQ, A619 DQ, A620 DQSK, DIN 1623-1
Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelikler	EN 10268:1999	TS EN 10268:2005 ASTM 607:1993
Yapı çelikleri	EN 10130:1999	ARCELOR B30 SAE, CORUS CA(200-260), DIN 1623-2:1986

Soğuk şekillendirme ve derin çekme işlemlerine uygun soğuk haddelenmiş çelik saclar, alaşımsız ve düşük karbonlu çeliklerdir. En yüksek akma ve çekme dayanımı, en düşük

süneklik (kopma uzaması) değerleri ile sınırlı olarak garanti edilirler. Şekillendirilebilirlik (n ve r) değerleri çok iyi olduğundan her türlü soğuk şekillendirme işlemlerine en uyumlu olan sac grubudur. Otomotiv endüstrisi, çeşitli ev, ofis ve sanayi eşyaları, beyaz eşya endüstrisi, radyatörler ve vantilatörler başlıca kullanım alanlarıdır. Kaplamasız olanları yiyecek-içeceklerle ilgili alanlarda kullanılmaktadır. Yığın ve sürekli tavlama olmak üzere her iki tavlama yöntemiyle de üretilmiş çeşitleri vardır. Çizelge 3.18’de şekillendirme amaçlı soğuk haddelenmiş çelik sacların mekanik özellikleri ve Çizelge 3.19’da ise kimyasal içerikleri verilmiştir [3], [4], [6] (Erdemir Mamul Kataloğu, 2002).

Çizelge 3.18 Soğuk şekillendirme ve derin çekme işlemlerine uygun soğuk haddelenmiş çelik sacların mekanik özellikleri – EN 10130:1999

Kalite No.	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en fazla]	Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az-en fazla]	Uzama (%) [en az] $L_0 = 80mm$	$r_{90}$	$\bar{r}$	$n_{90}$	$\bar{n}$
DC01	280	270-410	28	-	-	-	-
DC03	240	270-370	34	1,3	-	-	-
DC04	210	270-350	38	1,6	-	0,18	-
DC05	180	270-330	40	1,9	-	0,21	-
DC06	180	270-350	38	-	1,8	-	0,22

Notlar:

- 1) Bu değerlerin tümü temper haddelenmiş çelik saclar içindir.
- 2) Test numuneleri hadde yönüne dik doğrultudadır.
- 3)  $0,5 < t \leq 0,7$  mm kalınlık aralığındaki saclar için, en yüksek akma dayanımı  $20N/mm^2$  artar ve en düşük kopma uzaması 2 birim azalır.
- 4)  $t \leq 0,5$  mm kalınlıklardaki saclar için, en yüksek akma dayanımı  $40N/mm^2$  artar ve en düşük kopma uzaması 4 birim azalır.
- 5) r ve n değerleri,  $t \geq 0,5$  mm olduğunda geçerlidir.
- 6)  $t > 2$  mm şartında,  $r_{90}$  ve  $\bar{r}$  değerleri 0,2 birim azalır.
- 7) Tasarım amaçlı uygulamalar söz konusu olduğunda, DC01, DC03, DC04 ve DC05 kalite no.ları için en düşük akma dayanımı  $140N/mm^2$ , DC06 için ise  $120N/mm^2$ ’dir.

Çizelge 3.19 Soğuk şekillendirme ve derin çekme işlemlerine uygun soğuk haddelenmiş çelik sacların kimyasal içerikleri – EN 10130:1999

Kalite No.	%C [en fazla]	%Mn [en fazla]	%P [en fazla]	%S [en fazla]	%Ti [en fazla]
DC01	0,12	0,60	0,045	0,045	-
DC03	0,10	0,45	0,035	0,035	-
DC04	0,08	0,40	0,030	0,030	-
DC05	0,06	0,35	0,025	0,025	-
DC06	0,02	0,25	0,020	0,020	0,30

Düşük karbonlu, alaşımsız, soğuk haddelenmiş çelik sacları, ASTM Standartlarına göre ise iki sınıfa ayırmak mümkündür. 1. Sınıf (temper haddelenmiş), yüzey görünümünün önemli olduğu ve belirli bir yüzey kalitesi ve yüzey düzlüğü şartının karşılanması gerektiği uygulamalarda tercih edilir. 2. Sınıf (son işlem olarak tavllanmış) ürünler ise tümüyle tavllanmış bir ürün sınıfı olup, görünümün daha az önemli olduğu, yüzey dokusu, süreksizlikler, düzlük ve Lüders bantları oluşum eğilimi konularında sınırlandırmaların uygun olmadığı durumlarda tercih edilir (The ASM Committee on Steel Sheet and Strip, 1990).

Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacların ASTM'a göre diğer bir sınıflandırma şeklinde ise ticari kalite, derin çekme kalitesi ve özel dinlendirilmiş derin çekme kalitesi olmak üzere üç grup mevcuttur.

Ticari kalitedeki (CQ) düşük karbonlu çelik sac ve şeritler orta dereceli şekillendirmelere uygundur. Bu malzemeler, oda sıcaklığında ve bütün yönlerde, eğme bölgesinin dış yüzeyinde bir çatlak oluşmaksızın kendi üzerinde 180° katlanabilme sünekliğine sahiptirler. Bu kalitedeki malzemeler, diğer hiçbir mekanik deney gereksinimine maruz bırakılmamakta ve bunlardan istisnai tekbiçim bir kimyasal bileşim ile mekanik özellikler beklenmemektedir. Belirli bir zaman içerisinde yaşlanmaları söz konusudur. Lüders bantlarının oluşumu istenmiyorsa, şekillendirmeden hemen önce bir germe veya temper haddeleme işlemine tabi tutulması gerekmektedir (ASTM A366).

Ticari kalitedeki sacların sağlayamadığı daha yüksek süneklik ve daha tekbiçim özellikler gerektiğinde derin çekme kalitesindeki (DQ) saclara başvurulur. Bu kalitedeki saclar, derin çekilmesi gereken parçaların imalatı için uygundur. Derin çekme kalitesindeki saclar da ticari kaliteye dahil olan saclar gibi yaşlanma özelliğine sahiptirler ve Lüders bantlarının oluşumu istenmiyorsa, şekillendirmeden hemen önce benzer işlemlere tabi tutulması gerekmektedir (ASTM A619).

Şekillendirilen parçanın deformasyon derecesi daha yüksek ise ve Lüders bantlarının oluşumuna karşı direnç isteniyorsa, özel dinlendirilmiş derin çekme kalitesindeki (DQSK) düşük karbonlu çelik saclar kullanılmaktadır. Bu kalitedeki saclar, özellikle yüksek derin çekilebilirliğin gerektiği parçaların imalatında ve bunun için gereken sünekliğin de derin çekme kalitesindeki saclar tarafından sağlanamadığı durumlarda tercih edilirler. Bu kalitedeki sacların şekillendirilebilirlik özellikleri kalıcı olmakta ve zamanla sac malzemenin mekanik özelliklerinde yaşlanma sonucu belirgin bir değişim görülmemektedir (ASTM A620). Çizelge 3.20 ve 3.21'de ASTM Standartlarına göre soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik

sacların sırasıyla, mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri görülmektedir.

Çizelge 3.20 ASTM Standartlarına göre soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacların mekanik özellikleri

Kalite No.	Sınıf	Yüzey kalitesi	Yaşlanma eğilimi	Sertlik aralığı (HRB)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%) $L_0 = 50mm$
A366 Ticari kalite (CQ)	1. Sınıf	E	Var	38-60	234	317	35
	2. Sınıf	U	Yok	35-60	234	317	37
A619 Derin çekme kalitesi (DQ)	1. Sınıf	E	Var	35-55	207	310	39
	2. Sınıf	U	Yok	35-50	221	310	41
A620 Özel dinlendirilmiş derin çekme kalitesi	1. Sınıf	E	Yok	35-48	172	296	41
	2. Sınıf	U	Yok	35-48	207	296	42
1. Sınıf : Son olarak temper haddelenmiş				2. Sınıf : Son olarak tavllanmış			
E : Dış kısımlarda ve açıkta sergilenen parçalar için uygundur.				U : İçte kalan parçalar için uygundur.			

Çizelge 3.21 ASTM Standartlarına göre soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacların kimyasal içerikleri

Kalite No.	%C [en fazla]	%Mn [en fazla]	%P [en fazla]	%S [en fazla]	%Cu [en az]
A366 Ticari kalite (CQ)	0,15	0,60	0,035	0,040	0,20
A619 Derin çekme kalitesi (DQ)	0,10	0,50	0,025	0,035	-
A620 Özel dinlendirilmiş derin çekme kalitesi	0,10	0,50	0,025	0,035	-

Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelikler grubundan soğuk haddelenmiş çelik saclar, içerdikleri düşük oranda mikro alaşım elementlerinin yanında, aynı zamanda düşük karbon oranlarıyla da nitelendirilirler. Bu özellik bu grup çelik saclara iyi derecede kaynak edilebilirlik ve kaplanabilirlik özellikleri sağlar. İnce taneli yapısı sayesinde yüksek dayanımlı olmaları, iyi derecede yorulma ve darbe dayanımı göstermeleri, zor şekillendirme işlemleri gerektirmeyen yapı parçalarının imalatında kullanılmalarını mümkün kılmaktadır. Otomotiv yapı parçaları, endüstriyel raf düzenekleri, mobilya ve mekanik yapı imalatı başlıca kullanım alanlarıdır. Yığın ve sürekli tavlama olmak üzere her iki tavlama yöntemiyle de

üretmiş çeşitleri vardır. Çizelge 3.22 ve Çizelge 3.23, yüksek dayanım-düşük alaşımli çelik sacların sırasıyla mekanik özellikleri ve kimyasal içeriklerini sıralamaktadır [4], [6].

Çizelge 3.22 Yüksek dayanım-düşük alaşımli çelik sacların mekanik özellikleri –  
EN 10268:1999

Kalite No.	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az-en fazla]	Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az]	Uzama (%) [en az] $L_0 = 80mm$
H240LA	240-310	340	27
H280LA	280-360	370	24
H320LA	320-410	400	22
H360LA	360-460	430	20
Notlar: 1) Bu değerlerin tümü temper haddelenmiş çelik saclar içindir. 2) Test numuneleri hadde yönüne dik doğrultudadır.			

Çizelge 3.23 Yüksek dayanım-düşük alaşımli çelik sacların kimyasal içerikleri –  
EN 10268:1999

Kalite No.	%C ( en fazla )	%Mn ( en fazla )	%Si ( en fazla )	%P ( en fazla )	%S ( en fazla )	%Nb ( en fazla )	%Ti ( en fazla )
H240LA	0,10	0,60	0,50	0,025	0,025	0,090	0,15
H280LA	0,10	0,80	0,50	0,025	0,025	0,090	0,15
H320LA	0,10	1,00	0,50	0,025	0,025	0,090	0,15
H360LA	0,10	1,40	0,50	0,025	0,025	0,090	0,15

Soğuk haddelenmiş yapı çelikleri, en düşük akma ve çekme dayanımı değerleriyle sınırlı olarak garanti edilen karbon-mangan çelikleridir. Birçok yaygın uygulamaya uygundur. Bu nedenle kalınlık ve genişlik bakımından piyasada en fazla çeşidinin olduğu soğuk haddelenmiş çelik sac türüdür. Dayanımın şekillendirme ve süneklik özelliklerinden daha önemli olduğu yapı elemanları, depolama tankları veya konteynır imalatı gibi uygulamalarda genellikle kullanılırlar. Çizelge 3.24'te soğuk haddelenmiş yapı çeliklerinin mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri belirtilmiştir [4], [5], [6].

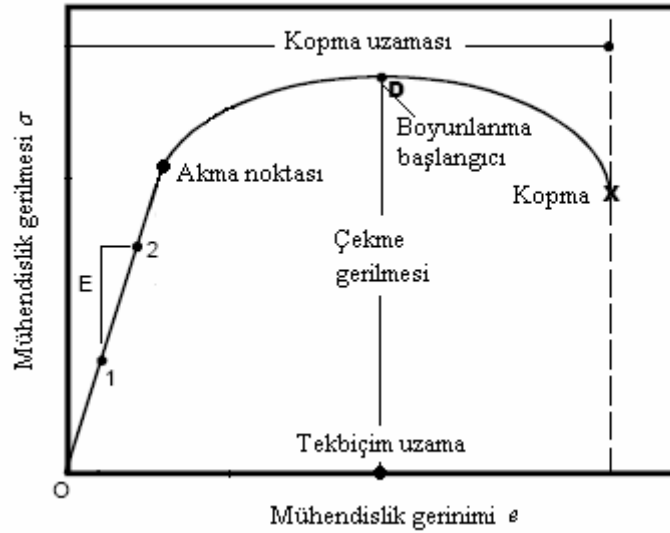
Çizelge 3.24 Soğuk haddelenmiş yapı çeliklerinin mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri – DIN 1623-2:1986

Kalite No.	Mekanik özellikler			Kimyasal içerik		
	Akma Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az]	Çekme Dayanımı ( $N/mm^2$ ) [en az-en fazla]	Uzama (%) [en az] $L_0 = 80mm$	%C [en fazla]	%P [en fazla]	%S [en fazla]
St 37-2 G	240	340-400	28	0,12	0,045	0,045
St 37-3 G	215	360-510	20	0,17	0,040	0,035

Notlar:  
1) Bu değerlerin tümü temper haddelenmiş çelik saclar içindir.  
2) Test numuneleri hadde yönüne dik doğrultudadır.

### 3.2 Çelik Sacların Mekanik Özellikleri

Üretilen çelik sacların sonraki şekillendirme işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi veya kullanılacakları yerlerde arzu edilen özellikleri sağlayarak, örneğin dış zorlanmalara karşı dayanabilmelerinin sağlanması amacıyla mekanik özelliklerinin önceden bilinmesinin önemi büyüktür.



Şekil 3.1 Mühendislik gerilmesi – mühendislik gerinimi eğrisinin temel nitelikleri

Çelik sacların şekillendirilebilme etkenlerinden olan ve basit tek eksenli çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikleri; elastiklik modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı, tekbiçim uzama, kopma uzaması, kopmada büzülme yüzdesi, pekleşme üsteli, plastik gerinim oranı ve gerinim hızına duyarlılık üsteli gibi temel özelliklerdir. Şekil 3.1, tek eksenli çekme testinden



elde edilen basit mühendislik gerilmesi - mühendislik gerinimi eğrisinin niteliklerini örnelemektedir.

### 3.2.1 Elastiklik Modülü

Malzemenin gerilme-gerinim grafiğinin başlangıç bölümü olan, akma noktasına kadarki elastik deformasyon bölgesindeki düz eğimin niteliğine göre belirlenir. Diğer adıyla Young modülünün doğru ölçülebilmesi için, düşük gerinim hızları ve yüksek data elde etme hızlarının, % 0,5 uzamanın altındaki elastik bölgede kullanılması gerekmektedir (Taylor, 1988).

Elastiklik modülü bilindiği gibi, E olarak simgelenir ve 3.1 eşitliğinde görüldüğü gibi, elastik bölgeyi oluşturan doğrunun eğimine eşittir (Bu eşitlikte; S nominal gerilme, e % nominal gerinimdir).

$$S = E.e \quad (3.1)$$

$$E = \arctan \alpha \quad (3.2)$$

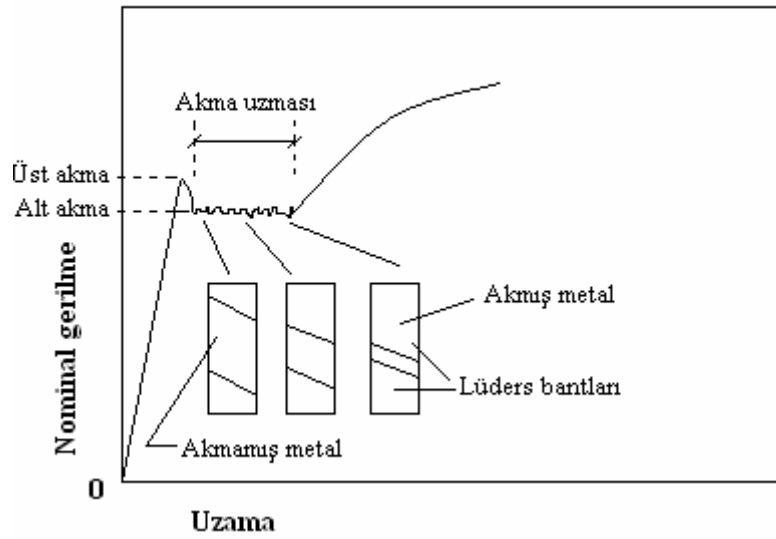
### 3.2.2 Akma Dayanımı

Malzemenin gerilme-gerinim grafiğinde, başlangıç elastik eğimin sapmaya başladığı noktada ölçülen gerilme değeri akma dayanımıdır. Belirgin veya belirgin olmayan akma olmak üzere iki şekilde oluşabilmektedir. Akmanın belirgin olmadığı durumlarda, % 0,2 uzama değerinden elastik eğriye paralel çizilip bu çizginin gerilme-gerinim grafiğini kestiği noktadaki gerilme değeri genellikle akma dayanımı olarak kabul edilir. Belirgin akmanın olduğu durumlarda ise malzemenin çekme testi eğrisinde, uzamanın sürekli artmasıyla beraber, gerilmeye ani bir düşüş ve hemen ardından bir miktar yükselmeyle beraber sık aralıklarla yukarı aşağı dalgalanmalar meydana gelir.

Şekil 3.2'de de gösterildiği gibi akmadaki bu oluşumlara üst akma ve alt akma noktası denilmektedir. Söz konusu üst akma noktasıyla başlayan ve yükün monoton bir şekilde artmaya başlamasından hemen öncesine kadar meydana gelen uzamaya ise akma uzaması denilmektedir.

Çelik sac malzemelerde belirgin akmanın ve akma uzamasının nedeni, azot ve karbon gibi ara yer atomlarının çözünmüş olarak dislokasyon boşluklarına yerleşmesi sonucu dislokasyonların hareketlerini önlemesidir. Plastik şekil değiştirme işleminin ve dolayısıyla akma olayının olması için dislokasyonların önlerindeki engeli aşarak harekete geçmesi

gerekir. Bu oluşumun gerçekleşmesi için, yüksek bir gerilme gereklidir (üst akma noktası). Bu yüksek gerilme ile dislokasyonların, hareketlerini zorlaştıran azot ve karbon gibi atomlardan kurtulmasından sonra yük azalır ve aynı olay akma uzaması boyunca defalarca gerçekleşerek aşağı yukarı dalgalanmaları meydana getirir. Bu gerilmelerin ortalama değeri, alt akma gerilmesi olarak kabul edilir. Bu durum özellikle düşük hızlarda uygulanan çekme deneylerinde belirginleşir, çünkü çözelti atomlarının dislokasyonlara tekrar yayınma durumu söz konusudur (Çapan, 1999).



Şekil 3.2 Tavlanmış bir düşük karbonlu çelikte akma uzaması ve Lüders bantları

Çelik saclarda istenmeyen bu akma uzamasının ortadan kaldırılması için malzemeler, daha önce 2.3.4 bölümünde de bahsedilen temper haddeleme gibi % 1 - 3 arası redüksiyonlu soğuk deformasyona tabi tutulurlar. Böylece dislokasyonlar serbest kalmakta ve redüksiyonun artmasıyla beraber, akma uzaması azalmakta veya ortadan kalkmaktadır. Ancak temper haddelemenin etkisi, çeliğin üretim yöntemine, mikro alaşım yapısına, sacın depolanma süresine ve ortamına bağlı olarak geçici olabilmektedir. Bu olay yaşlanma olarak adlandırılır.

Alüminyumla dinlendirilmiş düşük karbonlu çelik saclar, yaşlanmaya karşı üstün dirence sahiptirler, çünkü bu tür çeliklerde alüminyum azotu bağlamaktadır. Ayrıca ara yer atomu içermeyen IF çelikleri de vakum ile sakınleştirilerek karbon ve azot gibi elementleri barındırmadığından yaşlanma olayının görülmediği çelik saclardır. Bu tür çelik saclar karmaşık ve ayrıntılı derin çekme işlemlerinde kullanılmaktadır (Lange, 1985; The ASM Committee on Steel Sheet and Strip, 1990).

### 3.2.3 Çekme Dayanımı

Çekme testi süresince malzemenin mühendislik grafiğinde gözlemlenen en yüksek gerilme, çekme dayanımı ( $S_u, S_C$ ) olarak adlandırılmaktadır. Çelik saca uygulanan bir şekillendirme işleminde azami yükün üst sınırındadır. Bu gerilmeden sonraki deformasyonla beraber boyunlanma oluşmaktadır. Boyunlanma konusuna, üniform uzama konusunda değinilecektir.

Çekme dayanımı, 3.3 eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikteki  $F_{max}$  çekmedeki en yüksek kuvvet ve  $A_0$  ise numunenin başlangıçtaki kesit alanıdır.

$$S_u = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (3.3)$$

Şekil 3.1'deki nominal (mühendislik) gerilme – nominal gerinim grafiğinde çekme noktasındaki (D noktası) gerilme en yüksek gerçek gerilme değildir. En yüksek yükteki gerçek gerilme ( $\sigma_u, \sigma_C$ ), 3.4 eşitliğinden hesaplanmaktadır.

$$\sigma_u = S_u (1 + e_u) \quad (3.4)$$

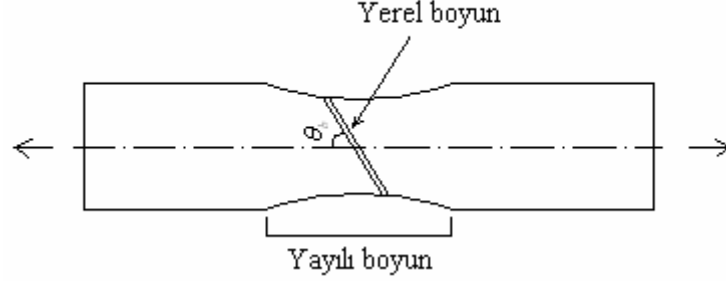
### 3.2.4 Uzama ve Kesit Büzülmesi

Çelik malzemelerde, üniform uzama ve kopma uzaması olmak üzere iki çeşit uzama vardır. Ulaşılan en yüksek mühendislik gerilmesine karşılık gelen mühendislik gerinimi, maksimum üniform nominal uzama ( $e_u$ ) olarak adlandırılır. Ancak bu noktadaki uzama gerçek uzama değildir. Gerçek maksimum üniform gerinim ( $\varepsilon_u$ ) 3.5 eşitliğinden hesaplanmaktadır (Kalpakjian ve Schmid 2001).

$$\varepsilon_u = \ln(1 + e_u) \quad (3.5)$$

Bu noktaya kadar çekme numunesi üniform bir şekilde deformasyona uğrar. Bu noktadan sonra şekil değişimi ilkin oldukça geniş bölgede yoğunlaşarak yayılı boyunlanmayı ve kopmadan biraz önce de kısmi bir bölgede (genellikle numunenin tam ortasında) keskin kesit daralması oluşturarak yerel boyunlanmayı meydana getirir. Yayılı boyunlanmanın oluşmasının nedeni, malzemenin pekleşmesi sonucu kesitin yük taşıma kapasitesindeki artımın, kesit daralmasına oranla daha geri kalmasıdır. Yerel boyunlanmanın oluşması da n değerinin bir fonksiyonu olmaktadır. Malzemenin izotropik olduğu varsayılırsa, yerel boyunlanma açısının  $\theta_b = 54^{\circ}44'$  olduğu gerinim dönüşümü formüllerinden bulunmaktadır

(Çapan, 1999). Bir çekme deneyinde oluşan yayılı ve yerel boyunlanma Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3 Bir çekme numunesinde ortaya çıkan yayılı ve yerel boyunlanma

Yerel boyunlanma alanında şekil değişiminin daha da yoğunlaşması ve numunenin incilmesiyle bu bölgede kopma meydana gelir. Kopma noktasında mühendislik eğrisinden okunan uzama değeri de kopma veya diğer adıyla toplam uzamadır ( $e_k$ ,  $e_f$  veya  $e_t$ ). Kopma noktasında yüzde uzama, 3.6 eşitliğiyle hesaplanır. Eşitlikte  $L_f$ , kopan parçaların bir araya getirilmesi ile ölçülen boydur.

$$\%e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (3.6)$$

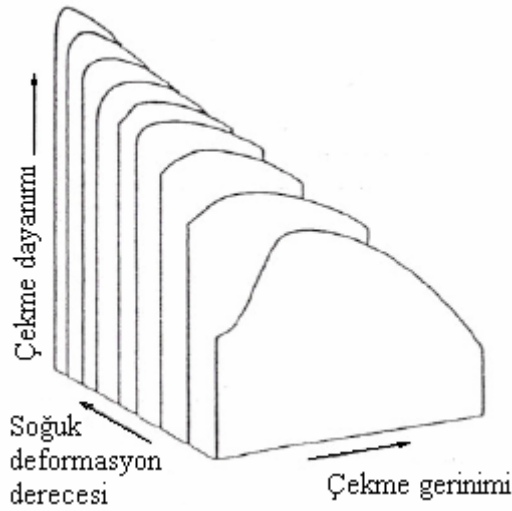
Kopma uzaması, metal sac şekillendirilebilirliğinin yaklaşık bir göstergesi olarak geniş çaplı kullanılmaktadır.

Kopmada kesit büzülme yüzdesi ( $Z$ ) olarak adlandırılan ve 3.7 eşitliği ile hesaplanan değer, kopmada yüzde uzama değeriyle birlikte, malzemelerin sünekliğini ifade eden başka bir büyüklüktür. Bu eşitlikteki  $A_f$ , kopan yüzeylerin alanıdır. Ancak sac kesit alanının ölçümünün kolay olmamasından dolayı, kopmadaki kesit büzülme yüzdesinin saclarda belirlenmesi, genelde tercih edilen pratik bir yöntem değildir (Taylor, 1988).

$$Z = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \cdot 100 \quad (3.7)$$

### 3.2.5 Pekleşme Üsteli

Pekleşme üsteli yada diğer adıyla deformasyon sertleşmesi üssü, malzemenin çekme testinden elde edilen gerçek gerilme – gerçek gerinim grafiğinin üniform uzama bölgesindeki eğrisinden, logaritmik koordinatlarda oluşan doğrunun eğimidir ve “n” harfi ile gösterilir.



Şekil 3.4 Düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerine pekleşmenin etkisi (Mielnik, 1991)

Pekleşme üsteli, malzemedan malzemeye ve aynı malzeme için, üretim aşamalarının farklılığına bağlı olarak değişir. Plastik şekil değiştirme sırasında, şekil değişimi ilerledikçe malzemenin akma sınırı yükselir, diğer bir deyişle plastik şekil değişimine karşı direnç artar. Bu olaya pekleşme denmektedir. Pekleşen malzemenin ise pekleşme üsteli düşmektedir. Bunun sonucunda, malzeme sünekliği ve dolayısıyla şekillendirilebilirliği düşer, akma sınırı ve çekme dayanımı yükselir (Şekil 3.4). Bu nedenle pekleşme, plastik şekil verme kuvvetiyle işinin ve dolayısıyla da şekil verme takımlarına etkiyen gerilmelerin yükselmesine yol açar. Bu sakıncanın önüne geçmek için sac malzemelere, yeniden kristalleşme tavinin uygulanması gerekir (çelik sacın üretim aşamalarının ilgili bölümünde bahsedilmiştir).

Soğuk deformasyon derecesiyle artan pekleşmenin nedeninin temelinde, metal malzemenin kafes yapısının dizilişindeki düzensizlikler yatmaktadır. Bu düzensizlikler kristal kusurları olarak sayılıp, noktasal hatalar (atom boşlukları veya yabancı atomlar), çizgisel hatalar (dislokasyonlar), yüzeysel hatalar (tane sınırları) ve hacimsel hatalar (boşluklar veya kalıntılar) olmak üzere dört kısma ayrılmaktadır. Bunlar arasında, temelde metallerin plastik şekil değiştirmesinin de nedeni olan dislokasyonlar, pekleşmenin açıklanmasında en belirgin

hatalardır. Dislokasyon içeren bir kayma düzlemi, hatasız ve ideal bir kafesteki kayma düzleminden daha düşük bir kayma gerilmesi gerektirmektedir. Plastik deformasyonlarla birlikte bu dislokasyonlar hareket etmekte ve artan dislokasyon derecesi ile dislokasyonlar birbirlerine karışarak yoğunlaşmaktadır. Sonuçta içyapıda mevcut bulunan tane sınırları veya kalıntılarla da birleşerek malzemede oluşan kaymayı engellemeye çalışırlar. Dolayısıyla kayma gerilmesi artmakta ve plastik şekil değişimine karşı direnç büyümektedir.

Malzemenin pekleşme üsteli, 3.8 eşitliğindeki gibi ifade edilmektedir (Dieter, 1985).

$$n = \frac{\frac{d\sigma}{\sigma}}{\frac{de}{e}} \quad (3.8)$$

Saclarda en yaygın kullanılan pekleşme modeli, 3.9 eşitliği ile ifade edilen eşitliktir ve bu model gerçeğe çok yakın sonuçlar vermektedir.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (3.9)$$

Bu eşitlikteki K dayanım katsayısı, n ise pekleşme üstelidir. Bu model, özellikle gerininin %1'den büyük olduğu durumlarda birçok sünek malzeme için oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

Holloman eşitliğine uyan malzemeler için yaklaşık n değeri, gerilme-gerinim eğrisi üzerindeki iki noktadan elde edilebilir. Bu iki noktanın alınacağı yerler hususunda yaygın kullanılan yöntem, noktalardan birinin % 10 gerinime denk gelen ve diğerinin ise en yüksek yüke denk gelen nokta olmasıdır. Bu iki noktadaki yüklerin veya gerilmelerin oranı hesaplanır ve n değeri ile üniform uzama, daha sonra bir çizelgeden veya grafikten saptanabilir. Bu yolla n değeri,  $\pm 0,02$  hata aralığıyla beraber elde edilir (Taylor, 1988).

Pekleşme üsteli daha doğru bir biçimde, ASTM E 646 standardında da belirtildiği gibi, doğrusal regresyon analizi kullanılarak elde edilir. Günümüzde bilgisayarlarla etkileşimli çalışan çekme testi makinelerinin bilgisayardaki yazılımları, test sırasında hesap yaparak diğer tüm sonuçları verdiği gibi, n değerini de test sonunda vermektedir.

### 3.2.6 Plastik Anizotropi Katsayısı

Plastik anizotropi katsayısı yada diğer adıyla plastik gerinim oranı, “r” ile gösterilir ve bir çekme testinde numunenin genişlik yönündeki gerçek gerinininin, kalınlık yönündeki gerçek gerinimine oranı olarak tarif edilir. Değeri, ölçüldüğü andaki uzamaya bağlı olarak değişir.

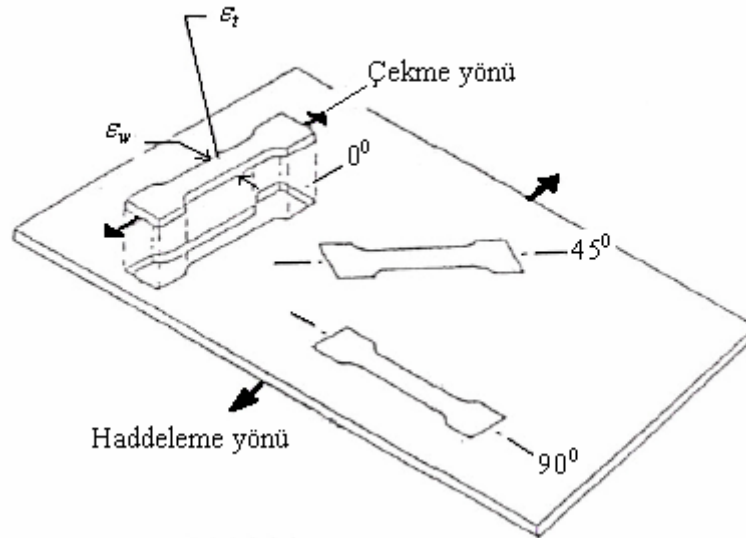
Ancak genellikle %10, %15 veya %20 uzama zamanlarında ölçülürler (Taylor, 1988).

Plastik anizotropi katsayısı  $r$ , 3.10 eşitliğine göre hesaplanmaktadır.

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{l_0 \cdot w_0}{l \cdot w}\right)} \quad (3.10)$$

Eşitlikten görüldüğü gibi, kalınlık değerleri, ölçümlerinin zor olması ve pratik olmaması nedeniyle hacim sabitliği ilkesine bağlı kalınarak, boy ve genişlik değerlerine dönüştürülmüştür. Dolayısıyla pratikte kullanılan, eşitlikteki bu son ifadedir. Böylece  $r$  değerleri daha sağlıklı olarak saptanmaktadır.

Plastik anizotropi katsayısının şekillendirme işlemlerinde ve özellikle derin çekme uygulamalarında önemi büyüktür. Sacların incelmeye yönündeki gerinimlerinin düşük olması istendiğinden, artan  $r$  değerleri ile sacların incelmeye karşı dirençleri artmaktadır. Dolayısıyla şekillendirme kabiliyetleri bakımından  $r$  değeri bir kıstastır. Plastik anizotropi faktörünün şekillendirmeye etkisi “şekillendirilebilirliğe etki eden faktörler” kısmında daha ayrıntılı açıklanmaktadır.



Şekil 3.5  $\bar{r}$  değerinin hesaplanması için çekme numunelerinin alınışı

Bir çelik sac malzemeden çok yakın mesafelerden, ancak farklı doğrultularda alınan çekme deneyi numuneleriyle yapılan deneylerde, farklı  $r$  değerleri bulunmaktadır. Genelde

karşılaşılan bu tip bir çelik sacda düzlemsel anizotropi olduğu vurgulanmaktadır. Haddemeleme yönüyle  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik açı yapan doğrultulardan alınan numunelerle yapılan çekme testleri sonucunda, ortalama dikey anizotropi parametresi  $\bar{r}$  elde edilir (Şekil 3.5). Bu parametrenin ölçümü için 3.11 eşitliği kullanılmaktadır (Çapan, 1999).

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (3.11)$$

Sac malzemelerin diğer mekanik özelliklerinin ortalama değeri de  $(\bar{n}, \bar{m}, \bar{\varepsilon})$  gibi benzer şekilde hesaplanabilmektedir.

Derin çekme işleminde önem kazanan ve  $\Delta r$  ile gösterilen düzlemsel anizotropi parametresi ise ileriki bölümlerde ayrıntılı incelenecektir.

### 3.2.7 Gerinim Hızı Duyarlılığı Üsteli

Gerinim hızı, metallerin şekil değiştirdiği süreç içinde, gerinimin anlık artım hızı olarak tanımlanmaktadır ve en genel haliyle 3.12 eşitliğindeki gibi ifade edilmektedir (Mielnik, 1991).

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.12)$$

Plastik şekil değiştirmede hacim sabitliği söz konusu olduğundan, asal gerinim hızlarının toplamı 3.13 eşitliğindeki gibi sıfır olmaktadır (Yurci, 1991).

$$\dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3 = 0 \quad (3.13)$$

Yükleme veya deformasyon hızı çoğu zaman gerinim hızıyla karıştırılsa da birbirlerinden farklı değerlerdir. Tek eksenli basit çekme deneyinde, test numunelerinin başlangıçtaki ölçme uzunlukları  $l_0$  ve çekme hızları  $v_{çkm}$  olursa, nominal gerinim hızı  $\dot{e}$  3.14 eşitliği ile hesaplanır.

$$\dot{e} = \frac{v_{çkm}}{l_0} \quad (3.14)$$

Şekil değişiminin herhangi bir sürecinde ölçme uzunluğu  $l$  değerine ulaştığında, bu noktadaki gerçek gerinim hızı  $\dot{\varepsilon}$ , 3.15 eşitliği ile hesaplanmaktadır. Şekil değişimi sabit çekme hızıyla artarsa  $\dot{\varepsilon}$  azalır (Granzow, 1990).



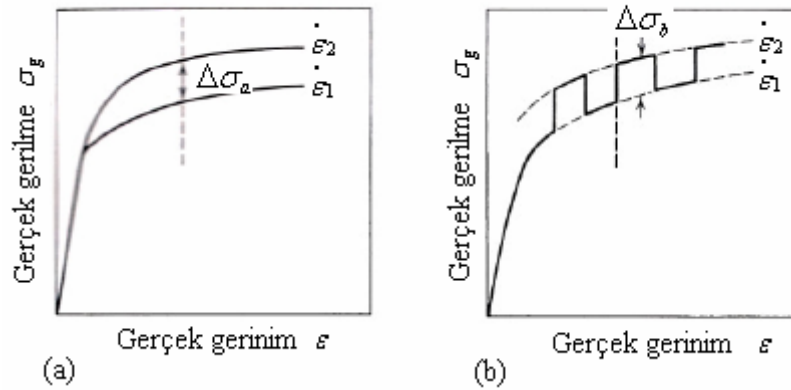
$$\dot{\varepsilon} = \left( \frac{l_0}{l} \right) \cdot \dot{e} = \frac{v_{\dot{c}km}}{l} \quad (3.15)$$

Gerinim hızı değişikçe, dayanımında da değişiklik gözlemlenen malzeme, gerinim hızına duyarlı malzemedir. Özellikle sıcaklığın artmasıyla bu duyarlılık oldukça etkili bir hal almaktadır. Sabit sıcaklıkta gerinim hızıyla gerilme arasındaki ilişki, 3.16 eşitliğiyle belirtilmektedir. Bu eşitlikte m gerinim hızı duyarlılığı üsteli, C malzeme sabiti,  $\dot{\varepsilon}$  gerinim hızı ve  $\sigma$  da gerilmedir (Mielnik, 1991).

$$\sigma = C \cdot \dot{\varepsilon}^m \quad (3.16)$$

Bu eşitliğe göre, sabit sıcaklık ve gerinimde, artan m değerleri, gerilmedeki değişimleri arttırmaktadır. Eğer m artı değerlikli ise hız ile birlikte gerilme artmakta, m eksi değerlikli ise gerinim hızının artmasıyla gerilme azalmaktadır. Gerinim hızı duyarlılığı üsteli m,  $\log \sigma - \log \dot{\varepsilon}$  grafiğinin eğimine eşittir (3.17 eşitliği) (Taylor, 1988).

$$m = \frac{\log \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)}{\log \left( \frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1} \right)} \quad (3.17)$$



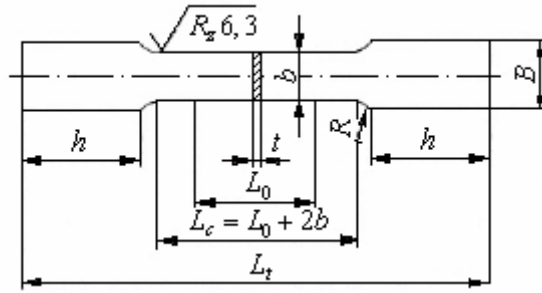
Şekil 3.6 Gerinim hızı duyarlılığı üstelinin belirlenmesi için yöntemler; (a) iki farklı hızda iki ayrı test ile, (b) gerinim hızını aynı test içinde değiştirme yöntemi ile (Taylor, 1988)

Gerinim hızı duyarlılığı üsteli, iki aynı cins test numunesinin farklı gerinim hızlarında yapılan çekme deneyleri ile veya deney boyunca iki farklı gerinim hızı düzeyinde çekme hızı

değiştirilen numunenin tek bir çekme testi ile olmak üzere iki farklı yöntemle ölçülebilir (Şekil 3.6). Gerinim hızının artması beraberinde bir miktar pekleşmeyi de getirdiğinden, ilk yöntemle hesaplanan  $m$  değerleri, ikinci yöntemle hesaplanana oranla daha büyük çıkabilmektedir. Ayrıca ikinci yöntem daha pratik bir uygulamadır. Gerinim hızı duyarlılığı üsteli, üniform uzama bölgesinin birçok farklı gerinim düzeyinde hesaplanabilir (Taylor, 1988).

### 3.3 Mekanik Özelliklerin Elde Edilmesi

Çelik sacların mekanik özelliklerinin elde edilmesi amacıyla kullanılan en yaygın deney, tek eksenli çekme deneyidir. Bu deneyde, EN, ASTM, Toyota vb gibi standartlarda farklı boyutlarla tanımlanan çekme testi numuneleri, her iki uçlarından çekme testi makinesinin mengenerine bağlanıp, numuneler kopana dek, verilen hızlarda çekilirler. Uygulanan yük ve uzama, yük hücresi ve uzama-ölçerler sayesinde ölçülür.



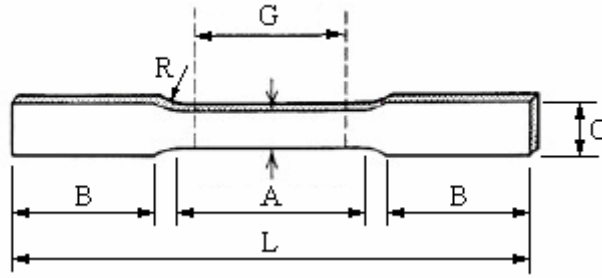
Şekil 3.7 EN 10002-1 standardına göre tek eksenli çekme deneyi numunesi ve boyutları

Çizelge 3.25 EN 10002-1 standardına göre tek eksenli çekme deneyi numunelerinin çeşitleri ve boyutları

Boyutlar	Orantısız çekme numuneleri		Orantılı çekme numuneleri	
	1.Çeşit	2.Çeşit	1.Çeşit	2.Çeşit
$b$	$20 \pm 1$	$12,5 \pm 1$	Bağımsız	Bağımsız
$L_0$	50	80	$5,65\sqrt{A_0}$	$11,3\sqrt{A_0}$
$L_c$	$L_0 + 2b$ (min $L_0 + b/2$ )			
$R$	min .12			
$B^*$	20 – 40			
$h^*$	Yeter büyüklükte			
* EN 10002-1 standardında herhangi bir sembolle verilmemiş olduğundan bu büyüklükler, DIN 50114 standardından alınmıştır.				

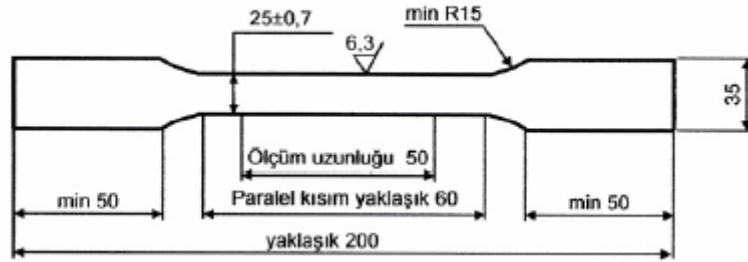
Avrupa standardına göre çelik saclar için tek eksenli çekme deneyi numunesi ve boyutları Şekil 3.7’de görülmektedir. Çizelge 3.25’te de Avrupa standardında EN 10002-1 standart numarasıyla belirtilmiş çekme testi numunelerinin çeşitleri ve boyutları açıklanmıştır.

ASTM standartlarına göre sac malzemelerin tek eksenli çekme deneyleri numunelerinin boyutlandırılması, Şekil 3.8’deki sembollere göre yapılmaktadır. Bu şekle göre standartta,  $G = 50 \pm 0,1mm$ ,  $W = 12,5 \pm 0,2mm$ ,  $R = 12,5mm$  (en az),  $L = 200mm$  (en az),  $A = 57mm$  (en az),  $B = 50mm$  (en az),  $C \approx 20mm$  olarak belirtilmiştir (Taylor, 1988).



Şekil 3.8 ASTM E 8M standardına göre, saclar için çekme deneyi numunesi ve boyutları

Tek eksenli çekme deneyi numunelerinin boyutlarının dünya genelinde farklılaştığının vurgulanması bakımından son bir örnek olarak, Toyota otomotiv firmasının mühendislik standartlarında istediği çekme deneyi numunesi boyutları verilebilir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Toyota firmasının kendi standardına göre çekme deneyi numunesi boyutları

Uniform uzamadan sonraki uzamada, numunenin bir kısmı hala tekbiçim uzarken diğer kısmı yüksek gerinim düzeyine sahip boyunlanmış bölgede daralmaktadır. Ölçü boyundaki farklılaşma, bahsedilen bu iki bölgenin oranlarını değiştirmekte ve toplam uzamanın ölçülmesine kayda değer etki yaratmaktadır. Farklı ölçü boyları için karşılaştırmalı sonuçlar elde etmek amacıyla, bu numunelerde  $\sqrt{A/l}$  ifadelerinin aynı olması gerektiği

belirtilmektedir. Farklı kalınlıklardaki numunelerin karşılaştırılması durumunda, bahsedilen bu oranın sürdürülmesi için ölçü boyu ve genişliklerinin ayarlanması gerektiğine işaret edilmektedir (Taylor, 1988).

Doğru ve güvenilir sonuçların elde edilmesi için tek eksenli çekme testinin titiz denetimi gereklidir. Bu bakımdan özellikle numune yüzeylerinin, çizik veya diğer hasarlardan arındırılmış olması gerekir, çünkü bu tip kusurların gerilmeyi artırıcı etkisi vardır ve erken kırılmaya sebebiyet verir. Ölçü bölgesinde kenarların birbirine paralel olması ve yuvarlatma bölgelerindeki geçişlerin düzensizlikleri barındırmaması gereklidir. Bu bölgelerin soğuk şekillendirilmeye uğratılmadan, örneğin taşlama gibi işlemlerle temizlenmesi önerilmektedir. 12,7 mm ölçü bölgesi genişliğine sahip bir numunenin bahsedilen genişlik değeri, nominal değerden en fazla  $\pm 0,25mm$  'lik tolerans aralığına göre sapma göstermeli ve bir baştan diğer başa  $\pm 0,05mm$  'lik değer aralığının içinde ölçülmelidir. Kopmanın numunenin tam ortasında, yani ölçüm bölgesi içinde gerçekleşmesi amacıyla bazı araştırmacılar bu bölgeyi incelemektedirler. Ancak daraltma işleminin, ortadaki genişlik değerinin baş taraflardakinden farkının 0,10 mm'den büyük olmayacak şekilde yapılması öngörülmektedir (Taylor, 1988).

Kavrama çeneleri, sac numuneyi mekanik yada hidrolik aparatlarla tutmaktadır. Numuneler çenelere bağlanırken, çenelerin merkez çizgisinden kaçık olarak tutturulmamasına dikkat edilmelidir.

Uygulanan yük, test makinesinde genelde üst çeneye bağlı bulunan yük hücresi vasıtasıyla ölçülür. Uzama da genellikle klipslerle bağlanan gerinim ölçerler (strain gage extensometer) kullanılarak ölçülür. Kopan numuneden toplam uzamanın belirlenebilmesi için, sıklıkla ölçü boyunun sonlarına çizgi işaretler atılır (Taylor, 1988).

Numune üzerine, toplam gerinimi, genişlikteki gerinimi ve gerinim dağılımını ölçebilmek için çember gridler boyanır yada asitle uygulanır. Bu gridler, test boyunca bir video kamera ve data işleyen düzenek aracılığıyla incelenirler. Bu amaçla, video uzama-ölçerli test makineleri günümüzde pahalı bir yöntem olsa da kullanılmaktadır. Optik uzama-ölçerler ise örneğin yüksek hızlı test uygulamalarında kendilerine yer bulmaktadır.

Çoğu çekme testi makineleri, vidalı yada hidrolik test makinelerinde  $10^{-5}$  'ten  $10^{-2} s^{-1}$  'e kadar değişen gerinim hızlarında çalışırlar. ASTM E 8M standardına göre, akma noktalarının belirlenmesi durumunda 12 MPa/s, plastik bölgede ise  $0,01s^{-1}$  yükleme hızını geçmemek gerekir. EN 10002-1 standardında üst akma dayanımının belirlendiği deneylerde elastik

bölgedeki yükleme hızı  $E < 150000 N/mm^2$  ise  $2-10 N/mm^2.s^{-1}$ ,  $E > 150000 N/mm^2$  ise  $6-30 N/mm^2.s^{-1}$  olmalıdır. Plastik bölgede ise bu standarda göre  $0,008s^{-1}$ 'lik yükleme hızı aşılmamalıdır.

Sıcaklığın değişimine göre malzemelerin mekanik özellikleri de değiştiğinden, tüm tek eksenli çekme testleri  $25^{\circ}C$  gibi bir sabit oda sıcaklığında yapılmalıdır.

### 3.4 Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinde Ortaya Çıkan Değişimler

Çelik sacların mekanik özelliklerinin değişimi konusu, kapsam bakımından çok geniş bir konu olmakla birlikte, herhangi bir çelik sac türü belirtilmediği ve genel olarak çelik saclar denildiği için ilk olarak akla gelen, mekanik özelliklerin, farklı çelik sac türlerinin birinden diğerine göre değişimi olmaktadır. Buna örnek olarak, bölüm 3.1.2.1 ve 3.1.2.2'de açıklanan çeşitli çelik sac standartlarındaki mekanik özelliklerin çizelgelerde sıralanması gösterilebilir. Ancak “çelik sacların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimler” tanımı ile beraber, konu, aynı standart kalitesindeki çelik sacın mekanik özelliklerinin;

- Üretildiği firmadan firmaya,
- Aynı fabrikada bir dökümden diğer döküme,
- Aynı dökümde bir rulodan diğerine,
- Aynı rulonun değişik bölgelerinde ve
- Aynı bölgede ancak değişik doğrultularda farklılıklar göstermesi durumlarına işaret etmektedir.

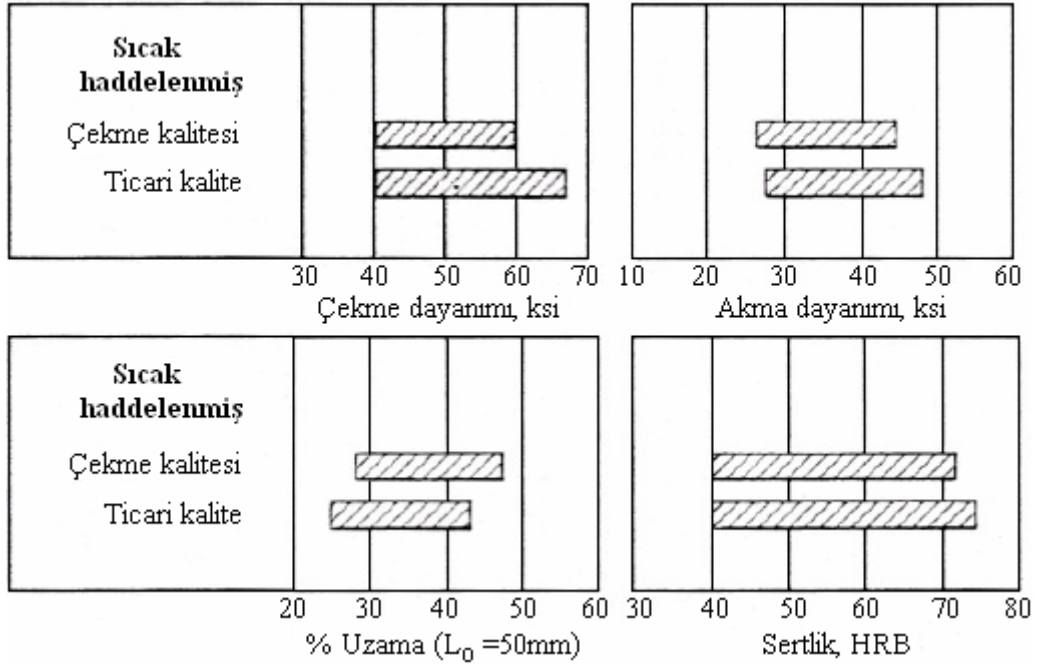
Aynı standart kalitesinde olan çelik sacın üretildiği iki ayrı firmada farklılaşması, en başta, üretim yöntemlerinin ve üretildikleri birimlerin farklılaşmasından kaynaklanmaktadır. Üretimdeki titizlik ve toplam kalite yönetimi çerçevesinde yapılan kontrollerin derecesi, aynı standart kalitesindeki çelik sacların beyan edilen mekanik özelliklerinin, firma standartlarındaki değişim aralıklarının firmadan firmaya değişmesine neden olmaktadır. Örneğin EN 10111:1998 standardı kapsamında bulunan soğuk şekillendirmeye yönelik sıcak haddelenmiş çelik sacların DD12 kalite derecesi için, Corus adlı çelik üreticisi firmanın standartlarında yapmış olduğu beyan; akma dayanımının 170 - 340 Mpa arasında, çekme dayanımının en fazla 420 Mpa ve % kopma uzaması değerinin en az 25 olacağı yönündedir [6]. Diğer bir çelik üreticisi firma olan Arcelor ise standartlarında DD12 için; akma dayanımının 200 - 340 Mpa arasında, çekme dayanımının 290 - 420 Mpa arasında ve % kopma uzaması değerinin en az 25 olacağını açıklamıştır [4]. Buradan, bahsedilen ikinci

firmanın dayanım konusunda daha dar değer aralığı vererek, söz konusu kalite dereceli çelik sac için, daha kaliteli ürün sunduğu anlaşılmaktadır.

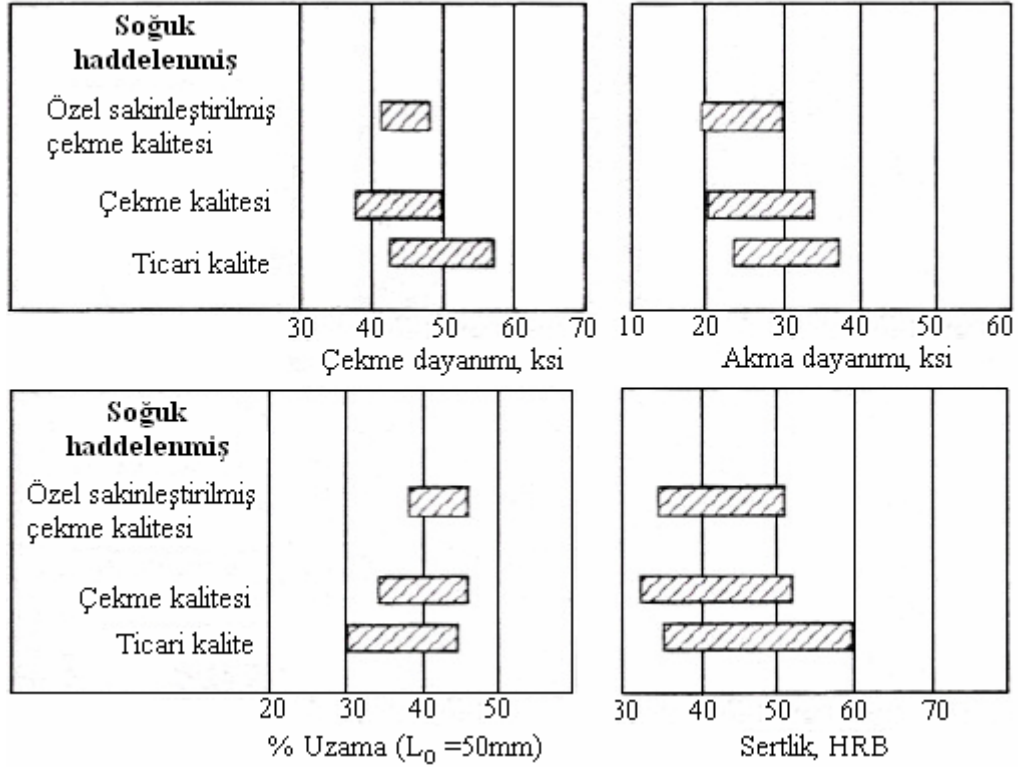
Korczak adlı araştırmacı, 2004 yılına ait araştırmasında, kontrollü haddeleme koşullarının, API 5L standardının X70 kalitesine uygun düşük karbonlu (% 0,09 C) ve mikro-alaşımli sıcak haddelenmiş boru çeliklerinin mikroyapıları ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu inceleme sırasında, sıcak haddelemeye kadar aynı değişkenlerle üretilen malzemelerin bitiş haddeleme bölümünde hadde redüksiyonları farklılaştırılmış ve sistemin hızı da dolayısıyla bu nedenle farklılaştığından bitiş sıcaklıklarında değişimler elde edilmiştir. Dolayısıyla çelik levhalar, farklı termo-mekanik yollardan geçtiğinden mekanik özellikleri farklılaşmıştır. Deneye tabi tutulan farklı bitiş haddeleme gruplarından ilk grubun 5. tezgahına ait sıcaklık değeri 780<sup>0</sup>C olurken, ikinci grubun 5. tezgahına ait sıcaklık değeri 795<sup>0</sup>C olarak ölçülmüştür. İlk bitiş haddeleme grubuyla elde edilen değerlerden ferrit tane boyutu 7.4 µm, içyapı yönelmesi % 21,5, akma dayanımı 498 – 565 MPa aralığında, çekme dayanımı 590 – 645 MPa aralığında ve % uzama değerleri % 29,0 – 23,6 aralığında elde edilmiştir. İkinci bitiş haddeleme grubuyla yapılan deneylerden ise, ferrit tane boyutu 5.6 µm, içyapı yönelmesi % 40,5, akma dayanımı 545 – 548 MPa aralığında, çekme dayanımı 636 – 623 MPa aralığında ve % uzama değerleri % 25,3 – 24,4 aralığında sonuçlanmıştır (Korczak, 2004). Haddeleme şartları, birtakım iyileştirmeler yada değişiklikler nedeniyle dökümden döküme ve tabiki firmadan firmadan farklılaştığı için, bu araştırma, çelik sacların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimler konusu kapsamında düşünülebilir.

Çelik sac üreticisi firmaların belli bir çelik sac kalitesi için, mekanik özellikleri belli sınırlar dahilinde açıklamaları, büyük çoğunlukla mekanik özelliklerin dökümden döküme ve aynı dökümün çeşitli bölgelerinde farklılaşmasındandır. Mekanik özelliklerde ortaya çıkan bu değişimler, çelik sacın şekillendirilmesi sırasında istenmeyen hataların ortaya çıkmasına neden olmakta ve çok sık karşılaşılmassa da çelik sacın, üretildiği firmaya geri gönderilmesine kadar varan sonuçlar doğurmaktadır. Ancak bu önemli konu hakkında literatürde pek fazla araştırma bulunmamakla birlikte, konu çoğunlukla firmalar dahilinde saklı kalmaktadır.

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de ASTM standartlarına göre adlandırılan düşük karbonlu çelik sacların mekanik özelliklerinin, farklı kalitelere değişim aralıklarının nasıl farklılaştığı görülmektedir. Üretim yöntemlerinin etkisiyle mekanik özelliklerin aynı rulo boyunca değişim göstermelerinin, bu şekillerdeki her bir değer aralığının oluşmasında rolü büyüktür.



Şekil 3.10 Sıcak haddelenmiş düşük karbonlu sakinleştirilmemiş çelik sacların tipik mekanik özelliklerinin değişimi (The ASM Committee on Steel Sheet and Strip, 1990)



Şekil 3.11 Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacların tipik mekanik özelliklerinin değişimi (The ASM Committee on Steel Sheet and Strip, 1990)

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'den göze çarpan ilk husus, sıcak haddelenmiş çelik sacların mekanik özelliklerinin soğuk haddelenmiş çelik saclarinkine göre daha geniş aralıkta olduğu ve sertlik değerlerinin çok daha yukarlarda olduğudur. Ayrıca ticari kalitelerin mekanik özellikleri, her iki farklı haddelenmiş gruplar için de çekme kalitelerin mekanik özelliklerinden daha geniş aralıkta değişmektedir. Özel sakınleştirilmiş çekme kalitesinde olan soğuk haddelenmiş çelik sacların mekanik özellikleri, en dar aralıkta değiştiğinden, bu tür çelik sacların pres operasyonlarındaki verimlilikleri, bu bakımdan da üst düzeydedir.

Çelik sacların meknik özelliklerinin aynı rulo boyunca değişimlerine bir örnek olarak, Erdem G. ve Taptık Y. adlı araştırmacıların 2005 yılında yapmış oldukları araştırma verilebilir. Erdemir tesislerinde yürütülen bu araştırmada incelenen malzeme, Al ile söndürülmüş soğuk haddelenmiş sürekli tavllanmış düşük karbonlu (% 0,025 C) çelik sacdır. Çekme testi numuneleri, rulonun baş ve kuyruk tarafından 10, 20, 40 ve 80m'lik uzaklıklar ve rulo ortası olmak üzere toplam dokuz bölgeden alınmıştır. Sıcak haddelemenin bitiş sıcaklığının ve rulo sarma sıcaklığının yüksek tutulmasına ve rulo sarma işleminde kapalı ortam kullanılarak, kenar ve orta kısımlar arasındaki sıcaklık farkının 40-50<sup>0</sup>C'den 10-20<sup>0</sup>C'ye düşürülmesine rağmen, mekanik özelliklerin rulo boyunca az da olsa değişim gösterdiği görülmüştür. Akma dayanımı 210-230 N/mm<sup>2</sup>, çekme dayanımı 310-330 N/mm<sup>2</sup>, kopma uzaması % 45-46 ve ortalama dikey anizotropi katsayısı 1,4-1,6 arasında elde edilmiştir. Ulaşılabilen en iyi koşullarda elde edilen bu mekanik özelliklerin değişimlerinin dar aralıkta olması, bu çelik sacın rulo boyunca mekanik özelliklerinin tekbiçim olduğunu tanımlamaktadır (Erdem ve Taptık, 2005).

Gündü, T. adlı araştırmacının 2000 yılında yapmış olduğu bir diğer araştırmada, çamaşır makinelerinde kullanılmak üzere şekillendirilen, 0,4 mm kalınlığında DIN 1.4016 standardındaki ferritik paslanmaz çelik saclar kullanılmıştır. Çekme dayanımı standartlarda 450-600 N/mm<sup>2</sup> ve akma dayanımı en az 250 N/mm<sup>2</sup> olarak verilirken, % uzama değeri en az 24 olarak belirtilmektedir. İki ayrı firmadan, her firmadan alınan iki ayrı dökümden, her dökümden alınan üç ayrı rulodan ve her rulonun başı, ortası ve sonundan alınan üçer farklı doğrultudan elde edilen çekme deneyleri sonuçları, malzemenin standartları dahilinde bulunmuştur. Birinci firmadan alınan malzemelerin çekme dayanımları, 455-472 N/mm<sup>2</sup> arasında sonuçlanırken, ikinci firmadan alınan malzemelerin çekme dayanımları, 460-477 N/mm<sup>2</sup> arasında elde edilmiştir. Akma dayanımları ise, birinci firmada 280-295 N/mm<sup>2</sup> arasında, ikinci firmada 275-290 N/mm<sup>2</sup> değer aralığında sonuçlanmıştır. Birinci firmanın % uzama değerleri % 25,2-30,9 arasında, ikinci firmanın ise % 25,9-30,6 aralığında elde



edilmiştir. Araştırmadan çıkarılan en çarpıcı sonuç hiç şüphesiz, değerlerin rulo boyunca değişmesinden ziyade, en çok dökümlere göre farklılaşmış olmasıdır (Gündü, 2000).

Çizelge 3.26 Farklı dökümlerden alınan ancak aynı işlemleri görmüş, çok düşük karbonlu çelik sacların mekanik özellikleri (Mendoza vd., 2000)

Mekanik Özellikler	Haddemeleme yönüne 0°			Haddemeleme yönüne 45°			Haddemeleme yönüne 90°		
	Numune			Numune			Numune		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Akma dayanımı (MPa)	153	138	167	145	142	156	137	140	153
Çekme dayanımı (MPa)	295	254	306	311	298	295	288	293	306
% Uzama	55,6	61,7	56,7	75,3	72,0	62,3	61,2	64,5	68,4
r	2,07	2,19	2,03	2,01	2,05	2,00	2,34	2,28	2,07
$\bar{r}$	2,10			2,14			2,02		

Çelik sacın aynı bölgesinin değişik doğrultularında rastlanan mekanik özellik değişimleri ise, nedenlerinin daha çok bilinerek daha kesin şekilde ortaya konulduğu ve aynı zamanda literatürde daha sık araştırılan konu olmaktadır. Doğrultuya göre mekanik özellik değişimi yani anizotropi, yalnızca dayanımı ve yalnızca uzama değerlerini değil mekanik özelliklerin tümünü etkileyen durumdur. Çizelge 3.26'da, Mendoza vd.'nin yapmış olduğu araştırmadan elde edilen değerler sunulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan numuneler, çok düşük karbonlu, farklı dökümlerden alınan ancak aynı imalat işlemleri görmüş çelik saclardır (1250°C - 950°C arasında sıcak haddemeleme, 730°C'de rulo sarma ve 800°C'de 180 saniye tavlama) (Mendoza vd., 2000).

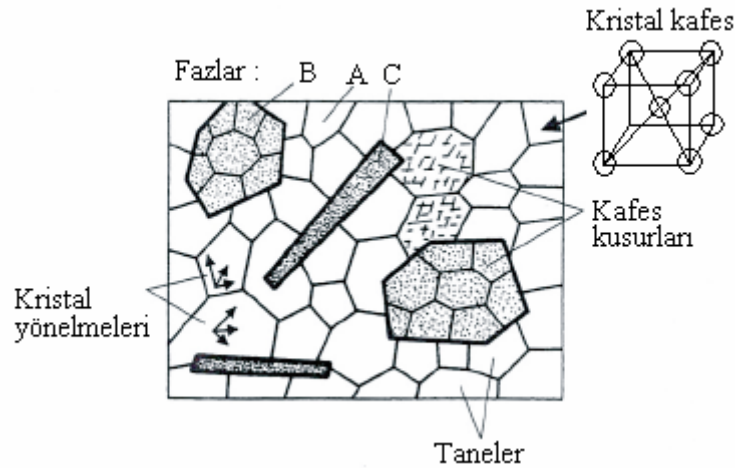
### 3.5 Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinde Ortaya Çıkan Değişimlerin Nedenleri

Konu kapsamında bahsedilen mekanik özellik değişimlerinin nedenlerinin temelinde iki husus yatmaktadır. Bunlardan ilki, elde edilen çelik sacın kimyasal içeriğine ve üretim sırasında izlediği termo-mekanik yollara göre oluşan iç yapısının şeklidir. Bu kısım, iç yapıdaki tanelerin boyutları, şekilleri, düzenleniş yönleri ve dağılımları ilgilidir. Değişim nedenlerinin temelinde yatan diğer husus ise, iç yapının istenmeyen düzensizlikleri kısım kısım barındırması olarak gösterilebilir. Bunlar ise üretim sırasında malzemeye giren ve metal olmayan kalıntı ve katışkı gibi parçacıklar ve tekrar, üretim sırasında oluşan boşluklardır. Çelik sacların üretimine etkiyen değişkenler, dolayısıyla nihai ürünün hem iç yapı şeklini hem de iç yapı temizliğini belirler.

### 3.5.1 İçyapıdan Kaynaklanan Temel Nedenler

elik saclar, diğer metaller gibi kristal yapıya sahiptir ve içyapıları Şekil 3.12’de de gösterildiği gibi aşağıdaki dört farklı yapı deęiŐkeninden oluşmaktadır (Banabic vd., 2000);

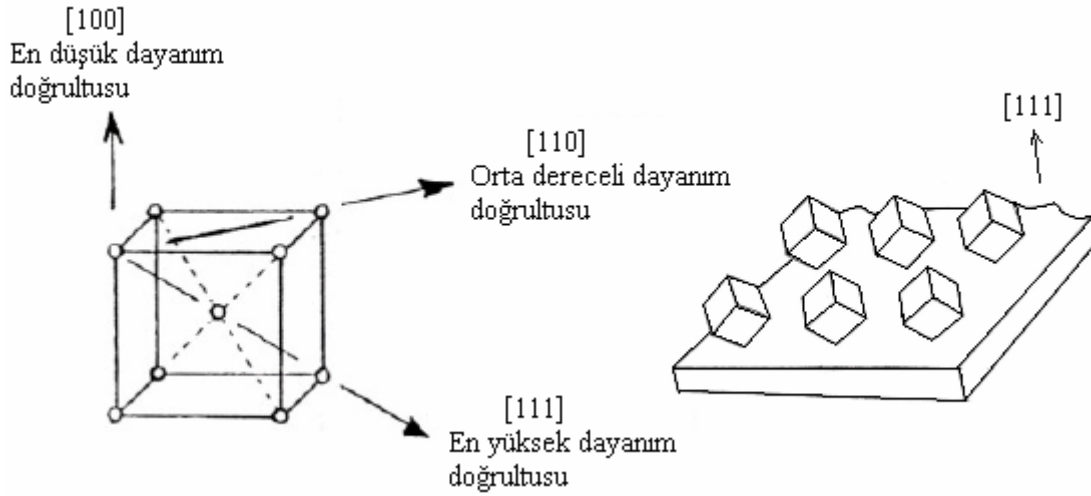
- Kristal yapı; ideal kristal kafeslerin birim hücrelerindeki atomların cinslerini ve pozisyonlarını belirtir.
- Faz yapısı; tek-faz hacimli birimlerin boyutlarını, Őekillerini ve karşılıklı düzenlerini belirtir (sabit kristal yapılı hacim birimleri).
- Tane yapısı; monokristal hacim birimlerin boyutlarını, Őekillerini, kristal kafes yönelmelerini ve karşılıklı düzenlerini belirtir.
- İçyapı; tüm kafes kusurlarının cinsini, miktarını, düzenini, kristalografik yönelmelerini belirtir. Aynı zamanda, noktasal, çizgisel ve hacimsel hatalar gibi ve tane ile faz sınırları gibi, ideal kristal kafesten sapmaları içerir.



Şekil 3.12 Metallerin içyapı değişkenleri (Banabic vd., 2000)

Bilindiği gibi malzemelerin içyapılarının belirlenmesinde temel niceliklerden biri, kristal yönelmeleridir. Kübik kristallere sahip malzeme içyapısının birim hacminde tanımlanan ve eksenleri,  $[100]$ ,  $[010]$  ve  $[001]$  doğrultularından oluşan bir kristalografik koordinat sistemine göre, kristal yönelmelerinin doğrultuları belirlenebilmektedir. Şekil 3.13’de HMK kristaline sahip bir elik sac malzemenin, belirtilen doğrultuları boyunca, değişen dayanım dereceleri verilmektedir. Bu Şekilden,  $[111]$  doğrultusundaki kristal dayanımın daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca, sacdaki kristallerin rasgele yönelme düzenlerinden ortaya çıkacak herhangi bir sapmanın, malzemenin mekanik özelliklerinde anizotropi meydana getireceği açıktır. Şekil 3.13’de görülen, yönelmiŐ kristallerin bulunduğu elik sacın, incelmeye karşı

dayanımı, yani plastik anizotropi katsayısı, diğer durumlardan daha yüksektir (Roberts, 1978).

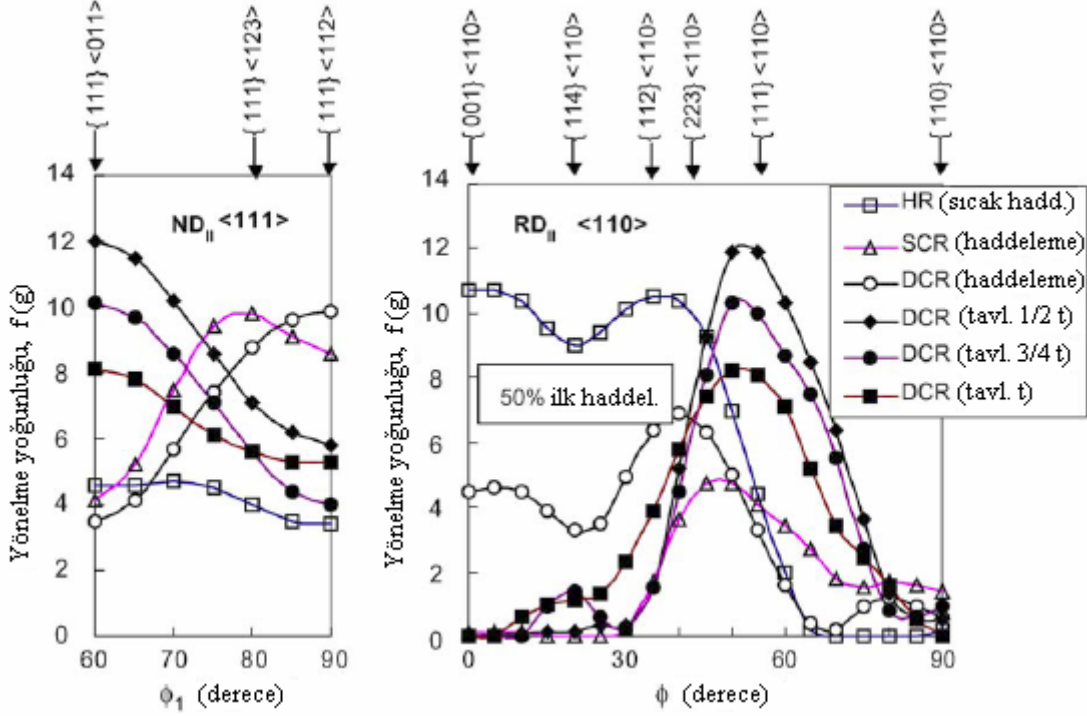


Şekil 3.13 HMK bir kristalin yönelme doğrultularının dayanım üzerindeki etkileri (Roberts, 1978)

Çelik sacların tavlama sırasında, yeniden kristalleşmenin oluşmasıyla beraber kristalografik içyapıları değişmeye başlar. Nihai içyapı niteliklerine yeniden kristalleşme tavlama sürecinin büyük etkisi olsa da tavlama öncesi çelik saca verilen soğuk şekil değiştirme miktarının ve soğuk şekillendirmeden önceki içyapı niteliğinin etkileri de göz ardı edilmemelidir. Whiteley ve Wise adlı araştırmacılar, düşük bitiş sıcaklıklarında yapılan sıcak haddeleme sonrası çelik sacların {110} gibi güçlü bir bileşen sergilediğini ortaya koymuşlardır. Matsudo vd. ise, haddeleme ve tavlama sürecinin ardından tekrarlandığı çevrimlerde, nihai içyapının, toplam redüksiyondan ziyade, haddelemenin iki aşaması arasındaki redüksiyonun dağılımına bağlı olduğuna işaret etmişlerdir. Ayrıca, son aşamadaki soğuk redüksiyonun miktarı, ilk redüksiyonun miktarından daha etkilidir. Aynı araştırmacıların çıkardıkları diğer sonuçta ise, arasında tavlama bulunan iki aşamalı haddelemede, aynı redüksiyona sahip tek aşamalı haddeleme işleminin sağladığı kadar güçlü içyapı üretilmediğine işaret edilmektedir (Roberts, 1978).

Whiteley ve Wise adlı araştırmacıların yaptığı diğer bir çalışmada, tavlama öncesi çelik saca verilen soğuk redüksiyonun miktarının % 75 oranlarına kadar yükselmesiyle, {111} içyapısının yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. % 90'lara varan daha büyük redüksiyonlarda ise, redüksiyonun artmasıyla beraber, {111} yapısının artmaya devam etmesine rağmen r değerinin düştüğü görülmektedir. Bu durum, {100} yapısının yüksek redüksiyon oranlarında diğer yapılardan daha fazla artmasına yolculmaktadır (Roberts, 1978).

Bu konu hakkında elde edilen sonuçlar en iyi şekilde, yönelme yoğunluğu – yönelme derecesi grafikleri ile gösterilmektedir. Jinxia vd.'nin yaptığı araştırmada, Şekil 3.14'teki grafikler elde edilmiştir.

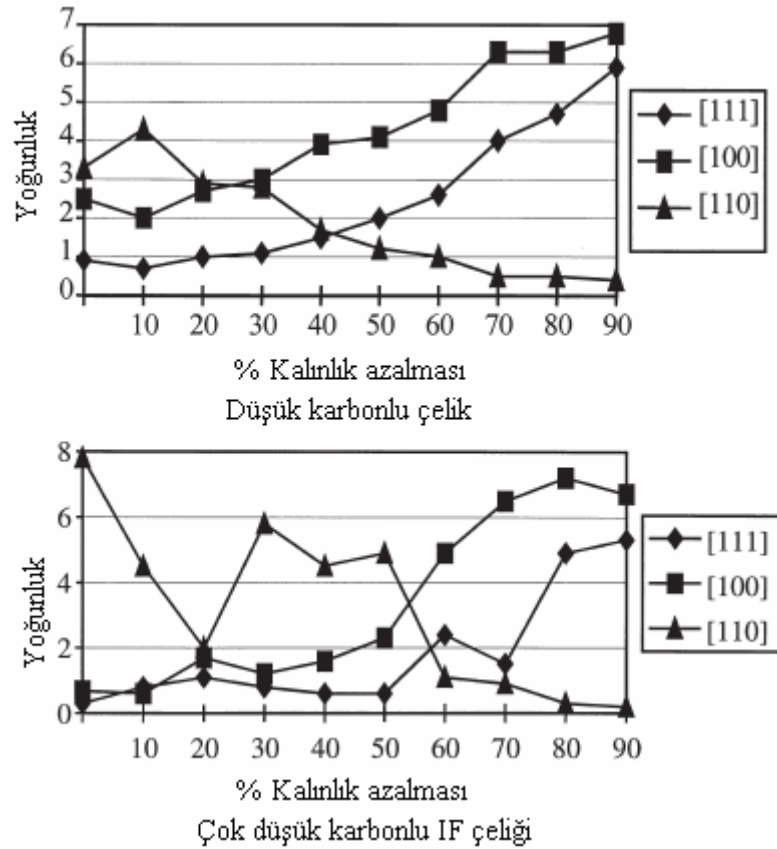


Şekil 3.14 Sıcak haddelenmiş, soğuk haddelenmiş ve çift aşamalı soğuk haddelenmiş sacların  $\alpha$ - ve  $\gamma$ - fiber yapıları (Jinxia vd., 2005)

Bu araştırmada kullanılan malzemelerden, SCR, tek aşamalı % 50 redüksiyonlu soğuk haddelenmiş çelik saclar; DCR, çift aşamalı, ilk aşaması % 50 redüksiyonlu haddelene olan ve tavlandıktan sonra tekrar haddelenerek toplam % 75 redüksiyonun elde edildiği soğuk haddelenmiş çelik saclardır. Şeklin yan tarafında görünen  $\frac{1}{2} t$ ,  $\frac{3}{4} t$  ve  $t$  açıklamaları ise sırasıyla; orta katmanı, alt yüzeyi ve yüzeyi simgelemektedir. Bu araştırmadan, SCR işleminin  $\{111\}\langle 112\rangle$  tavlama yapısının DCR işleminde de devam edebildiği ve  $\{111\}\langle 110\rangle$  yapısının DCR'deki tavlama işleminde geliştiği görülmektedir. Ayrıca ortalama dikey anizotropi katsayısının, DCR işlemi görmüş numunelerde SCR işleminden geçmiş numunelere göre daha yüksek olduğu ve soğuk deformasyonla beraber arttığı çıkarılan diğer sonuçtur (Jinxia vd., 2005).

Başka bir araştırmada Pero-Sanz vd., düşük karbonlu (% 0,03 C) ve çok düşük karbonlu (% 0,003 C) Ti ile stabilize edilmiş IF gibi iki farklı çelik kalitesi kullanarak, bu malzemelerin sıcak haddelene, soğuk haddelene ve tavlama işlemleri sonrasındaki içyapılarını ve kafes

doğrultularını incelemişlerdir. Buna göre,  $\{111\}$  bileşeninin ve dolayısıyla  $r$  değerinin soğuk haddelenmiş ve tavllanmış saclarda, sıcak haddelenmiş saclara oranla daha yüksek olduğu sonucu belirtilmiştir. Ayrıca IF çeliğinin  $\alpha$  fazında ve düşük karbonlu çeliğin ise  $\gamma$  fazında sıcak haddelenmesi,  $\{111\}$  yapısının yoğunluğunun, düşük karbonlu çelikte daha yüksek değerlerde elde edilmesine neden olmuştur. Şekil 3.15'te her iki çelik sac türünün de çeşitli kalınlık redüksiyonlarında soğuk haddelenmesi sonrasındaki yönelme yoğunlukları görülmektedir (Pero-Sanz vd., 1999).

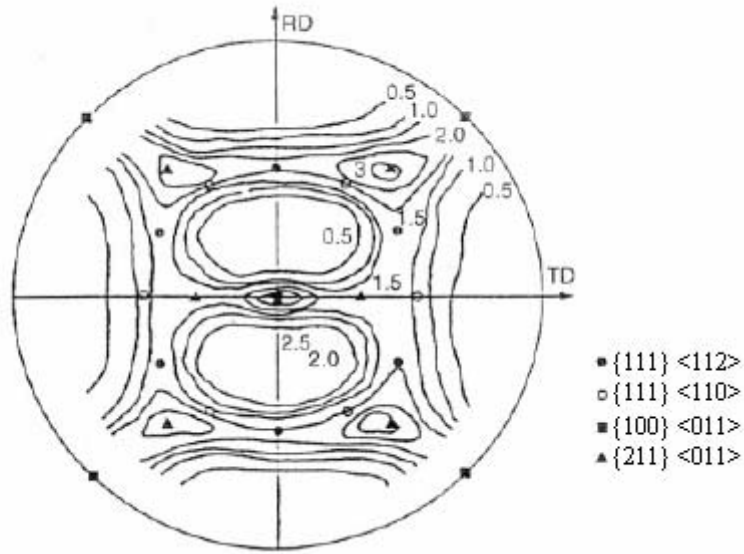


Şekil 3.15 Soğuk haddelenmiş iki farklı çelik sac türünün, çeşitli oranlardaki haddelenmeyle değişen, yönelme yapıları (Pero-Sanz vd., 1999)

Metal malzemelerdeki içyapı yönelmelerinin görüntülenmesi, X-ışını kırınımı yönteminden faydalanılarak yapılır. Bu yöntemin sunduğu farklı alternatifler içinde en yaygın kullanılanı, kutup biçimli görüntülerin incelenmesidir. Şekil 3.16'da soğuk haddelenmiş bir çelik sacın içyapısının kutup biçimli görüntüleme tekniğinin sağladığı yönelmeler görülebilmektedir.

Kristal yönelmelerinin yanında, çelik sacın içyapısında bulunan fazların cinsleri de mekanik özelliklerin değişimlerinin temel nedenlerindedir. Demir-karbon denge diyagramından soğuk şekillendirmeye yönelik düşük karbonlu çelik sacların, en yumuşak yapı olan ferrit ( $\alpha$ )

yapıda bulunduğu bilinmektedir. % 0,05'ten daha az karbon içeren çelik, 900°C üzerinde ( $\gamma$ ) östenit fazını içerir ve kristal yapısı yüzey merkezli kübiktir. Çelik yavaşça soğutuldukça ferrit tanecikleri belirir ve 723°C ötektoid sıcaklığının altına inildikçe, artık östenit perlite, yani ferrit+sementite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) dönüşür. Çeliğin karbon içeriği arttıkça,  $\gamma$ 'dan  $\gamma+\alpha$ 'ya dönüşüm sıcaklığı düşer ve içyapıdaki perlitin ferrite oranı artar (% 0,8 C içeriğindeki ötektoid bileşimde % 100 perlite ulaşılır). Bu dönüşümler yavaş soğutma içindir, çünkü hızlı soğutmada ferritle beraber, taneler arasında küresel karbürler oluşur. Ancak yeterli kimyasal içerik oranı sağlandığı takdirde yavaş soğutmada da beynit veya martenzit gibi sert yapılar elde edilebilir.

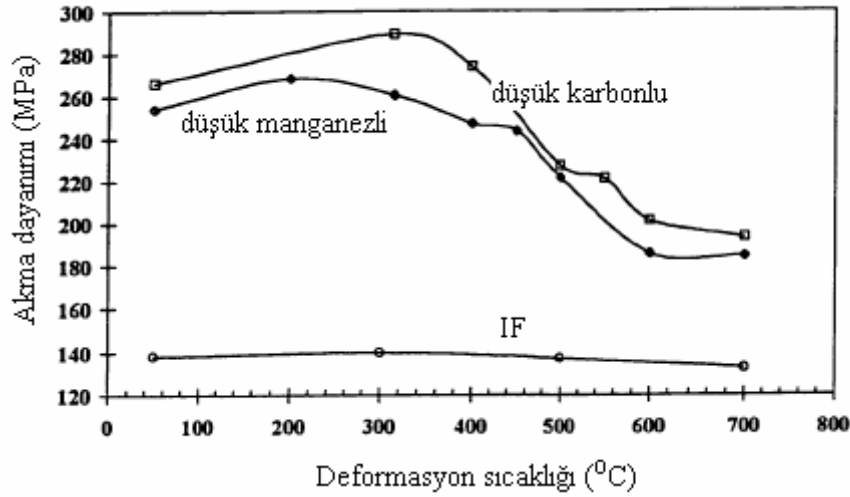


Şekil 3.16 Soğuk haddelenmiş çelik sacın kutup biçimli içyapı görüntüsü ve bazı önemli yönelmeler (Llewellyn ve Hudd, 1998)

Tane boyutu ve tane şekli de mekanik özelliklerin değişiminde önemli rol oynamaktadır. Petch adlı araştırmacı, düşük karbonlu çeliklerde akma dayanımının tane boyutunun kare köküyle ters orantılı olarak değiştiğini kanıtlamıştır. Buna göre, ferrit tane boyutunun azalmasıyla beraber, çelik sacın akma dayanımı artmaktadır. Tane boyutları aynı olan kaynar dökülmüş ve alüminyumla sakınleştirilmiş çeliklerin, tane şekilleri farklılaşmaktadır. Keksel yapıya sahip olan alüminyumla sakınleştirilmiş çeliklerin, bu nedenden ötürü şekillendirilebilirliği daha iyidir (Llewellyn ve Hudd, 1998).

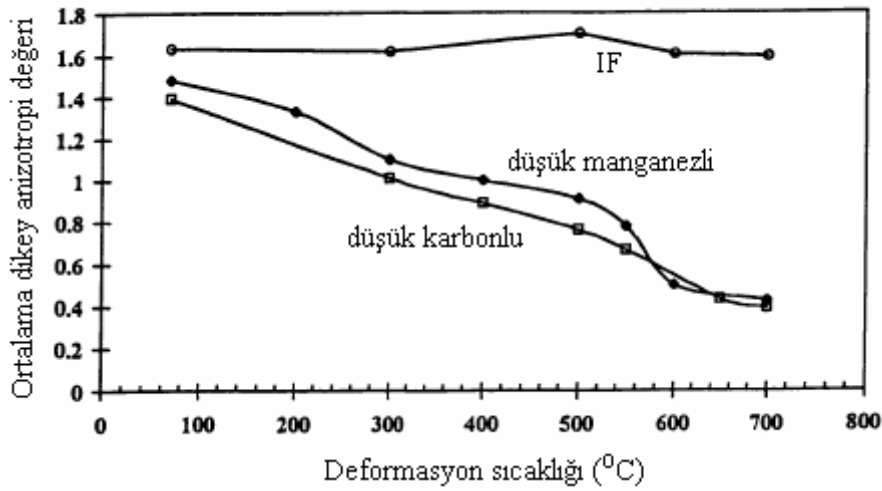
Tane boyutuyla akma dayanımının ilişkisi kullanılarak, çelik sacların sıcak haddelenmesi sırasında, çeşitli deformasyon sıcaklıklarında tane boyutlarının ölçülmesiyle, akma dayanımları hesaplanabilir. Barnett adlı araştırmacı yayınlamış olduğu araştırmasında, çeşitli

deformasyon sıcaklıklarında sıcak haddelenen üç farklı çelik sac malzemeden numuneler alarak içyapı incelemelerini yapmış ve bulduğu tane boyutu sonuçlarından akma dayanımlarını hesaplayarak, deformasyon sıcaklıklarının, çeşitli malzemelerin akma dayanımları üzerindeki etkisini incelemiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Çeşitli malzemelerin tane boyutlarından faydalanılarak hesaplanan akma dayanımları üzerinde deformasyon sıcaklığının etkisi (Barnett, 1996)

Aynı araştırmacı aynı incelemesinde bu üç çeşit çelik sac malzemenin içyapı görüntülerinden faydalanarak malzemelerin farklı deformasyon sıcaklığına karşılık gelen ortalama dikey anizotropi değerlerini belirlemiştir (Şekil 3.18).



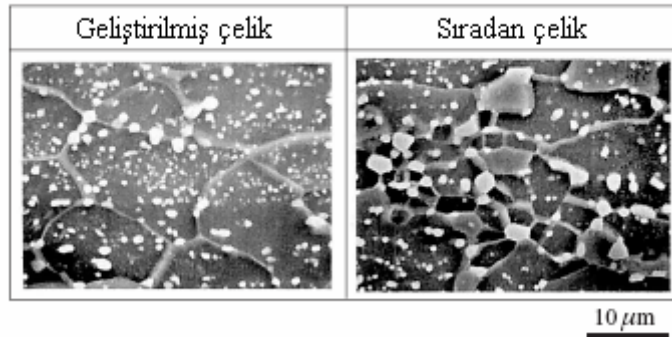
Şekil 3.18 Çeşitli malzemelerin içyapı görüntülerinden faydalanılarak elde edilen ortalama dikey anizotropi değerleri üzerinde deformasyon sıcaklığının etkisi (Barnett, 1996)

Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'den göze çarpan en önemli sonuç, IF çeliklerinin dayanımlarının ve anizotropi katsayılarının deformasyon sıcaklığından etkilenmemesidir (Barnett, 1996).

Malzeme dayanımı ayrıca, katı çözültü ve çökelti sertleşmesi gibi etkenlerden dolayı da etkilenmektedir. Katı çözültü sertleşmesi durumunda dayanım artımı genellikle, çözünen atomların atomik derişimlerinin kare köküne bağlı olarak değişir. Ancak düşük derişimlerde, sertleşme etkisinin doğrusal olarak değiştigi kabul edilebilir. Bu etkinin büyüklüğü, demir ile çözünen atomlar arasındaki atomik bazdaki boyut farkına bağlıdır. En büyük etki, katı çözültünün arayerlerine yerleşen karbon ve azot gibi küçük çaplı elementler tarafından elde edilmektedir.

Çökelti sertleşmesi, titanyum, niyobyum ve vanadyum gibi elementlerin yapıya eklenmesiyle büyük oranda görülmektedir. Bu elementler, kuvvetli karbür ve nitür yapıcı elementlerdir ve sıcak haddelenmeden önce slabın ısıtılması sırasında kısmen veya tamamıyla çözünenler. Sertleşme derecesi, çökeltilerin hacimsel oranlarına ve boyutlarına bağlıdır ve daha ince çökelti daha büyük etki gösterirler (Llewellyn ve Hudd, 1998).

Ferritten sonra yapıda ikinci faz olarak bulunan sementit çökeltisinin miktarı, yüksek karbonlu soğuk haddelenmiş çelik sacların yeniden kristalleşme durumuna ve içyapı oluşumuna etki eder. Sementit fazının ferrit matrise göre çok daha sert olması (950 HV) nedeniyle, ferrit yapının sementit sınırlarına yakın bölgelerinde soğuk haddelenme sonucu yüksek gerinim üretilir. Bu bölgenin varlığı yeniden kristalleşme açısından çok önemlidir. Ayrıca buna ek olarak, sementit çapı ve dağılım niteliğinin, ferrit tanelerinin büyümesinde kayda değer etkisi vardır (Fujita vd., 2004).



Şekil 3.19 Geliştirilmiş yüksek dayanımlı çeliğin mikroyapısının önceki sıradan çelikte karşılaştırılması (Fujita vd., 2004)



Fujita vd. yapmış oldukları araştırmada, JIS S35C standardına uygun olarak yeni geliştirilen bir yüksek dayanımlı elik sacın mekanik özelliklerini, önceden var olan elik sacla karşılaştırmışlardır. Geliştirilmiş eliğin mikroyapısı, homojen eş-eksenli ferrit tanelerini ve çok iyi dağılmış sementit tanelerini içerir. Böylece aynı standarttaki sıradan çeliğe göre şekillendirilebilirlik özellikleri artmıştır. % uzama değeri 35 iken 39'a, akma dayanımı 290 MPa iken 380 MPa'a, yükselmiş ve çekme dayanımı 500 MPa iken 470 MPa'a, ortalama r değeri ise 1,14 iken 1,01'e azalmıştır. Bunların yanında dikkat edilmesi gereken en önemli özelliği,  $\Delta r$  değerinin 0,06 gibi çok küçük değerlerde olmasıdır (Fujita vd., 2004). Şekil 3.19'da her iki elik sacın mikroyapısı görülmektedir.

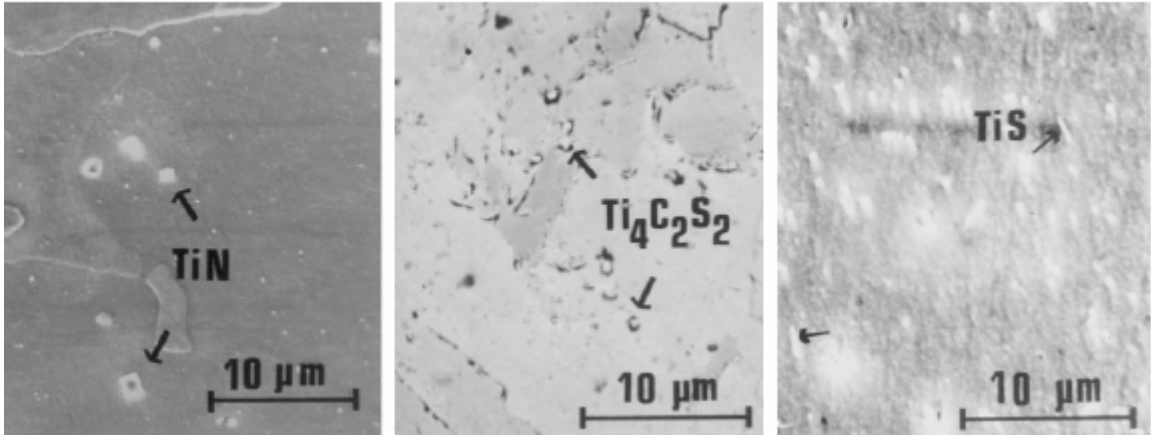
### 3.5.2 Kimyasal İçeriğin Etkisi

elik sacların üretimi sırasında ikincil metalürji potalarında, kimyasal alaşım elementlerinin yapıya katılarak karıştırılması ve istenilen oranda kimyasal bileşim hazırlanması, imal edilen ürünün mekanik özelliklerini ve kalitesini belirleyen ilk adımdır. Çünkü elik yapısında bulunan her elementin, genel olarak mekanik özelliklere etkisi vardır. Bununla birlikte elik banyosunda bulunan elementlerin dağılımının homojen olup olmaması, öncelikle slabın ve üretimin ilerleyen safhalarında da elik sacın mekanik özelliklerinin aynı dökümdeki değişimlerini etkilemektedir. Aşağıda, elik sac yapısında bulunan elementlerin, mekanik özelliklere ve şekillendirmeye etkileri sıralanmaktadır.

- **Karbon:** Karbon miktarı arttırıldığında malzemenin dayanımı artar ve sünekliği düşer. Bunun nedeni ferrit yapısındaki karbür parçacıklarının okelmesi ve ince tane boyutunun oluşumudur. Genellikle karbon miktarı % 0,10 ile sınırlandırılır ve şekillendirme işlemlerinde kullanılacak saclarda oranı daha da azaltmak gerekir (Granzow, 1990; Llwewllyn ve Hudd, 1998).
- **Manganez:** eliğin yüksek sıcaklıkta şekillendirilme kabiliyetini yükseltir ve belirlenen tane boyutuna erişmeyi kolaylaştırır. Ayrıca kükürtle bileşik oluşturduğundan dolayı, kükürtün kötü etkisini gidermek için özellikle yüksek sıcaklıklar için bir miktar manganez gereklidir. Şekillendirilme amaçlı üretilen elik saclarda % 0,15 – 0,35 arasında, yüksek dayanım gerektiren elik saclarda ise % 2,0 dolaylarında istenmektedir. Malzemede kükürt miktarı az ise manganez miktarı da azaltılarak, plastik anizotropi katsayısı oranı arttırılmış olur (Granzow, 1990; Llwewllyn ve Hudd, 1998).
- **Fosfor ve kükürt etkisi:** Bu iki element, şekillendirme işlemlerinde çatlama ve kırılma olasılığını arttırdığından, elik saclarda istenmeyen elementlerdir. Bu nedenle her ikisinin de % 0,035 st sınırını geçmemesi, arzu edilen durumdur. Buna rağmen fosforun az da

olsa r değerini arttırdığı bilinmektedir. Diğer taraftan, şekillendirme sırasında malzeme ayrılmalarına yol açan, kükürtün MnS bileşimidir. Ayrıca bu bileşik, anizotropi değerini artırır ve tavlama sırasında yeniden kristalleşmeyi yavaşlatır (Granzow, 1990; Llwewllyn ve Hudd, 1998).

- **Silisyum:** Silisyum miktarı, çelik sacın sakinleştirilmiş olup olmamasına bağlı olarak değişir. Kaynar dökülmüş çeliklerde, % 0,10'dan azken, sakinleştirme amaçlı katıldığında bileşimdeki oranı % 0,40'a kadar yükselir. Silisyum, çekme dayanımını artırır ve dolayısıyla şekillendirilme kabiliyetini düşürür. Aynı zamanda silikat kalıntıları olarak yapıda bulunarak, bükme işlemlerinde çatlama olasılığını artırır (Granzow, 1990; Llwewllyn ve Hudd, 1998).
- **Krom, nikel, molibden, vanadyum:** Düşük karbonlu çelik saclarda nadir olarak bulunan bu elementlerin her biri dayanımı artırır ve şekillendirme kabiliyetini düşürür. Dolayısıyla şekillendirilme amaçlı üretilen saclarda bu elementler düşük oranlarda bulunurlar (Granzow, 1990; Llwewllyn ve Hudd, 1998).
- **Bakır:** Çeliklerde kalıntı element olarak bulunan bakırın çelik bileşiminde % 0,10'dan düşük oranlarının etkisi yok denecek kadar azdır. Bileşimde % 0,20'den daha fazla bulunduğunda, atmosferik korozyona olan direnci artırır. Bunun yanında, alüminyumla sakinleştirilmiş çeliklerde tavlama esnasında gözlemlenen içyapıdaki yönelme değişimlerinin, bakırın % 0,4 - % 0,8 oranları arasında bulunduğu çeliklerde de oluştuğunu, Rickett ve Leslie adlı araştırmacılar kanıtlamışlardır. (Roberts, 1978; Granzow, 1990; Llwewllyn ve Hudd, 1998).
- **Niyobyum:** Karbon ve azotla yaptıkları bileşikler sayesinde, katıldıkları çelik sacların dayanımlarını artırır. Tek başına veya titanyumla birlikte, yeniden kristalleşme kinetiklerini diğer elementlerden daha güçlü bir etkiyle engeller. Dolayısıyla tane incelmesi ve çökelme sertleşmesine neden olur, arayer atomu içermeyen çeliklerde plastik anizotropi katsayısını artırıcı etkisi vardır. Ayrıca mikroyapıda bulunan serbest karbon ve azot atomlarını bağlayarak akma uzamasının görülmesini engeller (Granzow, 1990; Llwewllyn ve Hudd, 1998).
- **Titanyum:** Kuvvetli bir karbür ve nitrür yapıcı olduğundan soğuk haddelenerek tavllanmış çelik sacların yaşlanma etkisini ortadan kaldırır. Yüksek anizotropi değerleri elde edilmesini sağlar (Granzow, 1990; Llwewllyn ve Hudd, 1998). Ancak, titanyum kullanılarak çelik sacların stabilize edilmesi işleminde, çökelti matris içinde kalarak, çeliğin yeniden kristalleşme işlemini kötü etkileyebilir (Mendoza vd., 2000).



Şekil 3.20 Titanyumun oluşturduğu bileşiklerin SEM yöntemiyle görüntülenmesi (Mendoza vd., 2000)

- **Alüminyum:** Oksijen ve azotla bileşik oluşturduğundan çeliklerin sakinleştirilmesi amacıyla yapıya katılır. Alüminyumla sakinleştirilmiş çeliklerde tavlama ile birlikte, içyapının {111} bileşenli kafes yapıları sayıları artar ve {100} bileşenli kafes yapıları ise azalarak neredeyse sıfır düzeyine iner. Bu hadise, tercih edilen tane düzenini sağlamaya yardımcı olduğundan, anizotropi katsayısını artırır ve deformasyon yaşlanması olayını önler (Roberts, 1978; Granzow, 1990; Llweyllyn ve Hudd, 1998).
- **Azot:** Düşük karbonlu çeliklerin dayanımını büyük oranda artırır. Ancak mikroyapıda serbest halde bulunması, deformasyon yaşlanması olayına neden olduğundan istenmeyen elementtir (Granzow, 1990; Llweyllyn ve Hudd, 1998).
- **Seryum:** Manganez ve kükürt bileşiklerinden oluşan kalıntıların iğnesel yapıdan küresel yapıya dönüştürülmesini sağlar. İğnesel yapıda olan kalıntıların uzama değerlerini ve şekillendirilebilirliği azaltıcı etkisi vardır (Granzow, 1990; Llweyllyn ve Hudd, 1998).
- **Oksijen:** Bulunma oranı, metalin katılma niteliğini belirler. Oksijen miktarı artarsa azotun oluşturacağı bileşikler engellenir ve böylece deformasyon yaşlanmasını düşürmek amacıyla katılan alaşım elementlerinin gerekliliği azalır. Silisyum, alüminyum ve titanyum gibi oksijen bağlayıcı elementler, yapıdaki oksijenin miktarını kontrol ederler. Bu elementlerin oksijenle bileşik oluşturmaları sonucu, metalik olmayan yapılar ortaya çıkar. Metalik olmayan yapılar, sıvı haldeki çelikten cüruf olarak dışarı atılır ancak dışarı atılamayanlar, tekbiçim olmayan tane boyutunun oluşumuna ve yüzey hatalarına sebep olur. Ayrıca titanyumla etkileşimi bakımından ele alındığında, oksijen içeriğinin % 0,015 oranından yukarılarda olduğu çeliklerde, çok güçlü {111} yönelmeli içyapı ve çok zayıf {100} yönelmeli içyapının beraber sonuçlandığı, ancak bu oranın üzerinde, titanyumun

etkinliğinin fark edilir derecede düştüğü gözlemlenmektedir (Roberts, 1978; Granzow, 1990; Llweuwllyn ve Hudd, 1998).

### 3.5.3 Üretimden Kaynaklanan Nedenler

Nihai ürün olarak elde edilen çelik sacların mekanik özelliklerinin bahsedilen bakımlardan farklılık göstermesinin temelinde yatan hususlar, içyapı şekli ve içyapı temizliğidir. Arzu edilen boyutsal ve işlevsel niteliklerini çelik saclara kazandırmak için yapılan karmaşık üretim prosesleri, çelik sacların hem içyapı şekline hem de içyapı temizliğine etki eder. 2.Bölüm’de baştan sona ayrıntılarıyla incelenen ve içeriğinde mekanik özelliklere etkileri bulunduran üretim aşamalarının, değişim nedenleri bakımından özeti, aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Sürekli döküm yönteminde alttan döküm yapan potaların yerine üstten döküm yapan potaların kullanılması sonucu sıvı çeliğin üst yüzeyindeki cürufun sıçrama etkisiyle metale karışması
- Potadan tandişe döküm yapmadan önce tandiş, gazla yada mazotla ısıtılarak sıcaklığının 1050 – 1250<sup>0</sup>C arasında olması sağlanır. Bu ısıtmanın homojen olmaması.
- Tandışten kalıba döküm sırasında, tandişin sahip olduğu tutucunun; hatalı üretilmiş olması, yerinden sapması ve sıcakta dayanımının yetersiz olması nedenlerinden ötürü nozul ağzını tamamen tıkayamaması sebebiyle istenmeyen durumlarda kalıba metal sızması sıcaklık farkları doğurur.
- Sürekli döküm kalıbında bir titreşim mekanizması olduğu takdirde ve bu mekanizmada oluşacak aksaklık sonucu slab kabuğundan parçaların bakır kalıp duvarlarına yapışması ile dökülen slabda kusurlar oluşturması.
- Sürekli döküm kalıbı cidarlarının yağlanmasında ortaya çıkan düzensizlikler sonucu kısmi oksidasyonların ve sıcaklık farklarının ortaya çıkması.
- Elektromanyetik kalıp karıştırma düzeneklerinde meydana gelen aksaklıkların slabda homojen iç yapı elde etmeyi engellemesi.
- Sürekli döküm hızı, katılma zamanı, istenen slab kalitesi ve slab boyutu gibi değişkenlerin proses bilgisayarına girilmesi ile işleyen hassas su püskürtme sisteminde ortaya çıkan aksaklıklar sonucu, elde edilmesi istenen çelik kalitesinin optimum sıcaklık grafiğinden sapmaların meydana gelmesi.
- Metal atomlarıyla tepkimeye giren pota, tandiş ve kalıp malzemelerinin kullanımı sonucu kalıntı ve katışkı gibi süreksizliklerinin oluşması.
- İnert cüruf örtülerinin kullanılması nedeniyle tandiş ve kalıptaki metal yüzeyinin dış

etkenlere açık kalması.

- Sığ ve az bölmeli tandiş tasarımlarının kullanılması ve tandiş donanımları içinde kalıntı yüzdürülmesine yardım eden cihazların kullanılmaması nedenleriyle istenmeyen malzemelerin kalıba geçerek slab içinde yerlerini alması.
- Sıcak haddelemede gereğinden küçük çaplı merdanelerin kullanımı sonucu malzemenin yalnızca yüzey tabakalarının şekillenmesi ve orta içteki kısmın şekillenmemesi, diğer bir deyişle tüm kesitin yoğurulmaması.
- Slab ısıtma fırınlarının farklı bölgelerinde sıcaklık değerlerinin farklılaşması.
- Slab ısıtma fırını atmosferinin bileşenlerinin kontrolünde meydana gelen düzensizlikler ve gazlar arasında oksitlenmeye yol açan elementlerin miktarlarının azaltılmaması.
- Sıcak haddelemenin oksit kırma amaçlı yapılan ilk haddesinde, kırılan oksitleri uzaklaştırmak için yüksek basınçla püskürtülen suyun akışının metal sıcaklığına göre düzenlenmesinin yeterli yada homojen olmaması.
- Sıcak haddeleme sırasında, sıcaklık değişimlerinin, malzemenin akış gerilimini değiştirmesi. Sıcaklıktaki 10<sup>0</sup>C'lik bir değişim için, ortalama akış gerilimi % 3 oranında değişir.
- Sıcak haddelemenin bitiş haddeleme bölümüne gelen levhaların sıcaklığının 5 – 10<sup>0</sup>C gibi dalgalanmadan daha fazla bir dağılımda olması. Bunun nedeni de; kaba ve bitiş haddeleme arasındaki hareketli tablanın üzerindeki sıcaklık ölçümü ve otomatik soğutma sisteminin düzensizliği.
- Sıcak haddelenen çelik levhanın uzunluğuna ve haddelemenin hızına bağlı olarak değişen, bitiş haddeleme bölümüne giren ürün baş ve kuyruk kısımları arasındaki sıcaklık farkı (örneğin bir dakikada, 1100<sup>0</sup>C sıcaklıktaki 32 mm kalınlığında bir levhada yaklaşık 95<sup>0</sup>C ısı kaybı oluşmaktadır).
- Rulo sarma işleminde üründe meydana gelen sıcaklık farkları (özellikle 650 - 680<sup>0</sup>C sıcaklıklarından zaman zaman daha aşağılarda olması). Bunun nedeni, son tezgahın sonra bulunan su püskürtme tertibatı.
- Bitiş haddesinde deformasyon programındaki düzensizlik.
- Slabta mevcut bulunan gaz boşluklarının duvarlarındaki metal - gaz tepkimesi ürünlerinin söz konusu boşlukların kapanmasına engel oluşturması.
- Sıcak haddelemede gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık gibi hadde geçişi sırasındaki deformasyon koşullarına bağlı olarak tane boyutunun farklılaşması.
- Niyobyum ve titanyum gibi mikroalaşım elementlerinin yeniden kristalleşme kinetiklerini

diğer elementlerden daha güçlü bir etkiyle engellemesi, tane incelmesi ve çökeltme sertleşmesine neden olur. Bu elementlerin farklı dökümlerde farklı oranlarda ve değışen dağılımlarda bulunması (örneğin, düşük karbonlu çeliğın 950<sup>0</sup>C’de 1 saniyede yeniden kristalleştiğı koşullarda, yapıda niyobyum varlığı 200 ppm’e çıkarsa gerekli zaman 60 saniye olacaktır).

- Gerinim sertleşmesi, statik yeniden kristalleşme ve östenit tane büyümesi durumlarının birbirlerini izlemesi, bitiş haddesine doğru sürekli tekrarlanarak mikroalaşım elementlerine sahip olmayan çeliklerin düşük çapta tanelerinin incelmesine yol açar.
- Haddelenenin Ar<sub>3</sub> sıcaklığının altında sona ermesi durumunda, ferrit ve östenit bir arada bulunur. Eğer metal yüksek sıcaklıklarda rulo halinde yeterli süre kalırsa, ferrit içinde biriken gerinim, metalin yeniden kristalleşmesine neden olur. Dolayısıyla bu da yapıda, tekbiçim olmayan kaba ferrit tanesi oluşmasına yol açar.
- Rulo halinde çelik sacın soğumasının çok yavaş olması ve dış kısımların iç kısımlara göre daha hızlı soğuması şeklinde tekbiçim olmayan soğutulma durumu.
- Rulo halinde soğutma şartlarının alüminyum–nitrit gibi yavaş çekirdeklenme kinetikli fazların çökelebilmemesine olanak tanınması sonucu, rulonun farklı bölgelerinde farklı oranlarda AlN oluşmasına yol açması (600<sup>0</sup>C sarma sıcaklığının altında çökeltme oluşmaz, farklı sıcaklıklarda Şekil 2.11’deki gibi farklı oranlarda olur).
- Yüksek sarma sıcaklıklarının kaba ikincil faz parçacıklarına neden olması, hem % uzama değerinde hem de çekme dayanımında düşüşe neden olur.
- Sıcak haddelenmeden sonra ruloda tutma zamanı, tane irileşmesi ve demir karbür oluşumu gibi morfoloji değışimine neden olur.
- Devamlı aynı genişlikteki malzeme ile çalışma sonucu, o genişlik değerine göre aşınan merdanelerin daha geniş malzemelerin haddelenmesinde kullanılması sonucu yassı ürün üzerinde merdane izleri bırakmaları.
- Merdane üzerine kaynayıp yapışan oksit gibi yanıcı maddelerin yassı ürün üzerinde iz yapmaları.
- Merdanelerin düşey doğrultuda eğilmeleri ve bombe geometrisi oluşturmaları sonucu sacın kenar kısımlarının daha fazla uzaması nedeniyle kenar ve orta kısımlarda farklı gerinim yolları izlemeleri.
- Kenar kısımlarda merdanelerle malzeme arasındaki sürtünmenin orta kısma göre azlığı, kenarların daha çok genişlemesine neden olur. Böylece, orta kısım boyca daha çok uzar ve sac homojen olmayan deformasyon yolları izlemiştir.

- Soğuk haddeleme hattının başlangıcında asitleme işlemi yapılmadan önce, çelik sacın yüzeyindeki oksit tabakasının mekanik olarak kırılması amacıyla, yatay küçük merdane serilerinden geçirilmesi sırasında meydana gelen düzensizlikler.
- Soğuk haddeleme sırasında soğutma sıvısı (yağlayıcı) olarak kullanılan emülsiyonların içerikleri.
- Soğuk haddelemede aşırı yağlamanın durağan olmayan titreşimli haddelemeye sebebiyet vermesi.
- Haddeleme hızı ve soğutma yoğunluğuna bağlı olarak ısıl düzensizliklerin oluşumu.
- Soğuk haddeleme birimini terk eden sacların, demir ve karbon tortularının miktarları bakımından yüzeylerinin temizlik derecelerinin; yağlama şartları, soğutma şartları ve iş merdanelerinin pürüzlülüğüne bağlı olarak değişmesi.
- Tanelerin deformasyon yönünde uzamasıyla özelliklerin yöne bağımlı hale gelmesi.
- Soğuk haddeleme miktarı, ilk tane boyutu, kimyasal bileşim ve tavlama süresi gibi etkenlerin yeniden kristalleşme sıcaklığını etkilemesi.
- Yığın tavlama rulo sacların aynı ekseninde yüklenilmesinde titizlik gösterilmemesi sonucu, koruyucu atmosfer gazının devirdaymında ortaya çıkan düzensizlikler.
- Yığın tavlama koruyucu atmosfer gazı olarak kullanılan hidrojen-azot karışımının saf hidrojene göre ısıl geçirgenliğinin daha düşük olması sonucu, tavlama sırasında rulonun yüzey ve iç kısımları arasındaki sıcaklık farkının artması.
- Yığın tavlama hidrojen-azot karışımının koruyucu gaz olarak kullanıldığı durumlarda, rulonun dış kısımlarında azotun malzemedeki alüminyumla etkinleşmesi sonucu AlN oluşması.
- Yığın tavlama ısıtma süreci boyunca, koruyucu atmosfer gazına bağlı olarak istenen sıcaklığa çıkma zamanlarının değişmesi (örneğin hidrojen-azot karışımı ile 5 ila 10 saat arası sürerken, saf hidrojenin kullanılmasıyla 10 ila 20 saat arasında zaman almaktadır).
- Yığın tavlamanın soğutma çevriminde, düşük yoğunluğa sahip olduğundan koruyucu atmosfer gazı olarak hidrojenin kullanımı, daha hızlı gaz akışını beraberinde getirir. Böylece, hızlandırılmış soğutma ile rulolarda daha tekbiçim sıcaklık dağılımının ve daha üstün verimliliğin elde edilmesi.
- Yığın tavlama ısıtma çevriminin başlangıcında, haddeleme işleminden gelen yüzeye yapışmış yağlar yanar. Azot bazlı atmosferde, bu aşamada rulo merkezi ile kenarları arasındaki geniş sıcaklık farkı, daha sıcak kenarlarda oluşan yağın buharı nedeniyle meydana gelen çatlakları tetikler ve böylece siyah kenarlar oluşur. Isıtma hızı bu nedenle

sınırlandırılmalıdır.

- Hidrojen-azot karışımı koruyucu gazlar ile yapılan yığın tavlama sonucu, yapıya azot geçişi nedeniyle malzemenin kısmen daha yüksek dayanıma sahip olması.
- Ürünün muhtelif bölgelerindeki sıcaklık farkları, yığın tavlamanın farklı koruyucu gazlar ile yapılmasıyla çeşitlenmektedir. Nitekim istenilen en yüksek sıcaklığın elde edilmesi anında, hidrojen-azot karışımı ile üründeki en yüksek sıcaklık farkı 6 saat sonunda  $500^{\circ}\text{C}$  iken saf hidrojen ile 12 saat sonunda  $200^{\circ}\text{C}$ 'dir.
- Yığın tavlama koruyucu atmosfer gazlarının mekanik özelliklerden akma dayanımına etkisi sonuç olarak, Çizelge 2.6'dan görülebilmektedir. Buna göre çıkılan aynı en yüksek sıcaklıkta, akma dayanımının değişim aralığı, saf hidrojen kullanıldığında daha dar olarak sonuçlanmaktadır.
- Aynı çizelgeden (Çizelge 2.6) çıkarılan diğer sonuç ise, ısıtma sürecinin artması ve tavlama çıkılan sıcaklık değerinin yükselmesi sonucu akma dayanımlarının düştüğüdür.
- Yığın tavlama ve sürekli tavlama yöntemleri arasındaki en önemli fark olan işlem süreleri, sac malzemelerin mekanik özelliklerini etkiler. Şöyle ki, yığın tavlama 40-70 saat arasında süren işlem, sürekli tavlama 90-120 saniye arasındadır.
- Alüminyumla sakınleştirilmiş aynı kalitedeki iki çelik sacın farklı tavlama yöntemleriyle tavlansından sonra, Çizelge 2.7'deki mekanik özellikler elde edilmiştir. Bu çizelgeye göre, sürekli tavlama yönteminde daha yüksek akma ve çekme dayanımı elde edilirken, daha düşük tane boyutu, % uzama ve plastik anizotropi katsayısı değerleri alınmıştır. Buna ek olarak, dayanımların ve uzama değerlerinin değişim aralıklarının sürekli tavlama yönteminde daha fazla olduğu görülmektedir.
- Sürekli tavlama yöntemiyle beraber tanelerin daha ince ve dayanımların daha yüksek değerlerde elde edilmesi, AlN çökmesinin oluşma zamanına bağlıdır. Yığın tavlama AlN çökmesi yeniden kristalleşmeden önce oluşur. Bu, içyapı oluşumunu destekler. Ancak sürekli tavlama yönteminde AlN çökmesi yeniden kristalleşmeden sonra yer alır ve bu da tane büyümesini engeller.
- Yığın tavlama var olan rulo taşıma gibi işlemler, rulonun sıkılığından dolayı mekanik darbelerin ve çiziklerin oluşma nedenleridir ve sürekli tavlama bu olasılıklar daha düşük düzeydedir.
- Malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler, haddeleme sırasında malzemeye uzama olarak verilen deformasyon miktarına da bağlıdır. Derin çekme uygulamalarında kullanılacak malzemelere temper haddelemede % 0,25-1,00 arası uzama, daha az süneklik gerektiren uygulamalarda kullanılacak malzemelere ise %1,00-1,50 arası



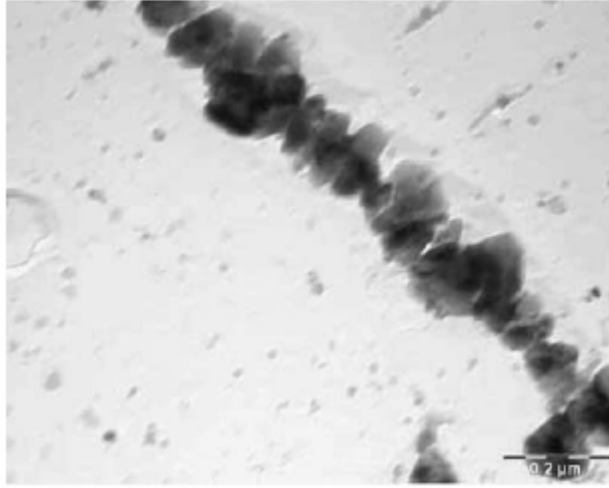
uzama verilir. Bu verilen deformasyon miktarlarının farklılığı mekanik özelliklerde değişimler meydana getirir.

- Karbon ve azot gibi mikroyapıda arayerlere yerleşebilen serbest atomlara sahip olan sakınleştirilmemiş çeliklerde, temper haddelene sonrasında yaşlanma gözlemlenir ve bu aylar süren yaşlanma süreci boyunca mekanik özelliklerde değişimler ortaya çıkar. Çizelge 2.9'da dört aşamada belirtilen yaşlanma süreci boyunca dayanımların, uzamaların ve pekleşme üstelinin nasıl değiştiği görülmektedir.
- Haddelene yönüne paralel doğrultuda çekilen temper haddelenmiş malzeme numunesi, hadde yönüne dik doğrultuda alınan numuneden daha yavaş yaşlanma etkisi sergiler. Bu etki, büyük ölçüde kalıntı mikro gerilmelerin heterojen şekilde dağılım düzenine yorulmaktadır.
- Sıcak daldırma yöntemi ile galvanizleme işleminde çelik sac hızlı ısıtma ve soğutma çevrimlerine maruz kalsa da yaşlanma sürecini içermediğinden tam olarak sürekli tavlama çevrimleriyle örtüşmemektedir. Bu nedenle, sıcak daldırma ile galvanizlenmiş çelik sacın şekillendirilebilirliği, yığın tavllanmış ve kaplamasız malzemeninkinden daha kötüdür.
- Galvalum kaplı malzemenin mekanik özellikleri genellikle, sürekli tavllanmış ve sıcak daldırma yöntemiyle galvanizlenmiş çelik sacın özellikleriyle benzerdir. Ancak şekillendirme sırasında malzemenin geri yaylanmaya karşı eğilimi daha yüksektir.

Aşağıda sıralanan düzensizlikler, yassı ürünlerin yüzeylerinde veya içyapılarında bulunan kusurlardır. Bu kusurlar genelde, malzemelerin uzama değerlerini düşürür ve dayanımlarını da artı veya eksi olarak değiştirirler. Kusurların, çelik sacların çeşitli yerlerinde düzenli veya düzensiz aralıklarda bulunması, mekanik özelliklerin bölgesel bazda değişmesine neden olmaktadır.

- **Kabuk**; metal olmayan ve/veya oksit kalıntılarından ibaret olan düzensiz, ince tabakalı malzemelerdir. Şekil ve boyut bakımından farklılık arz ederler. Üst üste binmiş kabuk malzemenin düzensiz olan çevresi, metal olmayan kalıntıları ve tufalları ana metalden ayırır. Döküm sırasında kabuğun oluşumu veya sıcak haddelene sırasında malzeme katmanlarının kayması nedeniyle başlar. Nispeten kabaca olan kusurlar, çıplak gözle görülebilir. Derin çekme sırasında malzeme yırtılmalarına neden olabilir (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Tufal**; çok sayıda aşırı ufak kabuk parçalarının sıralanmasıyla meydana gelen ince tabakalı düzensiz süreksizliklerdir. Haddelene doğrultusunda uzamış halde ve ana metale belli noktalardan bağlı halde bulunurlar. Östenit tane sınırlarının, sünek olmayan ve düşük

ergime noktasına sahip çökeltiler tarafından sıcak haddeleme esnasında zayıflamasıyla meydana gelirler. Sac kenarlarında metal akışı fazla olduğundan, tufal bu bölgelerde daha fazla görünür. Tufalin sacın tüm kenarına yayıldığı bazı sıra dışı durumlarda sac kenarları tamamıyla kesilir. Sorunun çözümü için çeliğin Mn, Cu, Sn, Cr içeriği ve fırın koşulları araştırılmalıdır. Malzeme yüzeyindeki tufallar derin çekme sonrası çukurlaşır ancak bu kusur ihmal edilebilir (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978). Şekil 3.21’de görülen tufal, TEM mikroskobik sistemiyle görüntülenen  $MnCr_2O_4$  içerikli tane sınırı çökeltisidir. Bu çökeltinin içinde bulunduğu soğuk haddelenmiş çelik sacın, hidrojen-azot karışımı koruyucu atmosfer altında  $700^{\circ}C$ ’de yığın tavlama olmasına rağmen bu tufali bulundurması dikkat edilmesi gereken noktadır (Wilson ve Chen, 2005).



Şekil 3.21 Çökeltinin TEM görüntüsü (Wilson ve Chen, 2005)

- **Damar** kusurları da haddeleme doğrultusunda uzamış izlerdir. Kabuk ve tufalların birleşmesiyle oluşur. Geniş açık çatlaklardan oldukça dar bantlara kadar yaygın tanımlanırlar. Ana metalden daha açık veya koyu renkli olabilirler. Yüzeğe yakın metal olmayan kalıntıların deformasyona maruz kalması yada yarı ürünlerdeki haddeleme yönüne paralel hataların haddeleme sırasında üst üste binmesiyle meydana gelirler. Kalıntıların ana malzemedan daha kırılgan olması dolayısıyla çatlak başlangıcını oluştururlar (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Delikler**; sacın üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru geçen çelik süreksizlikleridir. Haddeleme esnasında bu kusurların olduğu bölgelerde düşük süneklikten dolayı malzeme ayrılmaları olur. Sac kesitinde delikler; gaz boşluğu, kaba kalıntılar veya haddeleme öncesi mekanik yüzey hasarlarının varlığı nedeniyle meydana gelir. Çıplak gözle veya

optik cihazlarla tanımlanabilirler ancak sebeplerinin anlaşılabilmesi için metalografik muayene şarttır. Bu kusur genelde bobin baş ve sonlarında ortaya çıkarak bobinin tümünü etkilemez (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).

- **Katlanmalar**; işlenmemiş saclarda yüzeye yakın malzemelerdeki iç süreksizliklerdir. Oluşum nedenleri, metal olmayan kalıntıların malzeme kaynamasını önlemesiyle oluşturduğu yarı ürün boşluklarıdır. Sıcak ve soğuk haddeleme sırasında fark edilemezler, sonraki şekillendirme operasyonlarında ortaya çıkarlar. Bölge bölge çok ufak olabildikleri gibi bu kusurlar çok geniş alanlara yayılarak haddeleme yönünde uzayabilirler. Dıştaki kusurlar gözle tanınabilir ve içtekiler ise tahribatsız muayene yöntemleri ile ancak anlaşılabilir (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Malzeme içine istenmeyen maddelerin haddelenmesi**; sac yüzeyinde kusur teşkil eder. Bu maddeler, tufal, kir, tavlama tozları, asit ve emülsiyon artıklarından ibaret olup haddeleme esnasında yüzeye gömülürler. Ufak beneklerden geniş bölgeli kusurlara kadar boyutları değişkendir, sabit şekilleri yoktur ve yüzeye dağılmış vaziyettedirler. Yabancı maddelerin çeşitlerinin araştırılması, kusurların oluşum nedenlerine işaret etmektedir. Sıcak haddeleme sırasında yüzeye gömülen tufal, çok nadiren yapıda fark edilebilir değişime sebep olur. Soğuk haddeleme sırasında malzemeye katılan yabancı maddeler ise, diğerinden farklı olarak, daha geniş bölgesel sertleşmeye neden olmaktadır. Ayrıca, işlemi takip eden tavlama sonrası, ferrit yapının ince taneli olarak yeniden kristalleşmesine ve şekil değişiminin kritik değeri aşmasıyla da tane boyutunun artmasına yol açmaktadır (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Çukurcuk kusurları**; sac yüzeyinde genellikle düzensiz dağılan ve herhangi başka yabancı maddeyle kapanmamış olan küçük çöküntülerdir. Asitleme sırasında, işlem süreci uzadığında veya yetersiz inhibitörler eklendiğinde meydana gelirler. Ayrıca metal veya metal olmayan kalıntıların yüzeyden kopmaları veya paslanmalarıyla ortaya çıkan korozyondan dolayı oluşurlar (çukurcuk korozyonu) (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Hadde izleri**; yükselti veya çöküntü halinde, düzenli veya düzensiz, hadde yönünde veya dik yönde yinelenen yüzey izleridir. Sıcak veya soğuk haddelemede oluşabilir. Merdane yüzeylerindeki kırıklar, çatlaklar veya yapışmış metal parçacıkları gibi düzensizlikler bu kusurlara sebep olurlar. Haddeleme sırasında sertleşme olur ve takip eden tavlama işleminde kaba ve ince taneli yeniden kristalleşme bölgesi bu noktada şekillenebilir (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Ateş çatlağı izleri**; sıcak haddeleme sırasında, iş merdaneleri yüzeylerindeki çatlakların

çelik sac yüzeyine aktarılması ile oluşan izlerdir. İş merdaneleri yüzeylerindeki çatlaklara, içten su soğutmalı merdanelerin soğuk iç kısımları ile sıcak yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı yol açar. İlk meydana gelen izler, yükseltilerden ibaret olup sonraki haddeleme ile düzleşirler. Bu takip eden işlem sıcak haddeleme ise iz civarında tufal oluşur (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).

- **Sıcak sac çizikleri;** sığ, derin ve çeşitli boylarda emülsiyon artıkları, kir ve bazı diğer maddelerden ibaret olan çiziklerdir. Soğuk haddelemeden önce oluşurlar ve eğer farklı hata kaynağından ileri geliyorsa herhangi doğrultuda, ancak grup halinde olduklarında haddeleme yönündedirler. Oluşumlarıyla beraber çapak açığa çıkar ve sıyrılan metal, çizimin sonunda birikir. Kusur sıcak haddeleme sırasında oluştuysa çizik etrafında tufal inklüzyonları bulunmaktadır ve sıcak sacın sarılması sırasında oluşursa, çevreleyen malzemeden farklı düzensiz tane oluşumu meydana gelir. Bu kusurlar, asitleme aşamasında veya soğuk sac bobinin açılma ve sarılma işlemlerinde de oluşabilir. Sıcak ve soğuk haddeleme arasında oluşan çiziklerde tufal veya cüruf inklüzyonları bulunmaz ve eğer malzeme önceden tavlama işlemi görmüşse aynı yapısal oluşum meydana gelir (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Soğuk sac çizikleri;** sıcak sac çizikleri gibidir ancak soğuk haddeleme anında ve sonrasında herhangi bir işlem sırasında oluşurlar. Aynı hatadan kaynaklananlar, sıcak sac çiziklerinde olduğu gibi hadde yönüne paralel veya dik sıralanırlar. Şekil itibarıyla açık veya kapalı olabilirler, metal dışı inklüzyon veya tufal inklüzyonlarından yoksundurlar. Başlıca oluşum nedenleri, sert nesnelere ve makine parçalarının keskin köşe ve kenarları veya rehber merdaneler gibi saca temasta olan makine parçalarında biriken pislik parçacıklarıdır. Rulo sarma ve açma sırasında da genellikle oluşabilmektedirler. Açık çizikler kolay tanınır. Eğer hata tavlama sonrası meydana geliyorsa çizik etrafı, malzeme yer değişiminden dolayı bölgesel deformasyona uğrar. Tavlama öncesi oluşan kusurlarda ise tane boyutu, değişime uğramış durumdadır (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Tavlama lekeleri;** sacın kenarlarında tavlama sonrasında oksitlenmeden veya karbon birikiminden dolayı meydana gelen renk değişimleridir. Yığın tavlama sırasında oluşur. Gri-siyah veya renkli çizgiler gözle fark edilebilir. Sürekli tavlama bu lekeler tüm sac genişliğine dağılır. Koruyucu atmosferde oksijen mevcutsa kenarlarda oksitlenme oluşur. Kenarlarda karbon birikiminin nedeni, CO/CO<sub>2</sub> oranının istenilen değerden fazla olmasıdır. Yağlayıcı artıkları ve yağ dumanları tavlama lekelerinin oluşmasını engeller (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).

- **Çapraz kesişen kırıklar;** düzenli veya düzensiz aralıklarla sac kenarına doğru haddeleme yönüne dik ve çapraz olarak meydana gelirler. Temel olarak rulo açma aşamasında, sac boyunca ortaya çıkan bölgesel gerinim nedeniyle oluşurlar. Rulo geometrisi, sac kalınlığı ve rehber silindirlerin geometrilerinin bu tip kusurun oluşumunda etkileri vardır. Malzemenin akma uzamasının yüksek ve akma dayanımının düşük olması, çapraz kesişen kırıkların oluşma riskini artırır. Hem soğuk haddeleme hem de sonraki fabrikasyon işlemler sırasında oluşabilir (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Kuştüyü biçimli kırıklar;** temper haddeleme sırasında bölgesel gerinim nedeniyle oluşan kusurlardır. Kısım kısım veya sacın tüm genişliği boyunca oluşabilirler. Temper haddeleme sırasında, mesela sacın dalgalı olması gibi, merdane boşluğu ile sac profilinin tam çakışmaması temel nedendir. Çapraz kesişen kırık kusurları gibi çıplak gözle tespit edilebilirler. Sorunun çözümü için akma noktasının test edilerek gözden geçirilmesi önerilmektedir (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Yapışma kırıkları;** çoğunlukla mekanik hasarla ilgili yapışmadan kaynaklanan düzensiz kusurlardır. Yığın tavlama sonrası bobin sacın katmanlarının yapışması ve sonrasında bobin çözücüde sacın açılması ile birlikte meydana gelir. Bobin çözme hızının artırılması, yapışma kırıklarının oluşma riskini azaltır (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Rulo çatlıkları;** sacların bükülmesi sırasında şekil değişimi yönünün dikine meydana gelen kusurlardır. Bobin kırıklarının oluşumu, malzemenin gerilme-gerinim eğrisindeki akma noktası uzamasının varlığı nedeniyle, sacın bükülmesi sırasında şekil değişiminin tekbiçim değil de akma noktası bölgesinde inişli çıkışlı olmasından dolayıdır. Bu bobin kırıkları yetersiz temper haddeleme sonucu hala geniş aralıklı akma noktasına sahip olan çelik saclarda meydana gelir. Ayrıca yaşlanmaya maruz kalmış ve dolayısıyla akma noktası düşmüş çelik saclardan yada bükme mekanizması doğru ayarlanmamış cihazlardan dolayı da meydana gelebilirler (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).
- **Pas;** çelik yüzeyine yapışmış korozyon ürünü katmanıdır. Sıcaklık dalgalanmaları, atmosferin yüksek nem içeriği ve sacların uzun süren bekletilme koşulları nedeniyle vuku bulur. Kalıntılar, kir parçacıkları ve asit artıkları paslanmayı artırır. Çıplak gözle belirlenebilir (Grünhofer, Hese ve Nachigäller, 1967; Roberts, 1978).

#### 4. ÇELİK SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ

Şekillendirme amaçlı imal edilen sıcak ve soğuk haddelenmiş düz çelik saclar, mekanik ve hidrolik presler kullanılarak, çeşitli biçimlerdeki parçalara şekillendirilirler. Bükme, germe, derin çekme veya bu temel yöntemlerin çeşitli kombinasyonlarından ibaret olan sac şekillendirme işlemlerinin uygulanması sırasında, sac malzemedeki çatlama, yırtılma ve aşırı yerel bir incelmeye olmaması istenmektedir. Bu nedenle sac malzemenin şekillendirme sırasında gerinim dağılımının tekbiçim olması ve bu gerinimlerin her malzeme ve her yöntem için farklılaşan sınır değerleri aşmaması gerekmektedir.

Şekillendirilebilirlik kavramı, sac malzemenin plastik şekil değişimi sırasında, gerinimlerinin tekbiçim olması ve sınır gerinim değerlerini aşmaması ile birlikte, yapısal bütünlüğünü koruma kabiliyeti olarak kullanılır. Ancak gerekli olan şekillendirilme kabiliyeti, parça şekline göre değişmektedir. Çünkü bir uygulama için mükemmel şekillendirilebilirliğe sahip olan bir çelik sac, başka bir uygulamada şekillendirilebilme açısından zayıf kalabilmektedir.

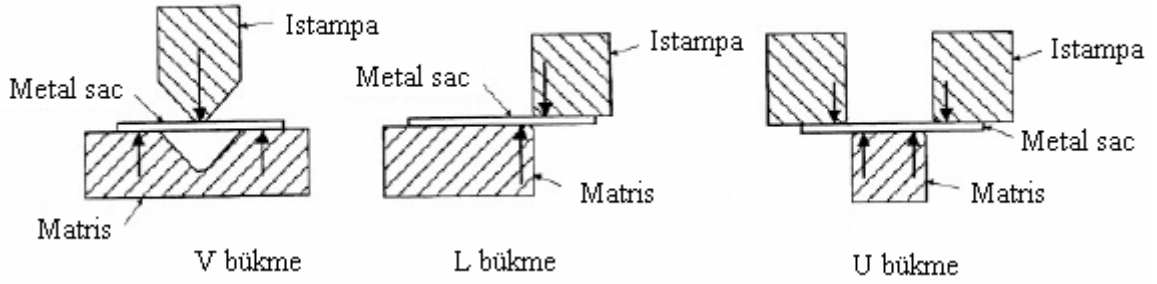
Malzemenin şekillendirilebilirliği en iyi “şekillendirme sınır diyagramı” ile gösterilir. Bu eğri, hatalı ve emniyetli gerinim bölgelerini birbirinden ayırır. Şekillendirme sınır eğrisinin elde edilmesi, teorik olarak mümkünse de en iyi yöntem onun, şekillendirilme işlemine benzer, deneysel yollarla oluşturulmasıdır. Bunun için, Erichsen , Bulge, Swift ve çekme testi gibi deney yöntemlerinden faydalanılır.

#### 4.1 Şekillendirme Yöntemleri

##### 4.1.1 Bükme

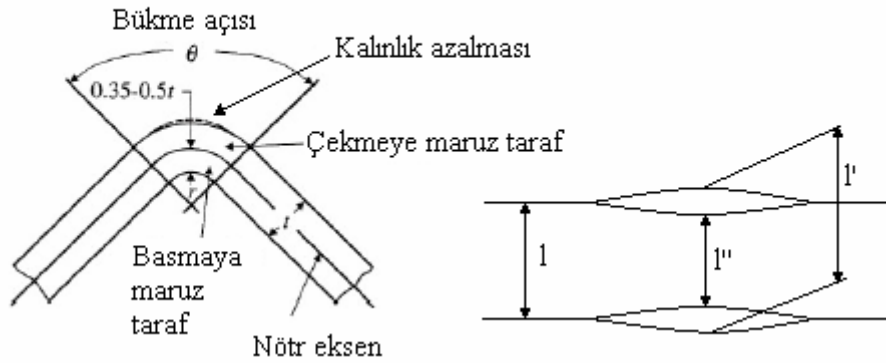
Sac şekillendirme yöntemleri arasında en çok karşılaşılan yöntemlerden biri bükmedir. Şekil 4.1’de gösterilen yöntemlerdeki gibi başlı başına uygulanan düz eksenli bükme olabildiği gibi karmaşık şekillendirme işlemlerinde sacın belli bölgelerinde çeşitli profillere sahip eksenlerde de meydana gelebilir (Mielnik, 1991).

Bükme esnasında bükülen sacın dış yüzeyi çekme, iç yüzeyi ise basma gerilmeleri etkisinde kalır. Çekme ve basmaya zorlanan kısımları ayıran çizgiye nötr eksen denilmektedir. Bir eğme momentinin uygulanması ve bükme derecesinin artırılması ile başlangıçta kalınlık kesitinin tam ortasında kalan tarafsız eksen iç yüzeye doğru yaklaşmaktadır. Çekme gerilmelerine maruz kalan dış yüzeydeki lifler, basma gerilmelerinin etkisindeki iç yüzey liflerinden daha fazla gerinirler. Bu nedenle, hacim sabitliği yasasına göre sac kalınlığı bükme bölgesinde azalmaktadır (Şekil 4.2) (Çapan, 1999).



Şekil 4.1 En yaygın bükme işlemleri (Mielnik, 1991)

Bükme bölgesinde oluşan şekil bozukluğu sac kalınlığında olduğu kadar, sac genişliğinde de meydana gelir. Bükmeden önceki parça eni  $l$ , içte artarak  $l'$ , dışta ise azalarak  $l''$  değerini alır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Bükme bölgesinde nötr eksenin kayması ve şekil bozuklukları

Sac malzemelerin bükülebilirliğinin tayini için, en düşük malzeme uzunluğu ve en küçük bükme yarıçapı bakımından aşağı yukarı yaklaşımlar sağlayan ampirik formüller geliştirilmiştir. İzin verilebilir bükme boyu genellikle, kaymış nötr eksen boyunca yay uzunluğuna göre 4.1 eşitliğindeki gibi hesaplanır (Mielnik, 1991).

$$İBB = \frac{\theta}{360} 2\pi (r_b + kt) \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte; İBB izin verilebilir bükme boyu,  $r$  bükme bölgesindeki iç yüzey yarıçapı,  $\theta$  bükme açısı (derece olarak),  $t$  sac kalınlığı ve  $k$  malzeme sabitidir.

Herhangi bir sac kalınlığı için  $r$  bükme yarıçapı, bir en düşük değer altında alınmaz, aksi

taktirde bükme bölgesinin dış kısmında çatlak baş gösterir. Dolayısıyla sac malzemeler için bir en düşük bükme yarıçapı değerinin saptanması gerekli görülmektedir. Kopma büzülmesine bağlı bir ampirik formül 4.2 eşitliğindeki gibidir. Bu eşitlikteki  $r_{b_{\min}}$  en düşük bükme yarıçapı,  $t$  sac malzeme kalınlığı,  $Z$  kopmadaki kesit daralmasıdır (Kalpakjian ve Schmid, 2001).

$$r_{b_{\min}} = t \left( \frac{50}{Z-1} \right) \quad (4.2)$$

Bükülen parça üzerinden bükme kuvveti kaldırıldığında parça bükme yönünün tersine doğru elastik şekil değiştirir ve sonuçta bükme yarıçapı büyür. Geri yaylanma denilen bu olayın incelenmesi için geri yaylanma oranı olarak nitelendirilen açı oranı 4.3 eşitliğindeki gibidir. Burada GYO geri yaylanma oranı,  $\theta_1$  bükülmeden önceki ve  $\theta_2$  bükülmeden sonraki bükme açılarıdır (Mielnik, 1991).

$$GYO = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} \quad (4.3)$$

Geri yaylanma yaklaşık olarak 4.4 eşitliğinden de hesaplanabilir. Bu eşitlikte  $\sigma_{0,2}$  malzemenin akma dayanımı,  $E$  elastiklik modülüdür (Kalpakjian ve Schmid, 2001).

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = 4 \cdot \left( \frac{\theta_1 \cdot \sigma_{0,2}}{E \cdot t} \right)^3 - 3 \cdot \left( \frac{\theta_1 \cdot \sigma_{0,2}}{E \cdot t} \right) + 1 \quad (4.4)$$

Geri yaylanmadan kaynaklanan hatanın önüne geçmek için geliştirilen yöntemlerden biri sacı gereğinden fazla bükmeaktır. Bükme alanına istampanın burnu ile bastırarak bu alanda yüksek gerilmeler oluşturmak da uygulanan diğer yöntemdir.

Sac metallerin bükülebilirliğinin arttırılması için sünekliklerinin arttırılması gereklidir. Bu amaçla malzeme ısıtılabilir yada hidrostatik gibi yüksek basınç ortamlarında işlem yapılabilir.

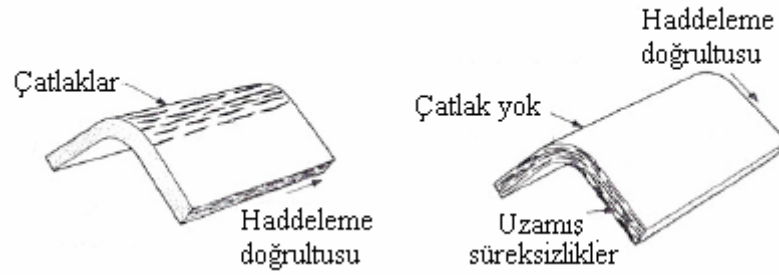
Bükmede oluşan gerilme durumu dış yüzeydeki sünekliği etkiler. Tek eksenli gerilme etkisindeki metalde süneklik, iki eksenli gerilme halindeki göre daha fazladır. Bükmede parça eni  $l$  arttıkça gerilme tek eksenli durumdan iki eksenli duruma doğru geçerek malzemede sünekliğin azalmasına neden olur (Çapan, 1999).

Sacın kenar koşulları da bükülebilirliği etkiler. Kaba ve pürüzlü kenarlar, gerilme birikimi bölgeleridir ve kenar pürüzlülüğü arttıkça bükülebilirlik düşer. Bükülebilirliği azaltan ve



kenar çatlaklarına neden olan diğer önemli etkenler, kalıntı miktarı ve şekli ile kesme-dilme işlemleri sırasında kenarların soğuk şekillendirmeye maruz kalmasıdır.

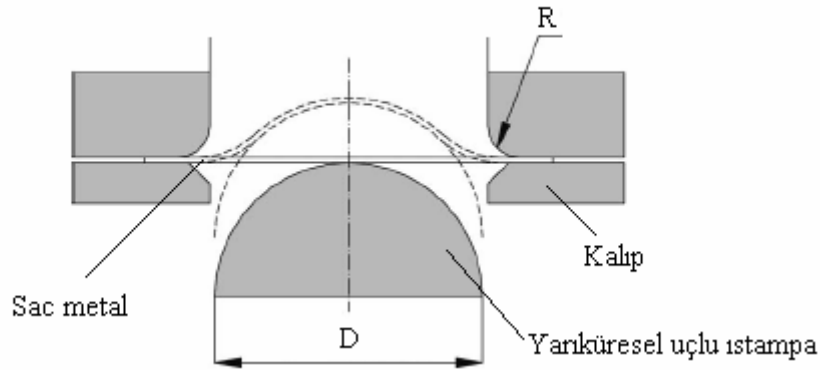
Bükülebilmede anizotropi önemli bir etkidir. Malzeme içerisinde bulunabilen kalıntı, katışkı ve boşluklar gibi süreksizliklerin soğuk haddelemede sıralanması, tercihli yönlenme ve mekanik fiberleşme olarak ortaya çıkan anizotropiyi oluşturur. Hadde yönüne dik yapılan bükme işleminde, malzemede çok sık tekrarlanan süreksizliklerden dolayı süneklik azalır. Bu nedenle bükme kıvrımı, sacın haddeleme yönüne dik olmalıdır (Kalpakjian ve Schmid, 2001).



Şekil 4.3 Bükme yönünün anizotropiyle ilgisi (Kalpakjian ve Schmid, 2001)

#### 4.1.2 Germe ile Şekillendirme

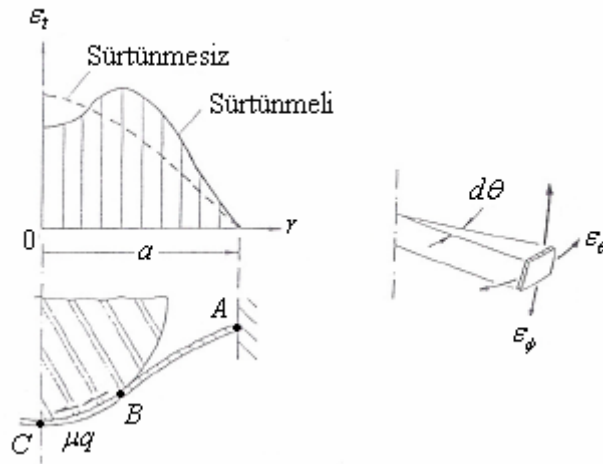
Bu yöntemde sac malzeme kalıplar arasında hiç hareket etmeyecek şekilde sıkıştırılır. Daha sonra ıstampa saca doğru ilerleyerek sac malzemenin gerilmek suretiyle şişirilerek şekillendirilmesini sağlar (Şekil 4.4). Malzemenin sıkıştırılan kısmı olan flanşın kalıp içine doğru akışı, yüksek basınç ve sürtünme kuvveti vasıtasıyla önlediği gibi yeterli gelmediği durumlarda bir feder sistemi ile de frenlenebilmektedir.



Şekil 4.4 Yarıküresel uçlu ıstampayla germe işlemi

Gerilen bölgede ortaya çıkan gerilme hali, iki eksenli çekmedir. Bu nedenle şişirilen bölgede incelme kaçınılmazdır. İstampanın ilerlemesiyle birlikte kalıp köşe yuvarlatmasına yakın bölgelerdeki malzemeler, ıstampaya doğru yaklaşmakta ve temas etmektedir. Bu nedenle sürtünme kuvvetinin artmasıyla dengelenmiş iki eksenli gerinim durumuna yaklaşılr (Lange, 1985).

Şekil 4.5'te yarıküresel uçlu bir ıstampayla germe işleminin herhangi bir anında, sac kesitinde kalınlık boyunca oluşan gerinim dağılımı görülmektedir. Bu şekle göre, en yüksek kalınlık gerinimi B noktasında meydana gelmekte ve dolayısıyla bu noktayla beraber, merkez noktadan aynı uzaklığa sahip noktaların oluşturduğu bir yay boyunca boyunlanma oluşmakta ve sonunda da yırtılma meydana gelmektedir (Kalpakjian ve Schmid, 2001).



Şekil 4.5 Yarıküresel ıstampayla yapılan sürtünmeli ve sürtünmesiz germe işleminde sac kalınlığındaki gerinim dağılımı

Bu şekilden anlaşıldığı üzere, sürtünme olayının bu tip bir germe işleminde etkisi büyüktür ve hem boyunlanma veya yırtılmanın oluşacağı bölgeyi hem de oluşma anındaki gererek şekillendirme oranını yani kap derinliğini etkiler. Bu nedenle sürtünme katsayısını azaltan yağlamanın gererek şekillendirmede önemi büyüktür. Sürtünmenin sifra yaklaştığı hidrolik akışkan yardımıyla germe işleminde, dengeli çekme ve kesitte tekbiçim incelme söz konusu olduğundan daha yüksek germe oranları elde edilir (Mielnik, 1991).

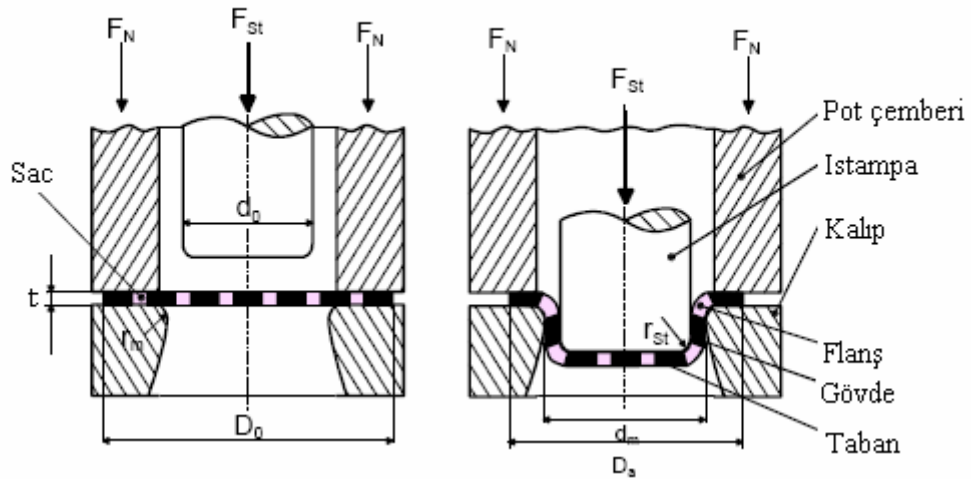
Bu yöntemde en etkin mekanik özellikler, üniform deformasyon sahasını arttıran pekleşme üsteli (n) ile boyunlanma sonrası uzamayı arttıran gerinim hızı duyarlılığı üstelidir (m).

Germe ile şekillendirmenin imalatta diğer şekillendirme işlemlerini içermeden tek başına

kullanıldığı yerler özellikle büyük ebatlı ve düşük üretim adeti gerektiren uçak ve otomobil parçalarıdır (otomobil tavan sacı, uçak kanadı gibi). Bunun dışında bu yöntem genelde, karmaşık geometrili parçaların imalatında diğer şekillendirme yöntemleri ile birlikte meydana gelmektedir. Örneğin bazı parçaların şekillendirilmesinde, flanşın bütün çevrede veya bir bölgede kalıp içersine akışına izin verilebilir. Bu durumda germe, derin çekme işlemi ile birlikte ortaya çıkar (Çapan, 1999; Yurci, 2003).

#### 4.1.3 Derin Çekme

Derin çekme, metal sac parçaların şekillendirilmesinde en önemli temel yöntemlerden birisidir. Paketleme, otomotiv ve diğer taşıtlar, beyaz eşya ve mutfak gereçleri gibi alanlarda yaygın bir şekilde karşımıza çıkmaktadır. DIN 8584 standardına göre derin çekmenin tanımı şöyledir; derin çekme, düz bir sacın, sac kalınlığında kasti bir değişim beklenmeden, bir tarafı açık oyuk bir yapıya, çekme-basma gerilme esaslı şekillendirilmesi işlemidir.

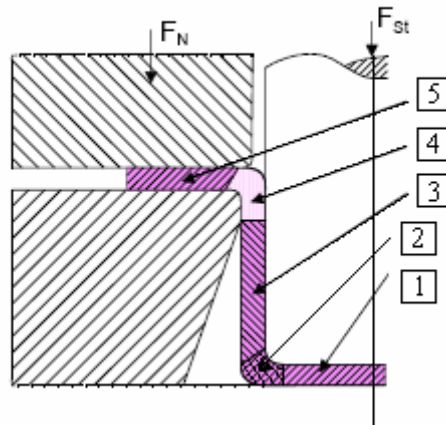


Şekil 4.6 Silindirik bir kabın derin çekilmesi [7]

Derin çekmenin uygulandığı temel teorik yöntemde dairesel metal sac, çembersel kalıp boşluğunun üst kısmında yer alır ve pot çemberi denilen bir üst kalıp ile belli bir kuvvetle sıkıştırılır. Düz silindirik ıstampa, sıkıştırılan sacı kalıp boşluğuna doğru iterek silindirik bir kap oluşturur (Şekil 4.6).

Derin çekme işleminde önemli değişkenler; metal sacın özellikleri, başlangıç sac çapının ( $D_0$ ) ıstampa çapına oranı ( $d_0$ ), ıstampa ve kalıp arasındaki boşluk ( $c$ ), ıstampa ucu yuvarlatma yarıçapı ( $r_{st}$ ), kalıp köşe yuvarlatması yarıçapı ( $r_m$ ), pot çemberi basıncı, sürtünme ve yağlamadır (Lange, 1985).

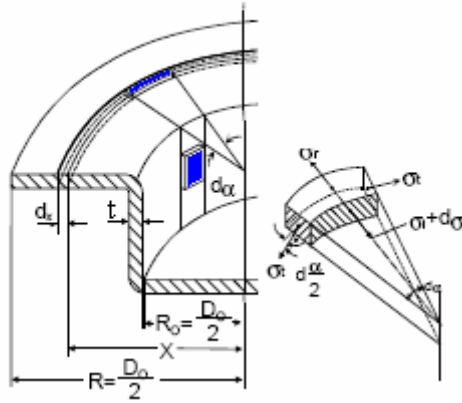
Derin çekme işlemi iki şekillendirme aşamasından ibaret olmaktadır. İlk aşama olan kabartma sürecinde, ıstampanın saca değmesi ve bir miktar ilerlemesiyle, ıstampa ucu yuvarlatması saca bükme uygulayarak şeklini saca iletir ve düşük derinlikli kabartı biçimindeki yapı oluşur. İstampanın tabanında (1 no'lu bölgede) herhangi bir akış yoktur ve malzeme durağandır. Bitişindeki 2 no'lu bölgede ise, malzeme bükmeye maruz kaldığından, burada bir miktar germe ile incelmeye meydana gelir. Hemen üzerindeki dikey bölge, başlangıçta kabartma aşamasında çok küçük bölge olup ileriki aşamada parça duvarını oluşturacak çekme bölgesidir. Kalıp köşe yuvarlatması tarafından bükülen bölge de 2 no'lu bölgeye benzer olup germe ve incelmeye etkisine maruz kalmaktadır. Flanş kısmını oluşturan 5. bölge ise kabartma aşamasında hemen hemen hiç hareket etmeyerek kalıp içersine akış göstermemiş bölge olarak sayılmaktadır. Özetle bu ilk aşamada, daha çok ıstampanın ve kalıp köşe yuvarlatmasının oluşturduğu bükme-çekme gerilmeleri ve buna bağlı olarak çok hafif incelmeler ön plandadır (Şekil 4.7) (Zhu, 1999; Wagoner ve Chenot, 2001).



Şekil 4.7 Derin çekmede oluşan farklı gerilme bölgeleri [7]

İstampanın ilerlemeye devam etmesiyle birlikte 3 no'lu bölge olan parça cidarı büyümekte, böylece kap derinleşmekte, yani derin çekmede ikinci aşama olan çekme aşaması başlamaktadır. Bu aşamada sacın temas ettiği her bölgede, sürtünme kuvvetleri belirginleşmektedir. Bu sebepten 1 ve 2 no'lu bölgeler, sürtünme kuvvetlerine karşı olarak çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır. Üniform deformasyon sınırını aşan bu bölgelerin keşiştiği çizgide incelmeye arttığından, muhtemel yırtılma bölgesinden biri bu 1 ve 2 no'lu bölge arasındaki sınırdır. Diğer muhtemel boyunlanma ve yırtılma bölgesi de 2 ve 3 no'lu bölge arasındaki sınırdır. Bunun nedeni, bükmeden dolayı malzemenin pekleşerek sünekliğinin azalmasıdır. 1 no'lu bölgede çekme gerilmeleri iki eksenli hal almaktadır.

Bükme nedeniyle 4 no'lu bölgede pekleşen malzeme, 3 no'lu bölgeye doğru akarken doğrultma işleminden geçtiğinden yüksek kuvvet gerekmektedir. Kalıp ve pot çemberi arasında bulunan 5 no'lu bölgeyi oluşturan flanş ise radyal yönde kalıp içersine hareket ederken, çevresel yönde bası gerilmelerine maruz kalmaktadır (Zhu, 1999; Wagoner ve Chenot, 2001).

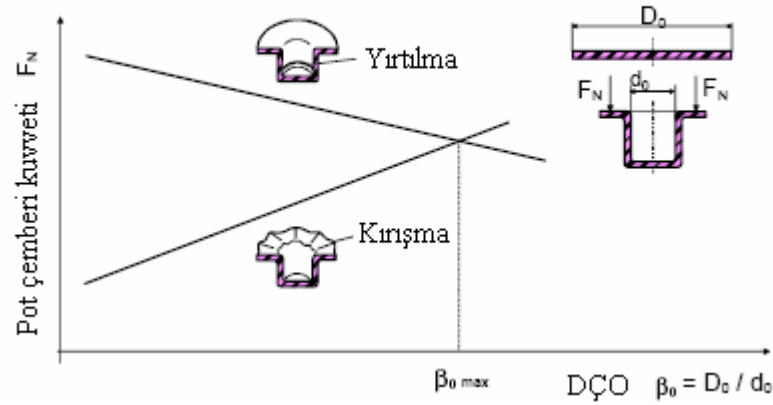


Şekil 4.8 Derin çekme işleminde malzeme akışı ve etkiyen gerilmeler (Wagoner ve Chenot, 2001)

İşlem sırasında flanştaki malzemenin akışı ve oluşan gerilmeler Şekil 4.8'deki gibidir. Başlangıçta flanş civarında yer alan mavi bölge, şekillendirme devam ettikçe, ıstampa hareketiyle radyal gerilme ( $\sigma_r$ ) altında ve çevresel sıkıştırma kuvvetiyle beraber ( $\sigma_t$ ) kalıp boşluğuna yaklaşmaktadır. Flanş bölgesindeki bu çevresel bası gerilmeleri sacın kırışmasına yol açabilmektedir. Özellikle ince saclarda kırışma eğilimi daha yüksek olmaktadır. Kırışma kusurunun önlenmesi için flanşa belli bir basınç uygulayan pot çemberi kullanılmalı yada kullanıldığı takdirde kırışma hala görülüyorsa pot çemberi basıncı arttırılmalıdır. Gereğinden büyük pot çemberi kuvveti ise yırtılmalara neden olur. Şekil 4.9'dan pot çemberi kuvvetinin sınır derin çekme oranına ve kusur bölgelerine etkisi görülmektedir (Zhu, 1999).

Pot çemberi kuvveti, pot çemberi basıncının, sacla pot çemberi arasındaki temas alanı ile çarpımıdır. Dolayısıyla birinci kademe için pot çemberi kuvveti 4.5 eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte,  $D_0$  çekme sacının,  $d_0$  ise ıstampanın çapıdır ve "p" pot çemberi basıncıdır. Pot çemberi basıncı bazı kaynaklarda, paslanmaz çelik için  $0,20 \text{ kgf/mm}^2$ , derin çekme kalitesindeki çelik için  $0,25 \text{ kgf/mm}^2$  önerilmektedir (Çapan, 1999).

$$F_N = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - d_0^2) \cdot p \quad (4.5)$$



Şekil 4.9 Pot çemberi kuvvetinin sınır derin çekme oranına ve kusur bölgelerine etkisi [7]

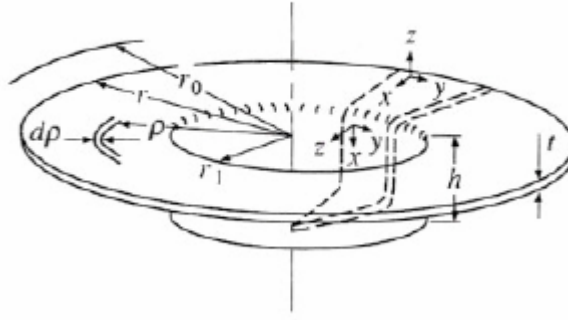
Derin çekmede iki önemli bölge çok iyi analiz edilmelidir. Bunlardan ilki, içinde çoğu deformasyonun gerçekleştiği flanş ve ikincisi, flanştaki deformasyonu sağlamaya yeterli olan kuvveti taşıyabilecek kap cidarıdır. Eğer başlangıç sacı çapı çok geniş seçilirse, sacı kalıp boşluğuna çekmek için gerekli olan ve cidara iletilen kuvvet, sınırı aşacak ve kap cidarında boyunlanma yada yırtılma oluşacaktır. Bu nedenle derin çekilebilirlik, sınır derin çekme oranı ile telaffuz edilmektedir. 4.6 eşitliğindeki gibi sınır derin çekme oranı SDÇÖ, yırtılma olmadan derin çekilebilen sacın en geniş çapının, kap veya ıstampa çapına oranıdır (Kalpakjian ve Schmid, 2001).

$$SD\check{C}O = \left( \frac{D_{\max}}{d} \right) \quad (4.6)$$

Derin çekme işleminde SDÇÖ'nun teorik olarak elde edilmesi için aşağıdaki kabuller yapılır (Mielnik, 1991).

- Bükme ve doğrultma işlemleri sırasında açığa çıkan dış ve iç sürtünme kayıpları ihmal edilir. Ancak oranın bulunmasından sonra bu sürtünme kayıpları, bir verimlilik katsayısının ( $\eta$ ) hesaba katılmasıyla yeniden düzenlenir.
- Pekleşme üsteli  $n$ 'nin SDÇÖ'ya çok küçük etkisi olduğundan dolayı malzeme ideal plastik malzeme olarak ( $n=0$ ) kabul edilir.
- Sac kalınlığının sabit kaldığı kabul edilir.
- Hill anizotropik plastisite teorisi uygulanır.

Sınır derin çekme oranının bu kabullere göre analiz edilmesi için Şekil 4.10'da gerekli boyutlar görülmektedir.



Şekil 4.10 Kısmi derin çekilmiş bir kabın analizi için gerekli boyutlar ve eksen takımları (Mielnik, 1991)

Flanşa  $d\varepsilon_z = 0$  olarak kabul edildiğinden, başlangıçta merkeze  $\rho_0$  uzaklığında bulunan birim elemanın alanı değişmemektedir. Bu durumda 4.7 eşitliği elde edilir.

$$\pi\rho_0^2 = \pi\rho^2 + 2\pi r_1 h = \text{sabit} \quad (4.7)$$

Eşitliğin her iki tarafının türevi alındığında 4.8 eşitliği belirlenir.

$$2\pi\rho d\rho + 2\pi r_1 dh = 0 \rightarrow d\rho = -\frac{r_1 dh}{\rho} \quad (4.8)$$

Birim elemanın çevresi  $\rho$  ile orantılı olduğundan ve  $d\varepsilon_z = 0$  kabul edildiğinden, flanştaki diğer gerinimler 4.9 eşitliğiyle hesaplanır.

$$d\varepsilon_x = -d\varepsilon_y = -\frac{d\rho}{\rho} = \frac{r_1 dh}{\rho^2} \quad (4.9)$$

Düzlemsel gerinim altında flanştaki akma dayanımının  $\sigma_f$  olduğu kabul edilirse,  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$ , elemanın konumuna göre değişmesine rağmen  $(\sigma_x - \sigma_y)$  terimi sabit kalır.  $d\varepsilon_z = 0$ ,  $\sigma_z = 0$  olduğundan  $\sigma_y = \sigma_x$  ve  $\sigma_f = 2\sigma_x$  olarak elde edilir. İstampa ilerleyişindeki artım başına düşen toplam işin, 4.10 eşitliğindeki gibi integrali alınırsa 4.11 eşitliğindeki en yüksek derin çekme kuvveti belirlenir.

$$\frac{dW}{dh} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{2\pi r_1 t \sigma_f d\rho}{\rho} = 2\pi r_1 t \sigma_f \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) = F_d \quad (4.10)$$

$$F_{d_{maks}} = \frac{dW}{dh_{maks}} = 2\pi r_1 t \sigma_f \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right) = 2\pi r_1 t \sigma_f \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (4.11)$$

$$\sigma_{d(maks)} = \sigma_f \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (4.12)$$

Kap cidarının, bu en yüksek derin çekme kuvvetini karşılaması gerektiğinden, aksenal gerilme 4.13 eşitliğinden hesaplanabilir. Bu eşitlikte kap cidarındaki akma gerilmesi  $\sigma_w$  olarak gösterilmiştir.

$$\sigma_x = \sigma_w = \frac{F_{d(maks)}}{2\pi r_1 t} = \sigma_f \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (4.13)$$

Düzlemsel gerinim hallerinde kap cidarının akma gerilmesi  $\sigma_w$  ve flanşın akma gerilmesi  $\sigma_f$  ile belirtildiğinden bu gerilmelerin oranı  $\beta$  ile gösterilir ve 4.14 eşitliğindeki gibi sınır derin çekme oranının e tabanındaki logaritmasına eşittir (Mielnik, 1991).

$$\beta = \frac{\sigma_{w(\varepsilon_y=0)}}{\sigma_{f(\varepsilon_z=0)}} = \ln(SD\check{C}O) \quad (4.14)$$

İçyapı değişiminin olmadığı varsayılan izotropik ve ideal plastik malzemede  $\sigma_f = \sigma_w$  ve  $\beta = 1$  olduğundan  $SD\check{C}O = e = 2,72$  olur. Hesaplanması sırasında sürtünme ve bükmedeki bazı koşulların ihmal edilmesinden dolayı gerçekte bu değer 2,1 - 2,2 arasındadır. İşlemdeki bu kayıplar, deformasyon verimliliği katsayısının ( $\eta$ ) telaffuz edilmesiyle hesaba katılır. Böylece 4.15 eşitliği en doğru sonucu vermektedir (Mielnik, 1991).

$$\ln(SD\check{C}O) = \eta\beta \quad (4.15)$$

$\eta$  değeri; yağlama, pot çemberi basıncı, sac kalınlığı ve yuvarlatma yarıçaplarının değişmesiyle farklılaşır.  $\beta = 1$  ve sınır derin çekme oranının 2,1 - 2,2 arasında değiştiği durumlarda  $\eta$ , 0,74-0,79 aralığındaki değerlere tekabül eder.

Düzlemsel anizotropiye sahip ideal plastik malzeme için Hill teorisi, 4.16 eşitliğini öngörür (Mielnik, 1991).

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{r+1}{2}\right)} \quad (4.16)$$

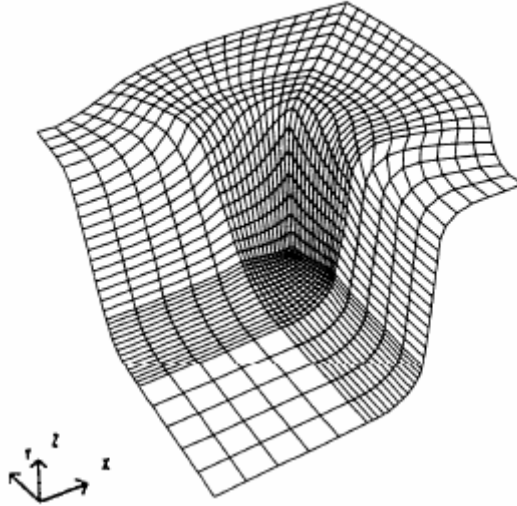


Böylece 4.15 eşitliği, 4.17 eşitliğine dönüşmektedir. Bu eşitlikte  $r$  plastik anizotropi değeri ve  $\bar{r}$  ortalama dikey anizotropi katsayısıdır.

$$\ln(SD\dot{\epsilon}) = \eta \sqrt{\left(\frac{r+1}{2}\right)} \cong \eta \sqrt{\left(\frac{\bar{r}+1}{2}\right)} \quad (4.17)$$

Anizotropinin sac şekillendirilebilirliğine etkisi açıklanırken plastik anizotropi değerinin derin çekmeye etkisi daha ayrıntılı incelenecektir.

Derin çekme yöntemiyle yalnızca eksenel simetrik veya silindirik parçalar imal edilmez, zira, çeşitli geometriye sahip parçalar, işlem zorlaşsa da, üretilebilmektedir. Özellikle dikdörtgenler prizması şeklindeki köşeli parçaların derin çekilmesi, silindirik parçalara nazaran daha zor işlemdir, çünkü bu köşelerde ciddi kırışma ve yırtılma sorunları ortaya çıkabilmektedir. Şekil 4.11’de bilgisayar ortamında çizim programlarıyla hazırlanmış köşeli derin bir parçanın üç boyutlu deformasyon ağı görüntüsünde, köşedeki gerilme yığılmasının büyüklüğü açıkça görülmektedir. Bu tipte parçaların derin çekilmesi sırasında, flanştaki malzemenin akışını ayarlayıp hataları önleyen, pot çemberi üzerindeki federlerden yararlanılır.

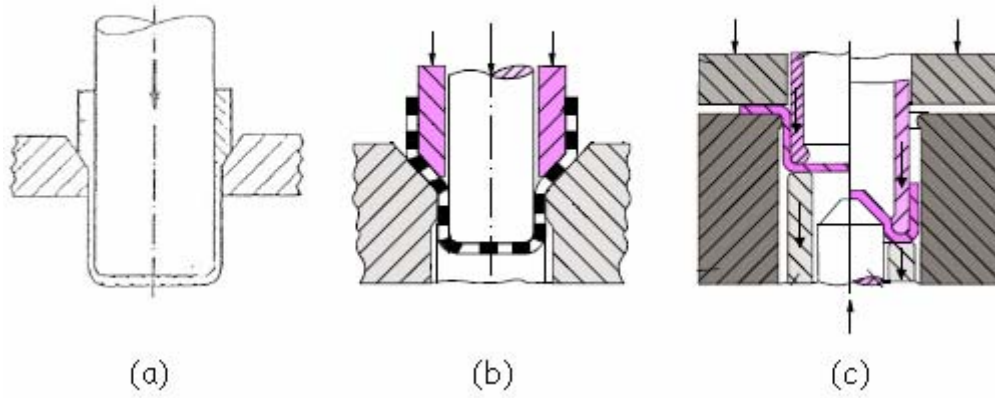


Şekil 4.11 Köşeli derin bir parçanın üç boyutlu deformasyon ağı görüntüsü (Zhu, 1999)

Derin çekme işleminde kalıp ile ıstampa arasındaki boşluk arttırılırsa, derin çekilen kabın kalınlığı flanşta, tabandaki kalınlıktan daha büyük olur. Bu da tekbiçim olmayan cidar

kalınlığına işaret eder. Kalınlık dağılımı düzgünlüğünün önemli olduğu parçalarda cidar ütüleme yada inceltmek çekme adlarıyla telaffuz edilen yöntem kullanılır (Şekil 4.12). Bu yöntemde ilk aşamada derin çekilen kap, ütüleme yüzüklerini içeren bir dizi derin çekme işlemlerinden geçirilerek cidar kalınlığı düzgünlüğünün hassaslığı sağlanır [7].

Her bir paso başına en yüksek ütüleme redüksiyonu  $[(t_0-t_1)/t_0]_{\text{maks}}$ , pekleşme üstelinin artmasıyla düşer, ancak ortalama plastik anizotropi katsayısındaki değişimlere, bu değer çok az duyarlıdır. Yüksek R değerleri ile, birincil çekme ve ütüleme aşamalarında daha az cidar kalınlaşması elde edilir (Kalpakjian ve Schmid, 2001).



Şekil 4.12 Çeşitli derin çekme yöntemleri; (a) cidar ütüleme, (b) doğrudan tekrar derin çekme, (c) ters tekrar derin çekme [7]

Tek aşama ile derin çekmenin çok zor olduğu ve istenen derinliğe ulaşamayan kaplar için tekrar çekme yada kademeli çekme olarak adlandırılan yöntem geliştirilmiştir (Şekil 4.12). Bu yöntemde kap, aralarında gerektiği takdirde tavlama işlemini de bulunduran birden fazla derin çekme işleminden geçer. Bir sonraki kademede bir önceki kademedен daima daha küçük çaplı ıstampa kullanılarak kap boyu da artırılmış olur. Yöntem, kabın kalıba yerleştirilme konumu bakımından, doğrudan veya ters derin çekme olarak ikiye ayrılır. İlk bakışta ters tekrar derin çekme, piyasada daha az yer tutar gibi zannedilse de bunun tersi doğrudur. Doğrudan tekrar derin çekmede sac malzeme, biri pot çemberi ve diğeri kalıp yuvarlatma yarıçaplarında bulunan iki aksi doğrultudaki geçiş bölgelerinden bükülür. Ters tekrar derin çekmede bu doğrultular aynıdır. Böylece daha az pekleşme, daha düşük ıstampa yükleri ve daha az cidar incilmesi elde edilir (Mielnik, 1991; Kalpakjian ve Schmid, 2001) [7].

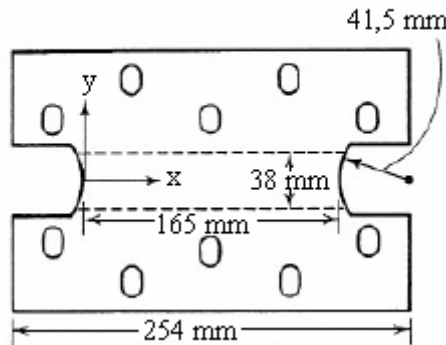
## 4.2 Çelik Saclara Uygulanan Şekillendirilebilirlik Deneyleri

Çelik saclara şekillendirilebilirliklerinin saptanması amacıyla uygulanan deneyler, temel özgül nitelik deneyleri ve benzeşim deneyleri olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Temel özgül nitelik deneyleri; tek eksenli çekme deneyi, düzlemsel gerinimli çekme deneyi, iki eksenli germe deneyi, kayma deneyi ve sertlik deneyleri gibi deneyler olup, elde edilen sonuçlar, malzemenin kalınlık değerlerinin, yüzey koşullarının ve belli işlem şartlarının değişiminden bağımsızdır. Benzeşim deneyleri ise; bükme, germe-bükme, germe, derin çekme, germe-derin çekme ve geri yaylanma gibi işleme özgü şekillendirilebilirlik ölçümü deneyleridir ve sonuçlar; sac kalınlığı, yüzey durumu, yağlama, takım geometrisi ve takım boyutları gibi etkenlere bağlı olarak elde edilirler.

Tek eksenli çekme deneyi, “mekanik özelliklerin elde edilmesi” bölümünde anlatıldığından bu kısımda açıklanmayacaktır. Yukarıda bahsedilen diğer deneylerden ise şekillendirilebilirlik açısından bazı önemli deneyler, bu bölümde anlatılmaktadır.

### 4.2.1 Düzlemsel Gerinimli Çekme Deneyi

Bilindiği gibi tek eksenli çekme deneyinde numune, büyük gerinimi artı değerli ve küçük gerinimi eksi değerli durumda koparak, sonuçlarını bu gerinim durumuna göre vermektedir. Bu tip deney numunesiyle küçük gerinimin sıfır olduğu düzlemsel gerinim durumundaki özelliklerin elde edilmesi olanaksızdır. Bu nedenle aynı çekme testi makinesinde, yalnızca çenelerin ve numune geometrisinin değiştirilmesiyle, istenen gerinim durumunun elde edilmesi amaçlanarak başarılmıştır.



Şekil 4.13 Düzlemsel gerinimli çekme deneyi numunesi (Taylor, 1988)

Numune, geometrisi Şekil 4.13'te açıkça görüldüğü gibi, standart tek eksenli çekme testi numunelerine göre daha kısa ve daha geniştir. Dikdörtgen sac çekme testinde, düzlemsel

gerinim koşullarına ulaşmak amacıyla boy/genişlik oranları 1/1, 1/2 ve 1/4 olan numuneler kullanılır. Bu numunelerin çeneğe bağlanan kısımlarına ek parçalar kaynaklanarak üçer katmanlı yapılıır. Böylece test sırasında, yüksek sıkıştırma kuvvetiyle herhangi kayma veya çarpılmalar önlenerek deney hatasız yapılmaktadır.

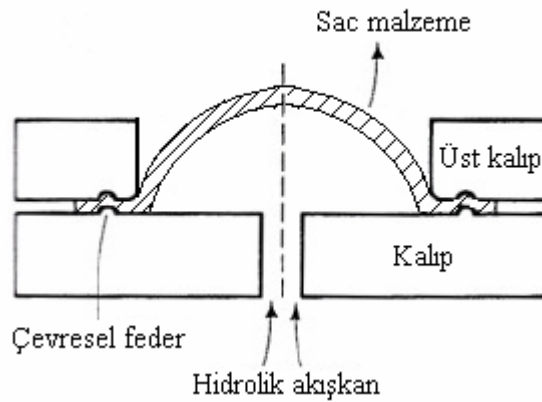
Boy/genişlik oranı 1/4 olan numune ile elde edilen en düşük küçük gerinim değeri -0,05 olarak ölçülmüştür. Bu da düzlemsel gerinim için gereken sıfır değerine çok yakındır (Taylor, 1988).

#### 4.2.2 İki Eksenli Germe Deneyi

Malzemelerin iki eksenli gerinim durumlarını belirlemede sıkça kullanılan yöntem hidrolik şişirme deneyidir. Bu deneyde metal sac, federli üst kalıp parçası ile çevresinden sıkıştırılmakta ve ıstampa yerine hidrolik basınç kullanılarak yalnızca bir tarafından şişirilmektedir (Şekil 4.14).

Çevresel kalıp parçaları kullanıldığından kubbe biçiminde deforme olmuş numune, şekil itibarıyla tam küreye yakındır. Bu bölgedeki gerilme-gerinim durumu, uzama ve akışkan basıncı eğrisinden bulunmaktadır. Test düzeneği bilgisayarla etkileşimli çalışabilmekte ve uzama-ölçerden gelen geri dönüşümlü bilgilerle akışkan basıncı ve gerinim hızı ayarlanabilmektedir. Kontrol, günümüzde video uzama-ölçer sistemi kullanılarak da gerçekleştirilebilmektedir (Banabic vd., 2000).

Istampa yerine akışkan kullanılması, sürtünmenin sıfıra yaklaşmasını ve şekillendirmenin dengeli iki eksenli çekme halinde ( $\varepsilon_\theta = \varepsilon_\phi = \varepsilon_t$ ) gerçekleşmesini sağlamaktadır.

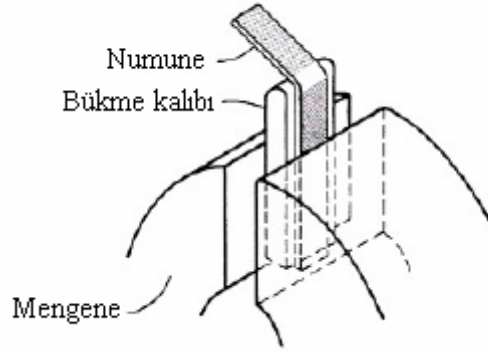


Şekil 4.14 Malzemenin iki eksenli gerinim durumunu yansıtan hidrolik şişirme deneyi

Hidrolik şişirme deneyi, sac şekillendirme yöntemlerinde sıkça karşılaşılan iki eksenli germe halindeki malzemenin temel özgül niteliklerini vermektedir. Bunun yanında, standart tek eksenli çekme testlerinden elde edilen gerinim düzeylerinden çok daha yukarılara çıkılarak, bu düzeylerdeki malzeme davranışını belirlemektedir. Ayrıca deney, malzemenin teorik akma davranışını incelemeye ve plastisite teorilerini doğrulamada sıkça başvurulan yöntemdir (Taylor, 1988; Lange, 1985).

#### 4.2.3 Bükme Deneyleri

Bükme deneyi bir benzeşim deneyidir ve uygulamada çok fazla çeşidi vardır. Bunlardan en basiti ve ASTM E 290 standardının öngördüğü yöntemde, metal sac numune ve bir bükme kalıbı, Şekil 4.15'te görüldüğü gibi bir mengeneye sıkıştırılır ve numune, kalıp üzerinden elle veya metal olmayan tokmak yardımıyla bükülür.



Şekil 4.15 ASTM E 290 standardına göre basit bükme deneyi (Taylor, 1988)

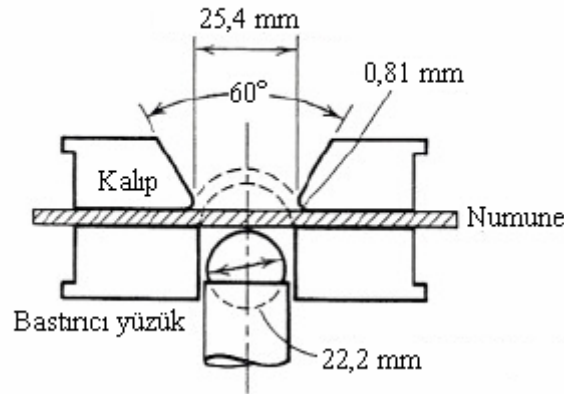
Eğer numune kırılma yada çatlama olmadan  $180^0$  bükülüyorsa, deney, bükme kalıbı yuvarlatma yarıçapının küçültülmesiyle tekrarlanır. Bu deneyde numune genişliğinin kalınlığa oranı, 8/1'den büyük olmalıdır ve numune eğer bir soğuk şekillendirme yöntemiyle çıkarılıyorsa kenarları talaş kaldırılarak düzeltilmelidir. Ayrıca numune alınırken haddeleme yönüne göre doğrultusuna dikkat edilmelidir, çünkü bu, numunenin çatlamaya karşı direncini etkiler (Taylor, 1988).

Mengeneyle bükmenin haricinde, en sık karşılaşılan bükme deneyi de TS 205 standardında belirtilen bükerek katlama deneyidir. Bu deney yönteminde 3 mm'den düşük kalınlığa sahip saclar kendi üzerine, 3 mm'den büyük kalınlıklardaki saclar ise bir blok üzerine, kolları açık ve birbirlerine paralel olacak şekilde  $180^0$  bükülürler.

Bükerek eğmede esas amaç, malzemeyi çatlak oluşana dek, tek yönde eğmektir. Süneklik dereceleri iyi olan malzemeler  $180^{\circ}$  katlanmalarına rağmen çatlama göstermezler. Bu tip malzemelerin deney sonucunda  $180^{\circ}$  katlanmaya rağmen çatlamanın görülmediği belirtilir. Daha erken açılarda çatlama gözlemlenen numunelerde ise kıstas olarak eğilme açısı kullanılır [9].

#### 4.2.4 Germe ile Şekillendirme Deneyleri

Germe ile şekillendirme deneyleri yada diğer adıyla çökertme deneyleri, sac malzemenin gerilebilirliğini belirlemede yaygın olarak kullanılan deneylerdir. Erichsen ve Olsen deneyleri başlıca çökertme deneyleridir. Bu deneylerin amacı, sac numuneyi sertleştirilmiş çelikten küresel uçlu ıstampa ile boyunlanma yada yırtılma oluşana dek gerdirerek, ortaya çıkan kabın yüksekliğini ölçmektir. Ölçülen bu değer, -mm- olarak Erichsen veya Olsen değeri olup, saclar için bir şekillendirilebilme ölçütüdür.



Şekil 4.16 Olsen çökertme deney düzeneğinin elemanları ve boyutları (Taylor, 1988)

Olsen ve Erichsen deneylerinin farkı, yalnızca düzenek boyutlarından ileri gelir. Olsen çökertme deneyinin boyutları Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Erichsen deneyinde ise düzenek boyutları; küresel ıstampa ucu çapı için 20mm, kalıp iç çapı için 27 mm ve kalıp profili yuvarlatma yarıçapı için 0,75mm olarak verilmektedir (Taylor, 1988).

Erichsen deneyinde bastırıcı kuvveti en az 1000 kgf olmalıdır ve bu değer daha düşük değerlere kesinlikle inmemelidir. ıstampa hızı 5-20 mm/d arasında değişmektedir. Olsen deneyinde ise ıstampa hızı 0,08 - 0,40 mm/sn olarak değişmektedir (Taylor, 1988) [9].

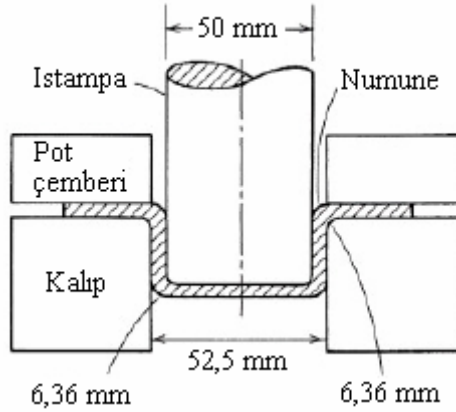
Bu iki deney yöntemiyle elde edilen çökertme yükseklik değerleri, çeşitli malzemeler arasında biçimlendirilebilirlik açısından karşılaştırma yapılmasını sağlasa da kullanılan takım ve kalıp

düzeneklerinin küçük boyutlarda olması ve böylece numune sıkıştırma yağlama zorluklarının yaşanması nedeniyle doğruluk değerleri üst düzeylerde değildir.

Hecker adlı araştırmacı, Erichsen ve Olsen deneylerini geliştirmiş ve yağlayıcı kullanmadan daha büyük çaplı takım ve federli kalıp kullanarak (takım ucu yarıçapı 50,8 mm) malzemelerin gerilebilirliklerini ölçmüştür (Banabic vd., 2000).

#### 4.2.5 Derin Çekme Deneyleri

Derin çekilebilirliğin ölçümü için kullanılan benzeşim deneylerinden en yaygını Swift deneyidir. Bu deneyde, değişen çaplarda dairesel kesilen numuneler pot çemberi ile tutulurlar ve düz dairesel uçlu ıstampa ile derin çekilirler. Swift deneyi için gerekli ölçüler Şekil 4.17'den görülmektedir.



Şekil 4.17 Düz silindirik ıstampa ile Swift deney düzeneğinin elemanları ve boyutları (Taylor, 1988)

Deney sonuçlarına yağlayıcı ve pot çemberi kuvveti etki ettiğinden, bu hususta standardizasyon sağlayabilmek için Chung ve Swift adlı araştırmacılar, pot çemberi basıncını, akma dayanımının % 0,5 - 1'i arasında önermektedir. En sık kullanılan yağlayıcılar ise polietilen tabaka veya SAE 20 yağlayıcılarıdır (Taylor, 1988).

Bu deneyden elde edilen derin çekilebilirlik değeri, sınır derin çekme oranı (SDÇO) veya redüksiyon yüzdesidir. Sınır derin çekme oranı, daha önce de bahsedildiği gibi, derin çekilebilen en yüksek taslak çapının ( $D_{maks}$ ), ıstampa çapına ( $d$ ) oranıdır.

En yüksek taslak çapının bulunması amacıyla numunelerin çaplarının, her bir numune için malzemeler yırtılana kadar kademeli olarak arttırılması gerektiği için, deney süresi uzayacağından 4.18 eşitliği ile belirtilen ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Bu eşitlikte  $F_y$

yırtılmanın meydana geldiği kuvvet,  $F_{maks}$  en yüksek kuvvet ve  $d_k$  kalıbın delik çapıdır (Banabic vd., 2000).

$$D_{maks} = \frac{F_y}{F_{maks}}(D - d_k) + d_k \quad (4.18)$$

Redüksiyon yüzdesi değeri (  $RY$  ) ise 4.19 eşitliği ile elde edilir (Taylor, 1988).

$$RY = 100 \cdot \frac{(D - d)}{D} \quad (4.19)$$

Kap yüksekliği yaklaşık olarak 4.20 eşitliğindeki gibidir.

$$h = \frac{(D^2 - d^2)}{4d} \quad (4.20)$$

#### 4.2.6 Germe-Derin Çekme Deneyleri

Dikdörtgen prizma şeklindeki parçalarda veya köşeli karmaşık çoğu parçada, germe ve derin çekme işlemleri beraber oluşurlar. Bu tür parçaların şekillendirilebilirliklerinin saptanabilmesi için germe ve derin çekilme kabiliyetlerinin belirlenmesi ve birbirlerine oranlanması gerekir. Bu amaçla en çok kullanılan iki yöntem (küresel uçlu ıstampa ile) Swift deneyi ve Fukui konik kap deneyidir.

Küresel uca sahip ıstampalı Swift deneyi, bir önceki konuda bahsedilen Swift derin çekme deneyinin benzeridir, ancak bu deneyde ıstampa ucu yarıküresel biçimdedir. Bu biçim sayesinde, kap cidarı oluşturmak için flanşın çekilmesine ek olarak, numunenin ortasında germe işlemi de meydana gelir (Lange, 1985).

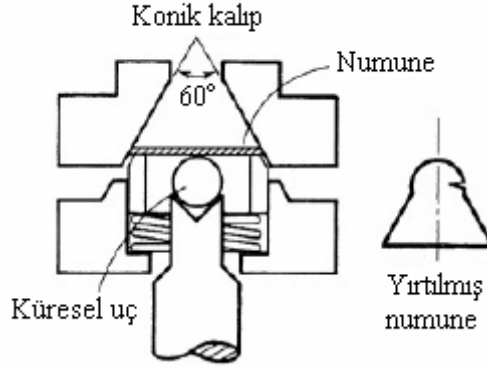
Swift germe-derin çekme deneyinde boyutlandırma iki çeşittir. İlkinde; yarıküresel ıstampa çapı 50 mm, numune çapı 127 mm ve pot çemberi kuvveti 490 N civarında olup, ikincisinde; yarıküresel ıstampa çapı 65 mm, numune çapı 165 mm ve pot çemberi kuvveti de yaklaşık 981 N olarak önerilmektedir. Her iki tip boyutlandırmada da Swift deneyi 1 mm/s hızında uygulanır (Taylor, 1988).

Bu deney, gözle görülür bir çatlak başlangıcı olduğunda veya ıstampa yükünde bir düşme meydana geldiğinde sonlandırılır. Deney sonuçlarının çoklu regresyon analizleri, yırtılmadaki kap yüksekliğinin artan  $r_m$ ,  $n$  ve sac kalınlığı değerleriyle arttığını göstermiştir.

Fukui konik kap deneyinde kullanılan deney düzeneği elemanları ve yırtılmış deney numunesi



Şekil 4.18’de görülmektedir. Bu deneyde ıstampanın küresel ucunun çapı, sac kalınlığına göre 12,5 - 27 mm arasında değişmekte ve kalıbın konik deliğinin ağız çapı ise yine sac kalınlığına bağlı olarak, 9,4 - 32 mm arasında değişmektedir. Taslak numune çapları 23 – 79 mm arasındadır. Numune yalnızca kalıba bakan kısmından yağlanır (Taylor, 1988).



Şekil 4.18 Fukui konik kap deney düzeneğinin elemanları ve yırtılmış numune (Taylor, 1988)

Fukui konik kap deneyinin sonucunda, yırtılma anında konik kısmın taban çapının taslak numune çapına oranı olan Fukui konik kap değeri elde edilir. Çatlağın oluşmasından sonra konik bölümün çapı değişmeyeceğinden, deneyin sonlandırılma anının çok hassas olmasına gerek yoktur.

Fukui konik kap değeri olarak boyunlanma anındaki kap derinliği, çap oranının yerine kullanılabilir (Banabic vd., 2000; Lange, 1985).

### 4.3 Şekillendirme Sınır Diyagramı

Karmaşık şekilli parçaların teorik olarak şekillendirilebilirliklerinin saptanmasının zor olması, tek eksenli çekme deneyinin yada uygulanan Erichsen, Olsen, Swift gibi benzeşim deneylerinin sınırlı sayıda gerinim durumunun analizine olanak tanınması ve bu deneylerin tam olarak malzemelerin şekillendirilme kabiliyetlerini yansıtmamaları nedenleriyle araştırmacılar, sac malzemelerin çeşitli gerinim durumlarını yansıtan şekillendirme sınır diyagramlarını geliştirmişlerdir.

Şekillendirme sınır diyagramları, sac malzemelerin gerinim analizlerinden oluşturulan şekillendirme sınır eğrilerinden ibarettir. Bu eğrilerin deneysel olarak elde edilmesinde, sınır gerinimlerin ölçümü için, sac levha yüzeyine şekillendirmeden önce kimyasal dağlama, elektro-dağlama yada fotoğraf baskısı gibi özel tekniklerle dairesel bir ağ görüntüsünün

çizilmesi gerekir. Deney parçasındaki gerinim derecelerinin karşılaştırılması için daireler mümkün olduğunca küçük çaplı olmalıdır (araştırmacılar en uygun daire çapını 2,54 mm olarak önermektedir) (Granzow, 1990). Dairesel ağların yüzeye uygulanmasından sonra, yağlama yapılmadan yırtılma görülene kadar sac şekillendirilerek, incelme ve yırtılma oluşan bölgelerde dairelerin şekli incelenir.

Şekillendirmeden sonra daireler elipse dönüşmektedir (Şekil 4.19). Bir elipsin büyük eksenini  $d_1$ , küçük eksenini  $d_2$  ve deformasyondan önceki daire çapını  $d_0$  ise şekil değişiminden sonra oluşan büyük asal gerinimler ( $e_1$  ve  $\varepsilon_1$ ) ve küçük asal gerinimler ( $e_2$  ve  $\varepsilon_2$ ) 4.21-4.24 eşitlikleri ile hesaplanır (Banabic vd., 2000).

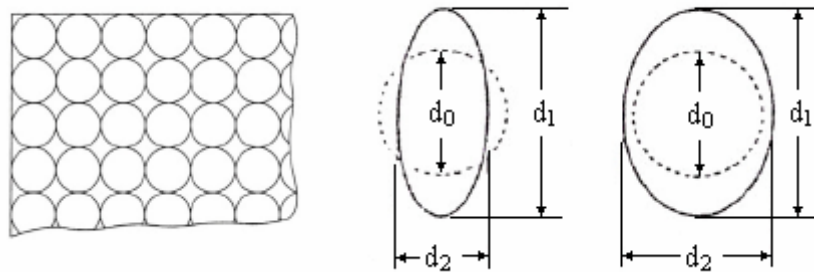
$$e_1 = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \quad (4.21)$$

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad (4.22)$$

$$e_2 = \frac{d_2 - d_0}{d_0} \quad (4.23)$$

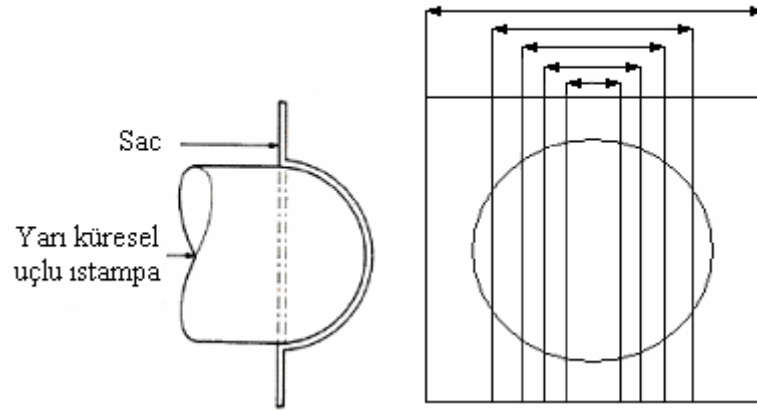
$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right) \quad (4.24)$$

Bu gerinimlerden  $e_1$  ve  $\varepsilon_1$  daima artıdır;  $e_2$  ve  $\varepsilon_2$  ise artı veya eksi değerlikli olabilmektedir.  $e_1$  ve  $e_2$ 'nin yerine  $\varepsilon_1$  ve  $\varepsilon_2$ 'nin kullanımı daha uygun sonuçlar vermesine rağmen, çoğu araştırmacı  $e_1$  ve  $e_2$ 'yi kullanmaktadır.



Şekil 4.19 Şekillendirme öncesinde yüzeye uygulanan dairesel ağ görüntüsü ve deformasyon sonrasında bunların dönüştükleri elipslerin boyutları

Tek eksenli çekme yöntemi ile şekillendirmede,  $e_1$  artı ve  $e_2$  eksi değerlerde olup bu nedenle sacın yüzeyindeki gerinim durumu çekme-basma olmaktadır. Malzeme gererek şekillendirilirse bu sefer büyük ve küçük eksenlerin her ikisi de ilk daire çapından büyük olacaktır. Bu durumda da çekme-çekme gerinimleri söz konusudur. Büyük gerinimin artı, küçük gerinimin sıfır olduğu durum da bir gerinim halidir ve bu duruma düzlemsel gerinim hali denilmektedir. Büyük gerinimlerin bir eksen takımında ordinata, küçük gerinimlerin de apse işaretlenmesiyle gerinim durumlarının yerlerinin gösterilmesi mümkün olmaktadır.



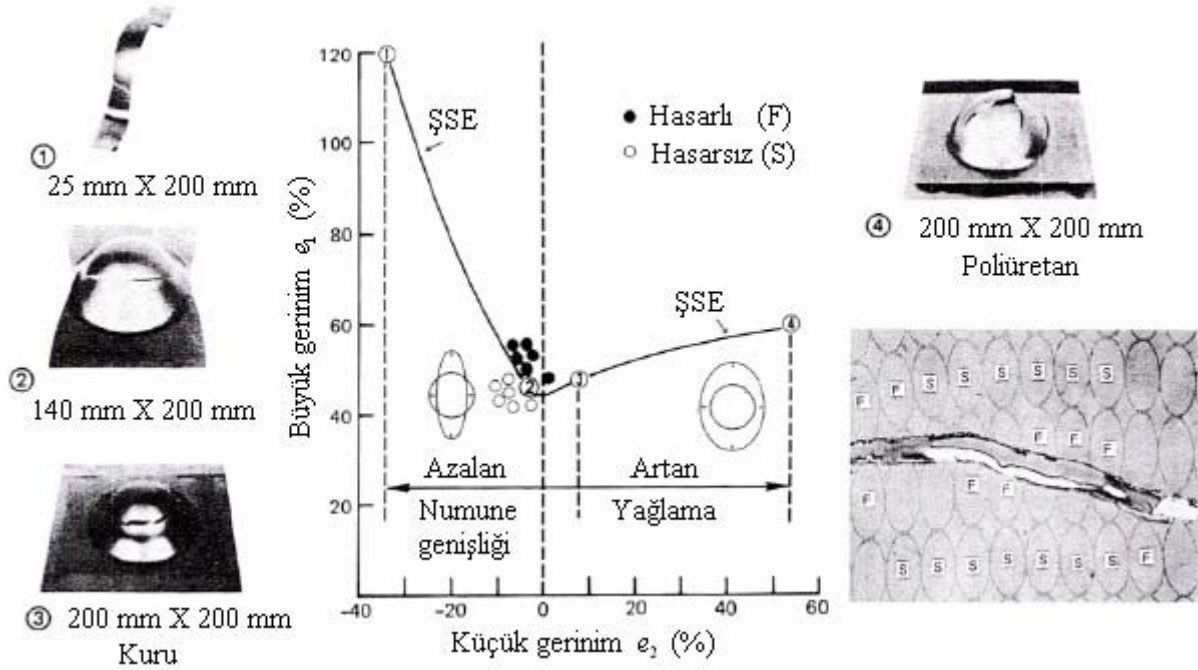
Şekil 4.20 Değişik endeki sac numunelerin şişirilme deneyi

Şekillendirme sınır eğrilerinin oluşturulması için gerekli olan gerinim durumlarının tespiti için kullanılan en yaygın yöntem, Hecker adlı araştırmacının 1975 yılında geliştirdiği, yarıküresel uçlu ıstampa ile sac numunenin deforme edilmesi yöntemidir. Bu yöntemde yukarıda bahsedilen değişik gerinim durumlarını ve gerekli  $e_1 - e_2$  noktalarını diyagram üzerinde elde etmek için, deney numunelerinin yağlayıcı cinsleri ve genişlikleri değiştirilir (Şekil 4.20). Çünkü kare bir sacın şişirilmesinde eşit iki eksenli germe söz konusu iken, küçük enli bir örnekte germe tek eksenli hale yakındır. Bu amaçla, 200 mm'lik sabit boy değerinde sac numunelerin genişlikleri 25 mm'den 200 mm'ye kadar çeşitlendirilmiş ve böylece 25 mm genişlikteki numuneyle çekme-basma durumu elde edilirken 200 mm x 200 mm boyutundaki numuneyle çekme-çekme durumunun eldesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, elde edilemeyen tam dengeli iki eksenli gerinim durumunun oluşması sırasında ortaya çıkan hatanın giderilmesi için yağlayıcının etkisi şu sıralamayla arttırılmıştır (Lange, 1985; Taylor, 1988);

- 0,08 mm kalınlığında polietilen levha ve mineral yağ kombinasyonu,

- 1,6 mm kalınlığında neopren levha ve mineral yağ kombinasyonu,
- 6,4 mm'den 63,5 mm'ye kadar değişen kalınlıklarda poliüretan tabaka.

Bu uygulamalarla yapılan bir deney serisi nihayetinde elde edilen  $e_1$  ve  $e_2$  değerlerinin keşim noktaları diyagramda işaretlenerek Şekil 4.21'deki gibi şekillendirme sınır eğrileri oluşturulur.



Şekil 4.21 Şekillendirme sınır diyagramının dört adet deney numunesi ile uygulanması (Kalpakjian ve Schmid, 2001; Mielnik, 1991)

Şekil 4.21'de de gösterilen yırtılma ve boyunlanmanın gerçekleştiği bölgenin civarında, ölçülecek elipslerin nerelerden alınacağı hususunda aşağıda sıralanan üç değişik yol izlenebilir;

- İçlerinden çatlak geçen elipslerin ölçülmesi,
- Çatlaktan etkilenmiş elipslerin ölçülmesi,
- Çatlaktan etkilenmeyen ve kabul edilebilir deformasyon görmüş elipslerin ölçülmesi.

Böylece ortaya çıkan birbirlerine paralel eğriler, bir şekillendirme sınır bandı oluşturmaktadır. Bu bandın altında kalan alan, şekil değişimleri güvenli bölgeyi, üstündeki deformasyonlar ise kusurlu bölgeyi belirtmektedir.

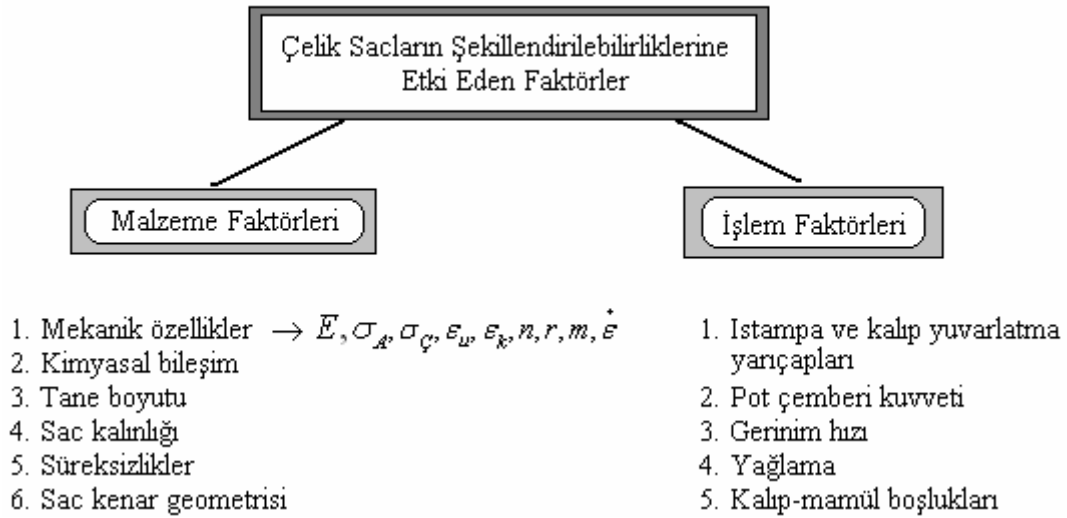
Bazı noktalarda gerinimlerin bölgeselliği veya büyüklüğü, sac parçayı etkileyen bütün

faktörlerin göz önüne alınması ile saptanır. Bu etkenler; takım geometrisi, yağlama ve malzeme özellikleridir. Bu nedenle şekillendirme sınır eğrisinin durumu, malzeme ve işlem faktörlerini de içeren ve kullanılan sac metale ait bir niteliktir. Tüm bu etkenler şekillendirme sınır eğrisinin düzeyine etki eder. Eğri yukarıya doğru kaydıka malzemenin şekillendirilebilirliği yükselir.

Şekillendirme sınır diyagramı üzerinde  $e_2$ 'nin sıfır olduğu ve  $e_1$ 'in belli bir değerde olduğu nokta, düzlemsel gerinim noktasıdır ve burada okunan “ $e_1$ ” düzlemsel gerinim değeri,  $\text{SSD}_0$  olarak gösterilerek çoğu sac malzemenin şekillendirilebilirliklerinin karşılaştırılmasında tek başına bir ölçüt olarak kullanılmaktadır.

#### 4.4 Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinin Şekillendirilebilirliklerine Etkileri

Çelik sacların şekillendirilebilme yeteneklerine etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar, Şekil 4.22’de de gösterildiği gibi malzeme ve işlem faktörleri olarak iki gruba ayrılabilirler. Bunlardan işlem faktörleri, saca uygulanacak zorlanmanın cinsini belirlerken, malzeme faktörleri ise bu zorlanmaya karşı dayanabilecek malzemenin cinsini belirler.



Şekil 4.22 Çelik sacların şekillendirilebilirliklerine etki eden faktörler

İşlem faktörlerinden kalıp ve ıstampa köşe yuvarlatma yarıçapları, sacların derin çekilebilirliğini doğrudan etkilemektedir. İstampa köşe yuvarlatmasının çok küçük tutulması, sürtünmeden ve pekleşmeden dolayı, temas ettiği sac bölgesini inceltmekte ve derin çekme oranını düşürmektedir. Kalıp ağzı köşe yuvarlatmasının da küçük tutulması, temas ettiği sac

bölgesinde aşırı bükmeye sebep olur ve malzemenin bu bölgede pekleşmesine neden olarak, kap cidarının alt bölgesindeki incelme miktarını arttırmaktadır. Aksine, bu yuvarlatma yarıçapının yüksek tutulması ise sacın kırışma eğilimini arttırmaktadır (Lange, 1985; Taylor, 1985).

İşlem faktörlerinden pot çemberi kuvveti veya basıncının sac parçada kırışıklık ve yırtılma oluşumuna etkisi büyüktür. Düşük tutulduğunda kırışıklık, yüksek tutulduğunda yırtılma oluşacağından, bu basıncın en uygun düzeyde tutulması gerekir (Çapan, 1999).

Gerinim hızı da şekillendirme operasyonlarında bir işlem değişkenidir ve yalnızca gerinim hızına duyarlılık üstelini değil, başka birçok mekanik özelliği, oluşturduğu ısınma nedeniyle etkilemektedir. Çelik saclarda gerinim hızının artması akma dayanımını artırır, pekleşme üsteli ve anizotropi katsayısını azaltır (Banabic vd., 2000).

Yağlama şartları da bir işlem faktörü olarak şekillendirilebilirliğe etki eder. Uygun yağlayıcı, sürtünmeyi kontrol altında tutar, takım aşınmalarını azaltır, aşırı ısınmaların önüne geçer ve sac üzerinde tekbiçim bir gerinim dağılımı sağlar. Böylece yağlayıcının optimum şekilde kullanımı, şekillendirilebilirliği önemli ölçüde arttırmaktadır (Lange, 1985).

Son olarak işlem faktörleri arasında, kalıp-mamul boşluklarının ayarlanması da şekillendirilebilirliği değiştiren etkenlerden sayılabilir. Bu aralık, derin çekme işlemleri sırasında cidarın ütülenme derecesini belirler (Mielnik, 1991).

Diğer taraftan, şekillendirilebilirliği etkileyen malzeme faktörleri arasında ise tane boyutu, sac malzemedeki optimum düzeyde seçilmesi gereken bir büyüklüktür. Tane boyutunun küçülmesi, malzemenin dayanım değerinin artmasına ve plastiklik özelliğinin düşmesine neden olduğundan, şekillendirilebilirliği azaltmaktadır. Tane boyutunun artması ise sac yüzeyinde portakal kabuğu görünümündeki yüzey bozukluklarına neden olduğundan en uygun düzeyde seçilmelidir (ASTM 7 veya 8 tane büyüklüğü).

Bir malzeme faktörü olan sac kalınlığının artması, şekillendirilebilirliği arttırmaktadır. Bunun nedeni, yüksek gerinim derecelerinin ortaya çıkması sonucu, kesitte daha yüksek incelme gerinimlerine olanak tanınmasıdır. Sac kalınlığının şekillendirilebilirliğe etkisi, şekillendirme sınır diyagramlarından, sınır eğrilerin yükselmesine sebep olması şeklinde görülebilmektedir (Taylor, 1985).

Sac kenar geometrisi, çapak ve sertleşmiş bölgeler barındırma bakımından sacların şekillendirilebilirliğini azaltan malzeme faktörleridir. Artan çapak boyları, malzemenin

şekillendirme derecesini düşürmektedir.

Süreksizlikler ve kimyasal bileşim etkenleri, özellikle malzemenin mekanik özelliklerini ve dolaylı olarak da şekillendirilebilirliğini etkileyen malzeme faktörleridir. Süreksizliklerin başında kalıntılar gelmektedir. Kalıntıların varlığının artmasıyla, sac malzemenin kopma dayanımı ve sünekliği düşmektedir (Lange, 1985; Banabic vd., 2000).

Bütün bu sayılan faktörlerin yanında, şekillendirilebilirliği etkileyen en önemli etkenlerden bir grup hiç şüphesiz malzemenin mekanik özellikleridir. Daha önce sıralanıp açıklanan mekanik özelliklerin, bu kısımda, çelik sacların şekillendirilebilirliğine etkisi incelenmektedir.

#### **4.4.1 Elastiklik Modülünün Etkisi**

Elastiklik modülü, düşük gerinimlerdeki şekillendirme işlemlerinde şekil çarpıtmaya ve geri yaylanmaya etki eder. Özellikle bükme ve diğer şekillendirme işlemlerinde ortaya çıkabilen geri yaylanma, büyük ölçüde elastiklik modülü ve elastik bölgedeki gerinimlerle ilgilidir. Şekillendirme derecesi ve sac kalınlığı sabit kalmak koşuluyla, malzemenin elastiklik modülünün artmasıyla geri esneme miktarı azalmaktadır. Akma dayanımının yaklaşık 140 MPa ve elastiklik modülünün 210.000 MPa kabul edildiği bir düşük karbonlu çelik sacın şekillendirilmesi esnasında, elastiklik modülü 70.000 MPa ve akma dayanımı bahsedilen çelik saca yakın olan bir alüminyum alaşımına göre yaklaşık üç kat daha az bir geri esneme göstermektedir (Newby, 1978).

#### **4.4.2 Akma Dayanımının Etkisi**

Kalıcı şekil değişimlerinin başladığı andaki gerilme değeri olan akma dayanımı, şekillendirilebilirlik açısından önemlidir. Şöyle ki, akma dayanımının 240 MPa'ın üzerinde olduğu düşük karbonlu çelik sac malzemelerin, nispeten düşük elastiklik modülleri ile beraber, şekillendirme işlemlerinde yüksek oranda geri esneme ve çatlama eğilimleri belirginleşmektedir. Bununla beraber, akma dayanımının artması kalıp aşınmasını hızlandırır.

Düşük karbonlu çelik sacların, akma dayanımlarının 140 MPa'ın altında olması, geri yaylanma oranını azaltsa da, şekillendirme sırasında meydana gelen gerilmelere karşı koyamayacağından pek uygun görülmemektedir (Granzow, 1990).

Akma dayanımının şekillendirme sınır diyagramına etkisi hususunda, Ghosh (1975) adlı araştırmacının 1,02 mm kalınlıkta ve farklı akma dayanımlarındaki çelik saclara uyguladığı deneyler örnek gösterilebilir. 206,9 MPa akma dayanımına sahip çelik sacın  $\dot{\epsilon}_{SD0}$  değeri (düzlemsel gerinim durumu yani  $e_2$ 'nin sıfır olduğu durumdaki  $e_1$  değeri) % 38 iken 965,3

MPa akma dayanımındaki çelik sacın  $\text{SSD}_0$  değeri % 12'lere düşmektedir (Banabic vd., 2000).

#### 4.4.3 Çekme Dayanımının Etkisi

Malzemenin çekme dayanımı şekillendirilebilirlik açısından diğer parametreler kadar önem arz etmemektedir. Ancak genelde çekme dayanımının artmasıyla sünekliğin azaldığının gözlemlendiği söylenebilir. Çekme dayanımı ile sertlik değeri arasında da yaklaşık bir bağıntı söz konusudur ( $S_u [MPa] = 3,5BSD$ ). Bazı araştırmacılar, çekme dayanımı / akma dayanımı oranı ile şekillendirilebilirliğin değişimini incelemişlerdir. Bu oranın az çok malzemenin pekleşme üsteliyle paralellik gösterdiği saptanmış ve artan değerlerin, sac malzemelerin şekillendirilme kabiliyetini olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir (Granzow, 1990).

#### 4.4.4 Uzamanın Etkisi

Üst akma noktasıyla başlayan ve yükün monoton bir şekilde artmaya başlamasından hemen öncesine kadar meydana gelen uzamaya akma uzaması denilmektedir. Tavlanmış bir çelik sac malzemenin çekme deneyinde ortaya çıkan akma uzaması, özellikle düşük gerinimlerdeki şekillendirme işlemlerinde üniform olmayan deformasyona sebep olur. % 1,5 gibi değerlere ulaştığında, tüm parça üzerine yayılan, Lüders bantları yada damarlanma olarak adlandırılan düzensiz yüzey izleri oluşmaktadır. Bu bozukluklara sahip parçalar, görünür dış yüzeylerde kullanıldığı takdirde, sorun teşkil etmektedir.

Kopma noktasında mühendislik eğrisinden okunan uzama değeri de kopma veya diğer adıyla toplam uzamadır. Kopma uzaması, metal sac şekillendirilebilirliğinin yaklaşık bir göstergesi olarak geniş çaplı kullanılmaktadır. Ancak bütün koşullar altında hiçbir özelliğin tek başına güvenilir bir şekilde şekillendirilebilirliğin göstergesi olamayacağı açıktır.

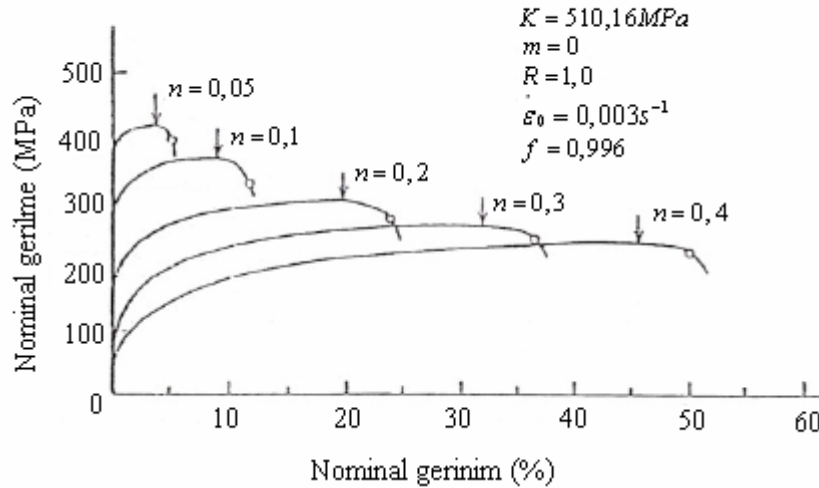
Tek eksenli çekme deneyinden elde edilen kopmadaki uzama yüzdesi, üniform uzamanın ve boyunlanma sonrası meydana gelen uzamanın ( $e_{pu}$ ) toplamıdır.  $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$  eşitliğini sağlayan bir malzemede, gerçek üniform gerinim  $\varepsilon_u = \ln(1 + e_u) = n$  olmaktadır, yani üniform gerinim deformasyon sertleşmesi üsteline eşittir. Bu değer yüksek olması, deformasyonlarda boyun oluşumunun daha geç ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Boyunlanma sonrası uzama ise daha çok malzemenin  $n$  değeri ile ilgili olup, malzemenin gerinim hızına karşı duyarlılığı arttıkça, boyunlanma sonrası gösterdiği uzama da artmaktadır. Sonuçta her iki uzama alanının büyümesi, malzeme sünekliğindeki ve şekillendirilebilirliğindeki artışın en büyük



göstergesi olmaktadır. Ancak, yerel boyunlanmanın hataya sebebiyet verdiği çelik saclar için, üniform uzama, şekillendirilebilirliğin doğru bir göstergesi olmayabilir. Bu hususta toplam uzamanın ölçüt alınması daha güvenilir sonuçlar doğurur (Chen, 1997; Granzow, 1990).

#### 4.4.5 Pekleşme Üstelinin Etkisi

Çekme testlerinden hesaplanan pekleşme üsteli sac malzemelerin pekleşme kapasitelerini yansıtır. Bu nedenle sac malzemelerin şekillendirilebilirliği açısından çok önemli bir kıstastır. Pekleşme üstelinin artmasıyla malzemenin sünekliği ve iki eksenli gerilebilirliği artmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi Holloman denkleminden pekleşme üsteli üniform uzamaya eşit olmaktadır. Dolayısıyla pekleşme üstelinin yüksek olması, üniform uzama bölgesinin yüksek olması, diğer bir deyişle, boyunlanmanın geç başlaması demektir. Bunun nedeni, yerel olarak plastik şekil değişimine uğrayan bir bölgede, oluşacak pekleşmeden dolayı dayanım artacağından, bu bölgedeki şekil değişiminin durması ve parçanın diğer komşu bölgelerinde plastik şekil değişiminin başlamasıyla daha fazla tekbiçim uzama elde edilmesidir (Şekil 4.23). Sonuç olarak sac malzemede hasar daha geç olmaktadır (Mielnik, 1991; Lange, 1985; Taylor, 1985).

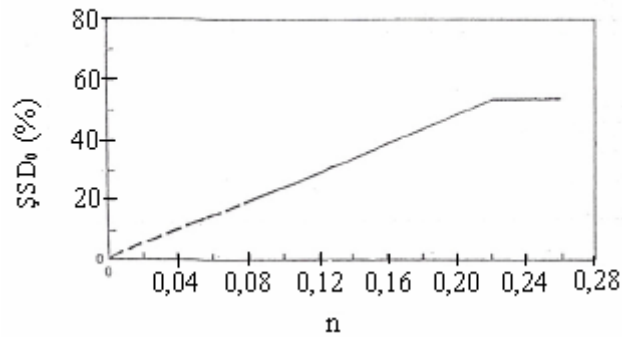


Şekil 4.23 Malzemenin belirtilen özelliklerinin sabit kalması koşuluyla, pekleşme üstelinin artımı ile gerilme-gerinim eğrisinin değişimi (Mielnik, 1991)

Pekleşme üstelinin şekillendirme sınır diyagramına etkisi Şekil 4.24'ten görülmektedir. Pekleşme üstelinin artmasıyla  $\dot{\epsilon}_{SD0}$ , yani düzlemsel gerinim durumunda büyük gerinim değeri artmakta, dolayısıyla şekillendirme sınır eğrisinin düzeyi yükselmekte ve şekillendirilebilirlik artmaktadır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta,

pekleşme üstelinin 0,23 değerinden yukarılarda,  $\text{SSD}_0$ 'a etkisinin olmadığıdır (Llewellyn ve Hudd, 1998).

Pekleşme üstelinin germe ile şekillendirmeye etkisi, derin çekme işlemine olan etkisinden daha çoktur.  $n$  değerinin artmasıyla gerilebilirlik önemli ölçüde artmaktadır. Derin çekme konusunda Hosford (1983) yürütmüş olduğu araştırmada,  $\eta = 0,75$  deformasyon verimliliği altında ve değişik gerilme oranlarında  $n$  değerinin sınır derin çekme oranına etkisini incelemiştir. Bu çalışmada pekleşme üstelinin derin çekmeye etkisinin oldukça az olduğu ve özellikle  $0,2 < n \leq 0,5$  değerlerinde belirginleştiği görülmektedir (Banabic vd., 2000).



Şekil 4.24 Pekleşme üstelinin  $\text{SSD}_0$  değerine etkisi (Llewellyn ve Hudd, 1998)

Şekillendirilme amaçlı kullanılan düşük karbonlu çeliklerde pekleşme üsteli 0,22 civarındadır. Daha yüksek değerler sünekliğin yada tek yönlü germe kabiliyetinin yükseltildiğinin göstergesidir. Özellikle şekillendirme amaçlı üretilmemiş bazı düşük karbonlu sıcak çekilmiş çelik saclarda pekleşme üsteli 0,10'a kadar düşebilir, ancak şekillendirme amaçlı çelik sacların  $n$  değerleri 0,18'den başlar. Şekillendirmeye uygun çelik saclara ASTM standartları açısından bakılırsa; ticari kalitelerin (CQ)  $n$  değerleri 0,20; derin çekme kalitesinde (DQ) 0,24; özel dinlendirilmiş derin çekme kalitesinde (DQSK) 0,22 ve arayer boşluk elementleri içermeyen çelik saclarda (IF) ise 0,24 civarındadır (Granzow, 1990).

Pekleşme üsteli, çeliğin yaşlanmasıyla ve soğuk deformasyonla düşer, tavlama ile artar. Tane boyutunun artması  $n$  değerini artırır, ancak portakal görünümlü yüzey oluşturması nedeniyle önerilmez.

#### 4.4.6 Plastik Anizotropi Değerinin Etkisi

Plastik anizotropi değeri, sacların derin çekilmesini önemli derecede etkilediğinden, derin

çekilebilirlik ölçütü olarak ele alınmaktadır. Ortalama dikey anizotropi parametresi  $\bar{r}$ 'nin 1'den büyük olması istenir. Başka bir deyişle, çelik sacın kalınlık yönündeki gerinim direncinin, genişlik yönündeki gerinim direncinden büyük olması istenmektedir. Böylece malzemenin kalınlığında fazla incelme olmadan, gerinimin büyük oranda sac yüzey düzleminde oluşmasını ve şekillendirmenin başarıyla sonuçlandırılmasını sağlamak amaçlanır (Granzow, 1990).

Plastik anizotropi değeri, tekrar derin çekme işlemlerini de olumlu yönde etkilemektedir. Çünkü kabın çapındaki redüksiyon, flanş deformasyonları ile ilgilidir. Yüksek  $r$  değerleri ile, kesitte kalınlaşma ve ütülemedeki redüksiyon oranı azalmaktadır (Lange, 1985).

Kasper (1969) adlı araştırmacı, plastik anizotropi değerinin derin çekmeye ve gererek şekillendirmeye etkisini birtakım benzeşim deneyleri ile çözüme yoluna gitmiştir. Sacların kopmada ortalama uzama yüzdesi ( $e_f^-$ ) ve ortalama dikey anizotropi değerinin ( $\bar{r}$ ) 4.25, 4.26 ve 4.27 eşitliklerinde kullanılmasıyla, Olsen çökertme değerinin (OÇD), Swift sınır derin çekme oranının (SDÇO), ve Fukui konik kap derinliğinin (FKKD), sırasıyla 0,925; 0,835 ve 0,754 korelasyon katsayıları ile yaklaşık olarak hesaplanabildiğini ileri sürmüştür (Mielnik, 1991).

$$OÇD = 0,217 + 0,00474 \cdot e_f^- + 0,00392 \cdot \bar{r} \quad (4.25)$$

$$SDÇO = 1,93 + 0,00216 \cdot e_f^- + 0,226 \cdot \bar{r} \quad (4.26)$$

$$FKKD = 0,525 + 0,0134 \cdot e_f^- + 0,207 \cdot \bar{r} \quad (4.27)$$

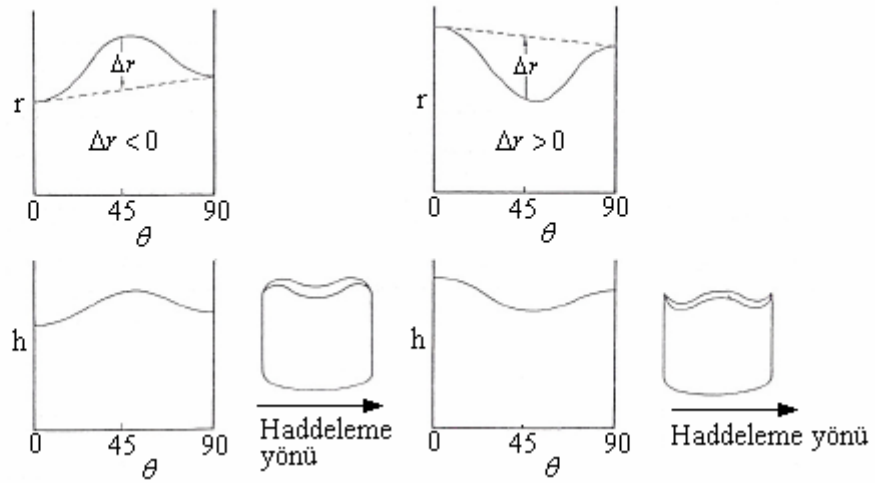
Plastik anizotropi değeri, şekillendirmeye yönelik soğuk haddelenmiş çelik saclarda, sac kalitesine göre değişmektedir. ASTM standardına göre, ticari kalitedeki saclarda  $\bar{r}$  tipik olarak 1,0 olurken, derin çekme kalitesinde 1,2; özel dinlendirilmiş derin çekme kalitesinde 1,6 ve IF çeliklerinde ise 2,00 civarında olmaktadır. Bu yüksek  $\bar{r}$  değeri nedeniyle IF çelikleri ekstra derin çekme sacı olarak adlandırılmaktadır (Granzow, 1990).

Plastik anizotropi değerlerinin sac yüzeyinde farklı doğrultularda farklı değerler alması durumu, ortalama dikey anizotropi parametresinden ( $\bar{r}$ ) ayrı bir şekilde, düzlemsel anizotropi denilen ve  $\Delta r$  ile gösterilen parametreyle açıklanır. Düzlemsel anizotropi, derin çekilmiş bir

kapta yüksekliklerin yönere göre farklılaşmasına ve kulaklanma diye tabir edilen hasarın oluşmasına neden olmaktadır. İstenmeyen kulak oluşumunun nispeten ortadan kaldırılabilmesi amacıyla, çelik sacların  $\Delta r$  değerleri, 4.28 eşitliği ile saptanır.

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2.r_{45} + r_{90}}{2} \quad (4.28)$$

Düzlemsel anizotropi parametresi ayrıca, sacın haddeleme doğrultusuna göre, kulakların konumlarının belirlenmesini sağlar (Şekil 4.25).  $\Delta r$  büyüdükçe kulak yüksekliği artar ve  $\Delta r$  sıfıra eşitse kulak oluşumu gözlenmez. Bir kaptı genelde dört adet kulak oluşsa da bu sayı iki, altı veya sekiz de olabilmektedir. Dört adet kulak oluşması durumunda,  $\Delta r$  eksi değerlikli ise kulak tepesi hadde yönüne  $45^\circ$ 'lik doğrultularda, artı değerlikli ise  $0^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik doğrultularda oluşurlar. Derin çekme kalitesindeki ve alüminyumla sakınleştirilmiş düşük karbonlu çelik saclarda  $\Delta r$  artı ve bazı yüksek dayanım düşük alaşımli çelik saclarda eksidir (Çapan, 1999).

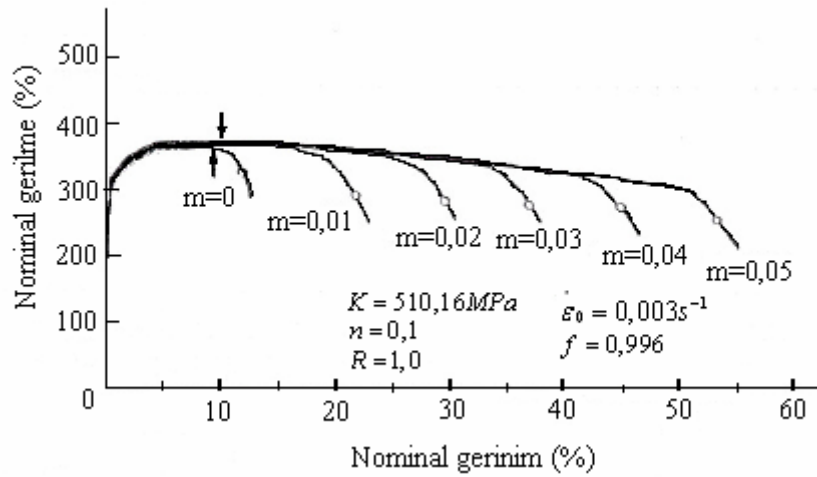


Şekil 4.25 Haddeleme yönlerine göre kulaklanmanın ve cidar yüksekliklerinin değişimi (Banabic vd., 2000)

Kalınlık yönündeki ortalama dikey anizotropi parametresi ( $\bar{r}$ ), düzlemsel anizotropi parametresinden ( $\Delta r$ ) bağımsızdır. Genelde yüksek  $\bar{r}$  değerlerine sahip malzemelerde, yüksek  $\Delta r$  saptanmaktadır. Ancak çelik sacların şekillendirilmesinde arzu edilen durum, yüksek  $\bar{r}$  değeri yanında  $\Delta r$ 'nin sıfıra eşit olması yönündedir (Banabic vd., 2000).

#### 4.4.7 Gerinim Hızı Duyarlılığı Üstelinin Etkisi

Gerinim hızı duyarlılığı, sac malzemelerin şekillendirilmesi sırasında oluşan gerinim dağılımına yardım eden diğer önemli bir özelliktir. Gerinim hızı duyarlılığı üstelinin ( $m$ ) artı ve yüksek değerde olduğu saclarda, boyunlanma olayından sonraki şekil değiştirme miktarları yüksek olmaktadır. Bu, Şekil 4.26'dan da görülebileceği gibi, toplam uzama değerlerini arttırmaktadır. Bu tür  $m$  değerleri artı ve yüksek olan malzemelerde, boyun içindeki malzemenin plastik akış hızının fazlalığı yada boyun bölgesinde herhangi bir süreksizliğin varlığı nedenlerinden dolayı, şekil değişimine karşı direnç artar, dolayısıyla plastik gerilme artar. Böylece, boyunlanma olayının etrafa yayılması ve kalınlık incelmesinin sadece bir bölgede yoğunlaşmayıp, tüm malzemede tekbiçim olarak gelişmesi sağlanır (Mielnik, 1991).



Şekil 4.26 Malzemenin belirtilen özelliklerinin sabit kalması koşuluyla, gerinim hızı duyarlılığı üstelinin artımı ile gerilme-gerinim eğrisinin değişimi (Mielnik, 1991)

Sac malzemelerin gerinim hızı duyarlılığı üstelinin boyun büyümesini yavaşlatıcı etkisi, pekleşme üsteli değerlerinden daha fazla olmaktadır. Ancak  $m$  ve  $n$  değerlerinin, en yüksek yükten sonraki yüzde uzama değerlerine, birlikte gösterdikleri etkileri araştırıldığında, aynı  $m$  değerine sahip farklı malzemelerin pekleşme üstelinin artmasıyla tekbiçim olmayan uzama değerlerinin kayda değer biçimde arttığı görülmektedir (Newby, 1978).

Gerinim hızına duyarlılık, özellikle yüksek sıcaklıklarda belirgin duruma geçmekte ve bu, metallerin süper plastik davranışlarının bir göstergesi olmaktadır. Li ve Chandra (1999) gibi araştırmacılar, gerinim hızına duyarlılık üstelinin, şekillendirme sınır diyagramına etkilerini analitik olarak inceleyerek,  $m$  değerlerinin artmasıyla şekillendirme sınır eğrileri düzeylerinin arttığını saptamışlardır (Kumar, 2002).

Gerilme veya gerinim derecelerin artması ise, gerinim hızına duyarlılık üstelini düşürmektedir.

Şekillendirme işlemlerine yönelik soğuk haddelenmiş çelik saclarda  $m$  değeri tipik olarak 0,01 - 0,015 arasında değişmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda etkili olan  $m$  değerinin oda sıcaklığında şekillendirme operasyonlarını önemli derecede etkilemediğinden, çoğu araştırmacıya göre, şekillendirilebilirlik üzerine  $m$  değerinin etkisi oda sıcaklığında ihmal edilebilir (Granzow, 1990).

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu deneysel çalışma dizisinde, Toyota firmasının otomobillerinde kullandığı ve Ermetal A.Ş.'de imal edilen, yağ karteri dış sac parçasının malzeme özellikleri, Ermetal A.Ş. fabrikasının Giriş-Kalite bölümündeki fizik laboratuvarında, ileriki kısımlarda bahsedilecek olan deneylerle incelenmiş ve parçanın imalatı sırasında şekillendirme prosesine bu özelliklerin etkileri gözlenmeye çalışılmıştır.

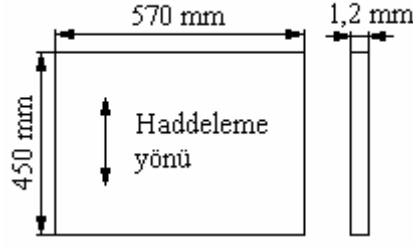
### 5.1 İncelenen Malzemenin Özellikleri

Deneysel çalışmada incelenen malzemenin dış sac parçasının imal edildiği otomobil yağ karteri, Şekil 5.1'den görülebilmektedir.



Şekil 5.1 Toyota firmasının otomobillerinde kullandığı yağ karteri

İncelenen yağ karteri, iç sac ve dış sac olmak üzere iki farklı parçanın soğuk şekillendirilerek birbirlerine kaynaklanması ve imal edilen parçanın elektrostatik siyah boyayla kaplanması işlemleriyle üretilir. Dış sacın imalatı, Şekil 5.2'de boyutları belirtilen, işlenmemiş düzlemsel taslak sacın, beş adet farklı pres ve kalıpta ardı ardına soğuk olarak plastik şekillendirilmesi suretiyle yapılır. Bu beş adet şekillendirme operasyonundan ilk ikisi derin çekmedir, ki bunlardan ilkinde, toplam kap cidar yüksekliğinin büyük bir kısmı oluşturulurken, ikincisinde kap tekrar çekilerek nihai karter derinliği elde edilir. Üçüncü operasyon etek kesme, dördüncüsü delmedir ve beşincisi de kenarları bükme ile üst köşe düzeltme işlemlerini barındıran nihai operasyondur.



Şekil 5.2 İncelenen yağ karterinin taslak sacı boyutları

Bu amaçla kullanılan sac malzeme, 1,2 mm nominal kalınlıkta Toyota standardına göre SCGA 270 D-45 standart derece numarasıyla belirtilen, soğuk haddelenmiş galvanil kaplı (demir+çinko alaşımı kaplı) çelik sacdır. Tedarik edildiği Erdemir firmasının fabrikalarında, sıcak haddelendikten sonra sürekli asitleme ile tandem hattında temizlenerek soğuk haddelenir, sürekli galvanizleme ile sürekli tavlama hattında galvanil kaplanarak tavllanır ve son olarak temper haddelenme işleminden geçirilerek üretilir. Rulo, dilinmiş rulo, kenarları kesilmiş rulo ve rulodan kesilmiş sac paketi şeklinde paketlenme biçimleri ile tedarik edilebilmektedir. Erdemir'e göre soğuk şekillendirme ve derin çekme işlemlerine uygun düşük karbonlu galvanile çelik sac tanımlamasına uygundur.

SCGA 270 D-45 standart dereceli bu çelik sacın kimyasal içeriğinde, karbon, manganez, fosfor, kükürt, titanyum ve niyobyum elementleri; % 0,004 C, % 0,2 Mn, % 0,01 P, % 0,01 S, % 0,06 Ti, % 0,03 Nb üst sınır oranlarında bulunmaktadır.

Erdemir standartlarına göre 431 derece numarasıyla belirtilen bu çelik sac tipinin, mekanik özelliklerinden akma dayanımı 140-180 MPa arasında, çekme dayanımı en fazla 270 MPa, ortalama plastik gerinim oranı 1.4, ortalama pekleşme üsteli 0.2, 1 - 2 mm kalınlık aralığı ve 80 mm ölçü boyu için % uzama değeri ise 44 - 51 aralığında Erdemir standartlarında beyan edilmektedir.

Toyota'nın TSG 3109 G isimli "galvanil kaplı çelik saclar" standardında ise SCGA 270 D-45 derecesindeki çelik sacın mekanik özellikleri, bazı alt ve üst dereceleriyle birlikte Çizelge 5.1'de belirtildiği gibidir. Bu standarda göre SCGA 270 D kalitesindeki çelik sac, yaşlanmaz özellikte olmalıdır. Ancak oda sıcaklığında bekletildiğinde, gerinim çizgilerini (Lüders bantlarını) üç ay içerisinde şekillendirme sırasında oluşturmayacak şekilde, yavaş yaşlanma özelliğine sahip olmasına izin verilebilir.



Çizelge 5.1 SCGA 270 D derecesindeki çelik sacın mekanik özelliklerinin, bazı alt ve üst dereceler ile birlikte gösterilmesi – TSG 3109 G

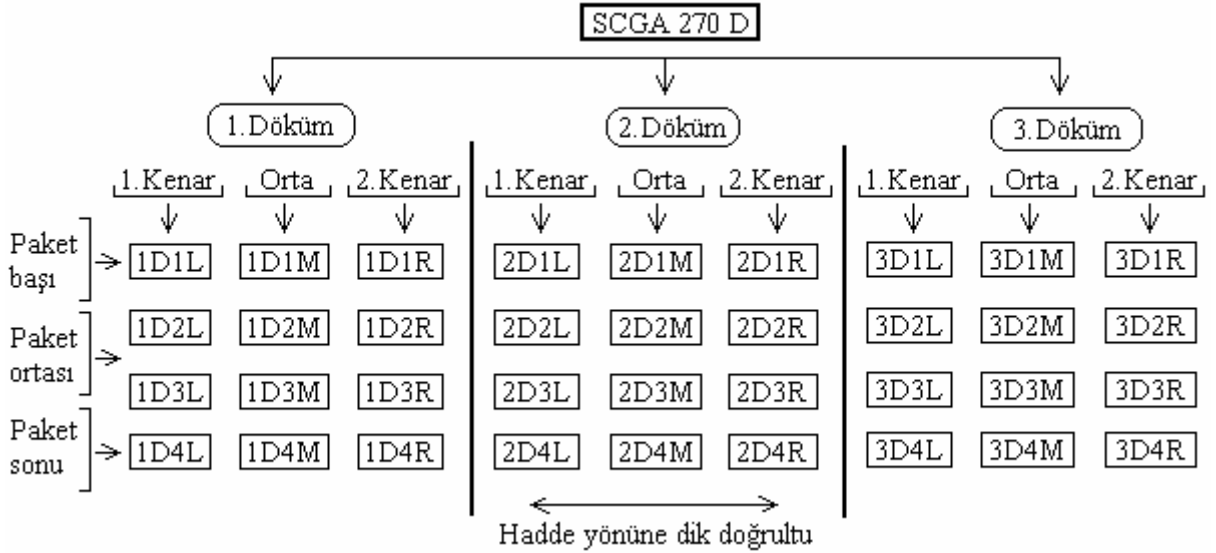
Kalite No.	Uygulama amacı	Akma dayanımı (MPa) [en az-en fazla] $1.0 \leq t \leq 3.2$	Çekme dayanımı (MPa) [en fazla]	$\bar{r}$ değeri [en az] $1.0 < t \leq 1.6$	Toplam yüzde uzama ( $L_0=50$ mm) [en az-en fazla] $1.2 \leq t < 1.6$
SCGA 270 C	genel	165 - 285	270	-	38 – 48
<b>SCGA 270 D</b>	<b>çekme</b>	<b>115 - 205</b>	<b>270</b>	<b>1.1</b>	<b>43 – 53</b>
SCGA 270 E	derin çekme	110 - 185	270	1.3	45 - 55
SCGA 270 F	ekstra derin çekme	100 - 165	270	1.4	47 - 57

Kaplama kodu 45 olan bu kalitede, kaplama ağırlığı  $45-65 \text{ g/m}^2$  aralığında ve kaplama kalınlığı, bir tarafta en az  $7.6 \mu\text{m}$  ve her iki yüzeyde eşit olacak şekilde değişir. Kaplama alaşımındaki (demir+çinko) demir içeriği ise % 7 - 15 arasında değişmektedir.

## 5.2 Numune Alma Prosedürü

Çalışma kapsamında, Ermetal firmasının sac kesme bölümüne gelen 1,2 mm kalınlığındaki SCGA 270 D kalite numaralı sacların, üç farklı döküm paketi incelenmiştir. Her bir paketin, başlangıç ve son kısımlardan birer ve orta kısımdan ikişer olmak üzere toplam dörder adet taslak sac, kesme anında hadde yönleri işaretlenerek ve numaralandırılarak alınmıştır. Bu taslak sacların boyutları, 400 mm x 1140 mm şeklindedir ve 1140 mm aynı zamanda rulo genişliği boyutudur. Daha sonra her bir taslak sacın, rulo genişliği boyutlarından üç eşit kısma bölünmesiyle, birinci kenar (L), orta (M) ve ikinci kenar (R) olmak üzere, 400 mm x 380 mm boyutlarındaki numune taslakları, tekrar hadde yönlerinin işaretlenmesiyle elde edilmiştir. Bu numune taslaklarından, çekme testi için, hadde yönüne göre farklı doğrultularda ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$  ve  $45^\circ$ ) üçer adet çekme testi numunesi, krank milli preste, özel olarak hazırlanmış kesme kalıplarında işlenerek alınmıştır. Sertlik ile Erichsen deneyleri için ise 100 mm x 100 mm'lik birer adet numune, kesme makinelerinde numune taslaklarından kesilmiştir. Numune alma prosedürü Şekil 5.3'ten daha açık bir biçimde görülebilmektedir.

Bu örnekleme yöntemiyle, işletmeye gelen aynı kalitedeki saclar arasında, farklı dökümlerden, aynı dökümün farklı bölgelerinden ve aynı bölgelerin farklı doğrultularından kaynaklanan mekanik özellik değişimleri ve ortaya çıkan sapmalar görülebilmektedir.



Şekil 5.3 Numune alma prosedürü ve numune taslaklarının adlandırılması

Şekil 5.3'ten de görülebilen numune taslaklarının ve onlardan elde edilen çekme deneyi numunelerinin adlandırılması, açıklanan şu sistematığe göre tasarlanmıştır. Örneğin, ilk döküm paketinin kuyruk kısmının ortasından alınan, haddeleme yönüne  $45^0$  doğrultudaki çekme deneyi numunesi, 1D4M45 olarak adlandırılmıştır. Buna göre;

- “1D”, birinci dökümü paketini,
- Takip eden “4” rakamı, paketin kuyruk kısmını,
- “M”, rulo genişliğine göre bölgenin orta kısımdan olduğunu ve
- “45” ise çekme deneyi numunesinin haddeleme yönüyle  $45^0$  açı yaptığını belirtmektedir.

Bu numune alma prosedürüne göre toplam çekme deneyi numunesi sayısı,  $3 \times 4 \times 3 \times 3$  çarpımından 108 olarak elde edilir. Buna ek olarak, şekillendirme sırasında malzeme karakteristikleri nedeniyle parçalarda kusur oluşturduğu saptanan sacların hemen peşlerinden gelen sacların alınarak çekme deneyi numunesi olarak hazırlanmasıyla da numune sayıları artırılmıştır. Bu amaçla alınan numune taslakları üç adet olup, her birinden haddeleme doğrultusu hesaba katılarak üçer adet çekme deneyi numunesi alındığından, hasar sonrası alınarak incelenen numunelerin sayısı da böylece dokuzu bulmaktadır.

İncelenen her bir pakette 900 mm x 1140 mm boyutlarında aşağı yukarı 350 adet (353 – 357) sac bulunmaktadır ve yaklaşık olarak her dört eşit bölümden bir sac, üç eşit parçaya bölünmek üzere alındığından dolayı, takriben her 116 sacdan bir örnek alınmıştır denilebilir. Haddeleme doğrultusuna göre sac boyutu 900 mm olduğundan her bir paket 315 m uzunluğundaki bir ruloya denk gelmektedir ve dolayısıyla rulo uzunluğu doğrultusunda

numune araları ortalama 105 m'dir.

Paketlerin en üst ve en alt saclarının nakil sırasında hasar görebileceği olasılığı göz önünde bulundurularak, baş ve son kısım numunelerinin alınması sırasında bu hasarlı saclardan örnek almamaya dikkat edilmiştir. Ayrıca tüm deney numuneleri, numune taslaklarının kenarlarından en az 30 mm pay bırakılarak hazırlanmıştır. Bunun nedeni de imalat veya kesme işlemleri sırasında sac kenarında oluşabilecek muhtemel sertlik artımı veya dayanım değişimi hususlarının ortadan kaldırılmasıdır.

### 5.3 Yapılan Deneyler ve Kullanılan Cihazlar

İncelenen sacların mekanik özelliklerini saptamak amacıyla çekme deneyleri, sertlik deneyleri ve Erichsen deneyleri yapılmıştır. Ayrıca tane büyüklüğünün belirlenmesi için, yalnızca bir numuneden örnek alınarak, SCGA 270 D kaliteli çelik sacın mikroyapısı fotoğflanmıştır.

#### 5.3.1 Çekme Deneyleri

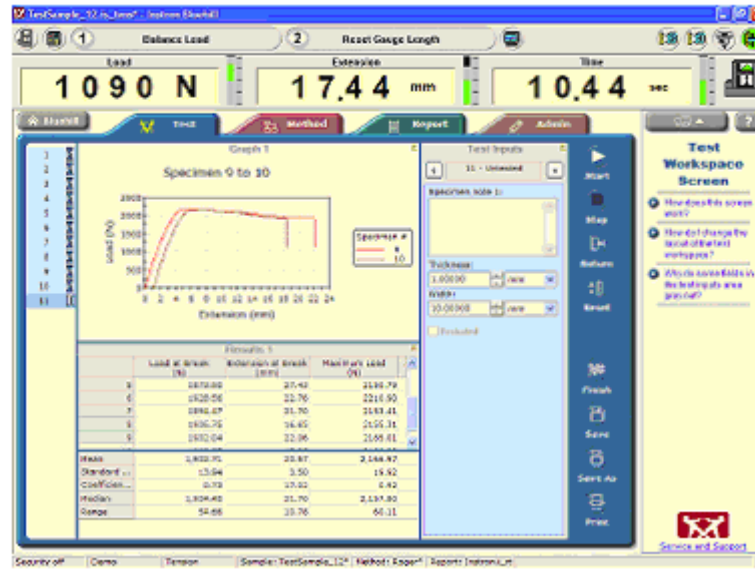
Çalışma kapsamında yapılan çekme deneyleri, TS 138 EN 10002-1 numaralı test yönetimi standardına uygun olarak, 23<sup>0</sup>C oda sıcaklığında, 100 kN kapasiteli Instron 5582 elektro mekanik test makinesi ile uygulanmıştır. Bu son teknolojiye sahip test makinesinin donanımları olarak da 100 kN üst sınırlı yük hücresi, otomatik video uzamaölçer ve vidalı mekanik çeneler kullanılmıştır. Tüm çekme deneyleri, numuneler kopana dek, 15 mm/d'lık test hızlarında (çenelerin ayrılma hızı) uygulanmıştır. Çekme deneyi makinesinin deney anında çekilmiş fotoğrafı Şekil 5.4'ten görülebilmektedir.

Deneylerin tümü bilgisayar kontrollü olarak ve Instron-Bluehill yazılım programı kullanılarak yürütülmüştür. Deneylerde kullanılan video uzamaölçer ve yük hücresi ile, uzama ve yük değerleri bilgisayar ortamına aktarılmakta ve gerinimler ile gerilmeler, bu program tarafından hesaplanmaktadır. Deney sırasında malzemenin gerilme-gerinim grafiği, hemzamanlı olarak oluşturulmakta ve yazılım aynı anda hem mühendislik eğrisini, hem de gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrisini gösterebilmektedir. Şekil 5.5'te yazılım programından bir görüntü verilmiştir.

Yazılımın otomatik hesaplayarak deney sonunda telim ettiği değerler; akma dayanımı, akmadaki gerçek gerilme, akmadaki gerçek gerinim, maksimum kuvvet, çekme dayanımı, gerçek çekme gerilmesi, maksimum tekbiçim uzama yüzdesi, maksimum tekbiçim gerinim, pekleşme üsteli, dayanım katsayısı, plastik anizotropi katsayısı, kopmadaki uzama yüzdesi ve kopmadaki gerçek gerinim gibi değerlerdir.



Şekil 5.4 Çekme deneylerinin uygulandığı Instron 5582 modelli test makinesi



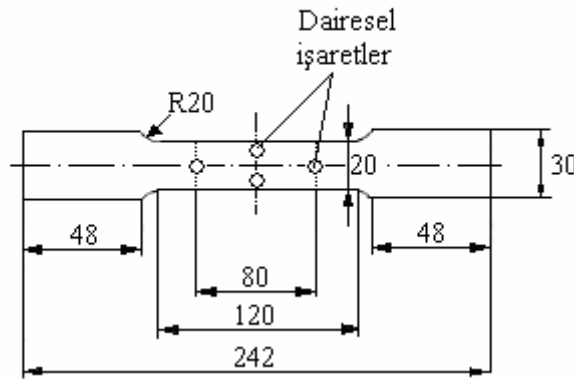
Şekil 5.5 Instron-Bluehill yazılım programından bir görüntü

Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla uygulanan deneylerin tümünde, aynı tipte ve boyutta çekme numuneleri kullanılarak, farklı numune boyutlarının mekanik özellik sonuçlarını farklılaştırması olasılığı ortadan kaldırılmıştır. İlk ölçme uzunluğu 80 mm ve

genişliği 20 mm olan numuneler (şekil 5.6), numune taslaklarından, özel olarak hazırlanmış kalıp takımı kullanılarak mekanik bir pres tarafından kesilerek çıkartılmıştır. Numunelerin bütün kenarlarında bu soğuk işlem nedeniyle kalan pekleşmiş bölgelerin ve çapakların, deneyleri etkilememesi için giderilmesi işlemi, elektrikli dönel zımparayla yapılmıştır. Temizlenmelerinden sonra numuneler, ölçme uzunlukları içersinde, genişlik ve kalınlık boyutlarının beş farklı noktasından milimetrenin 1/1000'i hassaslıktaki dijital mikrometre ile ölçülmüş ve bu değerlerin ortalaması bilgisayar yazılımına girilmiştir. Ayrıca her bir numunenin her iki tarafının kaplama kalınlığı beşer ayrı noktadan, dijital göstergeli ultrasonik kaplama ölçüm cihazı ile ölçülerek, toplam kaplama kalınlıkları ortalamaları bulunmuştur. Çizelge 5.2'de girilen bu değerlerin alt ve üst sınırları ile ortalamaları görülebilmektedir.

Çizelge 5.2 Çekme deneyi numuneleri boyutlarının ölçülmesiyle elde edilen değerlerden alt ve üst sınırlar ile ortalamalar

Numune grubu	Kaplama kalınlığı toplamı ( $\mu m$ )			Kalınlık (mm)			Genişlik (mm)		
	min.	ortalama	maks.	min.	ortalama	maks.	min.	ortalama	maks.
1.Döküm	14,3	16,3	19	1,193	1,206	1,217	19,746	19,950	20,007
2.Döküm	13,3	14,8	17	1,191	1,197	1,202	19,940	19,973	20,002
3.Döküm	13,6	15,0	17	1,183	1,196	1,202	19,937	19,983	20,011



şekil 5.6 Çekme deneyleri numunelerinin nominal ölçüleri ve dairesel işaretler

Test makinesinin bünyesindeki video uzama-ölçerlerin çalışma prensibine göre, deney numunelerinin ölçüm yapılan bölgelerine, içi dolu dairesel beyaz işaretler konulmalıdır. Uzamaların, bu dairesel beyaz işaretlerin deney boyunca izlenmesiyle belirlenmesinden dolayı, cihaz, hem işaretlerin daireselliğinde hem de işaret eksenlerinin tam dik çıkışması hususunda titiz çalışma istemektedir. şekil 5.6'daki numune üzerinden bu işaretler

görülebilmektedir. Görüldüğü üzere, bunlardan yatay eksendeki işaretlerin arası, yazılıma tam ölçü boyunu (80 mm) tanıtmaktadır.

Mekanik özelliklerin, haddeleme yönlerine göre farklı doğrultulardan alınan sonuçlarının ortalamalarının hesaplanmasında, daha önce ortalama dikey anizotropi parametresinin hesaplanmasında da bahsedildiği gibi aşağıdaki 5.1 eşitliği kullanılmıştır.

$$\bar{x} = \frac{x_0 + 2 \cdot x_{45} + x_{90}}{4} \quad (5.1)$$

İncelenen malzemenin çekme deneyleri sırasında alınan numune fotoğrafları, Şekil 5.7’de görülmektedir. Bu şekilde, en üstteki numune kopmuş, ortadaki belli bir miktar uzamış ve en alttaki ise henüz çekilmemiştir.



Şekil 5.7 Deneyler sırasında fotoğraflanan numuneler; kopmuş, uzamış ve çekilmemiş

### 5.3.2 Sertlik Deneyleri

Her üç farklı döküm numaralı SCGA 270 D kaliteli çelik sacın daha önce belirtilen bölgelerinden alınan numune taslaklarından Erichsen deneyi için çıkartılan 100 mm x 100 mm boyutlarındaki parçaların öncelikli olarak uygun yerlerinden sertlik deneyleri yapılmıştır. Numuneler deneylerden önce dikkatli bir şekilde hazırlanarak, sertliğin değişmesine neden olabilecek dış etkiler bertaraf edilmiştir. “Reicherter” markalı cihazla yapılan sertlik deneyleri, Rockwell sertlik deneyleri olup, DIN 50103 standardına göre uygulanmıştır.

Numunelerin kalınlıklarının 1,2 mm olması göz önünde bulundurularak, 100 kg yükü olan Rockwell B yerine, 60 kg yükü olan 1/16” bilya uçlu Rockwell F sertlik yöntemi seçilmiştir. Daha sonra sonuçların her biri, standart tablolarının yardımıyla HRB cinsine çevrilmiştir.

Deney yapılırken, numunelerin sertlik değerleri, her bir numunenin dört farklı bölgesinden alınan değerlerin ortalaması bulunarak belirlenmiştir.

### 5.3.3 Erichsen Deneyleri

SCGA 270 D kalitesindeki soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacın değişik bölgelerinden alınan 36 adet numune taslaklarından çıkartılan 100 mm x 100 mm ebatlarındaki parçalara, Şekil 5.8'de görülen mekanik Erichsen çökertme cihazında, gererek şekillendirme deneyleri uygulanmıştır.



Şekil 5.8 Erichsen çökertme deneyi cihazı

Cihaz görüldüğü gibi otomatik kontrol düzeneğine sahip olmadığından, deney hızı ve bastırıcı kuvvetinin ayarlanması, deneyi yapan kişiye bağlıdır. Yağlamasız yani kuru yapılan deneylerin hızı, mümkün olduğunca sabit tutulmaya çalışılmıştır. Bastırıcı kuvvetinin yeterli olduğu ise, deney sonunda ortaya çıkan numune şekillerinin bastırıcı çemberinin iziyle beraber dalgalanmasız olmasından yani bastırıcının çökertme bölgesine en ufak bir derin çekmeye izin vermemesinden anlaşılmaktadır. Boyunlanma ve bastırıcı izleri, Şekil 5.9'daki çökertilmiş deney numuneleri görüntülerinden görülebilmektedir.

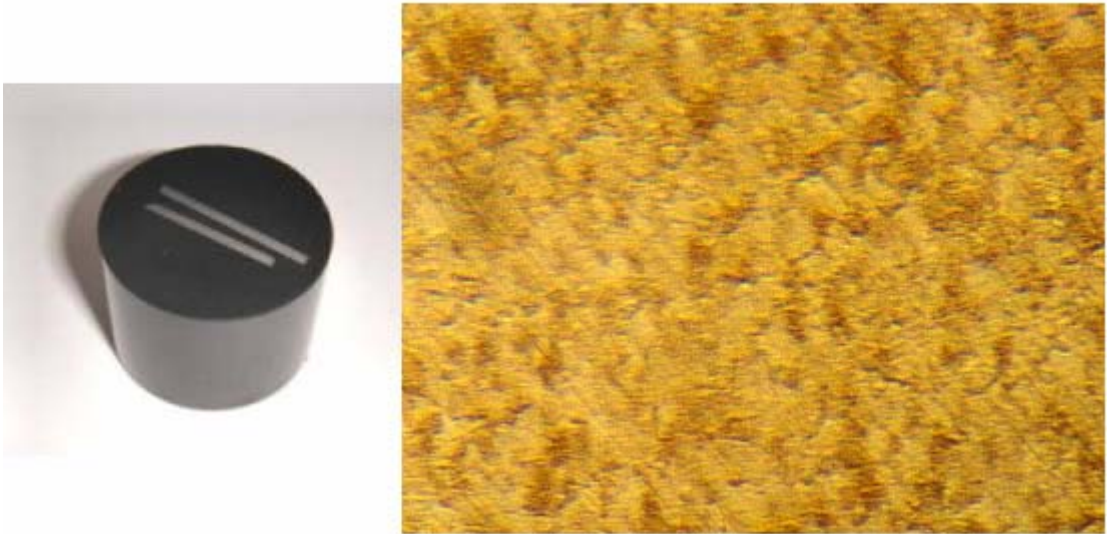
Bastırıcı çemberin ilerlemesi ve ıstampanın ilerleyerek numuneyi çökertmesi, el çarkının saat yönünde döndürülmesi ile sağlanır. Deneyin bitiş anı, konik ve aydınlatmalı aynadan görülen çökertme tepesinde oluşan çizgi şeklinde dairesel boyunlanmanın başlangıcıdır. Erichsen çökertme değeri ise, deneyin durdurulması ile daha önce sıfırlanan mm'lik skoldan okunan değerdir. Euronorm 32-66 standartlarında, SCGA 270 D'nin yaklaşık olarak eşdeğeri olan FeP04 kalitesindeki 1,2 mm saclar için, Erichsen çökertmenin olması gereken en az değeri 11,4 mm olarak verilmiştir.



Şekil 5.9 Çökertilmiş Erichsen deney numuneleri

### 5.3.4 İy yapının Görüntülenmesi

SCGA 270 D sacının tane büyüklüğünün belirlenmesi için, herhangi bir bölgeden kesilen sac parçası, Şekil 5.10'da görülen biçimde bakalite alınmak amacıyla hazırlanmıştır.



Şekil 5.10 İy yapısı incelenen, bakalite alınmış, parlatılmış ve dağlanmış numune ile x100 büyütme iy yapısı görüntüsü

Gömme yöntemiyle 170°C sıcaklıkta ve 25 kN basınçta hazırlanan bakalit, öncelikle sırayla 240, 320, 800 ve 1000 numaralı zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve yıkanıp kurutulmuştur. Daha sonra 6  $\mu\text{m}$  çuha ve 6  $\mu\text{m}$  elmas pasta ile ön parlatma işleminden geçirilmiştir. Son parlatma işlemi ise, 3  $\mu\text{m}$  çuha ve 3  $\mu\text{m}$  elmas pasta ile yapılmıştır. Parlatma işleminden sonra bakalit yüzeyi Nital 4 dağlayıcı ile dağlanmıştır. En son safhada



ise BHM modellenli bir elektron mikroskobu ile malzemenin iç yapısı x100 büyütmede görüntülenerek fotoğraflanmıştır (Şekil 5.10).

Bu kalitedeki sac numunenin x100 büyütme göre tane büyüklüğünün, ASTM 8 ile ASTM 9 arasında, 9'a daha yakın bir şekilde olduğu saptanmıştır.

## 5.4 Deney Sonuçları

### 5.4.1 Çekme Deneyleri Sonuçları

Bölüm 5.2'de anlatılan numune alma prosedürüne uygun olarak alınan ve adlandırılan numunelerin çekme deneyleri sonuçları Çizelge 5.3'deki gibidir. Bu çizelgedeki ve Çizelge 5.4'teki semboller sırasıyla şu mekanik özellikleri ifade etmektedir;  $S_A$  : % 0,2 uzamadaki nominal akma gerilmesi ( $N/mm^2$ ),  $\sigma_A$  : % 0,2 uzamadaki gerçek akma gerilmesi ( $N/mm^2$ ),  $S_{\sigma}$  : nominal çekme gerilmesi ( $N/mm^2$ ),  $\sigma_{\sigma}$  : gerçek çekme gerilmesi ( $N/mm^2$ ),  $e_u$  : % olarak üniform uzama,  $\epsilon_u$  : % olarak üniform gerinim,  $e_k$  : % olarak kopma uzaması,  $\epsilon_k$  : % olarak kopmadaki gerçek gerinim,  $n$  : pekleşme üsteli,  $r$  : plastik anizotropi değeri,  $K$  : dayanım katsayısı.

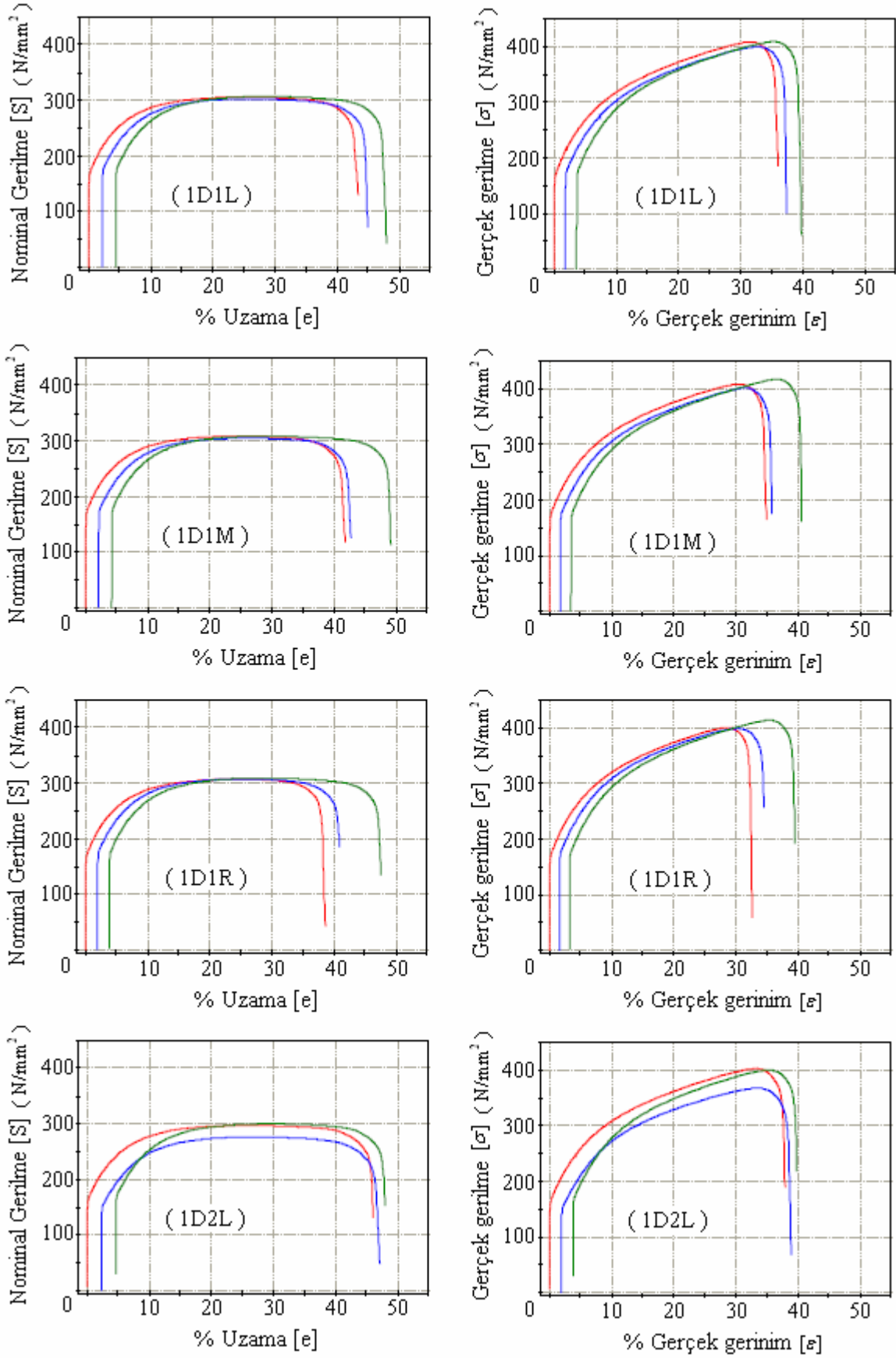
Çizelge 5.3 Çekme deneyleri sonuçları

Numune adı	$S_A$	$\sigma_A$	$S_{\sigma}$	$\sigma_{\sigma}$	$e_u$	$\epsilon_u$	$e_k$	$\epsilon_k$	$n$	$r$	$K$
1D1L0	168,70	169,13	305,27	381,83	25,08	22,38	43,42	36,06	0,22	1,40	529,93
1D1L90	177,06	177,50	302,08	373,16	23,53	21,13	42,84	35,66	0,21	1,80	515,27
1D1L45	178,76	179,29	306,43	380,27	24,09	21,59	43,65	36,22	0,22	1,39	527,17
1D1M0	173,03	173,49	308,17	384,53	24,78	22,14	41,79	34,92	0,22	1,50	531,79
1D1M90	177,63	178,09	304,77	377,45	23,85	21,39	40,62	34,09	0,21	1,80	522,35
1D1M45	178,44	178,90	308,30	384,41	24,69	22,06	44,97	37,14	0,22	1,35	528,68
1D1R0	169,33	169,74	306,62	381,50	24,42	21,85	38,65	32,67	0,22	1,51	530,40
1D1R90	178,35	178,82	306,98	378,85	23,41	21,04	38,95	32,89	0,22	1,77	526,64
1D1R45	177,22	177,63	308,61	384,93	24,73	22,10	43,71	36,26	0,21	0,79	528,07
1D2L0	164,72	165,16	297,16	374,28	25,95	23,08	46,09	37,91	0,23	1,79	517,23
1D2L90	153,16	153,55	276,05	344,42	24,77	22,13	44,78	37,01	0,23	2,19	485,82
1D2L45	171,59	172,02	299,83	374,81	25,01	22,32	43,32	35,99	0,22	1,64	518,05
1D2M0	162,18	162,57	294,69	371,00	25,89	23,03	46,89	38,45	0,22	1,79	511,86
1D2M90	158,33	158,75	281,12	349,64	24,38	21,81	41,54	34,74	0,23	2,14	491,19
1D2M45	150,55	150,93	277,95	346,66	24,72	22,09	44,50	36,81	0,23	1,73	492,83
1D2R0	158,84	159,21	291,97	367,45	25,85	23,00	48,05	39,23	0,23	1,80	509,52
1D2R90	159,34	159,75	281,40	352,26	25,18	22,46	46,76	38,36	0,23	2,31	489,89
1D2R45	156,19	156,61	283,91	354,54	24,88	22,22	43,38	36,04	0,23	1,60	500,88
1D3L0	144,62	145,01	275,60	347,13	25,95	23,07	45,82	37,72	0,24	1,87	490,53
1D3L90	130,47	130,79	254,21	317,27	24,81	22,16	45,70	37,64	0,25	2,11	462,35
1D3L45	154,95	155,35	283,07	353,44	24,86	22,20	44,59	36,87	0,23	1,59	498,85
1D3M0	145,32	145,66	277,47	349,75	26,05	23,15	47,02	38,54	0,23	1,88	491,30
1D3M90	157,38	157,79	279,08	349,09	25,09	22,38	44,24	36,63	0,23	2,44	487,25
1D3M45	152,16	152,56	279,59	348,53	24,66	22,04	45,58	37,56	0,23	1,74	494,98
1D3R0	136,22	136,58	268,10	337,42	25,85	23,00	45,74	37,67	0,24	1,95	483,45

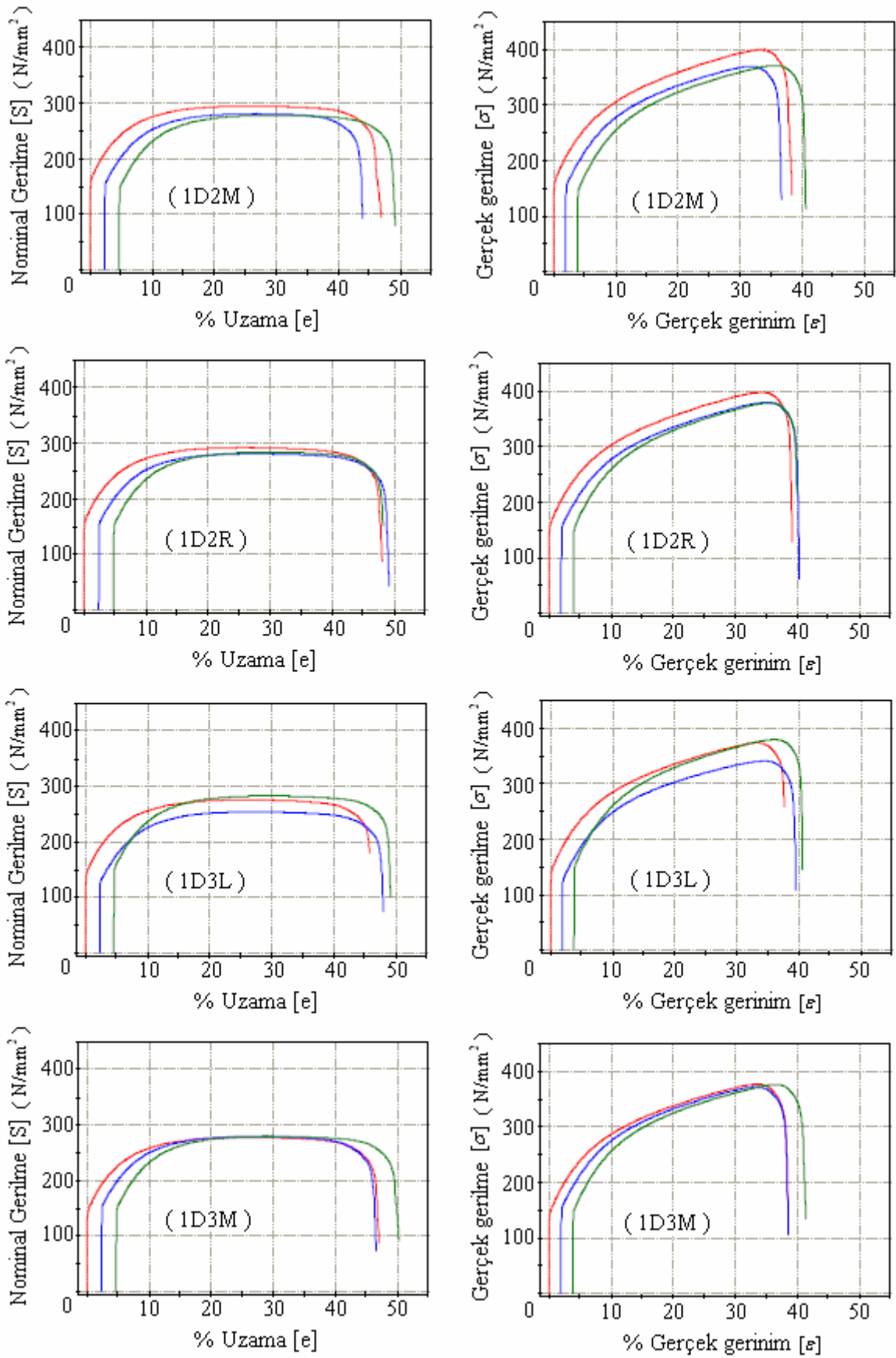
Numune adı	$S_A$	$\sigma_A$	$S_c$	$\sigma_c$	$e_u$	$\varepsilon_u$	$e_k$	$\varepsilon_k$	n	r	K
1D3R90	143,22	143,59	265,73	331,45	24,73	22,10	44,44	36,77	0,24	2,02	473,85
1D3R45	135,99	136,33	263,97	329,14	24,69	22,06	45,34	37,39	0,24	1,60	476,64
1D4L0	127,92	128,25	257,52	324,59	26,04	23,15	45,68	37,62	0,25	1,99	468,10
1D4L90	139,98	140,33	262,59	327,22	24,61	22,00	42,45	35,38	0,24	2,13	471,54
1D4L45	115,17	115,48	240,48	299,55	24,56	21,97	42,56	35,46	0,27	1,63	452,44
1D4M0	119,42	119,74	248,92	313,97	26,14	23,22	47,64	38,96	0,26	1,88	459,82
1D4M90	143,33	143,71	263,98	330,41	25,16	22,45	46,56	38,23	0,24	2,31	469,08
1D4M45	162,18	162,59	289,80	361,43	24,71	22,09	46,51	38,19	0,22	1,73	504,85
1D4R0	131,06	131,41	261,97	330,04	25,99	23,10	46,59	38,25	0,25	1,89	475,52
1D4R90	146,39	146,76	267,69	334,26	24,87	22,21	44,93	37,11	0,23	2,39	472,88
1D4R45	150,36	150,78	277,18	345,42	24,62	22,01	43,00	35,77	0,24	1,89	492,86
2D1L0	163,71	164,14	296,42	372,42	25,64	22,82	43,71	36,27	0,22	1,83	515,69
2D1L90	173,92	174,37	295,75	368,38	24,56	21,96	43,58	36,17	0,21	2,33	505,77
2D1L45	178,03	178,51	306,85	380,66	24,05	21,55	41,08	34,41	0,22	1,54	527,95
2D1M0	167,14	167,60	299,72	376,30	25,55	22,75	44,36	36,71	0,22	1,90	519,88
2D1M90	173,56	174,03	297,93	371,66	24,75	22,11	44,17	36,58	0,22	2,46	512,52
2D1M45	175,83	176,29	306,63	380,78	24,18	21,66	41,46	34,69	0,22	1,70	529,26
2D1R0	164,67	165,10	299,67	375,92	25,44	22,67	43,33	36,00	0,22	1,89	521,73
2D1R90	174,15	174,60	298,41	372,58	24,85	22,20	42,80	35,63	0,22	2,52	511,93
2D1R45	177,36	177,82	306,89	381,41	24,28	21,74	41,13	34,45	0,22	1,68	528,14
2D2L0	164,86	165,28	301,64	379,37	25,77	22,93	46,23	38,00	0,23	1,92	526,78
2D2L90	173,73	174,17	298,89	372,38	24,59	21,99	42,86	35,67	0,22	2,50	514,35
2D2L45	177,66	178,12	306,63	381,03	24,26	21,72	42,34	35,30	0,22	1,78	527,38
2D2M0	165,64	166,06	302,24	379,06	25,41	22,65	44,12	36,55	0,22	1,91	526,30
2D2M90	175,80	176,30	301,60	376,50	24,83	22,18	45,12	37,24	0,22	2,45	520,08
2D2M45	177,81	178,27	307,11	382,01	24,39	21,82	43,88	36,38	0,22	1,70	527,87
2D2R0	167,47	167,91	301,80	378,84	25,53	22,74	43,79	36,32	0,22	1,91	524,10
2D2R90	176,26	176,73	299,85	373,79	24,66	22,04	44,79	37,01	0,22	2,57	514,43
2D2R45	178,42	178,88	307,27	381,76	24,24	21,71	41,76	34,90	0,22	1,74	528,73
2D3L0	165,21	165,65	299,42	375,86	25,53	22,74	44,17	36,59	0,22	1,81	520,92
2D3L90	174,73	175,20	296,47	368,81	24,40	21,83	40,98	34,34	0,22	2,26	507,98
2D3L45	178,11	178,58	306,34	379,98	24,04	21,54	40,86	34,26	0,22	1,59	526,66
2D3M0	165,53	165,97	299,62	375,72	25,40	22,63	44,95	37,12	0,22	1,82	520,34
2D3M90	173,03	173,50	296,75	370,50	24,85	22,20	46,26	38,02	0,22	2,40	510,50
2D3M45	177,44	177,90	307,20	381,87	24,31	21,76	43,58	36,17	0,22	1,65	528,10
2D3R0	166,91	167,34	299,42	375,59	25,44	22,67	44,51	36,82	0,22	1,86	518,32
2D3R90	173,77	174,21	295,10	367,27	24,45	21,88	41,51	34,72	0,21	2,75	504,12
2D3R45	178,91	179,38	306,35	380,72	24,28	21,74	43,39	36,04	0,22	1,63	525,29
2D4L0	165,32	165,73	298,24	373,83	25,35	22,59	43,62	36,20	0,22	2,00	516,52
2D4L90	174,81	175,27	294,91	367,06	24,46	21,88	41,15	34,47	0,21	2,37	503,69
2D4L45	177,93	178,45	305,35	378,17	23,85	21,39	40,37	33,91	0,22	1,40	526,52
2D4M0	165,74	166,16	299,55	375,97	25,51	22,72	45,49	37,49	0,22	1,89	519,56
2D4M90	174,16	174,60	296,54	370,15	24,82	22,17	44,73	36,97	0,22	2,35	508,18
2D4M45	178,18	178,67	306,59	380,77	24,20	21,67	42,75	35,59	0,22	1,50	527,66
2D4R0	167,05	167,50	298,10	374,01	25,46	22,69	44,15	36,57	0,22	1,94	515,60
2D4R90	175,27	175,73	296,14	368,86	24,56	21,96	42,11	35,14	0,21	2,64	505,40
2D4R45	179,75	180,23	306,40	379,97	24,01	21,52	42,45	35,38	0,21	1,81	525,42
3D1L0	160,18	160,60	288,88	364,81	26,28	23,34	47,22	38,67	0,23	1,81	502,96
3D1L90	164,92	165,36	286,89	360,26	25,58	22,77	49,76	40,39	0,22	2,50	499,03
3D1L45	167,66	168,09	295,80	369,72	24,99	22,31	46,20	37,98	0,22	1,78	514,43
3D1M0	157,31	157,72	288,18	363,73	26,22	23,28	49,04	39,91	0,23	1,83	504,73
3D1M90	166,45	166,90	287,26	360,93	25,64	22,83	46,94	38,49	0,22	2,42	497,82
3D1M45	168,38	168,78	295,28	369,76	25,22	22,49	46,55	38,22	0,22	1,78	510,80
3D1R0	159,85	160,27	288,69	364,46	26,25	23,31	47,98	39,19	0,23	1,85	503,01
3D1R90	167,21	167,63	288,93	362,58	25,49	22,70	43,51	36,13	0,22	2,53	498,90
3D1R45	169,91	170,37	296,50	370,92	25,10	22,39	47,69	38,99	0,22	1,69	514,89
3D2L0	157,12	157,55	287,10	361,39	25,87	23,01	49,58	40,27	0,23	1,67	504,49

Numune adı	$S_A$	$\sigma_A$	$S_c$	$\sigma_c$	$e_u$	$\epsilon_u$	$e_k$	$\epsilon_k$	n	r	K
3D2L90	166,12	166,54	286,55	360,24	25,72	22,89	52,48	42,19	0,22	2,45	495,91
3D2L45	169,07	169,52	294,72	368,34	24,98	22,30	45,26	37,34	0,22	1,78	511,49
3D2M0	158,61	159,02	287,42	362,66	26,18	23,25	48,44	39,50	0,23	1,90	501,78
3D2M90	168,81	169,25	286,85	360,54	25,69	22,86	49,96	40,52	0,22	2,41	492,89
3D2M45	169,81	170,25	294,18	367,21	24,83	22,17	46,54	38,21	0,22	1,73	508,44
3D2R0	160,86	161,30	287,79	362,95	26,12	23,20	50,18	40,67	0,22	1,85	499,97
3D2R90	168,02	168,47	287,45	360,81	25,52	22,73	50,45	40,85	0,22	2,32	496,55
3D2R45	170,00	170,44	294,79	367,91	24,80	22,16	48,35	39,44	0,22	1,90	508,92
3D3L0	156,80	157,20	287,10	361,16	25,80	22,95	48,90	39,81	0,23	1,76	502,47
3D3L90	165,75	166,18	287,49	361,43	25,72	22,89	50,63	40,96	0,22	2,38	498,79
3D3L45	167,52	167,95	295,77	369,86	25,05	22,35	47,16	38,64	0,22	1,72	513,92
3D3M0	158,92	159,35	288,96	364,38	26,10	23,19	49,85	40,44	0,23	1,81	505,36
3D3M90	167,27	167,72	287,71	361,17	25,53	22,74	46,68	38,31	0,22	2,37	497,01
3D3M45	167,37	167,79	293,46	367,12	25,10	22,39	47,62	38,94	0,22	1,81	508,24
3D3R0	159,05	159,46	287,79	363,19	26,20	23,27	49,50	40,21	0,23	1,83	501,64
3D3R90	166,55	166,97	287,83	360,91	25,39	22,62	43,66	36,23	0,22	2,80	498,13
3D3R45	168,36	168,79	293,94	367,24	24,93	22,26	48,37	39,45	0,22	1,70	508,99
3D4L0	161,02	161,45	289,56	365,31	26,16	23,24	47,81	39,07	0,23	1,63	504,77
3D4L90	166,45	166,90	288,53	362,41	25,61	22,80	48,92	39,83	0,22	2,36	501,16
3D4L45	171,04	171,49	298,31	372,54	24,88	22,22	46,75	38,36	0,22	1,75	517,68
3D4M0	159,11	159,57	289,81	365,35	26,06	23,16	50,69	41,00	0,23	1,88	508,73
3D4M90	168,09	168,53	288,60	362,32	25,55	22,75	48,02	39,22	0,22	2,38	498,88
3D4M45	168,16	168,60	294,60	368,31	25,02	22,33	47,60	38,94	0,22	1,72	512,18
3D4R0	160,56	160,98	289,48	364,97	26,08	23,17	48,37	39,45	0,23	1,78	503,91
3D4R90	167,56	167,97	288,82	362,80	25,61	22,80	45,86	37,75	0,22	2,43	498,38
3D4R45	171,35	171,83	297,36	371,79	25,03	22,34	47,61	38,94	0,22	1,67	515,44

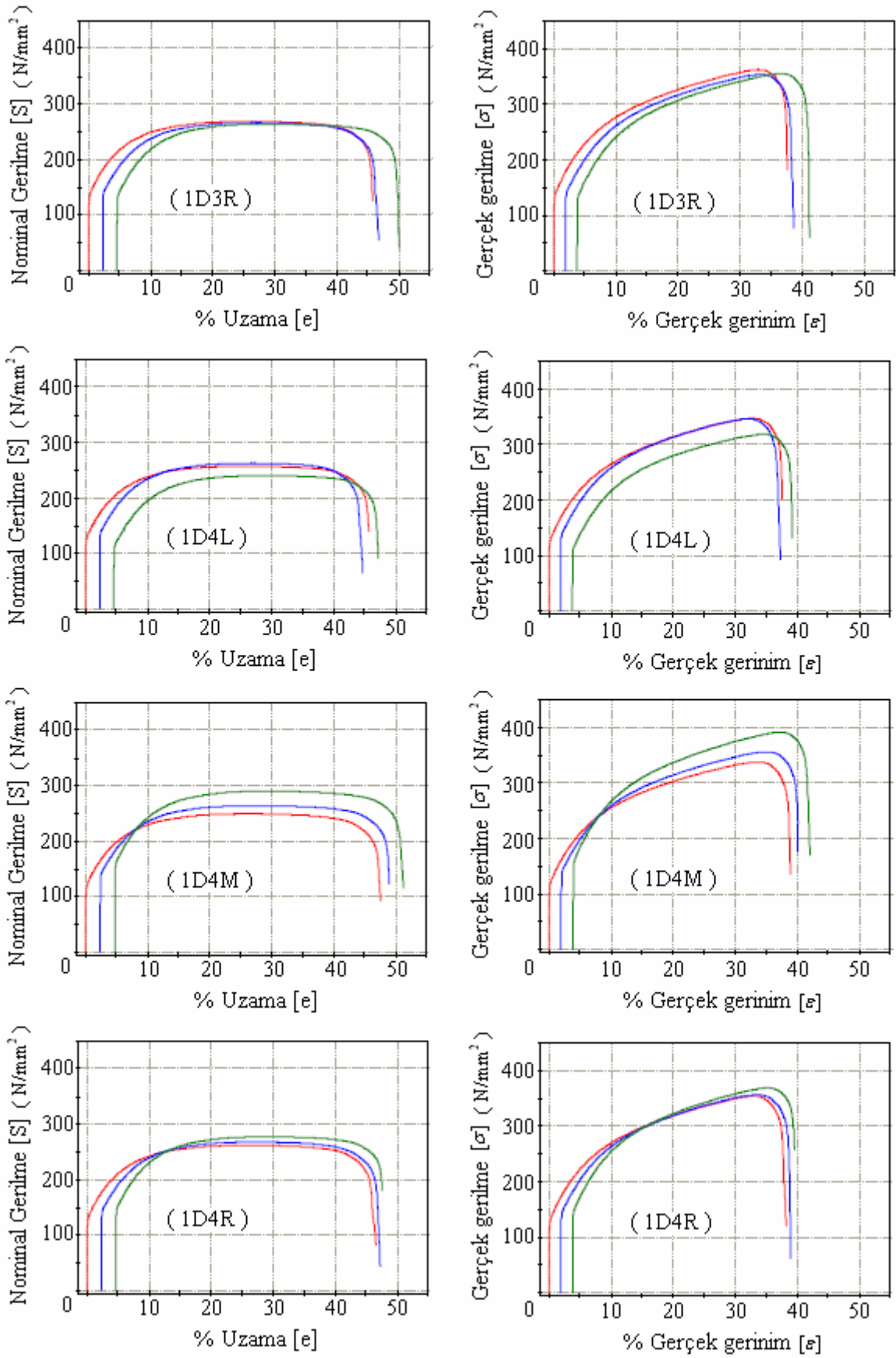
Çizelge 5.3'de sonuçları sıralanan çekme deneylerinin grafikleri, Şekil 5.11 ila Şekil 5.19 arasındaki şekillerde görülebilmektedir. Grafiklerde bulunan üçer eğriden her biri, o bölgenin farklı doğrultularından alınan numunelerin, ayrı ayrı çekme deneyi sonuçlarıdır. Buna göre, kırmızı eğriler haddeleme yönüyle  $0^0$ , mavi eğriler haddeleme yönüyle  $90^0$  ve yeşil eğriler de haddeleme yönüyle  $45^0$  açı yapan doğrultulardan alınan numunelerin çekme eğrileridir.



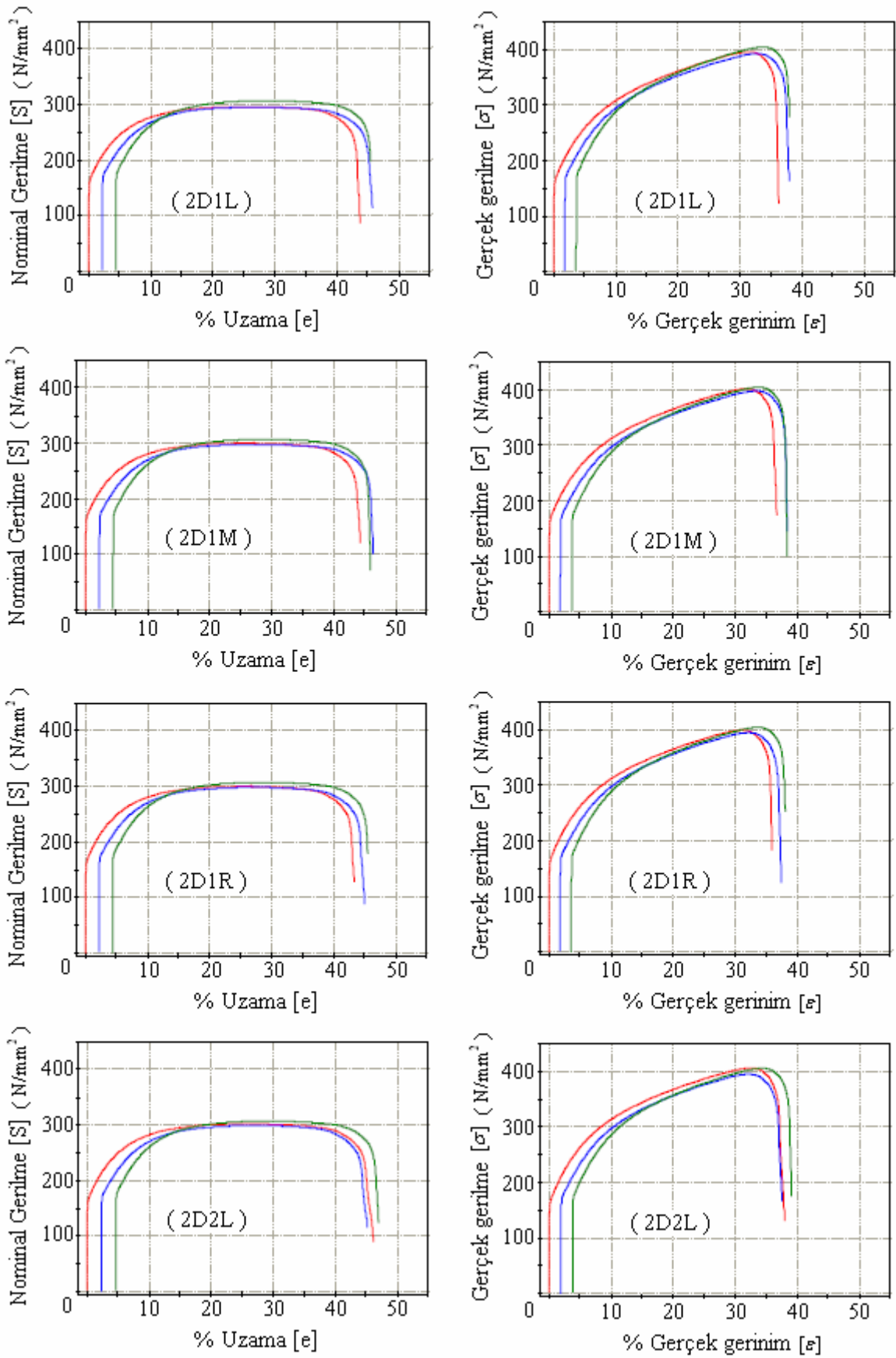
Şekil 5.11 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 1D1L – 1D2L



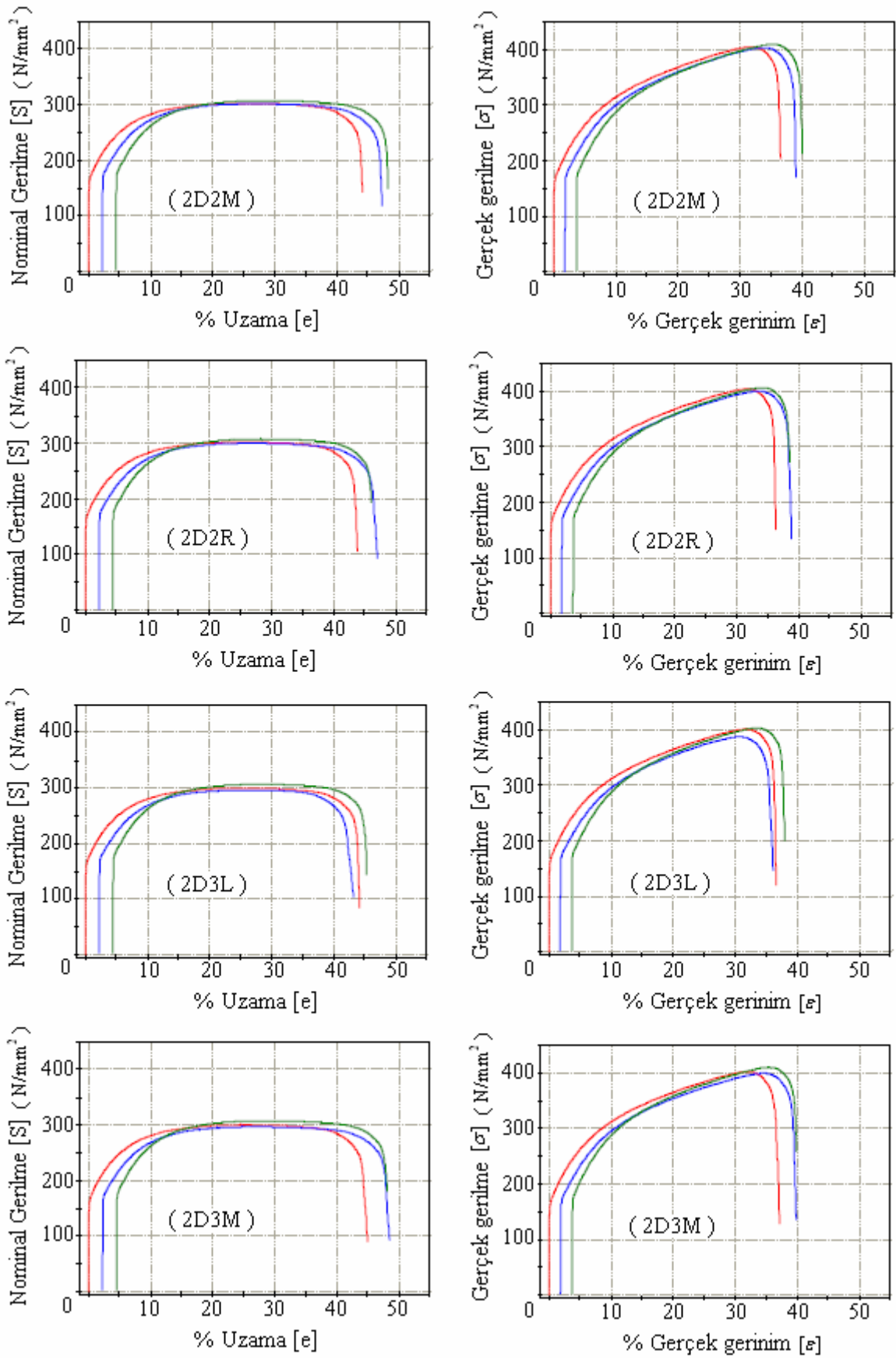
Şekil 5.12 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 1D2M – 1D3M



Şekil 5.13 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 1D3R – 1D4R

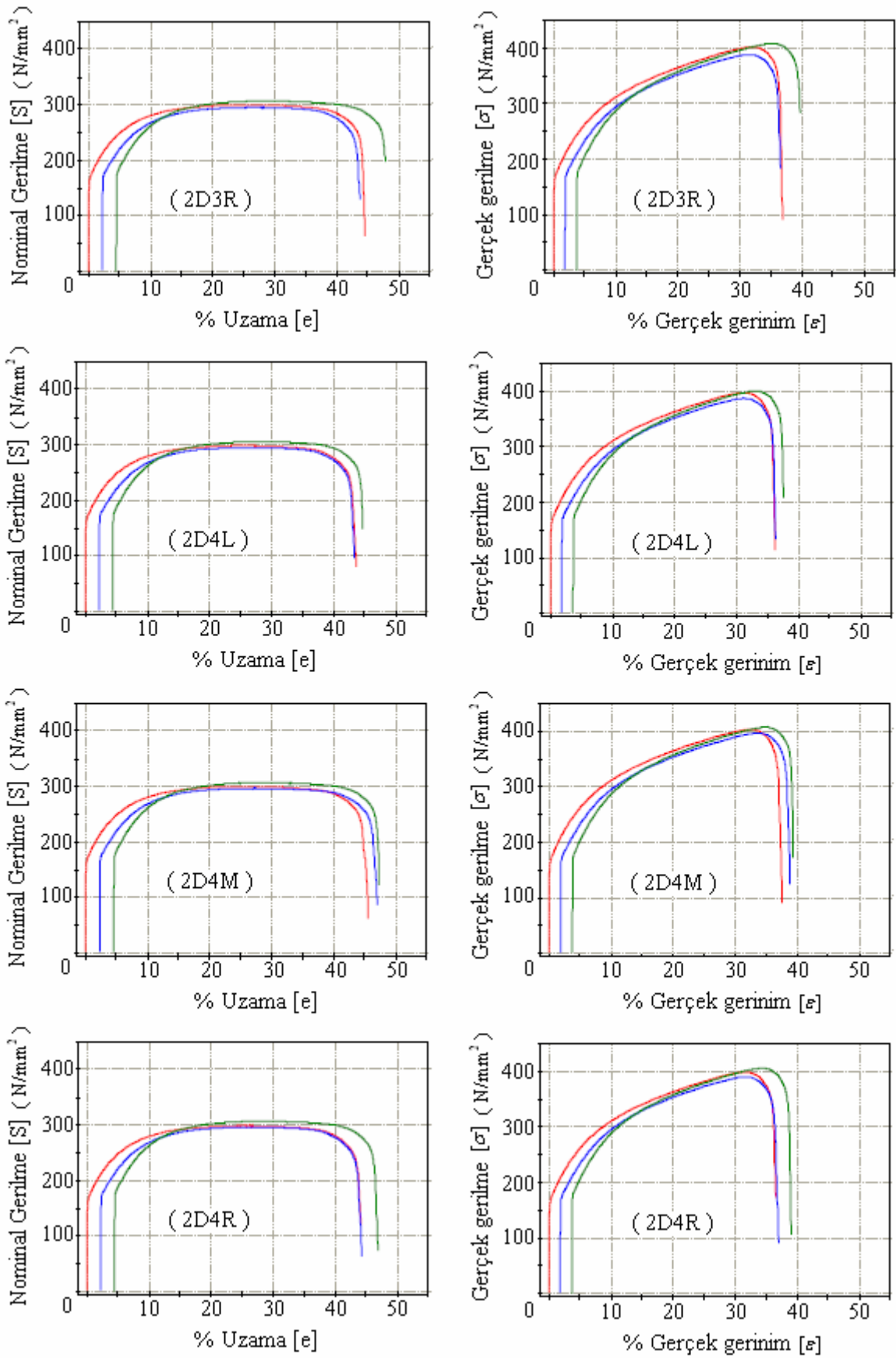


Şekil 5.14 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 2D1L – 2D2L

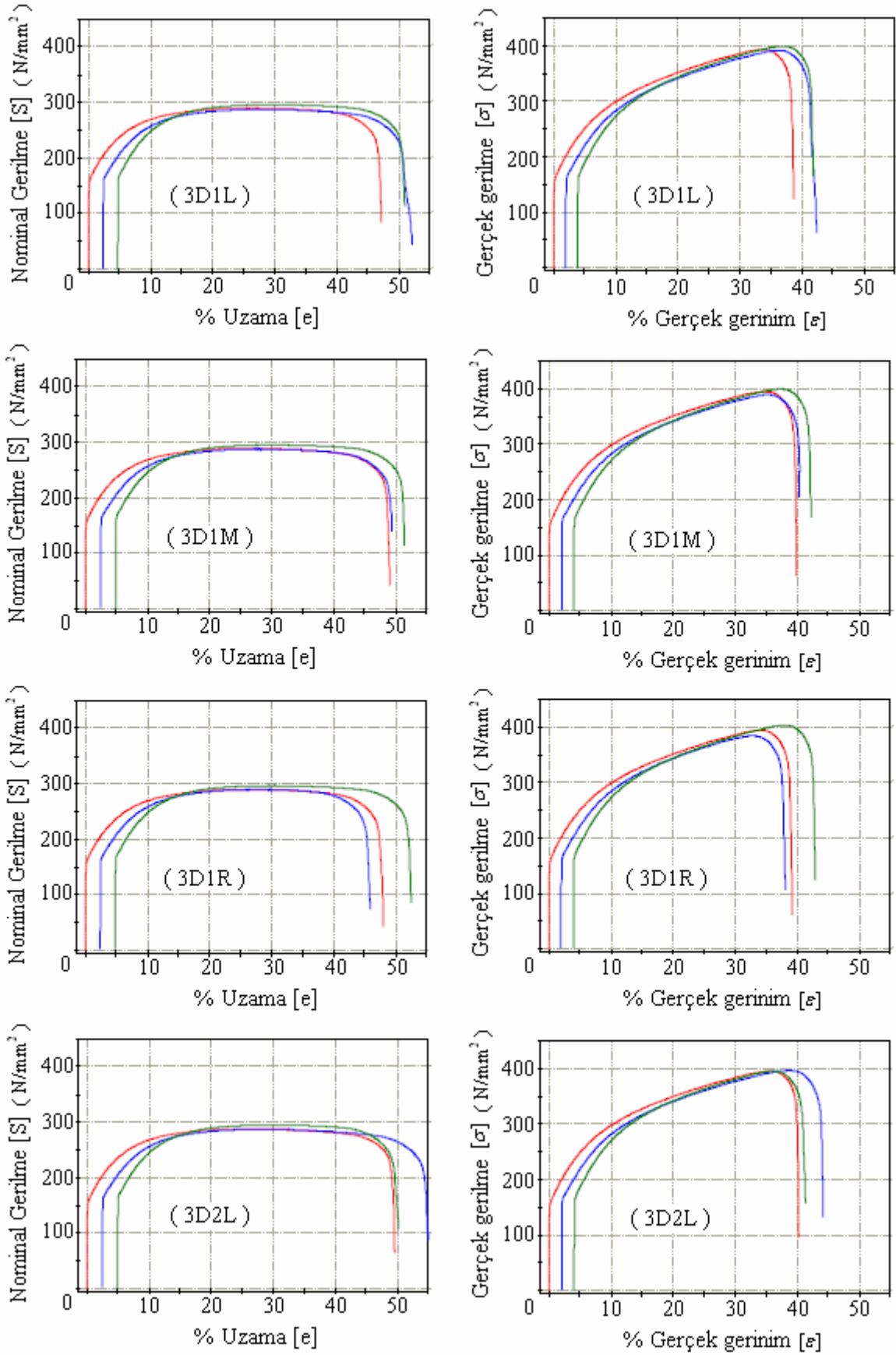


Şekil 5.15 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 2D2M – 2D3M

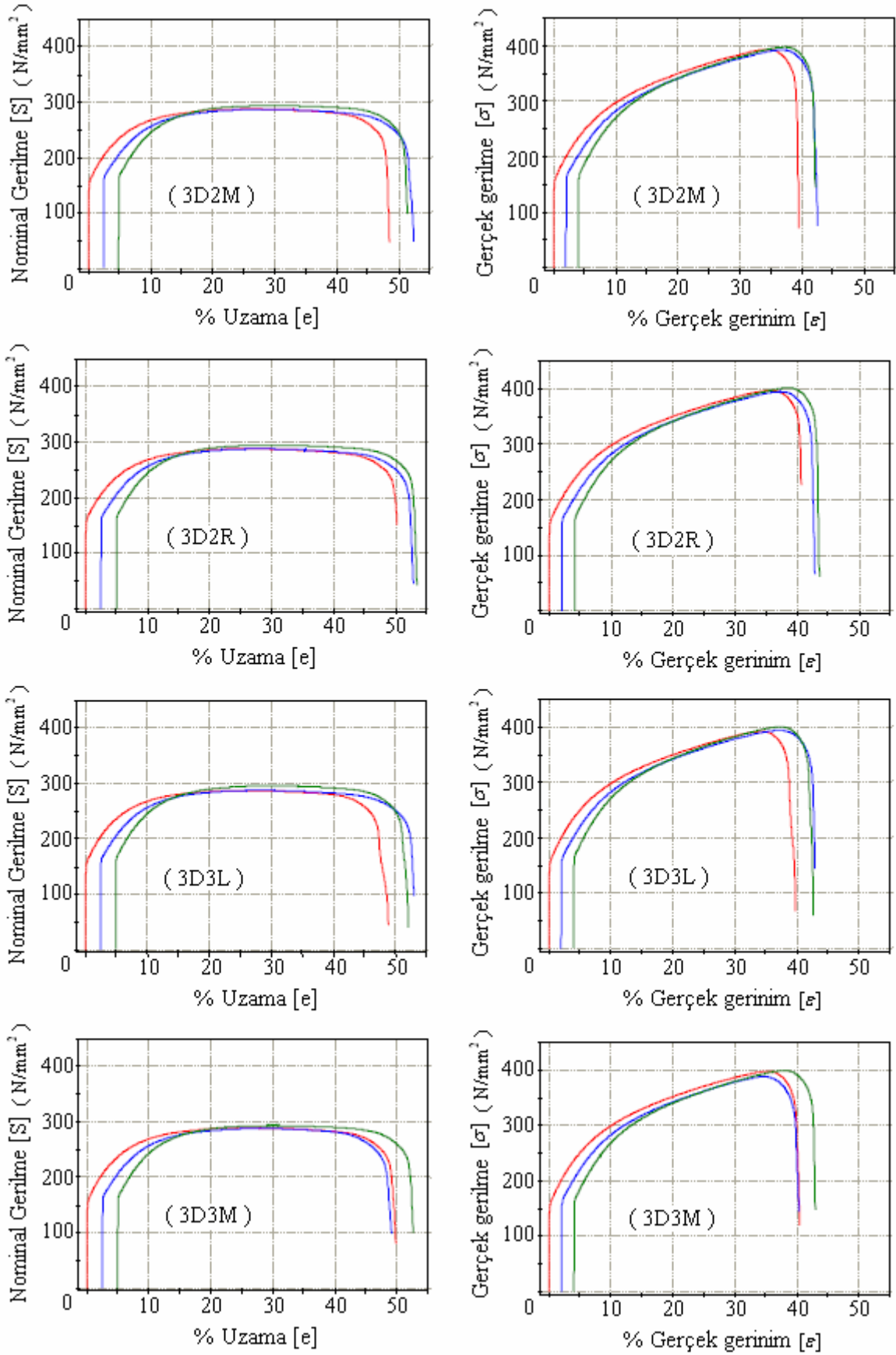




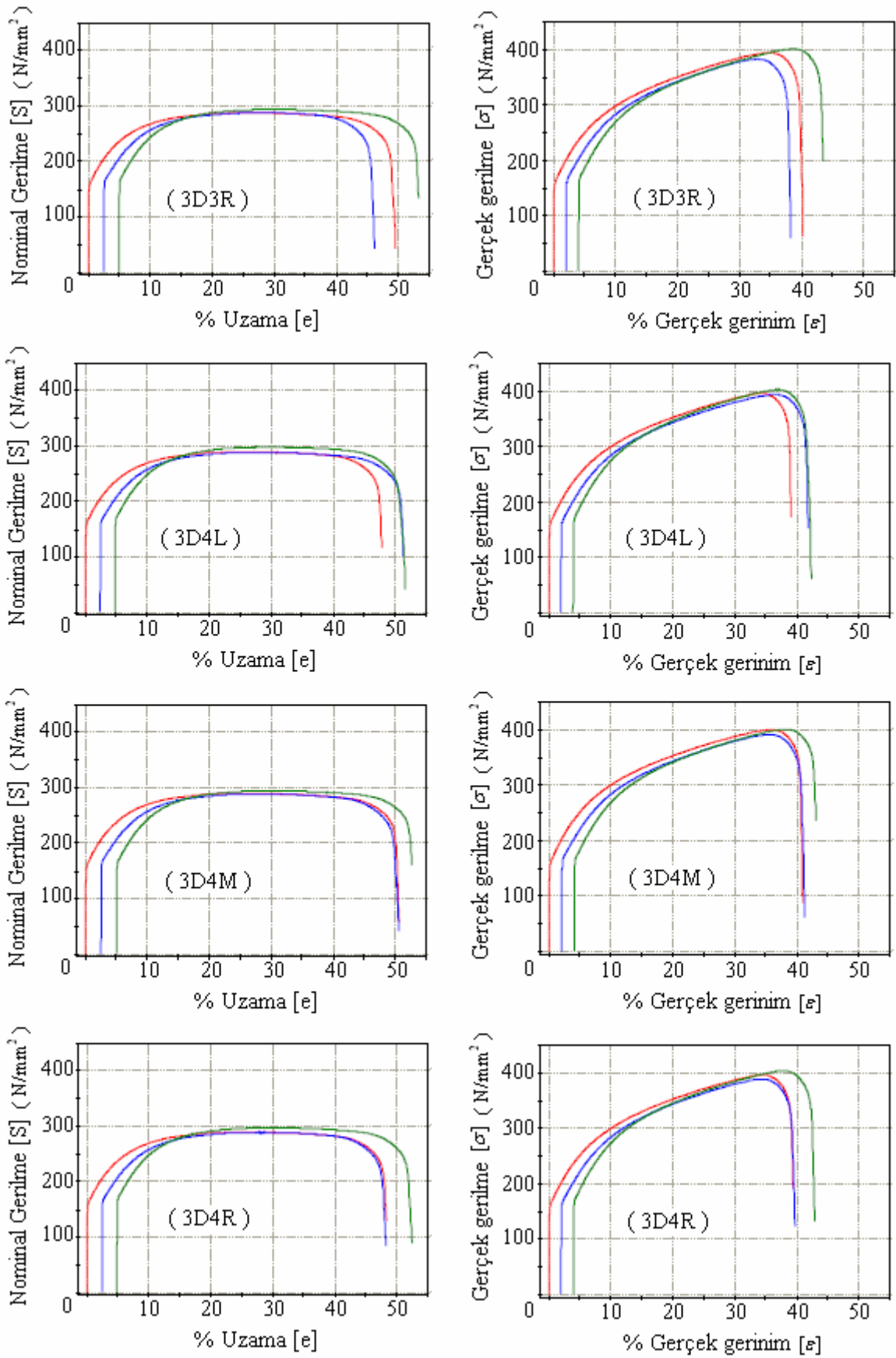
Şekil 5.16 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 2D3R – 2D4R



Şekil 5.17 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 3D1L – 3D2L

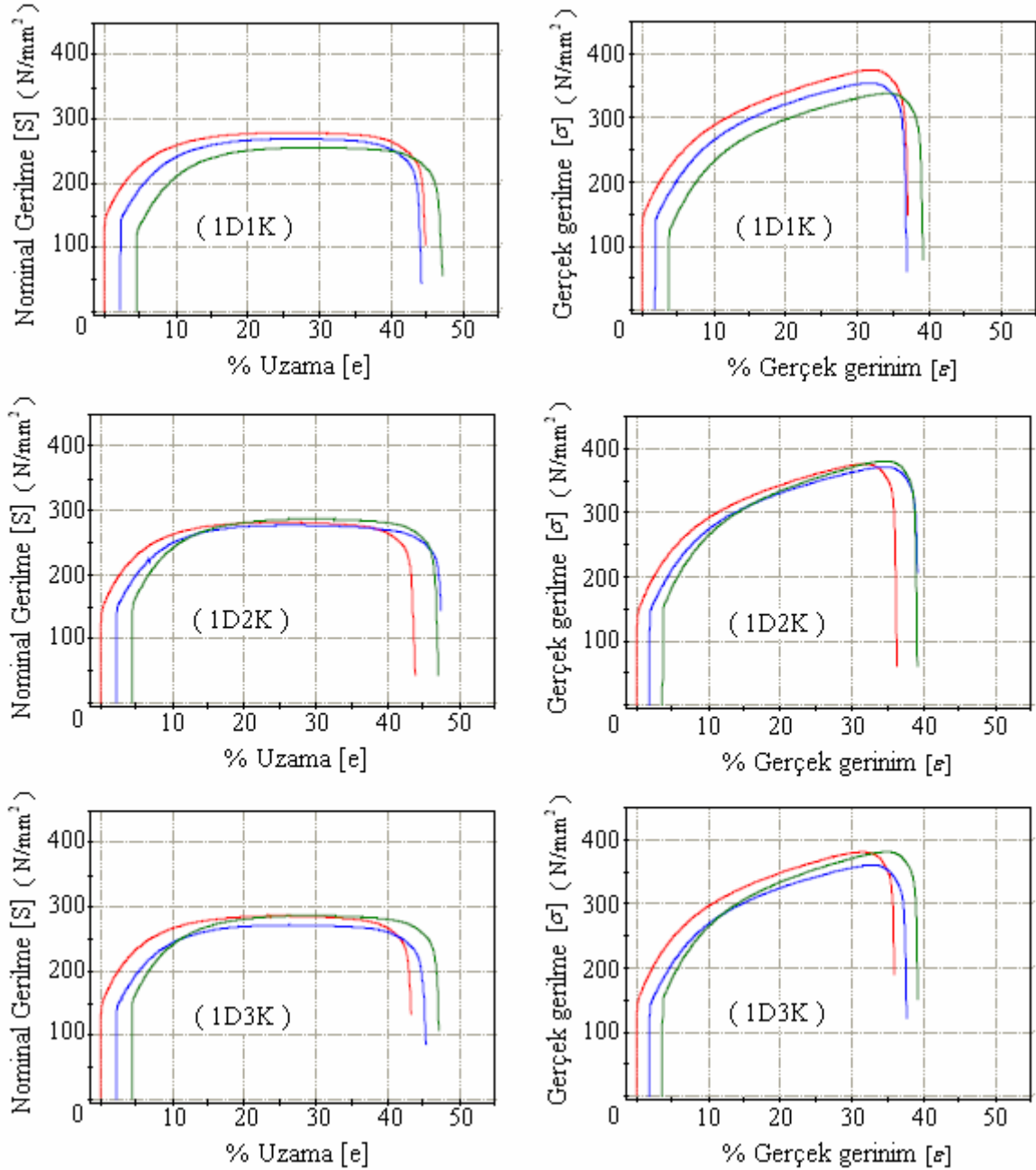


Şekil 5.18 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 3D2M – 3D3M



Şekil 5.19 Çekme deneylerinden elde edilen grafikler, 3D3R – 3D4R

Numunelerin alındığı birinci döküm sacların imalat hattında şekillendirilmelerinin izlenmesi sırasında, malzeme özelliklerinden kaynaklandığı anlaşılan, boyunlanma ve yırtılma gibi kusurlara sahip ıskarta parçaların imal edildiği taslak sacların hemen arkasından gelen taslakların alınıp çekme deneylerinin yapılmasıyla, Şekil 5.20'deki grafikler ve Çizelge 5.4'teki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.20 İmalatta tespit edilen kusurlu parçalara yakın bölgelerden alınan numunelerle yapılan çekme deneyleri grafikleri

İncelenen üç farklı döküm paketinin pres operasyonlarında şekillendirilmesinin takip edilmesi

sonucu, yalnızca birinci döküm paketinin şekillendirilmesi sırasında, malzeme düzensizliğinden kaynaklandığı anlaşılan kusurların oluşma sıklıkları büyük miktarlara ulaşmıştır. Bu nedenle işlem değişkenlerinin devamlı ayarlanmasının gerekliliği, şekillendirmenin verimliliğini çok azaltmış olduğundan döküm paketinin yarısında, paketin şekillendirilmesi iptal edilmiştir.

Çizelge 5.4 İmalatta tespit edilen kusurlu parçalara yakın bölgelerden alınan numunelerle yapılan çekme deneyleri sonuçları

Numune adı	$S_A$	$\sigma_A$	$S_{\sigma}$	$\sigma_{\sigma}$	$\epsilon_u$	$\epsilon_u$	$\epsilon_k$	$\epsilon_k$	n	r	K
1D1K0	147,92	148,30	279,08	351,34	25,90	23,03	44,78	37,01	0,24	1,96	495,26
1D1K90	147,37	147,76	269,41	335,41	24,50	21,91	41,94	35,02	0,24	2,05	478,77
1D1K45	126,94	127,26	255,84	318,66	24,56	21,96	42,64	35,51	0,26	1,65	471,95
1D2K0	145,94	146,34	281,45	351,99	25,06	22,36	43,74	36,28	0,24	1,46	504,75
1D2K90	151,08	151,46	276,66	343,68	24,22	21,69	45,25	37,33	0,23	1,88	490,67
1D2K45	157,12	157,53	286,21	357,47	24,90	22,23	42,62	35,50	0,23	1,58	505,35
1D3K0	149,28	149,67	285,82	357,43	25,05	22,36	43,32	35,99	0,24	1,51	509,06
1D3K90	146,36	146,73	271,84	337,66	24,21	21,68	43,15	35,87	0,24	1,79	484,73
1D3K45	156,94	157,34	286,27	357,32	24,82	22,17	42,80	35,63	0,23	1,47	506,64

#### 5.4.2 Sertlik ve Erichsen Çökertme Deneyleri Sonuçları

Deneysel çalışma kapsamında yapılan tüm sertlik ve Erichsen çökertme deneyleri sonuçları, Çizelge 5.5'te sıralanmıştır.

Çizelge 5.5 Erichsen çökertme ve sertlik deneyleri sonuçları

Paket Bölgeleri	Sertlik [HRB]	EÇD [mm]	Paket Bölgeleri	Sertlik [HRB]	EÇD [mm]	Paket Bölgeleri	Sertlik [HRB]	EÇD [mm]
1D1L	35	11,65	2D1L	33	11,4	3D1L	23	12,1
1D1M	37	11,5	2D1M	32,5	11,5	3D1M	25,25	11,9
1D1R	35	11,4	2D1R	32,5	11,5	3D1R	25,5	11,7
1D2L	30	11,5	2D2L	33	11,5	3D2L	25,5	12
1D2M	30	11,65	2D2M	33,2	11,7	3D2M	25,5	12,1
1D2R	31	11,75	2D2R	33	11,5	3D2R	26	12,1
1D3L	30	11,3	2D3L	33	11,6	3D3L	25,5	11,9
1D3M	30	11,3	2D3M	32,5	11,7	3D3M	26	11,8
1D3R	30	11,3	2D3R	33,5	11,4	3D3R	26	12
1D4L	32	11,2	2D4L	33,2	11,5	3D4L	26	11,7
1D4M	32	11,1	2D4M	33	11,3	3D4M	26	11,9
1D4R	31	11,2	2D4R	33,2	11,5	3D4R	26	11,9
1D1K	31	11,3						
1D2K	32	11,45						
1D3K	32	11,2						

### 5.5 Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Yapılan çekme deneylerinin grafikleri incelendiğinde, tüm grafiklerin ortak özelliği olarak ilk göze çarpan, en ufak bir belirgin akmanın ve dolayısıyla akma uzamasının görülmemesidir. Bunun nedeni, daha önce de bahsedildiği gibi çelik sacların üretiminden, daha doğrusu incelenen sac temper haddelenme işleminden geçtiği için temper haddelenmesinden tekrar soğuk şekillendirilmelerine kadarki sürenin, her malzeme için değişen yaşlanma başlangıcı zaman sınırını, bu üç farklı döküm sac paketinde de aşmamasıdır. Dolayısıyla incelenen sacların tümü imal edilmelerinden itibaren bir iki ay içerisinde şekillendirilmiştir denilebilir. Pres operasyonlarından örnekler incelendiğinde ise belirgin akmadan kaynaklanan kusurlara rastlanılmadığı görülmüştür. Ayrıca belirgin akmanın hiçbir sacda görülmemesi, akma uzamasından kaynaklanan, olası mekanik özellik değişimlerini ortadan kaldırmıştır.

İlk döküm paketinden alınan örnek sacla yapılan içyapı incelemelerinde malzemenin tane boyutunun ASTM 8 ile 9 arasına denk geldiği saptanmıştır. Şekillendirme sırasında ortaya çıkan yüzey kusurlarından portakallanmanın ASTM 5 tane büyüklüğünden daha aşağı değerlerde ortaya çıkması, deneyleri yapılan malzemenin bu kusurdan muaf olduğunun kanıtıdır.

SCGA 270 D kalitesindeki soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik saca uygulanan tek eksenli çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikler, öncelikle, numunelerin birbirlerine çok yakın bölgelerden alınmasına rağmen, doğrultulara göre değişiklikler göstermektedir. Çizelge 5.6'da her farklı döküm paketinden alınan numunelerin haddelenme yönüyle değişen açılara göre farklılaşan mekanik özelliklerinin ortalamaları görülmektedir.

Çizelge 5.6 Elde edilen tüm çekme deneyleri sonuçlarının farklı doğrultulara göre ortalamalarının farklı döküm paketleri için gösterilmesi

Ortalama adı	$S_A$	$S_{\phi}$	$e_u$	$e_k$	n	r	K
1D0	150,1133	282,7883	25,6658	45,2816	0,2342	1,7708	499,9542
1D90	155,3867	278,8067	24,5325	43,6508	0,2300	2,1175	489,0092
1D45	156,9630	284,9267	24,6850	44,2592	0,2300	1,5567	501,3583
2D0	165,7708	299,6533	25,5025	44,3692	0,2208	1,8900	520,4783
2D90	174,4325	297,3617	24,6483	43,3383	0,2167	2,4667	509,9125
2D45	177,9525	306,6342	24,1742	42,0875	0,2192	1,6433	527,4150
3D0	159,1158	288,3967	26,1100	48,9633	0,2292	1,8000	503,6517
3D90	166,9333	287,7425	25,5875	48,0725	0,2200	2,4458	497,7875
3D45	169,0525	295,3925	24,9942	47,1417	0,2200	1,7525	512,1183

Bu çizelgeye göre her bir değer, paketin farklı bölgelerinden alınan 12şer farklı numuneden elde edilen aritmetik ortalamadır. Ayrıca Şekil 5.22'den 5.32'ye kadar olan şekillerde de tüm çekme deneylerinin doğrultulara göre ortalamaları görülebilmektedir. Akma dayanımı ortalamalarına bakıldığında, her üç döküm paketinden alınan numunelerin de haddeleme yönüne  $45^0$ 'lik doğrultularda, diğer doğrultulardan daha yüksek değerler aldığı göze çarpmaktadır. En düşük değerlerin haddeleme yönünde olduğu ve hadde yönüne dik doğrultularda ise değerlerin,  $45^0$ 'lik değerlere daha yakın olduğu aşıkardır. Çıkan sonuçlara göre haddeleme yönlerindeki akma dayanımlarının en düşük olması, hacim merkezli kübik kafes yapısına sahip metallerde, kaymaların öncelikle meydana geldiği  $\langle 111 \rangle$  doğrultu ailelerinin büyük çoğunlukla bu yönlere denk gelmesinden ileri gelmektedir. Haddeleme yönlerine  $45^0$ 'lik doğrultulardan alınan numunelerin akma dayanımlarının yüksek olması ise  $\langle 111 \rangle$  doğrultularına yönelmelerin bu yönde daha zor olması ve dolayısıyla şekil değişimine karşı direncin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Bahsedilen bu kristalografik anizotropiyle beraber, mekanik özelliklerde ortaya çıkan değişimlere neden olan etmenlerden bir başkasının da malzemedeki süreksizliklerden kaynaklanan anizotropi olduğu daha önce not edilmişti. Şöyle ki, haddeleme sırasında mekanik liflenmeyle beraber, malzemedeki bulunan kalıntı, katışkı ve boşluk gibi süreksizliklerin haddeleme yönünde uzamaları, sacın özellikle haddeleme yönüne dik doğrultudaki dayanımının düşmesine neden olmaktadır. Nitekim Çizelge 5.6'ya bakıldığında, incelenen saca uygulanan çekme deneyleri sonucunda,  $90^0$ 'lik doğrultularda malzemelerin çekme dayanımlarının en düşük değerler aldığı görülmektedir (Şekil 5.24). Akma dayanımı hususunda olduğu gibi çekme dayanımında da haddeleme yönüne  $45^0$ 'lik doğrultulardaki deneylerin en yüksek değerleri verdiği, bu ortalama çizelgesinden çıkarılan bir başka sonuçtur.

Çizelge 5.6'dan, üç farklı döküm paketiyle incelenen çelik sacın, maksimum üniform uzama ve kopmadaki uzama yüzdesi değerlerinin, haddeleme yönüne  $0^0$ ,  $90^0$  ve  $45^0$ 'lik açılardaki değişimlerine bakıldığında, haddeleme yönündeki ( $0^0$ ) uzama değerlerinin en yüksek çıktığı görülmektedir (Ayrıca Şekil 5.26 ve 5.28). Bu sonuç da teorik olarak beklenen bir sonuçtur ve malzemenin kristalografik ile mekanik anizotropisinden kaynaklanmaktadır. Haddeleme yönüyle  $90^0$ 'lik doğrultulardan elde edilen ortalama uzama değerleri, incelenen ilk döküm paketinde  $45^0$ 'lik doğrultu değerlerine göre daha düşük, ikinci ve üçüncü pakette ise daha yüksektir. Kristalografik anizotropi nedeniyle, haddelemeye dik doğrultudaki uzama değerlerinin daha yüksek mertebelere erişmesinin beklenmesine rağmen, boyunlanmanın ve



kopmanın erken oluşmasına neden olan birtakım etkenlerin olduğu açıktır. Bunlar içerisinde ilk akla geleni, içyapıda, haddeleme yönüne paralel uzanmış kalıntı, katışkı ve boşluk gibi süreksizliklerdir. Bu bakımdan incelenen birinci döküm paketinin çok az da olsa diğerlerine göre daha fazla süreksizlik içerdiği sonucunu çıkarmak mümkün olmaktadır.

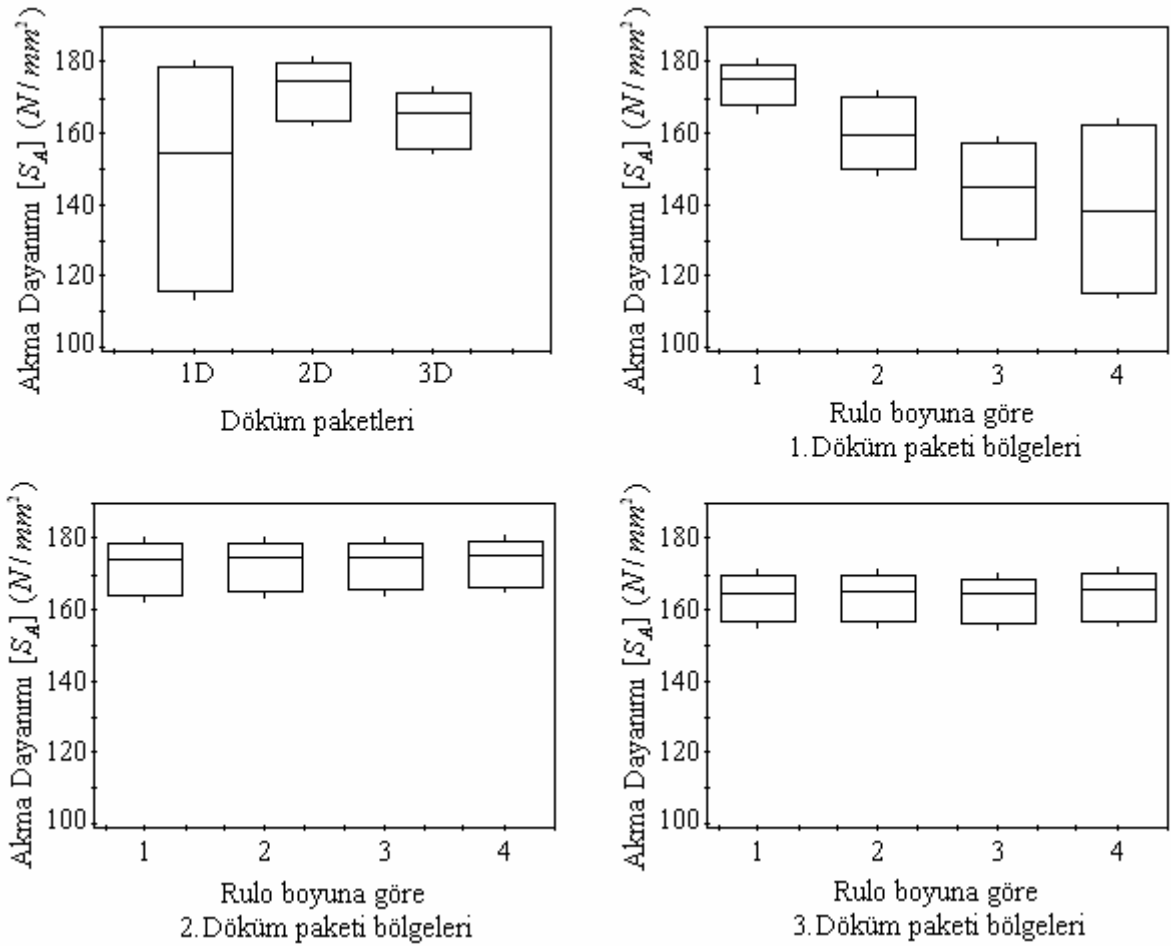
Bilindiği gibi,  $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$  denkleminin  $\sigma - \varepsilon$  koordinatlarında çizdiği eğriye yakın değerler veren malzemelerde, teorik olarak, en yüksek üniform uzama değerlerinin ( $\varepsilon_u$ ), pekleşme üsteline eşit olduğu kabul edilir. Dolayısıyla n değerinin artması, yani pekleşme sonucu kesitin yük taşıma kapasitesinin artması, üniform şekil değiştirme alanını büyütmektedir. Çizelge 5.6'ya bakıldığında, haddeleme yönüne  $0^0$ ,  $90^0$  ve  $45^0$ 'lik doğrultulara göre ayrı ayrı n değeri ortalamalarının her bir döküm paketinde de aynı şekilde olduğu, yani  $0^0$  doğrultularında diğer doğrultulardan -az farklılık da olsa- daha fazla olduğu göze çarpmaktadır.  $90^0$  ve  $45^0$ 'lik doğrultularda ise n değerleri, daha düşük bir düzeyde ve birbirlerine yakın sonuçlanmıştır (Ayrıca Şekil 5.30). Bu sonuç, yüzde üniform uzama değerlerindeki açısal bazda ortalama durumlarına eşdeğerdir. Bu nedenle,  $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$  denklemindeki  $\varepsilon_u$  ve n ilişkisi doğrulanmaktadır. Ancak bu iki karakteristiğin, yapılan hiçbir deneyde birbirine eşit olmadığı sonucu da aşikardır. Fakat nominal eğri yerine gerçek eğri sonucu olan yüzde tekbiçim gerinim değerlerine bakıldığında, bu değerlerin birbirlerine neredeyse eşit oldukları ve  $\varepsilon_u$  değerlerinin çok az farkla n değerlerini aştığı görülmektedir.

Haddeleme yönüne göre doğrultuların farklılığına göre alınan ortalama değerlerden plastik gerinim oranları incelendiğinde, Çizelge 5.6'dan da görülebileceği gibi, haddeleme yönüne  $90^0$ 'lik doğrultuda beklenildiği gibi en yüksek,  $45^0$ 'lik doğrultuda ise en düşük değerlerin elde edildiği ve  $0^0$ 'lik doğrultuda ise plastik gerinim oranlarının  $45^0$ 'lik doğrultuların ortalamasına daha yakın sonuçlandığı anlaşılmaktadır (Ayrıca Şekil 5.32). Bu değerlerin farklı doğrultularda bu şekilde farklılaşması, derin çekme işlemlerinde kulaklanmayı oluşturarak, flanşa fazla malzeme kaybına sebebiyet vermektedir. Derin çekmenin son aşamalarında kulak oluşmuş bir flanşa, çukurları teşkil eden  $45^0$ 'lik doğrultulardaki düşük r değerlerindeki bölgeler, kalıp boşluğuna daha önce akmaktadır. Kulaklanmada tepeleri meydana getiren r değerlerine sahip  $0^0$ 'lik ve  $90^0$ 'lik bölgeler ise, hala flanşa deformasyona maruz kalmaya devam etmektedir. Kısacası derin çekilen parçanın flanşında çukur kısımlar, haddeleme yönüyle  $45^0$ 'lik doğrultu ve tepe oluşturan kısımlar da  $0^0$  ile  $90^0$ 'lik doğrultular olarak ayırt edilebilmektedir.

Farklı döküm paketlerinde haddeleme yönüne göre farklı doğrultularda elde edilen dayanım

katsayısı ortalamaları incelendiğinde, çekme dayanımına benzer olarak,  $45^0$ 'lik doğrultularda en yüksek ve  $90^0$ 'lik doğrultularda ise en düşük değerler elde edilmiştir.

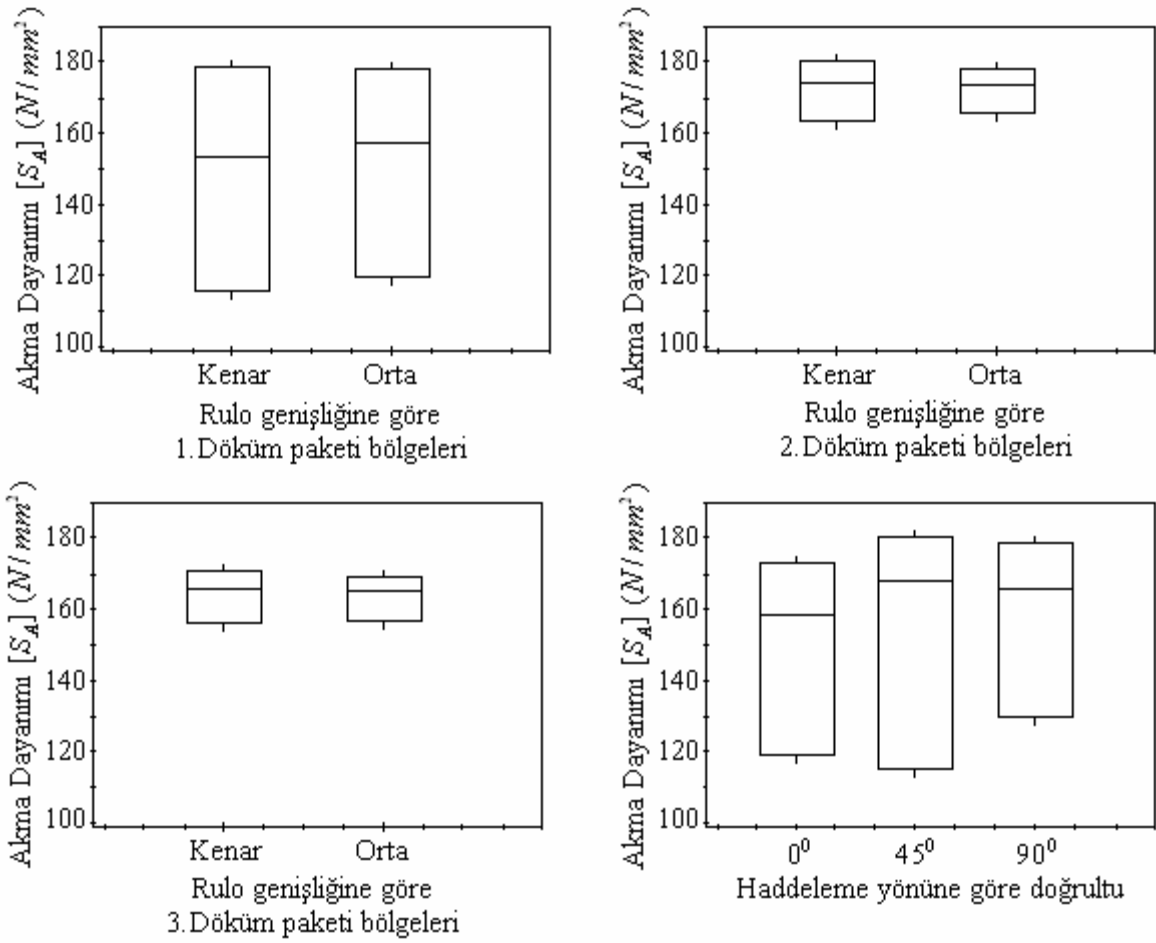
Çizelge 5.3'te verilen tüm çekme deneyleri sonuçlarının, öncelikle, aynı bölgeden ancak farklı doğrultulardan alınan değerlerinin, 5.1 eşitliğine göre hesaplanmasıyla elde edilen birincil ortalama değerleri, her bir bölge için bulunmuştur. Daha sonra bu bölgelerin paket içindeki konumları dikkate alınarak hem rulo boyunca hem de rulo genişliğince ortalamaları hesaplanmıştır. Son olarak da her bir mekanik özelliğin paketlere göre ayrı ayrı ortalama değerleri bulunmuştur. Elde edilen tüm sonuçlar, Ek-1'de ortalama değer çizelgeleri olarak gösterilmektedir. Bu değerler, daha anlaşılabilir olmaları açısından, mekanik özellik cinsine göre sırasıyla, takip eden şekillerde kutu grafikleri halinde belirtilmiştir.



Şekil 5.21 Akma dayanımının döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi

Şekil 5.21'den göze çarpan en önemli sonuç hiç şüphesiz, ilk incelenen döküm paketinde akma dayanımının değişim aralığının, diğer iki pakete nazaran oldukça fazla olmasıdır. Şöyle

ki; birinci pakette en yüksek - en düşük akma dayanımı farkı  $N/mm^2$  olarak 63,59 iken, ikinci döküm paketinde 16,04 ve üçüncü döküm paketinde 14,55 olarak ölçülmüştür. Kutu grafiklerin orta çizgisinden de yaklaşık olarak görülebildiği gibi birinci pakette akma dayanımı  $N/mm^2$  olarak 154.86, ikinci pakette 174.03 ve üçüncü pakette 166.04 olarak sonuçlanmıştır. Toplamda alınan en yüksek sonuç ikinci pakette 179,75  $N/mm^2$  olurken, en düşük sonuç ise birinci pakette 115,17  $N/mm^2$  olmuştur.

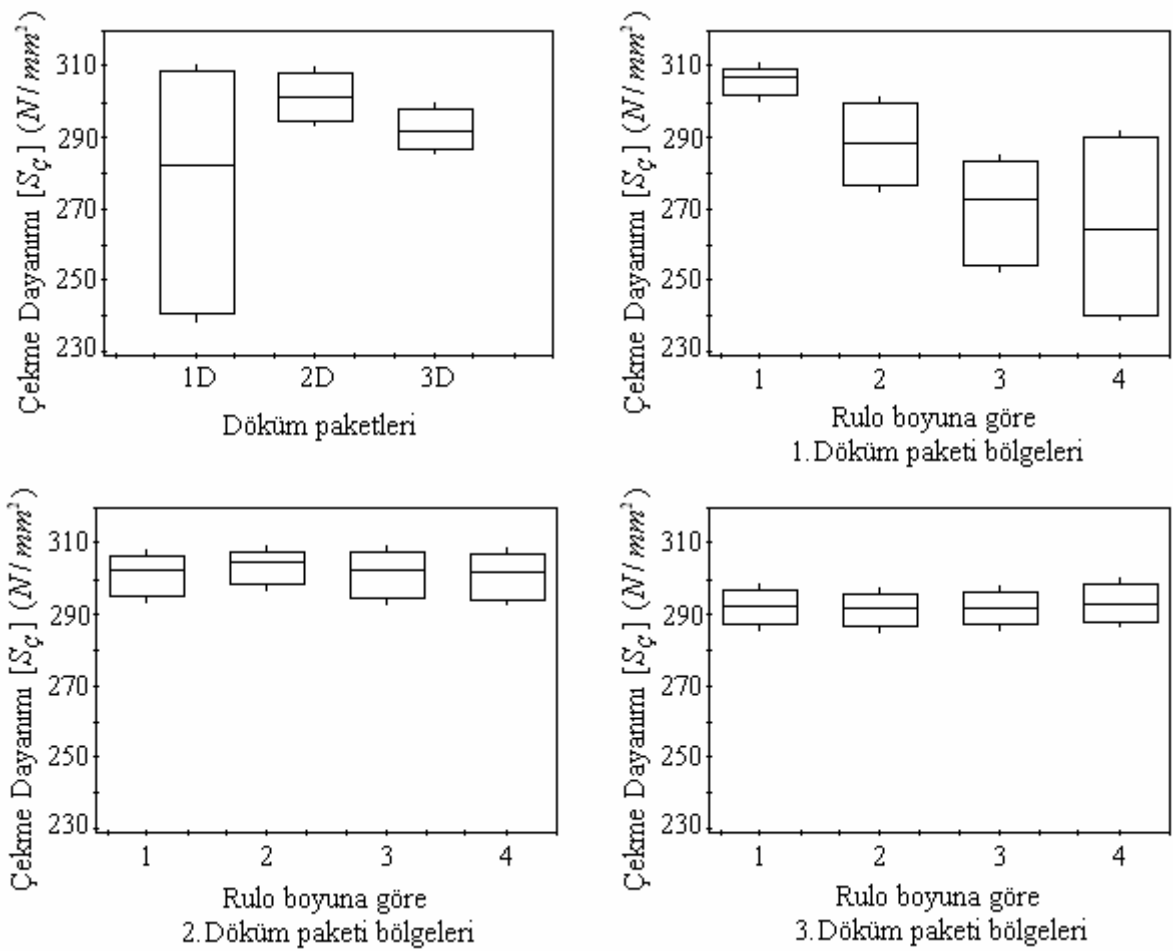


Şekil 5.22 Akma dayanımının rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi

Birinci dökümün açılmış rulo uzunluğunun farklı kısımlarından eşit aralıklarla alınan örneklerin ortalamalarında, akma dayanımı paket sonuna doğru sürekli azalan bir görüntü sergilerken, akma dayanımının değişim aralığı bariz bir şekilde artış göstermiştir. İkinci ve üçüncü döküm paketinde ise akma dayanımının paket başından paket sonuna doğru değişiminde görünür önemli bir fark olmamış ve değişim aralıkları dar sınırlarda kalmıştır.

Yapılan tüm deneylerde, daha önceden de bahsedildiği gibi, L ve R ile adlandırılan bölgeler

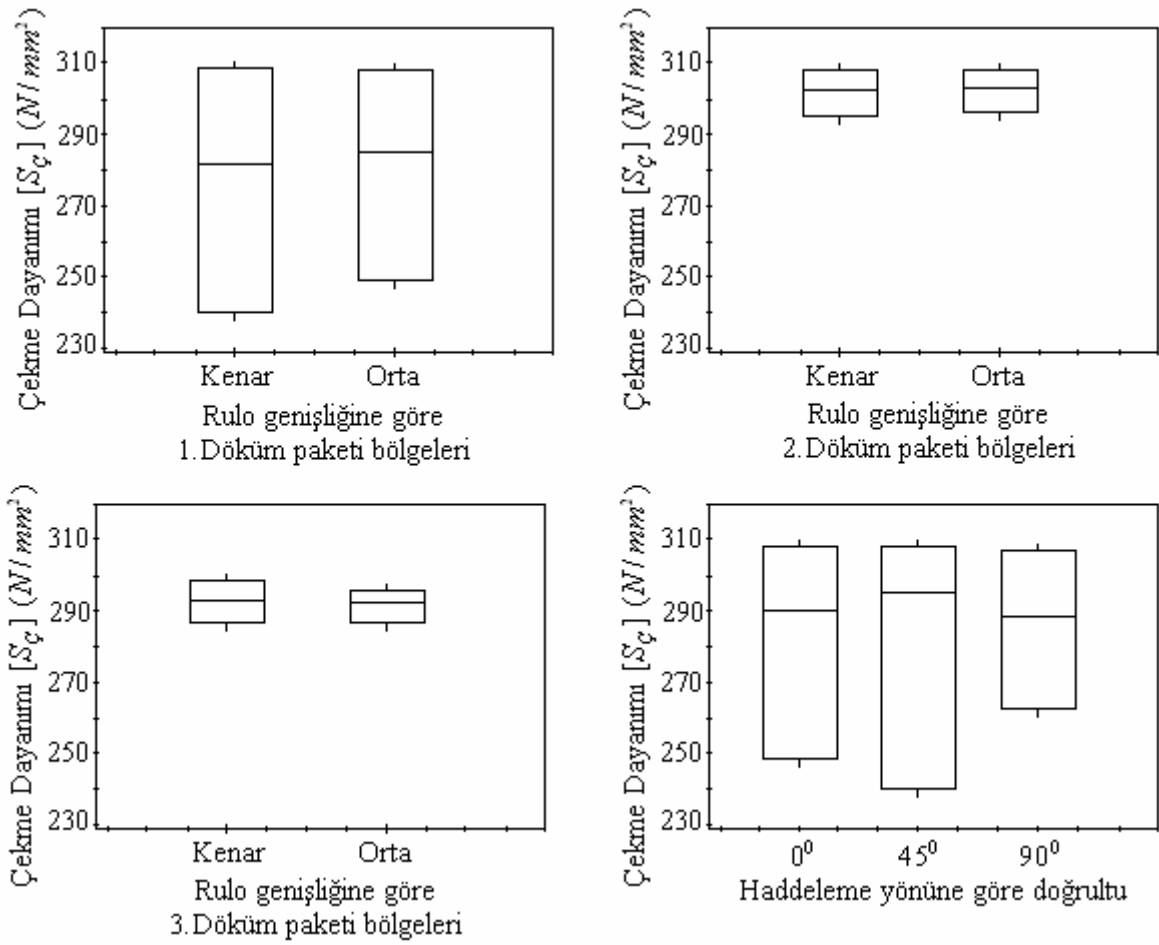
rulo genişliğine göre kenarlardan, M ile adlandırılanlar ise orta kısımlardan alınan numunelerdi. Şekil 5.22’de belirtilen “kenar” ibaresi bu nedenle L ve R numunelerinin ortalamalarını içermektedir. Söz konusu şekilde dikkat çeken en önemli husus, akma dayanımlarının rulo genişliğine göre orta kısımlarda, kenar kısımlara nazaran, her üç döküm paketinde de aynı şekilde, daha dar değişim aralıklarında bulunmasıdır. Ayrıca her üç pakette de elde edilen en yüksek ve en düşük değerler, kenar kısımlardan alınan numunelerden sonuçlanmıştır. Ortalamalara bakıldığında ise birinci döküm paketinin bir kez daha ikinci ve üçüncü paketlerle uyuşmadığı görülür. Çünkü birinci pakette akma dayanımı ortalaması, kenar kısımda daha az iken ikinci ve üçüncü pakette kenar kısımda daha fazladır.



Şekil 5.23 Çekme dayanımının döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi

Şekil 5.23’ten çekme dayanımlarının değişimleri incelendiğinde, kutu grafiklerin, aynı bazdaki akma dayanımı değişimlerine (Şekil 5.21) oldukça benzediği görülmektedir. Örneğin çekme dayanımı değişimleri, birinci pakette oldukça geniş bir aralıkta gözlenmiştir. Şöyle ki;

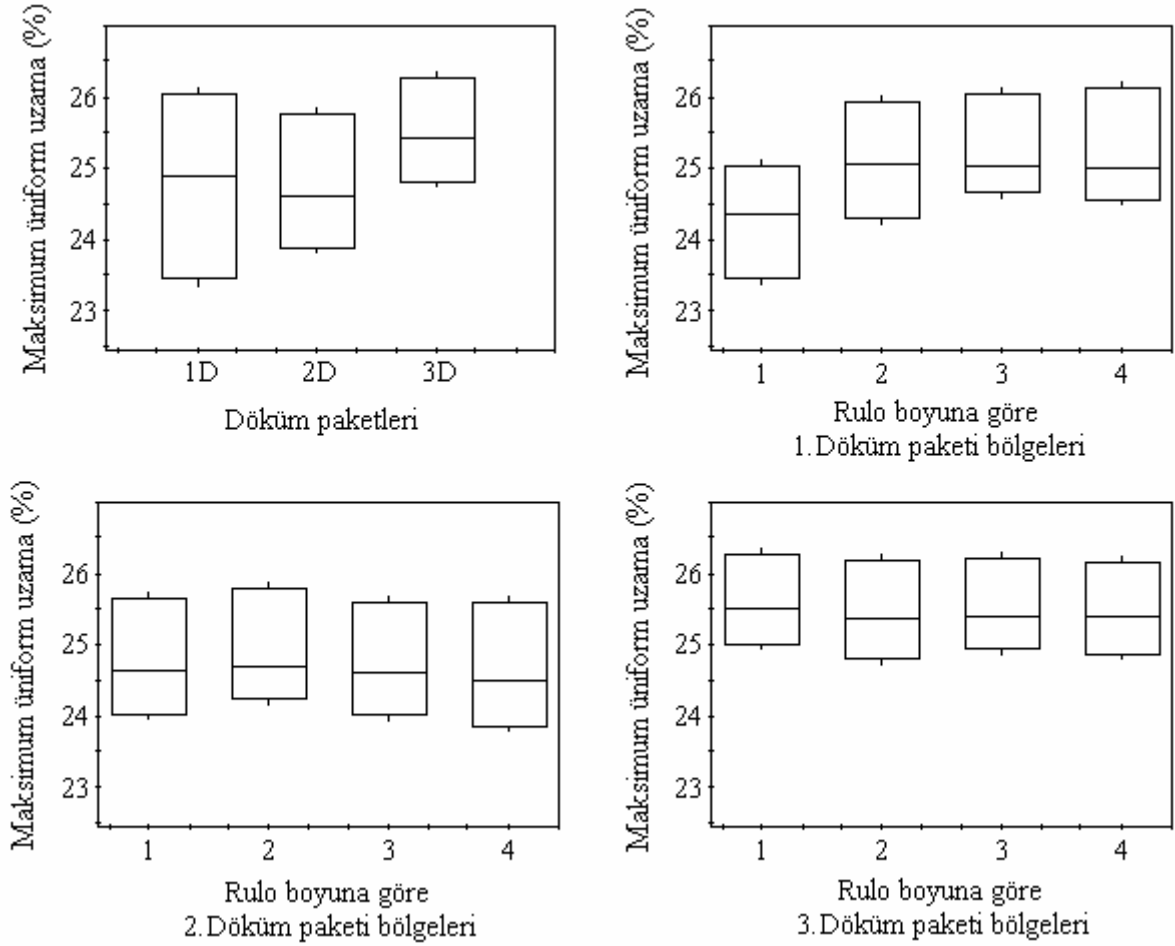
birinci pakette çekme dayanımlarının en yüksek ve en düşük değerlerinin farkı  $N/mm^2$  olarak 68,13 iken, ikinci pakette 12,36 ve üçüncü pakette 11,76 olarak sonuçlanmıştır. Üç döküm paketinin genelinde elde edilen en yüksek çekme dayanımı birinci pakette  $308,30 N/mm^2$  ve en düşük değer ise tekrar birinci pakette  $240,48 N/mm^2$  olarak ölçülmüştür. Ortalama değerler ise  $N/mm^2$  olarak; birinci pakette 282,86, ikinci pakette 302,57 ve üçüncü pakette 291,73 şeklindedir. Akma dayanımıyla benzer şekilde, birinci pakette elde edilen çekme dayanımı değerlerinin, rulo boyuna göre bölgeler değiştikçe azaldıkları ve değişim aralıklarının arttığı gözlenmiştir. Ancak burada akma dayanımına göre farklılık, özellikle ikinci ve üçüncü paketlerin değişim aralıklarının daha dar olması şeklindedir.



Şekil 5.24 Çekme dayanımının rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi

Çekme dayanımının rulo genişliğine göre değişim sınırlarına ve ortalamalarına bakıldığında, kenar ve orta kısımların birbirlerine göre dayanım farklılığı, akma dayanımında olduğu gibi bir kez daha kendini göstermektedir. İncelenen her üç döküm paketinde de orta kısımlarının

dayanımlarının daha dar aralıklarda değiştiği ve en yüksek ile en düşük değerlerin daima kenarlarda elde edildiği aşıkardır. Ancak çekme dayanımı ortalamalarının kenar ve orta kısımda birbirlerine çok yakın olması ve bu değerlerin birinci ve ikinci pakette orta kısımda daha büyük olurken üçüncü pakette kenar kısımda daha büyük olması nedeniyle, genel olarak kenarlarda dayanımın daha fazla olduğu yargısına kesin olarak ulaşmak zordur.

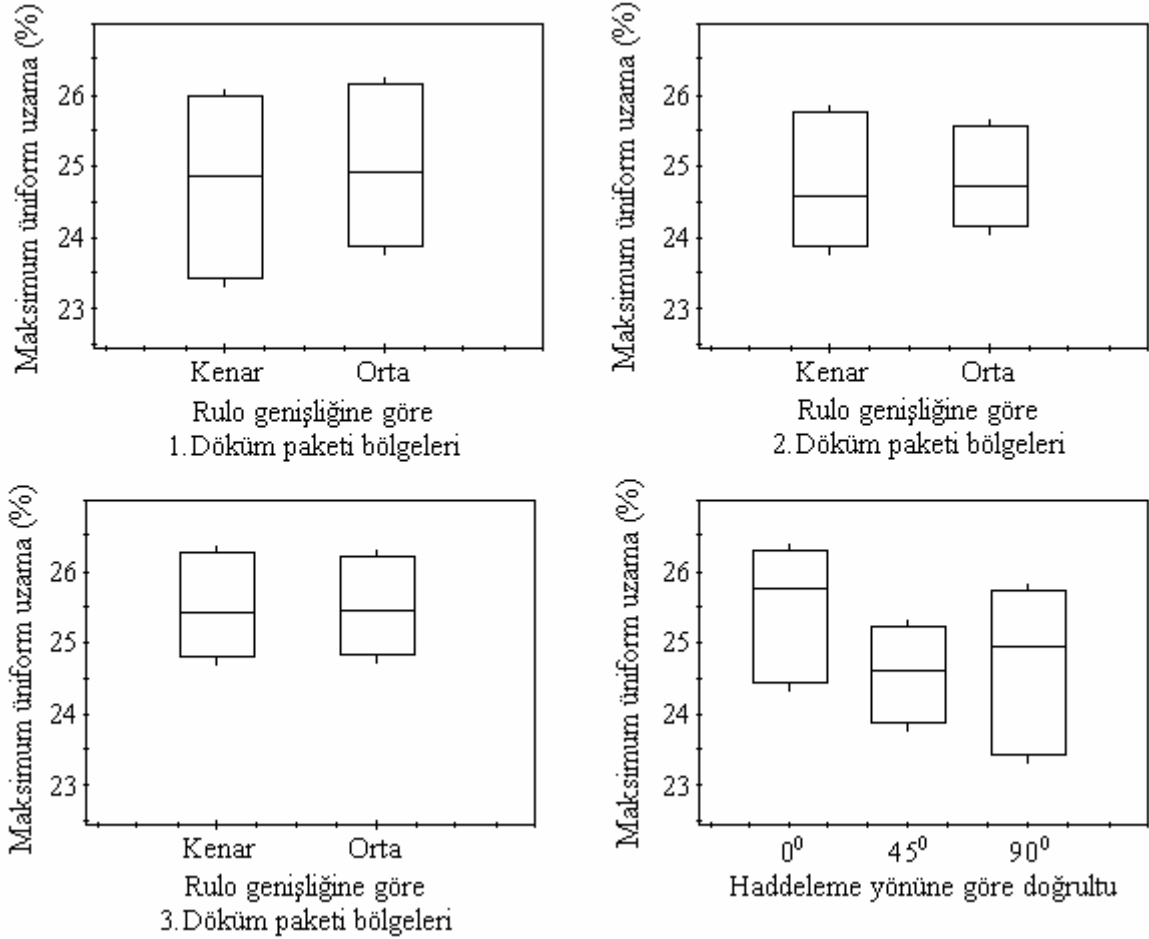


Şekil 5.25 % Üniform uzama değerinin döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi

Maksimum üniform uzama yada diğer adıyla en yüksek tekbiçim uzama yüzdesi değerlerinin döküm paketlerine ve her bir döküm paketinde rulo boyunun farklı bölgelerine göre değişimleri, Şekil 5.25'te verilmiştir. Birinci döküm paketi maksimum üniform uzama yüzdesi bakımından da değer aralığı en fazla olan pakettir. Bu pakette en yüksek - en düşük değer farkı 2,73 iken ikinci pakette 1,92 ve değer aralığının en dar olduğu üçüncü pakette 1,48'dir. Üç paketin genelinde karşılaşılan en yüksek değer üçüncü pakette % 26,28 olup, en düşük değer birinci pakette % 23,41 olarak elde edilmiştir. Üçüncü döküm paketinin

ortalaması en yüksek (% 25,42), ikinci döküm paketinin ortalaması en düşüktür (% 24,62).

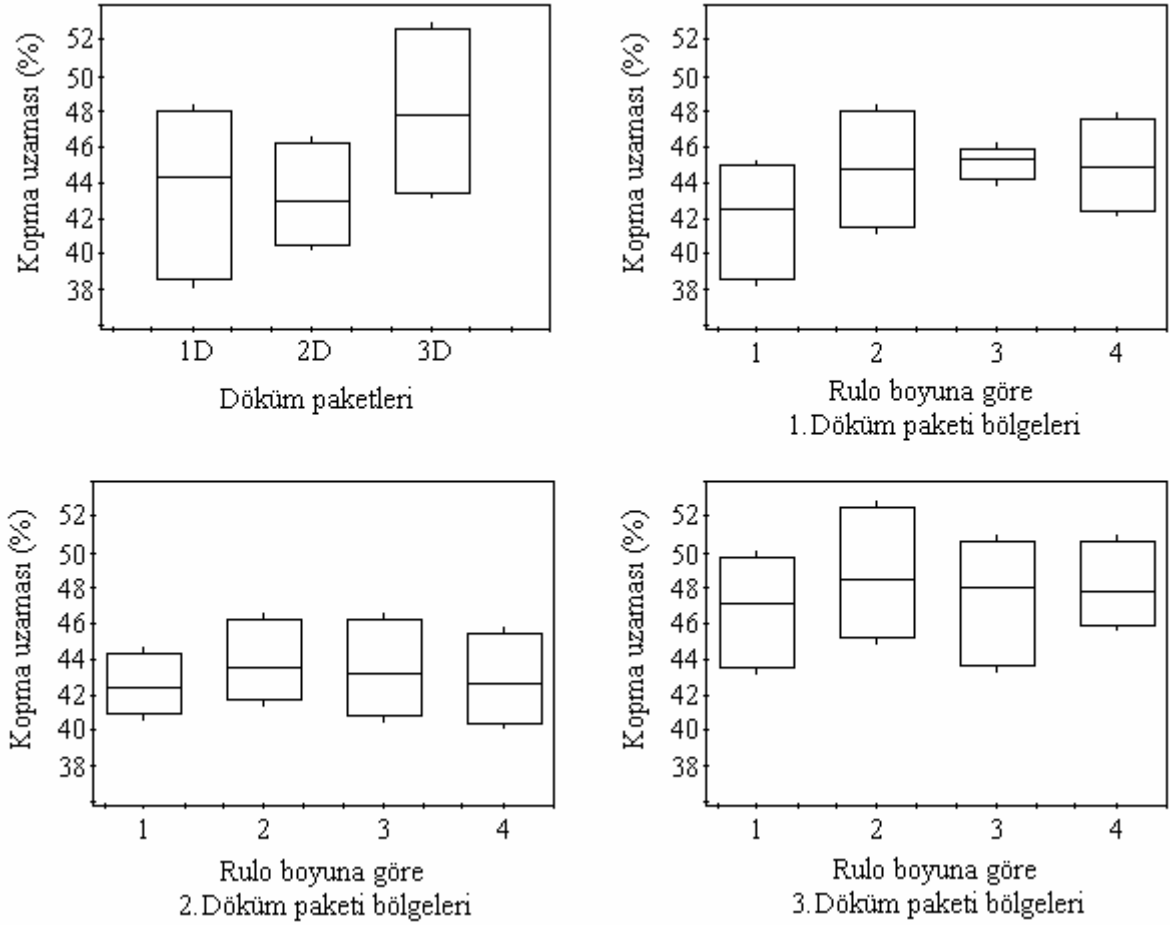
Birinci döküm paketinin rulo boyuna göre farklı bölgelerden elde edilen değişimleri incelendiğinde, ilk bölgenin değerlerinin açık bir şekilde daha aşağılarda olduğu gözlenmektedir. İkinci ve üçüncü paketlerin bu bakımdan değişimleri daha sıradandır.



Şekil 5.26 % Üniform uzama değerinin rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi

Şekil 5.26 incelendiğinde, her bir döküm paketinde rulo genişliğine göre orta kısımların değişim aralıklarının daha dar sonuçlandığı görülmektedir. Ancak birinci döküm paketinde değer aralıkları, kenar ve orta kısımda birbirine çok yakındır.

İkinci ve üçüncü paketlerde en yüksek ve en düşük değerler daima kenar kısımdan çıkmaktayken birinci pakette en yüksek değer orta kısımdan sonuçlanmıştır. Ortalama değerlere bakıldığında ise orta kısımlardan elde edilen değerlerin, her üç döküm paketinde de kenar kısımlardan daha yüksek olduğu sonucu çıkmaktadır.



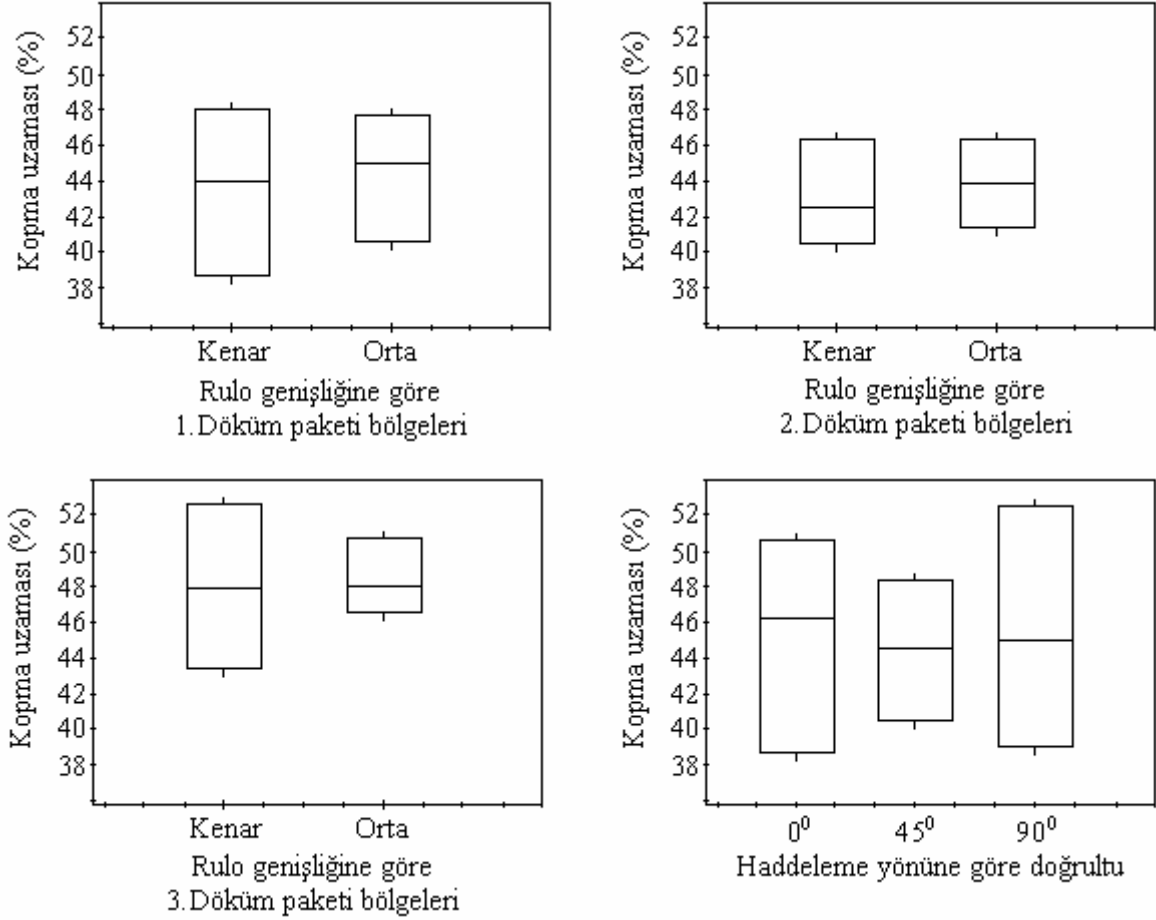
Şekil 5.27 Kopma uzaması yüzdesi değerinin döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi

Şekil 5.27’de belirtilen, kopma uzaması yüzdesi değerlerinin döküm paketine göre değişimleri, en yüksek tekbiçim uzama yüzdesinin Şekil 5.25’teki değişimlerine benzer biçimde sonuçlanmıştır. Şöyle ki; üçüncü paketin % uzama ortalaması en yüksek (% 47,83) ve ikinci paketin ise en düşüktür (% 42,97). Birinci paket değerleri en geniş aralıkta, en yüksek – en düşük değer farkı 9,4 olarak bulunmuştur. Ancak tekbiçim uzama yüzdesinin döküm paketlerine göre değişiminde en dar aralıkta sonuçlanan üçüncü paket deneyleri, kopma uzaması yüzdesinde neredeyse birinci paketin değer aralığı kadar geniş elde edilmiştir (8,97). Birinci paket değerleri ise en dar aralıkta, en yüksek – en düşük değer farkı 5,89 olarak sonuçlanmıştır. En düşük % kopma uzaması değerlerine birinci döküm paketinde ve birinci bölgede % 38,65 olarak rastlanılırken, en yüksek kopma uzaması yüzdesi değeri üçüncü döküm paketinde % 52,48 olarak elde edilmiştir.

İkinci ve üçüncü pakette kopma uzaması yüzdesi değerlerinin rulo boyunca ele alınan farklı

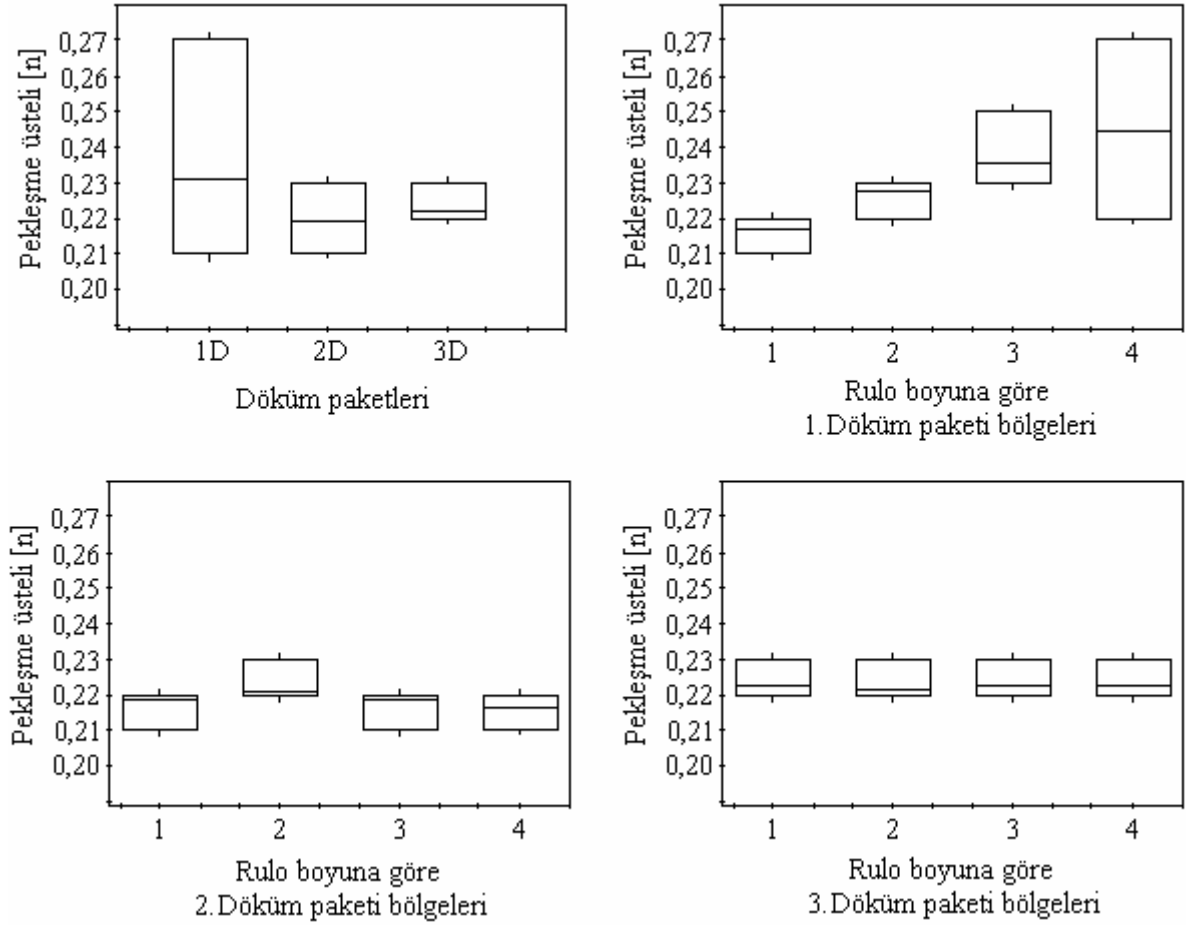


bölgelere göre değişimleri, birinci pakete göre daha sıradan sonuçlanırken, değer ortalamaları yine bu ikinci ve üçüncü döküm paketinde ilginç bir şekilde aynı karakteristik artım ve azalışa sahip olmaktadır.



Şekil 5.28 Kopma uzaması yüzdesi değerinin rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi

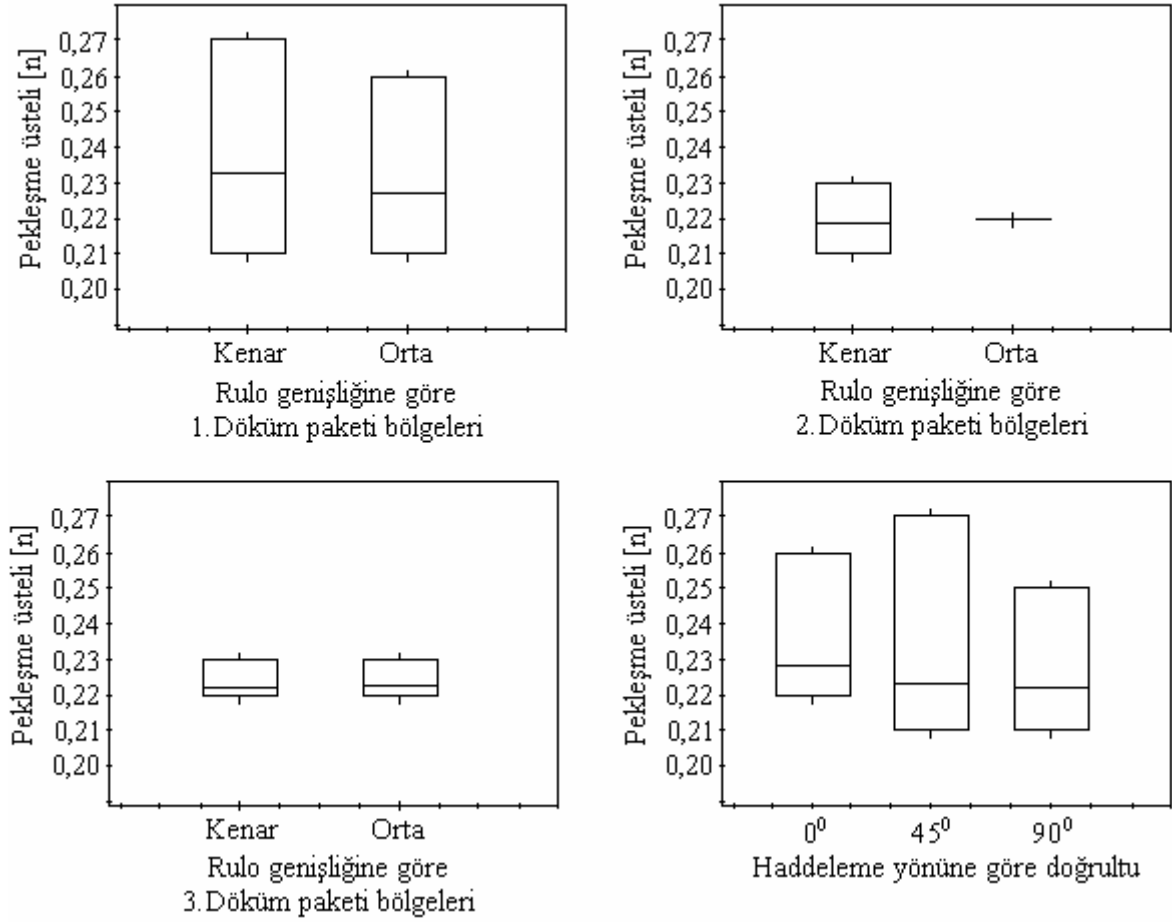
Kopma uzaması değerlerinin rulo genişliğine göre farklı bölgelerde nasıl sonuçlandığı, Şekil 5.28'de açık bir biçimde görülmektedir. Buna göre orta kısımların daha dar değer aralıklarında bulunduğu sonucu çıkarılabilir. Aynı zamanda en yüksek ve en düşük kopma değerlerinin kenar kısımlarda olduğu görülmektedir. Tüm kopma uzaması yüzdelерinin ortalaması ise her üç döküm paketinde de orta kısımda daha yüksektir. Kopma uzaması bakımından kenar ve orta kısım değer aralığı farkı, en belirgin olarak üçüncü döküm paketinde sonuçlanmıştır.



Şekil 5.29 Pekleşme üstelinin döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi

Malzemenin dayanımına ve aynı zamanda üniform uzama bölgesinin genişliğine bağlı olan pekleşme üstelinin Şekil 5.29’da gösterilen değişimine göre en geniş değer aralığı, 0,21 - 0,27 sınırlarıyla birinci döküm paketinden elde edilmiştir. 0,22 ve 0,23 değerlerinden farklı bir değer almayan üçüncü döküm paketi, n değeri bakımından en kararlı paket olmuştur. Birinci, ikinci ve üçüncü döküm paketlerinin pekleşme üsteli değerlerinin ortalamaları sırasıyla 0,2310; 0,2194 ve 0,2223 olarak hesaplanmıştır.

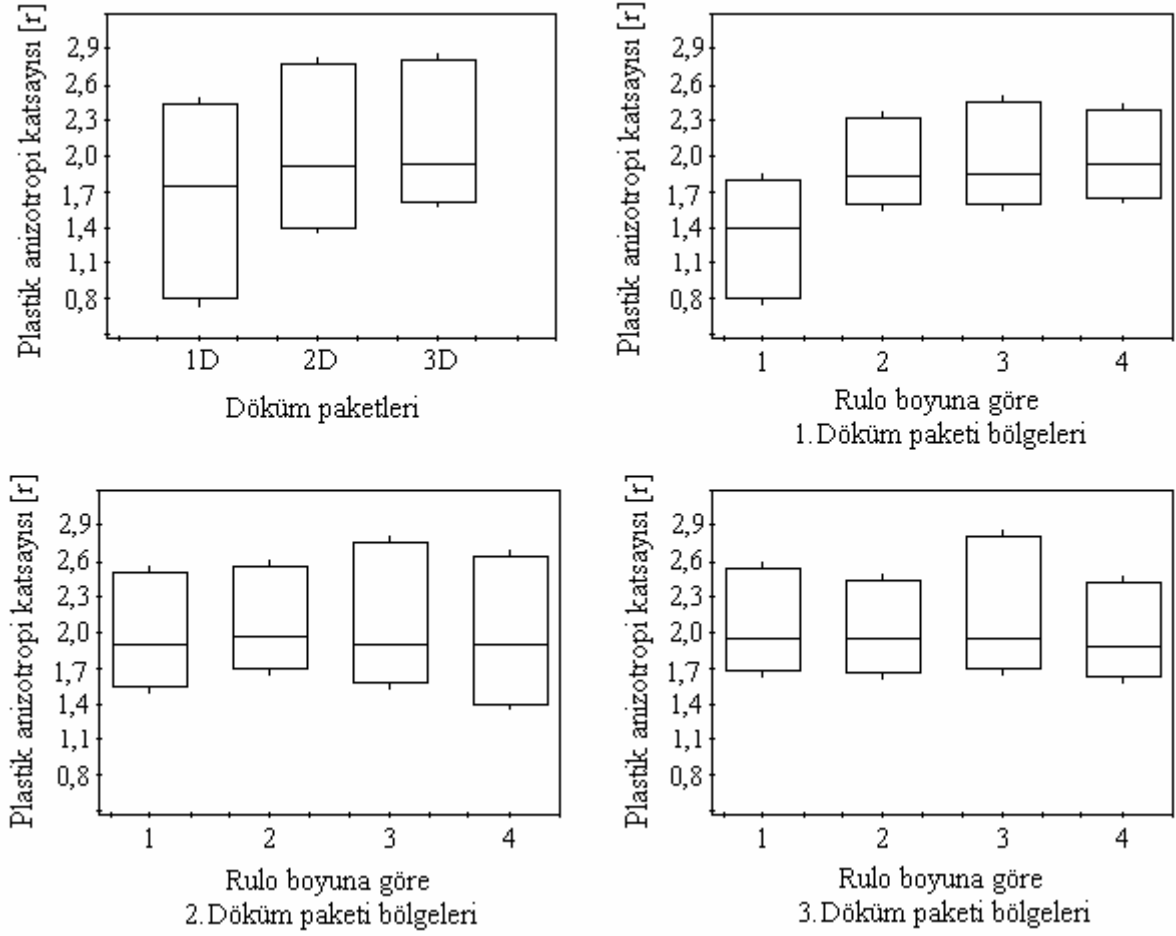
Rulo boyuna göre değişen bölgelerden elde edilen sonuçlarla döküm paketlerinin farklılığı açıkça görülmektedir. Birinci paketin n değerleri, paket bölgeleri numaraları arttıkça yükselmekte ve değişim aralıkları artmaktadır. Özellikle birinci paketin sonundaki değişim aralığı göze çarpmaktadır. Üçüncü paketin ise n değerlerinin, rulo boyuna göre değişen bölgelerdeki tekbiçimliliği dikkate değer bir husustur.



Şekil 5.30 Pekleşme üstelinin rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi

Rulo genişliğine göre orta kısımların, diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi, pekleşme üsteli hususunda da kenar kısımlara nazaran daha dar değer aralıklarında değişmesi, bir kez daha tekrarlanmaktadır. Özellikle ikinci pakette orta kısımlardan elde edilen pekleşme üsteli değerleri, 0,22'den farklı bir değer almayarak pekleşme üsteli bakımından en kararlı döküm paketi bölgesi olmuştur.

İkinci ve üçüncü paketlerde n değerleri ortalamaları, orta kısımlarda daha yüksekken, birinci pakette kenar kısımlarda daha yüksek sonuçlanmıştır. Bu durumun, uzama ve dayanım değerleriyle örtüşmemesi not edilmesi gereken bir konudur.

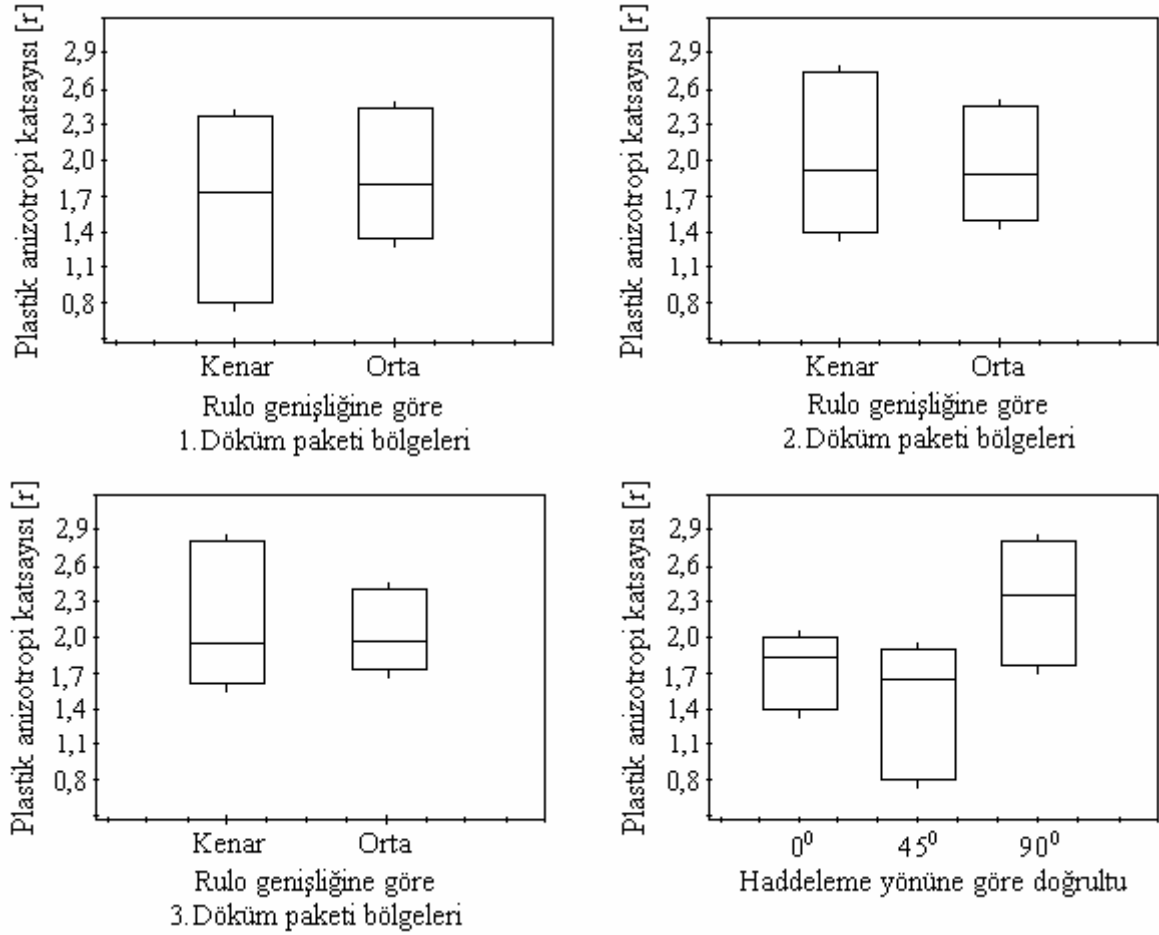


Şekil 5.31 Plastik anizotropi katsayısının döküm paketine ve rulo boyunca alınan farklı bölgelere göre değişimi

Plastik anizotropi katsayısının döküm paketlerine göre değişimlerine bakıldığında, birinci döküm paketinin diğer paketlere oranla daha geniş aralıkta değiştiği göze çarpmaktadır. Birinci pakette r değerlerinden elde edilen, en yüksek – en düşük değer farkı 1,65, ikinci pakette 1,35 ve üçüncü pakette ise 1,17'dir. En küçük değerlerle birinci paketin birinci bölgesinde karşılaşmıştır ve elde edilen en düşük değer, 0,79 olarak bulunmuştur. En yüksek r değeri ise üçüncü pakette ve 2,80'dir. Aynı bölgeden üç farklı doğrultunun ortalaması alındığında, ortalama dikey anizotropi değeri elde edildiğinden, kutu grafiklerde gösterilen dikdörtgenlerin ortasındaki çizgiler, ortalama dikey anizotropi değerlerinin ortalamasını göstermektedir. Paketlerin ortalama dikey anizotropi değerlerinin ortalaması sırasıyla; 1,75, 1,91 ve 1,94 olarak hesaplanmıştır.

Plastik anizotropi katsayısının, birinci pakette rulo boyunca ele alınan farklı bölgelerde paket başından paket sonuna doğru artış gözlenmektedir. İkinci pakette ise paket başından paket

sonuna doğru, ortalamadan ziyade plastik gerinim oranının değer aralığının artımı söz konusudur. Plastik anizotropi katsayısının, rulo uzunluğu boyunca değişimi bakımından ele alındığında, üçüncü pakete, en kararlı paket nitelendirilmesi yapılabilir.



Şekil 5.32 Plastik anizotropi katsayısının rulo genişliğince farklı bölgelere ve çeşitli doğrultulara göre değişimi

Şekil 5.32'den plastik anizotropi katsayısının rulo genişliğince farklı bölgelerden elde edilen sonuçlarının değişimleri incelendiğinde, kenar kısımların her üç döküm paketinde de orta kısımlara nazaran daha geniş aralıkta bulunduğu görülmektedir. Özellikle bu kenar ve orta kısımlar farkı, kopma uzaması yüzdesinin değişimi durumundaki gibi, üçüncü pakette en belirgin haldedir. En yüksek ve en düşük değerlere ikinci ve üçüncü pakette kenar kısımlarda rastlanırken birinci pakette en yüksek değerle orta kısımda karşılaşılmaktadır. Kenar ve orta kısımların ortalamalarına bakıldığında, bu değerlerin tüm paketlerde birbirlerine çok yakın oldukları görülmektedir. Aynı zamanda ilk ve üçüncü pakette orta kısım ortalaması daha yüksek, ikinci pakette ise daha düşüktür.

Dayanım katsayısının döküm paketine ve paket içersindeki çeşitli bölgelere göre değişimlerinin karakteristiği, çekme dayanımlarının değişim karakteristiklerine tamamıyla benzeştiği, elde edilen kutu grafiklerde görülmüştür. Bu nedenle, bu kısımda şekillerle ayrıca gösterilmelerine gerek duyulmamış, fakat Ek-2’de verilmiştir.

Elde edilen mekanik özelliklerin, dökümlere ve rulo bölgelerine göre değişimlerine bakıldığında şu sonuçlar çıkmıştır;

- Her üç dökümde de mekanik özellikler, farklı bölgelerde yoğunlaşarak, ortalamaları farklılaşmıştır. Bunun nedeni, her döküm paketinin, imalatları sırasında farklı termomekanik işlemlerden geçmesidir. Ayrıca dökümlerin kimyasal içeriklerinin farklılaşması da bir etkidir. Değişim aralıklarına bakıldığında, mekanik özelliklerin tümünde birinci dökümün en geniş değer aralığına sahip olduğu görülmektedir. Özellikle dayanım konusunda, paket çok değişkenlik göstermiştir. Buna rağmen beklenenin aksine uzama değerlerinin aynı oranda değişmemesi not edilmesi gereken bir durumdur. Sonuç olarak mekanik özelliklerin değişimi bakımından en tutarsız paket, ilk incelenen döküm paketidir.
- Kopma uzaması dışında, üçüncü döküm paketinin mekanik özelliklerinin tümünün değişim aralığı en dar aralık olarak sonuçlanmıştır. Bu nedenle mekanik özellik değişimi bakımından en tutarlı paket, üçüncü döküm paketidir denilebilir. Diğer özellikler bakımından daha tutarlı ancak, yalnızca kopma uzaması bakımından üçüncü paketin ikinci paketten daha tutarsız olması, malzeme içyapısının tutarlı fakat, kopma başlangıcı oluşturan düzensizlikleri içermek bakımından tutarsız olmasındandır.
- Bir sac paketinin genelinde mekanik özelliklerin değişim aralıklarının fazla olması yada bir başka deyişle paketin mekanik özellikler bakımından tutarsız olması, onun şekillendirilme verimliliğini kötü etkiler. Pres operasyonlarında işlem değişkenlerinin devamlı olarak değiştirilmek zorunda kalınması, hem zaman kaybıdır ve hem de ıskarta parça oranını artırır. Bu nedenle birinci döküm paketi, şekillendirilme verimliliği bakımından en kötü pakettir. Diğer iki paket ve özellikle üçüncü paket ise şekillendirilme verimliliği bakımından iyi düzeydedir. İncelenen otomobil yağ karteri dış sacının üç döküm paketinin de şekillendirilme işlemleri sırasındaki davranışları gözlemlendiğinde, birinci döküm paketinde ardı ardına çok ıskartaların çıktığı, pres değişkenlerinin sürekli değiştirilmek zorunda kalındığı görülmüştür. Ayrıca bu nedenle, birinci döküm paketinin yarısında paket iptal edilerek şekillendirilmesi durdurulmuştur. İlk pakette bu sorun yaşanırken diğer paketlerde yaşanmaması, deneysel çalışmalardan çıkan sonuçları destekler

niteliktedir.

- Rulo boyunca ortaya çıkan değişimler bakımından incelendiğinde, birinci döküm paketinin dayanım değerlerinin paket sonuna doğru sürekli artış sergilemesiyle birlikte uzama değerlerinin sürekli azalış göstermesi, var olan dayanım-uzama ilişkisini destekler niteliktedir. Ancak diğer döküm paketlerinde bu şekilde karakteristik bir artış veya azalış sergilenmemesine karşılık ilk paketin rulo boyunca bu biçimde değişmesi, birinci döküm paketinin imalatı sırasında izlediği termomekanik yollardaki düzensizliklerden kaynaklanmaktadır. Buna ek olarak, rulo sarma işleminin ve özellikle sıcaklığının bu karakteristik değişime büyük etkisi olmaktadır. Çünkü rulo sarma işlemi, ikincil faz parçacıklarının miktarı ile dağılımını ve böylece çökeltme sertleşmesi miktarını belirler. Yüksek sarma sıcaklığı kaba ikincil faz parçacıklarına neden olurken, ruloda soğuma sırasında rulonun değişik bölgelerinde sıcaklık değerlerinin değişmesi, ikincil faz parçacıklarının dağılımının düzensiz olmasına yol açar. Özellikle rulo içinde sıcaklığın dış kısımlara göre yüksek olması, iç kısımların çökelti bakımından daha fazla miktarda ve daha düzensiz olmasını doğurur. Bu da birinci dökümde gözlemlenen rulo boyunca dayanım artımını, gittikçe değişim aralıklarının artımını ve uzama değerlerinin azalmasını açıklamaktadır.
- Rulo genişliğince ortaya çıkan değişimler bakımından incelendiğinde, her üç döküm paketinde de mekanik özelliklerin tümünün, orta kısımlarda kenar kısımlara göre daha dar sınırlarda değiştiği görülmektedir. Ayrıca sonuçların genelinde, her bir döküm paketinde de en büyük ve en küçük değerler, kenar kısımlarda elde edilmiştir. Başka bir deyişle, rulo genişliğine göre orta kısımlar kenar kısımlardan daha tutarlı sonuçlanmıştır. Bunun en mühim nedeni, özellikle imalat hattının yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki kısımlarında ve sıcak rulo sarma ile rulo bekletme sırasında, rulo genişliğine göre kenar kısımların orta kısımlardan daha erken soğumasıdır. Ayrıca kenar ve orta kısım arasındaki deformasyon miktarı farkı da bunun nedenleri arasında sayılabilir. Deformasyon farkının nedenleri ise, eğik veya bombeli şekle sahip merdanelerin ilk tezgahlarda sacın kenar kısımlarının kalınlıklarını azaltması yada sürtünme nedeniyle kenarların orta kısımlardan daha fazla şekil değiştirmesidir.
- Toyota standardında, SCGA 270 D kalite derecesinde olan ve yapılan deneylerle incelenen bu malzemenin akma dayanımı 115-205 MPa arasında ve çekme dayanımı en fazla 270 MPa olarak istenmektedir (Çizelge 5.1). Erdemir standardında ise, akma dayanımı 140-180 MPa arasında ve çekme dayanımı, aynı şekilde, en fazla 270 MPa olarak belirtilmiştir. Elde edilen çekme deneyi sonuçlarına göre, akma dayanımı bakımından Toyota'nın

istediği değer aralığı tüm testlerde yakalanırken, Erdemir standardının yalnızca alt sınır değeri, sadece birinci döküm paketinde aşılmıştır. Bunun yanında ikinci ve üçüncü incelenen döküm paketlerinin hiç birinde çekme dayanımının en yüksek sınır-değer şartı elde edilemeyerek, değerler sürekli 270 MPa'ın üzerinde seyretmiştir. Birinci döküm paketinde ise çekme dayanımı sınırı rulonun büyük bir kısmında aşılmıştır. Bahsedilen standartların açıkladığı farklı uzama değerleri aralıkları, farklı deney numuneleri geometrilerinden kaynaklanmaktadır. Yapılan deneylerde kullanılan deney numuneleri geometrileri, Erdemir standartları ile denk olduğundan, olması gereken % kopma uzaması değerleri sınırları, Erdemir standartlarında belirtildiği gibi, % 44-51 arasında, kabul edilmelidir. Elde edilen değerlere bakıldığında, birinci ve ikinci dökümün % kopma uzaması, alt sınır değerleri aştığı görülmektedir. Üçüncü dökümün ise beyan edilen % 44 alt sınır değerini tam olarak yakaladığı gözlemlenmiştir. Son olarak standartlarda açıklanan ve elde edilen ortalama  $r$  değerleri karşılaştırıldığında, Toyota'nın belirlediği 1,1 alt sınır-değer şartının sağlandığı ancak, Erdemir'in 1,4 alt sınır-değer şartının, ilk döküm paketinin baş kenar kısmında aşıldığı görülmektedir.

- Çizelge E.7'den düzlemsel anizotropi değerlerinin ortalamalarına bakıldığında, ikinci döküm paketinin 0,5350 ile en yüksek, üçüncü döküm paketinin 0,3704 ile en düşük değerde olduğu ve ilk döküm paketinin ise 0,3875 ortalama değerine sahip olduğu görülmektedir. Düzlemsel anizotropi değerinin, derin çekmede kulaklanma oluşumuyla ilgisi büyüktür ve sıfır olduğu zaman teorik olarak kulaklanmanın oluşmadığı kabul edilir. Bu nedenle içlerinde  $\Delta r$  değerinin sıfıra en yakın olduğu döküm paketi olan üçüncü döküm paketi, kulaklanma oluşumuyla malzeme israfının en az yaşandığı pakettir. İkinci döküm paketi ise kulaklanmanın en fazla oluşacağı döküm paketidir. Ayrıca rulo genişliğine göre orta kısımların  $\Delta r$  ortalamalarının, üç dökümde de kenar kısımlara göre daha az olduğu bu çizelgeden görülmektedir. Rulo boyuna göre  $\Delta r$  bakımından herhangi bir karakteristik artış veya azalışa hiçbir dökümde rastlanmamıştır.
- Ortalama dikey plastik anizotropi değeri, sac malzemelerde derin çekilebilirliği ifade eden niteliklerdir. Bu değerin yüksek olması, sacın kalınlık yönündeki deformasyonunun genişlik yönündeki deformasyondan daha az sonuçlanacağı, yani sac çok incelmeden şekil değiştireceği anlamındadır. Aynı zamanda derin çekmede birinci bölge cidarı, ikinci bölge ise flanşı temsil ettiğinden artan  $r$  değerlerinin sınır derin çekme oranını da arttırdığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle bu değerin yüksek olması istenir. Ortalama olarak en yüksek üçüncü döküm paketinde, en düşük ise birinci döküm paketinde elde edilmiştir. Dolayısıyla şekillendirilme verimliliğinin yanında, şekillendirilme kabiliyeti bakımından



da en iyi düzeyde olan üçüncü döküm ve en kötü düzeyde olan birinci dökümdür.

- Pekleşme üsteli, sacların özellikle germe ile şekillendirilme kabiliyetini arttıran bir malzeme değişkenidir. Yüksek n değerine sahip malzemelerde, pekleşme kapasitesi de yüksek olmakta ve kesitteki kritik noktalarda pekleşme düzeyi artmaktadır. Böylece bu bölgelerde deformasyona karşı direnç artmakta ve deformasyonlar üniform bölgeye kaymaktadır. Bunun sonucunda boyunlanma daha geç ortaya çıkmaktadır. Döküm paketlerinden elde edilen n değerleri ortalamalarına bakıldığında, birinci pakette en yüksek saptandığı ve ikinci pakette en düşük saptandığı görülmektedir. Ancak gerilebilirliğin göstergesi olan EÇD ortalamalarına bakıldığında, birinci pakette en düşük ve üçüncü pakette en yüksek elde edildiği görülmektedir. Ancak, EÇD değerleri çeşitli malzemeler arasında biçimlendirilebilirlik açısından karşılaştırma yapılmasını sağlasa da kullanılan takım ve kalıp düzeneklerinin küçük boyutlarda olması ve böylece numune sıkıştırma yağlama zorluklarının yaşanması nedeniyle doğruluk değerleri üst düzeylerde değildir.
- Çekmede maksimum üniform uzama ve kopma uzaması, malzeme sünekliğini doğrudan ifade eden değişkenler olarak kullanılmakta ve yüksek değerlerde olması istenmektedir. Döküm paketleri ortalamalarına bakıldığında, her iki özelliğe de üçüncü paketin en yüksek ve ikinci dökümün en düşük ortalamalara sahip oldukları görülmektedir. Dolayısıyla üçüncü paket bir kez daha şekillendirilebilirliği en iyi olan paket olarak ortaya çıkmaktadır. Rulo genişliğine göre orta kısımların her iki uzama özelliğinin de ortalamaları, bütün dökümlerde kenar kısımların ortalamalarından daha yüksek sonuçlanmıştır. Böylece, rulo genişliğine göre orta kısımların şekillendirilebilirliklerinin daha iyi olduğu ortaya çıkmaktadır.
- Malzemelerin dayanım değerleri ile sertlik değerlerinin doğru orantılı olarak değiştiği bilinmektedir. Dayanım değerlerinin her birinin ortalamalarından, ikinci dökümün en fazla ve birinci dökümün en az olduğu saptanmıştır. Sertlik değerlerinin ortalamalarında ise ikinci dökümün en fazla ve üçüncü dökümün en az olduğu görülmüştür.

## 6. SONUÇLAR

Çelik sacların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimlerin, değişim nedenlerinin ve bunların şekillendirme prosesi üzerindeki etkilerinin incelendiği ve yapılan deneylerle desteklendiği bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki gibidir.

1. Kimyasal içeriklerine ve üretimleri sırasında gördükleri işlemlere bağlı olarak çeşitlenen ve onlarca farklı kalite derecesine ayrılan çelik saclar, çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu olağanüstü çeşitliliğin arasında, büyük ebatlı karmaşık geometrili parçaların kullanıldığı otomotiv endüstrisi, yeni kalitede malzeme geliştirmede itici güç olmaktadır.

2. Çelik sacların mekanik özellikleri bir kaliteden diğer kalite derecesine farklılaşırken, aynı standart kalitesindeki iki sacın mekanik özelliklerinde, üretildikleri firmadan firmaya, dökümden döküme, aynı dökümden çıkan farklı rulolarda, aynı rulonun boyuna veya enine göre farklı bölgelerinde ve aynı bölgenin değişik doğrultularında değişimler ortaya çıkmaktadır. Aynı standart kalitesinde ortaya çıkan bu değişimler, yapılan deneysel çalışmalarla da desteklenmiş ve ortaya konmuştur.

3. Mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimleri bakımından bir çelik sacın niteliği, onun tutarlılığını tanımlamaktadır ve çelik sacın mekanik özelliklerinin tutarlılığı, ayrı bir kalite derecesi teşkil eder. Farklı firmalar aynı standart kalitesindeki çelik sacın mekanik özelliklerinin değişimlerini, farklı sınır değerlerde sunabilmektedirler.

4. Çelik sacın mekanik özellikler bakımından tutarlılığının iyi olması, pres operasyonlarında malzemedan kaynaklanan ıskartaların azaltılması ve dolayısıyla onun şekillendirilme verimliliğinin iyi düzeyde olması demektir. Çelik sacdan, şekillendirilecek bir parça için şekillendirilebilme yeteneğinin aranmasının yanında, şekillendirilme verimliliğinin de üst seviyelerde olması arzu edilmektedir. Çelik sacın mekanik özelliklerinin tutarlılığının, şekillendirme operasyonlarına etkisi, deneysel çalışmalarla da incelenmiş ve malzemedan kaynaklandığı anlaşılan hataların ve ıskartaların miktarları gözlenmiştir. Bu bağlamda, mekanik özellikleri geniş aralıklarda değişen döküm paketinin (ilk incelenen paket) şekillendirilmesi sırasında, pres operasyonlarının verimliliğinin alt düzeylere inmesi nedeniyle şekillendirilmesinin iptal edilmesi, yapılan deneyleri doğrulamıştır.

5. Çelik sacların mekanik özelliklerinin tutarlılık derecesi, çelik sacların üretiminin bütün safhalarıyla ilgilidir. Sürekli dökümden çelik sacların kaplanmasına kadar olan aşamaların

tümünde bulunan işlem parametreleri, çelik sacın içyapı değişkenlerini etkiler. İçyapı değişkenleri ise; istenmeyen kalıntı, katışkı ve boşluklar gibi düzensizlikler (içyapı temizliği) yada izlenen termomekanik geçmişe bağlı olarak mikroyapı karakteristiği olabilmektedir. Mikroyapı karakteristiği ise; kristal yapı, faz yapısı, tane yapısı ve içyapının içinde bulundurduğu, biçim, kimyasal içerik ve yönelme doğrultuları gibi niteliklerinden ibarettir.

6. Çelik sacların mekanik özelliklerinde değişimlerin ortaya çıkmasına neden olan işlem değişkenlerinden en önemlisi sıcaklıktır. Sürekli döküm, slab ısıtma, sıcak haddeleme, rulo sarma ve tavlama esnasında değiştirilebilen parametre olan sıcaklık, malzemenin mikroyapı değişkenlerini doğrudan etkilemektedir. Sıcaklığın değişmesine neden olan işlem değişkenlerinden haddeleme hızına ise, kalınlık indirgenmesi için hadde aralığının ayarlanması, hadde geçişi sayısı ve en yüksek rulo sarma hızı etki eder. Ayrıca yağlama, tavlama fırını atmosferi, tavlama hızı, tavlama şekli, ruloda soğutma koşulları; sıcaklığa ve dolayısıyla mekanik özelliklerin ortaya çıkan değişimlerine etki eden başlıca üretim değişkenleridir.

7. Çelik saca verilen deformasyon miktarı, deformasyon koşulları ve yüzey kusurları da mekanik özelliklerin değişimlerinin başlıca nedenleridir.

8. Çelik sac imal eden firmaların, endüstrilere yeni standart kalitelerinde üstün mekanik özelliklere sahip çelik saclar sunmalarının yanında, üretilen çelik sacların mekanik özellikler bakımından tutarlılıklarının iyi seviyelerde olmalarını da sağlamaları gerekmektedir. Bu da yukarıda sayılan üretim değişkenlerinin çok iyi kontrolünü gerektirmektedir.

9. Sac malzemenin kimyasal bileşimi ve alaşım elemanlarının oranı, mekanik özellikleri etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Düşük karbonlu bir çelik sacın içeriğinde, mutlaka C, Mn, P ve S gibi elementler bulunmaktadır. Bunların oranlarının artması, sac malzemenin uzama değerlerini düşürür. Al, Ti ve Nb gibi elementler ise oksijeni veya azotu bağlamak amacıyla çeliğe katılır. Diğer elementler, yapıda çökelti oluşturan artık elementler olarak bulunarak, dayanımı arttırır ve uzama değerlerini düşürürler.

10. Sac malzemenin şekillendirilebilirliğini nitelendiren mekanik özelliklerin başında dayanım ve uzama değerleri gelmektedir. Sac malzemenin akma veya çekme dayanımının artması, şekillendirilebilirliğinin azalması demektir. Diğer taraftan akma dayanımının çok düşük seviyelerde olması, şekillendirme işlemleri sırasında sacın oluşan kuvvetlere dayanım gösterememesi olarak sonuçlanmaktadır. Uzama değerlerinden kopma uzaması ve bilhassa boyunlanmanın oluşum sınırı olan maksimum üniform uzama değeri, malzeme sünekliğini

doğrudan ifade etmekte ve yüksek değerlerde olmaları istenmektedir. Bunlara ek olarak, sac malzemenin elastiklik modülünün düşük olması, şekillendirme işlemlerinde geri esnemenin azalmasına neden olmaktadır.

11. Tavlanmış çeliklerde ortaya çıkan akma uzaması yada diğer adıyla belirgin akma, hem mekanik özellikleri değiştirdiği için hem de şekillendirme sırasında yüzey bozukluklarına neden olduğu için önemli bir konudur. Çelik sacın içeriğinde bulunan karbon ve azot elementlerinin, çözeltilerin ana kafesinde arayerlere yerleşip, “Cottrell atmosferi” diye tabir edilen atmosferi oluşturmaları, şekil değişimi sırasında dislokasyonun hareketine engel oluşturur. Sonuçta çelik sacda üst akma noktası ile beraber, akma uzaması olarak adlandırılan belirgin akma oluşmaktadır. Tavlamadan sonra yapılan temper haddeleme ile akma uzaması ortadan kalkmakta, ancak yaşlanma zamanı olarak tabir edilen ve arayer atomu içermeyen çelikler hariç, malzemenin malzemeye değişen belli bir süre sonunda tekrar oluşmaktadır. Yaşlanma, malzemenin akma dayanımını arttırmakta ve uzama değerlerini azaltmaktadır. Bu nedenle çeliğin şekillendirilebilirliğini düşürür. Ayrıca Lüders bantları olarak bilinen damarlanma kusurlarını oluşturarak yüzey bozukluklarına neden olmaktadır. Dolayısıyla, çelik sacın, yaşlanma sürecini geçirmeden şekillendirilmesi, mekanik özelliklerinin arzu edilen değer aralıklarında şekillendirilmesi demektir. Yapılan deneylerle incelenen malzeme, akma uzaması sergilemediğinden yaşlanmadığı tespit edilmiştir.

12. Çelik sacın pekleşme üstelinin yüksek olması, üniform gerinim alanının büyümesi ve boyunlanmanın daha geç ortaya çıkması demektir. Bu durum, şekillendirilebilirliğin ve özellikle gerilebilirliğin artmasının önemli bir göstergesidir.

13. Derin çekilebilirliği ifade eden mekanik özellik,  $r$  değeri (plastik anizotropi değeri) yani plastik gerinim oranıdır. Plastik anizotropi değerinin artması, sacın incelmeye veya kalınlaşmaya karşı direncinin artması demektir. Bu da, pres operasyonlarında şekillendirilebilirliğin artımının en önemli göstergesidir. Kulaklanma diye tabir edilen imalat kusurunun oluşmasında, plastik anizotropi katsayısının değişik doğrultulardaki değerlerinden elde edilen düzlemsel anizotropi katsayısı  $\Delta r$ 'nin etkisi büyüktür. Malzemede ıskarta oluşturduğu için oluşması istenmeyen kulaklanmanın ortadan kalkması için  $\Delta r$  değerinin sıfıra yaklaşması gerekmektedir.

14. Şekillendirilebilme açısından önem teşkil eden  $r$  değeri ve uzama karakteristiklerinin, deneysel çalışmalarla incelenen çelik saclarda, Toyota standardında belirtilen alt sınır değerler civarında olması ve hatta alt sınır değerleri aşması, şekillendirmede oluşan ıskartaların

miktarını arttıran etkenlerdendir. Bu nedenle, SCGA 270 D kalitesi yerine, Çizelge 5.1’de de belirtildiği gibi bir üst kalitede olan SCGA 270 E sacının kullanılması, aynı zamanda bu kalitenin mekanik özelliklerinin daha dar değer aralıklarında olmasından dolayı, daha uygun sonuçlar verir.

**KAYNAKLAR**

Banabic, D., Bunge, H.J., Pöhlandt, K. ve Tekkaya, A.E., (2000), “Formability of Metallic Materials”, Springer Verlag, Berlin.

Barnett, M.R., (1996), “Influence of Warm Rolling Temperature on Ferrite Recrystallization in Low C and IF Steels”, (A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy), Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, Montreal.

Béranger, G., Henry, G. ve Sanz, G., (1996), “The Book of Steel”, Intercept Ltd., Hampshire.

Burtsev, K., (1973), “Rolling Practice – Sheet and Plate Production”, MIR Publishers, Moscow.

Cantor, B. ve O’Reilly, K., (2003), “Solidification and Casting”, IOP Publishing Ltd., London.

Chen, L.X., Bhandhubanyong, P., Vajragupta, W. ve Somsiri, C., (1997), “Plastic Properties of Low Carbon Steel Sheets”, Journal of Materials Processing Technology, 63: 95-99.

Çapan, L., (1999), “Metallere Plastik Şekil Verme”, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

Dehghani, K., (1999), “Static and Dynamic Strain Aging in Interstitial-Free Steels”, (A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy), Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, Montreal.

Dieter, G.E., (1985), “Mechanical Behaviour of Materials Under Tension”, Metals Handbook – Vol.8 (Mechanical Testing), American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

Erdem, G., Taptık, Y., (2005), “Effect of Hot Rolling Conditions to Produce Deep Drawing Quality Steels for Continuous Annealing Process”, Journal of Materials Processing Technology, 170: 17-23.

Erdemir Mamul Kataloğu, (2002), Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş.

Erhuy, C.G., (2001), “Soğuk Haddelenmiş Düşük Karbonlu Çelik Sacların Şekillendirilebilirlik Özelliği ve Mekanik Karakteristikleri”, (Yüksek Lisans Tezi), Y.T.Ü., F.B.E. Makine Mühendisliği, İmal Usulleri Programı, İstanbul.

Ersoy, T.T., Köroğlu, K., Günday, E., Pehlivan, K. ve Yaşacan, D.A., (1991), “Soğuk Haddehane ve İkmal Tesisleri”, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş. Eğitim Müdürlüğü Yayınları, Karadeniz Ereğli.

Forouraghi, K., (1995), “Ultrasonic Measurement of Drawability (r-values) of Low Carbon Steel Sheets”, (A Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy), Mechanical Engineering Department, Iowa State University, Iowa.

Fujita, T., Nakamura, N. ve Iizuka, S., (2004), “High Carbon Steel Sheets for Power Train Parts – Formable High Carbon Steel Sheets Suitable for One-Piece Forming”, JFE Technical Report, JFE GIHO, No.4: 39-43.

Granzow, W.G., (Armco Inc.), (1990), “Sheet Formability of Steels”, Metals Handbook – Vol.1 (Properties and Selection : Iron, Steels and High Performance Alloy), American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

Grünhofer, H.G., Hese, T., Nachtigäller, H., Roth, W., Schmithals, P.U., Schreiber, D., Selige, A. ve Skock, K., (1967), “Surface Defects on Cold Rolled Strip and Sheet”, Verlag

Stahleisen M.B.H., Düsseldorf.

Gündü, T., (2000), “Derin Çekme Saclarında Derin Çekilebilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi”, (Yüksek Lisans Tezi), İ.T.Ü., F.B.E. Metalürji Mühendisliği, İstanbul.

Jinxia, L., Zhanying, L., Cairu, G., Zhaodong W., Xianghua, L., Guadong, W., (2005), “Evolution of Textures in Interstitial Free Steel during Mulyiple Cold Rolling and Annealing”, Journal of Materials Processing Technology, 167: 132-137.

Kalpakistan, S. ve Schmid, S.R., (2001), “Manufacturing Engineering and Technology”, Practice Hall Inc., New Jersey.

Kaluç, E., (2002), “Demir Çelik Teknolojisi – Ders Notları”, Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.

Korczak, P., (2004), “Influence of Controlled Rolling Condition on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Micro-alloyed Steels”, Journal of Materials Processing Technology, 157(158): 553-556.

Kumar, D.R., (2002), “Formability Analysis of Extra Deep Drawing Steel”, Journal of Materials Processing Technology, 130 (131): 31-41.

Lange, K., (1985), “Handbook of Metal Forming”, McGraw Hill, New York.

Lenard, J.G., Pietrzyk, M. ve Cser, L., (1999), “Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products”, Elsevier Science Ltd., Oxford.

Llewellyn, D.T., ve Hudd, R.C., (1998), “<Steels> Metallurgy & Applications – 3th Edition”, Butterworth – Heinemann, Oxford.

Lopes, A.B., Rauch, E.F. ve Gracio, J.J., (1999), “Textural vs Structural Plastic Instabilities in Sheet Metal Forming”, Acta Metallurgica Vol.47, No.3: 859-866.

Mendoza, R., Huante, J., Alanis, M., Rivera, C.G. ve Islas, J.A., (2000), “Processing of Ultra Low Carbon Steels with Mechanical Properties Adequate for Automotive Applications in the As-annealed Condition”, Materials Science and Engineering A, 276: 203-209.

Mendoza, R., Molina, A., Serrania, F. ve Islas, J.A., (2003), “Mechanical Properties of a Recrystallized Low Carbon Steel”, Scripta Materialia, 48: 391-395.

Mielnik, E.M., (1991), “Metalworking Science and Engineering”, McGraw Hill Inc., New York.

Newby, J.R., (1978), “Formability of Steel Sheets”, Metals Handbook – Vol.1 (Properties and Selection: Iron and Steels), American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

Pero-Sanz, J., Ruiz-Delgado, M., Martinez, V. ve Verdaja, J.I., (1999), “Annealing Textures for Drawability : Influence of the Degree of Cold Rolling Reduction for Low Carbon and Extra Low Carbon Ferritic Steels”, Elsevier Science Inc., Madrid.

Roberts, W.L., (1978), “Cold Rolling of Steel – Manufacturing Engineering and Materials Processing/2”, Marcel Deccer Inc., New York.

Sukapuntavorn, A. ve Somsiri, C., (1997), “A Comparative Study of Limiting Strain in Low Carbon Steel”, Journal of Materials Processing Technology, 63: 140-143.

Taylor, B., (General Motors Corporation), (1985), “Sheey Formability Testing”, Metals

Handbook – Vol.8 (Mechanical Testing), American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

Taylor, B., (General Motors Corporation), (1988), “Formability Testing of Sheet Metals”, Metals Handbook – Vol.14 (Forming and Forging), American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

The ASM Committee on Steel Sheet and Strip, (1990), “Carbon and Low-Alloy Steel Sheet and Strip”, Metals Handbook – Vol.1 (Properties and Selection : Iron, Steels and High Performance Alloy), American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

TSG 3109 G, 2003, “Galvannealed Steel Sheets – Class: C1”, Invoice for Issue of Toyota Engineering Standard, Engineering Administration Department, Toyota Motor Corporation.

Wagoner, R.H., Chenot, J.L., (2001), “Metal Forming Analysis”, Cambridge University Pres, London.

Wasilkowska, A., Tsipouridis, P., Werner, E.A., Pichler, A. ve Traint, S., (2004), “Microstructure and Tensile Behaviour of Cold Rolled TRIP-aided Steels”, Journal of Materials Processing Technology, 157(158): 633-636.

Wilson, P.R. ve Chen, Z., (2005), “Characterisation of Surface Grain Boundary Precipitates Formed during Annealing of Low Carbon Steel Sheets”, Scripta Materialia, 53: 119-123.

Yurci, M.E., (1991), “Talaşsız Şekil Verme Analizleri ve Gelişmeler – 1, (Yüksek Lisans Ders Notları), Y.T.Ü. Makine Mühendisliği, İmal Usulleri Programı, İstanbul.

Yurci, M.E., (2003), “Talaşsız Şekil Verme”, Y.T.Ü. Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.

Zhu, X., (1999), “Theoretical Analysis of Sheet Metal Formability”, (A Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy), Mechanical Engineering Department, Michigan Technological University, Michigan.

## **İNTERNET KAYNAKLARI**

[1]www.erdemir.com.tr

[2]www.steelonthenet.com

[3]www.mittalsteel.com

[4]www.arcelor.com

[5]www.thyssenkrupp.com

[6]www.corusgroup.com

[7]www.aluminum.org

[8]www.sciencedirect.com

[9]www.eere.energy.gov/industry/steel/



**EKLER**

- Ek 1 Deney sonuçlarının ortalamaları  
Ek 2 Dayanım katsayısının değişimi

### Ek 1 Deney sonuçlarının ortalamaları

Çizelge E.1 Akma dayanımı ortalamaları

Ortalama adı	$\bar{S}_A$	Ortalama adı	$\bar{S}_A$	Ortalama adı	$\bar{S}_A$	Ortalama adı	$\bar{S}_A$
1D1L	175,8200	1D1	176,0783	1D	154,8567	1DKenar	153,4325
1D1M	176,8850						
1D1R	175,5300						
1D2L	165,2650	1D2	159,4358				
1D2M	155,4025						
1D2R	157,6400						
1D3L	146,2475	1D3	145,2858			1DOrta	157,7050
1D3M	151,7550						
1D3R	137,8550						
1D4L	124,5600	1D4	138,6267				
1D4M	146,7775						
1D4R	144,5425						
2D1L	173,4225	2D1	173,2992	2D	174,0271	2DKenar	174,1931
2D1M	173,0900						
2D1R	173,3850						
2D2L	173,4775	2D2	174,2950				
2D2M	174,2650						
2D2R	175,1425						
2D3L	174,0400	2D3	174,0083			2DOrta	173,6950
2D3M	173,3600						
2D3R	174,6250						
2D4L	173,9975	2D4	174,5058				
2D4M	174,0650						
2D4R	175,4550						
3D1L	165,1050	3D1	165,6517	3D	166,0385	3DKenar	166,1825
3D1M	165,1300						
3D1R	166,7200						
3D2L	165,3450	3D2	166,4417				
3D2M	166,7600						
3D2R	167,2200						
3D3L	164,3975	3D3	165,0700			3DOrta	165,7506
3D3M	165,2325						
3D3R	165,5800						
3D4L	167,3875	3D4	166,9908				
3D4M	165,8800						
3D4R	167,7050						

Çizelge E.2 Çekme dayanımı ortalamaları

Ortalama adı	$\bar{S}_C$	Ortalama adı	$\bar{S}_C$	Ortalama adı	$\bar{S}_C$	Ortalama adı	$\bar{S}_C$
1D1L	305,0525	1D1	306,7142	1D	282,8621	1DKenar	281,4969
1D1M	307,3850						
1D1R	307,7050						
1D2L	293,2175	1D2	287,1475				
1D2M	282,9275						
1D2R	285,2975						
1D3L	273,9875	1D3	272,7875				
1D3M	278,9325						
1D3R	265,4425						
1D4L	250,2675	1D4	264,7992				
1D4M	273,1250						
1D4R	271,0050						
2D1L	301,4675	2D1	302,3867			2D	302,5708
2D1M	302,7275						
2D1R	302,9650						
2D2L	303,4475	2D2	304,0033				
2D2M	304,5150						
2D2R	304,0475						
2D3L	302,1425	2D3	302,2133				
2D3M	302,6925						
2D3R	301,8050						
2D4L	300,9625	2D4	301,6800				
2D4M	302,3175						
2D4R	301,7600						
3D1L	291,8425	3D1	291,9992	3D	291,7310		
3D1M	291,5000						
3D1R	292,6550						
3D2L	290,7725	3D2	290,8783				
3D2M	290,6575						
3D2R	291,2050						
3D3L	291,5325	3D3	291,1017				
3D3M	290,8975						
3D3R	290,8750						
3D4L	293,6775	3D4	292,9450				
3D4M	291,9025						
3D4R	293,2550						

Çizelge E.3 Maksimum üniform uzama yüzdesi ortalamaları

Ortalama adı	$\bar{e}_u$	Ortalama adı	$\bar{e}_u$	Ortalama adı	$\bar{e}_u$	Ortalama adı	$\bar{e}_u$
1D1L	24,1975	1D1	24,3409	1D	24,8921	1DKenar	24,8725
1D1M	24,5025						
1D1R	24,3225						
1D2L	25,1850	1D2	25,1033				
1D2M	24,9275						
1D2R	25,1975						
1D3L	25,1200	1D3	25,0750			1DOrta	24,9313
1D3M	25,1150						
1D3R	24,9900						
1D4L	24,9425	1D4	25,0492				
1D4M	25,1800						
1D4R	25,0250						
2D1L	24,5750	2D1	24,6508	2D	24,6248	2DKenar	24,5847
2D1M	24,6650						
2D1R	24,7125						
2D2L	24,7200	2D2	24,7142				
2D2M	24,7550						
2D2R	24,6675						
2D3L	24,5025	2D3	24,6108			2DOrta	24,7050
2D3M	24,7175						
2D3R	24,6125						
2D4L	24,3775	2D4	24,5233				
2D4M	24,6825						
2D4R	24,5100						
3D1L	25,4600	3D1	25,5067	3D	25,4215	3DKenar	25,4038
3D1M	25,5750						
3D1R	25,4850						
3D2L	25,3875	3D2	25,3600				
3D2M	25,3825						
3D2R	25,3100						
3D3L	25,4050	3D3	25,4083			3DOrta	25,4569
3D3M	25,4575						
3D3R	25,3625						
3D4L	25,3825	3D4	25,4108				
3D4M	25,4125						
3D4R	25,4375						

Çizelge E.4 Kopma uzaması yüzdesi ortalamaları

Ortalama adı	$\bar{e}_k$	Ortalama adı	$\bar{e}_k$	Ortalama adı	$\bar{e}_k$	Ortalama adı	$\bar{e}_k$
1D1L	43,3900	1D1	42,5775	1D	44,3627	1DKenar	44,0622
1D1M	43,0875						
1D1R	41,2550						
1D2L	44,3775	1D2	44,7092				
1D2M	44,3575						
1D2R	45,3925						
1D3L	45,1750	1D3	45,3317			1DOrta	44,9638
1D3M	45,6050						
1D3R	45,2150						
1D4L	43,3125	1D4	44,8325				
1D4M	46,8050						
1D4R	44,3800						
2D1L	42,3625	2D1	42,4408			2D	42,9706
2D1M	42,8625						
2D1R	42,0975						
2D2L	43,4425	2D2	43,5725				
2D2M	44,2500						
2D2R	43,0250						
2D3L	41,7175	2D3	43,1700	2DOrta	43,9088		
2D3M	44,5925						
2D3R	43,2000						
2D4L	41,3775	2D4	42,6992				
2D4M	43,9300						
2D4R	42,7900						
3D1L	47,3450	3D1	47,1108	3D	47,8298	3DKenar	47,7997
3D1M	47,2700						
3D1R	46,7175						
3D2L	48,1450	3D2	48,4492				
3D2M	47,8700						
3D2R	49,3325						
3D3L	48,4625	3D3	47,9600			3DOrta	47,8900
3D3M	47,9425						
3D3R	47,4750						
3D4L	47,5575	3D4	47,7992				
3D4M	48,4775						
3D4R	47,3625						

Çizelge E.5 Pekleşme üsteli ortalamaları

Ortalama adı	$\bar{n}$	Ortalama adı	$\bar{n}$	Ortalama adı	$\bar{n}$	Ortalama adı	$\bar{n}$		
1D1L	0,2175	1D1	0,2167	1D	0,2310	1DKenar	0,2328		
1D1M	0,2175								
1D1R	0,2150								
1D2L	0,2250	1D2	0,2275						
1D2M	0,2275								
1D2R	0,2300								
1D3L	0,2375	1D3	0,2358			1DOorta	0,2275		
1D3M	0,2300								
1D3R	0,2400								
1D4L	0,2575	1D4	0,2442						
1D4M	0,2350								
1D4R	0,2400								
2D1L	0,2175	2D1	0,2192	2D	0,2190	2DKenar	0,2184		
2D1M	0,2200								
2D1R	0,2200								
2D2L	0,2225	2D2	0,2208					2DOorta	0,2200
2D2M	0,2200								
2D2R	0,2200								
2D3L	0,2200	2D3	0,2192						
2D3M	0,2200								
2D3R	0,2175								
2D4L	0,2175	2D4	0,2167						
2D4M	0,2200								
2D4R	0,2125								
3D1L	0,2225	3D1	0,2225	3D	0,2223	3DKenar	0,2222		
3D1M	0,2225								
3D1R	0,2225								
3D2L	0,2225	3D2	0,2217					3DOorta	0,2225
3D2M	0,2225								
3D2R	0,2200								
3D3L	0,2225	3D3	0,2225						
3D3M	0,2225								
3D3R	0,2225								
3D4L	0,2225	3D4	0,2225						
3D4M	0,2225								
3D4R	0,2225								

Çizelge E.6 Ortalama dikey anizotropi değerleri ortalamaları

Ortalama adı	$\bar{r}$	Ortalama adı	$\bar{r}$	Ortalama adı	$\bar{r}$	Ortalama adı	$\bar{r}$
1D1L	1,4950	1D1	1,4033	1D	1,7504	1DKenar	1,7244
1D1M	1,5000						
1D1R	1,2150						
1D2L	1,8150	1D2	1,8300				
1D2M	1,8475						
1D2R	1,8275						
1D3L	1,7900	1D3	1,8442			1DOrta	1,8025
1D3M	1,9500						
1D3R	1,7925						
1D4L	1,8450	1D4	1,9242				
1D4M	1,9125						
1D4R	2,0150						
2D1L	1,8100	2D1	1,8975	2D	1,9108	2DKenar	1,9200
2D1M	1,9400						
2D1R	1,9425						
2D2L	1,9950	2D2	1,9750				
2D2M	1,9400						
2D2R	1,9900						
2D3L	1,8125	2D3	1,8867			2DOrta	1,8925
2D3M	1,8800						
2D3R	1,9675						
2D4L	1,7925	2D4	1,8842				
2D4M	1,8100						
2D4R	2,0500						
3D1L	1,9675	3D1	1,9533	3D	1,9377	3DKenar	1,9353
3D1M	1,9525						
3D1R	1,9400						
3D2L	1,9200	3D2	1,9517				
3D2M	1,9425						
3D2R	1,9925						
3D3L	1,8950	3D3	1,9508			3DOrta	1,9425
3D3M	1,9500						
3D3R	2,0075						
3D4L	1,8725	3D4	1,8950				
3D4M	1,9250						
3D4R	1,8875						

Çizelge E.7 Düzlemsel anizotropi değerleri ortalamaları

Ortalama adı	$\Delta r$	Ortalama adı	$\Delta r$	Ortalama adı	$\Delta r$	Ortalama adı	$\Delta r$
1D1L	0,2100	1D1	0,4533	1D	0,3875	1DKenar	0,4163
1D1M	0,3000						
1D1R	0,8500						
1D2L	0,3500	1D2	0,3466				
1D2M	0,2350						
1D2R	0,4550						
1D3L	0,4000	1D3	0,4016			1DOorta	0,3300
1D3M	0,4200						
1D3R	0,3850						
1D4L	0,4300	1D4	0,3483				
1D4M	0,3650						
1D4R	0,2500						
2D1L	0,5400	2D1	0,5150	2D	0,5350	2DKenar	0,5475
2D1M	0,4800						
2D1R	0,5250						
2D2L	0,4300	2D2	0,4700				
2D2M	0,4800						
2D2R	0,5000						
2D3L	0,4450	2D3	0,5266			2DOorta	0,5100
2D3M	0,4600						
2D3R	0,6750						
2D4L	0,7850	2D4	0,6283				
2D4M	0,6200						
2D4R	0,4800						
3D1L	0,3750	3D1	0,4066	3D	0,3704	3DKenar	0,3731
3D1M	0,3450						
3D1R	0,5000						
3D2L	0,2800	3D2	0,2966				
3D2M	0,4250						
3D2R	0,1850						
3D3L	0,3500	3D3	0,4150			3DOorta	0,3650
3D3M	0,2800						
3D3R	0,6150						
3D4L	0,2450	3D4	0,3633				
3D4M	0,4100						
3D4R	0,4350						



Çizelge E.8 Dayanım katsayısı ortalamaları

Ortalama adı	$\bar{K}$	Ortalama adı	$\bar{K}$	Ortalama adı	$\bar{K}$	Ortalama adı	$\bar{K}$
1D1L	524,8850	1D1	527,0183	1D	497,9200	1DKenar	496,6513
1D1M	527,8750						
1D1R	528,2950						
1D2L	509,7875	1D2	502,4192				
1D2M	497,1775						
1D2R	500,2925						
1D3L	487,6450	1D3	485,8058			1DOrta	500,4575
1D3M	492,1275						
1D3R	477,6450						
1D4L	461,1300	1D4	476,4367				
1D4M	484,6500						
1D4R	483,5300						
2D1L	519,3400	2D1	521,5183	2D	521,3052	2DKenar	520,6097
2D1M	522,7300						
2D1R	522,4850						
2D2L	523,9725	2D2	524,5000				
2D2M	525,5300						
2D2R	523,9975						
2D3L	520,5550	2D3	520,1900			2DOrta	522,6963
2D3M	521,7600						
2D3R	518,2550						
2D4L	518,3125	2D4	519,0125				
2D4M	520,7650						
2D4R	517,9600						
3D1L	507,7125	3D1	507,2242	3D	506,4190	3DKenar	506,9247
3D1M	506,0375						
3D1R	507,9225						
3D2L	505,8450	3D2	504,1075				
3D2M	502,8875						
3D2R	503,5900						
3D3L	507,2750	3D3	505,4750			3DOrta	505,4075
3D3M	504,7125						
3D3R	504,4375						
3D4L	510,3225	3D4	508,8692				
3D4M	507,9925						
3D4R	508,2925						

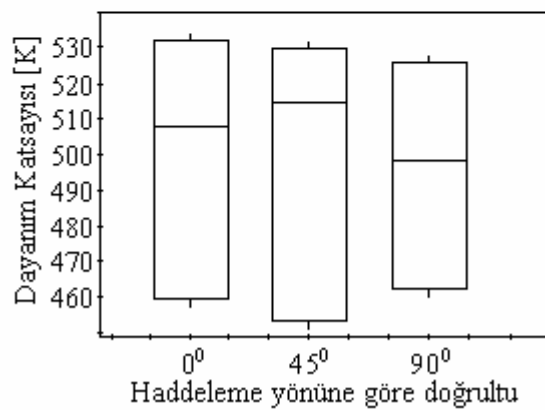
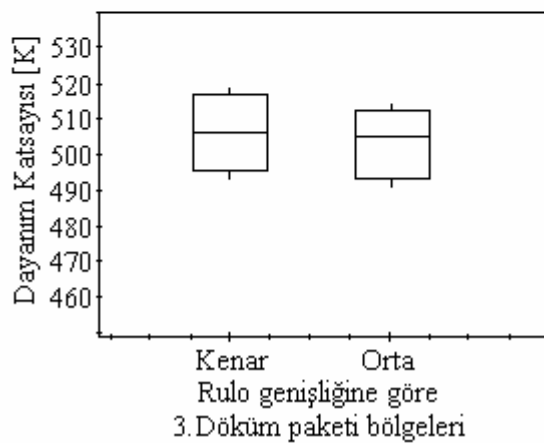
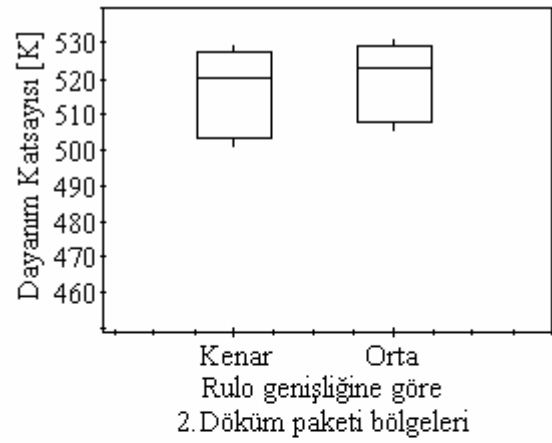
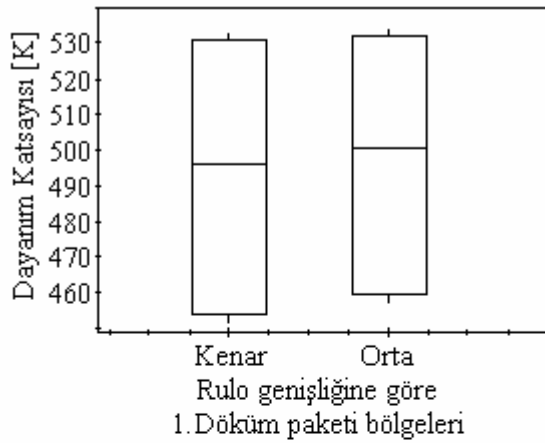
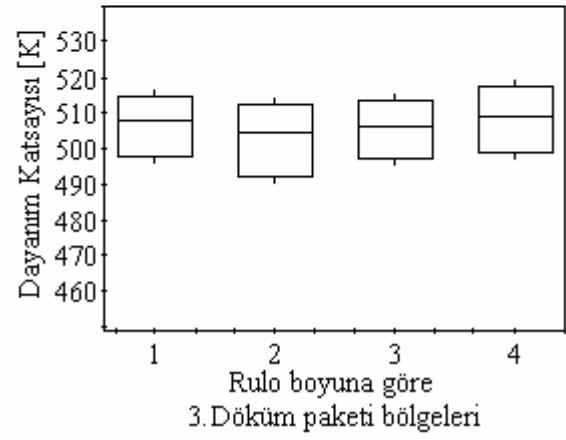
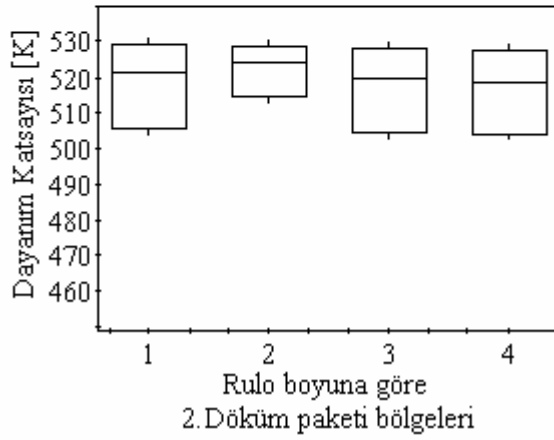
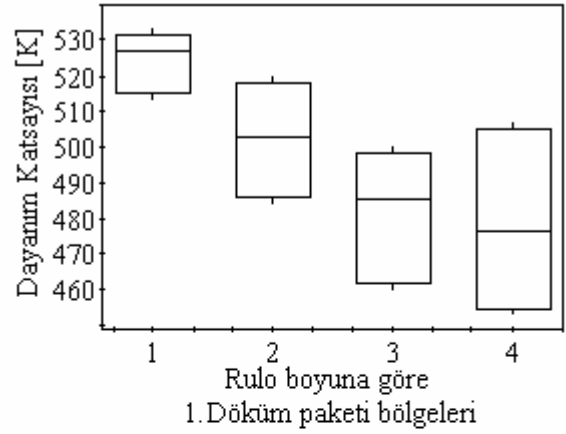
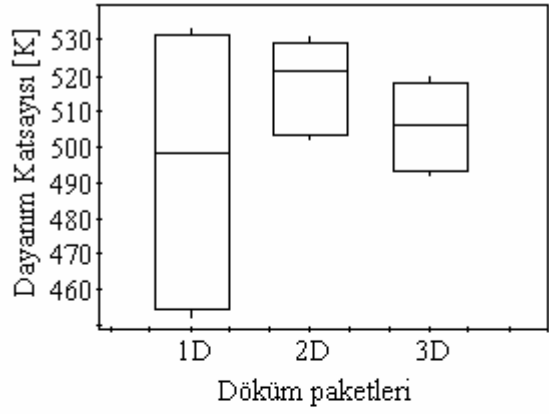
Çizelge E.9 Sertlik değerleri ortalamaları

Ortalama adı	Sertlik [HRB]	Ortalama adı	Sertlik [HRB]	Ortalama adı	Sertlik [HRB]	Ortalama adı	Sertlik [HRB]
1D1L	35,00	1D1	35,67	1D	31,92	1DKenar	31,75
1D1M	37,00						
1D1R	35,00						
1D2L	30,00	1D2	30,33				
1D2M	30,00						
1D2R	31,00						
1D3L	30,00	1D3	30,00			1DOrta	32,25
1D3M	30,00						
1D3R	30,00						
1D4L	32,00	1D4	31,67				
1D4M	32,00						
1D4R	31,00						
2D1L	33,00	2D1	32,67	2D	32,97	2DKenar	33,05
2D1M	32,50						
2D1R	32,50						
2D2L	33,00	2D2	33,07				
2D2M	33,20						
2D2R	33,00						
2D3L	33,00	2D3	32,67			2DOrta	32,80
2D3M	32,50						
2D3R	33,50						
2D4L	33,20	2D4	33,13				
2D4M	33,00						
2D4R	33,20						
3D1L	23,00	3D1	24,58	3D	25,52	3DKenar	25,44
3D1M	25,25						
3D1R	25,50						
3D2L	25,50	3D2	25,67				
3D2M	25,50						
3D2R	26,00						
3D3L	25,50	3D3	25,83			3DOrta	25,69
3D3M	26,00						
3D3R	26,00						
3D4L	26,00	3D4	26,00				
3D4M	26,00						
3D4R	26,00						

Çizelge E.10 Erichsen değerleri ortalamaları

Ortalama adı	EÇD [mm]	Ortalama adı	EÇD [mm]	Ortalama adı	EÇD [mm]	Ortalama adı	EÇD [mm]
1D1L	11,65	1D1	11,52	1D	11,40	1DKenar	11,41
1D1M	11,50						
1D1R	11,40						
1D2L	11,50	1D2	11,63				
1D2M	11,65						
1D2R	11,75						
1D3L	11,30	1D3	11,30			1DOrta	11,39
1D3M	11,30						
1D3R	11,30						
1D4L	11,20	1D4	11,17				
1D4M	11,10						
1D4R	11,20						
2D1L	11,40	2D1	11,47	2D	11,51	2DKenar	11,49
2D1M	11,50						
2D1R	11,50						
2D2L	11,50	2D2	11,57				
2D2M	11,70						
2D2R	11,50						
2D3L	11,60	2D3	11,57			2DOrta	11,55
2D3M	11,70						
2D3R	11,40						
2D4L	11,50	2D4	11,43				
2D4M	11,30						
2D4R	11,50						
3D1L	12,10	3D1	11,90	3D	11,93	3DKenar	11,93
3D1M	11,90						
3D1R	11,70						
3D2L	12,00	3D2	12,07				
3D2M	12,10						
3D2R	12,10						
3D3L	11,90	3D3	11,90			3DOrta	11,93
3D3M	11,80						
3D3R	12,00						
3D4L	11,70	3D4	11,83				
3D4M	11,90						
3D4R	11,90						

## Ek 2 Dayanım katsayısının değişimi



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 26.10.1981

Doğum yeri İstanbul

Lise 1992-1999 Cağaloğlu Anadolu Lisesi

Lisans 1999-2003 Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fak.  
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2003-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Müh. Anabilim Dalı,  
İmal Usulleri Programı

**Çalıştığı kurum**

2004-2005 İstanbul Makina ve Otomasyon Sistemleri Sanayi  
Ticaret A.Ş.