

66615

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİKLERDE DÖVÜLEBİLİRLİĞİN
BURMA, BASMA ve ÇEKME DENEYLERİ İLE
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Erdal KARADENİZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Şubat 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Temmuz 1997

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Levon ÇAPAN

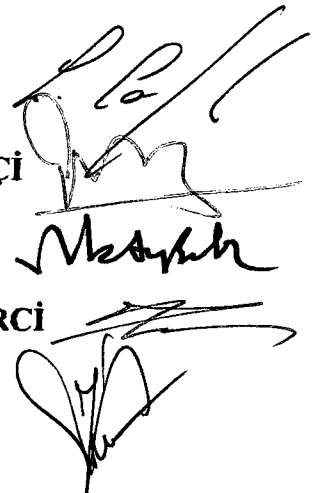
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Kutsal TULBENTÇİ

Prof. Dr. Oktay BODUR

Prof. Dr. Mehmet Emin YURCI

Prof. Dr. İbrahim UZMAN

TEMMUZ 1997



ÖNSÖZ

Bu çalışmada AISI 1040, 1050, 4140 ve 5140 çeliklerine sıcak haddelenmiş, normalize edilmiş ve küreleştirilmiş durumlarda sertlik, basit çekme, burma, basma, halkalı basma, çentikli çekme deneyleri uygulanarak dövülebilirlik saptanması yöntemleri incelenmiştir.

Bu çalışmanın yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında çok değerli fikir ve önerilerinden faydalandığım doktora danışmanım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Levon ÇAPAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında laboratuvarlarından yararlandığım Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölüm Başkanlığına ile Makina Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, İ.T.Ü. Kimya - Metalurji Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, 1010. Ordu Donatım Ana Tamir Fabrikası Müdürlüğüne, T.Z.D.K. Adapazarı Ziraat Aletleri ve Makinaları Fabrikaları Müessesesi Müdürlüğüne ayrı ayrı teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarım sırasında her bakımdan yardımcı olan Met. Y. Müh. Uğur ŞEN'e ve Teknisyen Recai ŞENYURT'a çok teşekkür ederim.

Şubat 1997

Erdal KARADENİZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	xxii
ÖZET	xxiv
SUMMARY	xxv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 DÖVME	7
2.1 Dövmenin Tanımı	7
2.2 Dövme Yöntemleri	7
2.2.1 Elde dövme	8
2.2.2 Açık kalıpta dövme	8
2.2.3 Kapalı kalıpta çapaklı dövme	9
2.2.4 Kapalı kalıpta çapaksız dövme	10
2.2.5 Yatay dövme	10
2.2.6 Hassas dövme	11
2.2.7 İzotermal dövme	12
2.2.8 Sıcak kalıpta dövme	12
2.2.9 Süperplastik dövme	12
2.2.10 Radyal dövme	13
2.2.11 Sinter dövme	15
2.2.12 Dövme haddeleri ile şekillendirme	16
2.2.13 Elektro yığma	17
2.2.14 Darbeli ekstrüzyon (Püskürtme)	18
2.2.15 Orbital dövme	19
2.2.16 Delme	19
2.2.17 İstampa ile basma	20
2.2.18 Dar kalıplar arasında dövme. Uzatma. Toplama.	20
2.3 Dövmede Oluşan Kusurlar	22
2.3.1 Malzeme kusurları	22
2.3.2 Isıtmadan kaynaklanan kusurlar	23
2.3.3 Dövmeden kaynaklanan kusurlar	23

BÖLÜM 3 DÖVÜLEBİLİRLİK	28
3.1 Dövülebilirliğin Tanımı	28
3.2 Dövülebilirliği Etkileyen Faktörler	28
3.2.1 Malzeme değişkenleri	29
3.2.1.1 Tane boyutunun etkisi	29
3.2.1.2 İkinci faz partikülleri, inklüzyonlar, kimyasal bileşim ve tane yapısının etkisi	29
3.2.2 İşlem Değişkenleri	31
3.2.2.1 Gerilme halinin etkisi	31
3.2.2.2 Şekil değiştirmenin etkisi	32
3.2.2.3 Şekil değiştirme hızının etkisi	32
3.2.2.4 Sıcaklığın etkisi	33
3.2.2.5 Sürtünmenin etkisi	35
3.3 Dövülebilirliğin Saptanması	39
3.3.1 Çekme deneyi	39
3.3.2 Burma deneyi	41
3.3.3 Basma deneyi	42
3.3.4 Eğme deneyi	44
3.4 Dövülebilirlik Deneylerinin Tartışılması	45
3.5 Basmada Çatlak Oluşma Mekanizması ve Çatlak Doğrultusunun incelenmesi	46
BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	48
4.1 Deney Malzemelerinin İncelenmesi	48
4.1.1 Kimyasal analiz	48
4.1.2 Isıl işlem koşullarının tayini	49
4.1.3 Kalıntıların incelenmesi	50
4.1.4 Mikroyapı ve tane boyutunun saptanması	50
4.2 Mekanik Deneyler	51
4.2.1 Sertlik deneyi	51
4.2.2 Çekme deneyi	51
4.2.3 Burma deneyi	51
4.2.4 Basma deneyi	54
4.2.5 Çentikli çekme deneyi	60
BÖLÜM 5 DENEY SONUÇLARI	63
5.1 Deney Malzemelerinin İncelenmesi	63
5.1.1 Kimyasal analiz	63
5.1.2 Kalıntıların incelenmesi	64
5.1.3 Mikroyapı ve tane boyutu	71
5.2 Mekanik Deney Sonuçları	83
5.2.1 Sertlik deneyi	83
5.2.2 Çekme deneyi	88
5.2.3 Burma deneyi	89
5.2.4 Basma deneyleri	98

5.2.4.1 Dolu silindir basma deneyi	98
5.2.4.2 Halkalı dolu silindir basma deneyi	131
5.2.4.3 Sonuç	155
5.2.5 Çentikli çekme deneyi	156
5.3 Sonuç	169
BÖLÜM 6 İRDELEME	171
6.1 Burma Deneyi	171
6.2 Basma Deneyleri	173
6.3 Dövülebilirlik Eğrileri	183
BÖLÜM 7 SONUÇLAR ve ÖNERİLER	193
KAYNAKLAR	196
ÖZGEÇMİŞ	201



SEMBOL LİSTESİ

A_0, A_k	: Kesit alanları , (mm^2)
C	: İntegrasyon sabiti
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrad derece
D, D_0, d, d_0	: Çaplar , (mm)
$d\varepsilon$	: Etkin sonsuz küçük birim şekil değiştirme
e_f	: Kopma uzaması
h, h_0	: Yükseklikler , (mm)
$^{\circ}\text{K}$	: Kelvin derece
L, l_k, l_0, l_u, e, e_0	: Uzunluklar , (mm)
M, M_T	: Moment , (Nm)
q	: Kopma kesit daralması
P	: Kuvvet , (kN)
R, R_i, R_0, r	: Yarıçaplar , (mm)
R_a	: Yüzey pürüzlülüğü , (μm)
T, T_e	: Sıcaklıklar , ($^{\circ}\text{K}$)
t	: Zaman , (s)
v	: Hız , (mm/s)
w	: Genişlik , (mm)
W	: Güç , (Watt)
α, β	: Sürtünmeye bağlı katsayılar
$\Delta_h, \Delta_k, \Delta_u$	: Uzama miktarı , (mm)

$\epsilon, \epsilon_\theta, \epsilon_z, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3,$

$\epsilon_f, \epsilon_k, \epsilon_{nf}, \epsilon_{tf}$

: Birim şekil değıştirmeler

ϵ_{hf}

: Gerçek süneklik

$\dot{\epsilon}$

: Birim şekil değıştirme hızı , (s^{-1})

γ

: Kayma birim şekil değıştirmesi , (Radyan)

μ

: Sürtünme katsayısı

$\sigma, \sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3,$

$\sigma_\theta, \sigma_m, \sigma_z, \sigma_u, \sigma_x, \sigma^*$

: Normal gerilme elemanları , (N/mm^2)

τ

: Kayma gerilmesi , (N/mm^2)

θ

: Kayma açısı (radyan)

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa no</u>
Şekil 2.1 Elde dövme ekipmanı	8
Şekil 2.2 Açık kalıpta dövme kalıpları	9
Şekil 2.3 Kapalı kalıpta çapaklı dövme	9
Şekil 2.4 Kapalı kalıpta çapaksız dövme	10
Şekil 2.5 Yatay dövme	11
Şekil 2.6 Radyal dövme techizatı	14
Şekil 2.7 Bir tübün radyal dövülmesi	14
Şekil 2.8 Radyal dövülmüş tüblere ait kesit örnekleri	14
Şekil 2.9 Sinter dövme işlemi	15
Şekil 2.10 (a) Dövme haddeleri ile şekillendirme (konvansiyonel yöntem), (b) Matris gravürleri	16
Şekil 2.11 Çapraz haddeleme	17
Şekil 2.12 Elektro yığma işlemi	17
Şekil 2.13 (a) İleri püskürtme, (b) Geri püskürtme	18
Şekil 2.14 Orbital dövme	19
Şekil 2.15 Delme işlemi uygulamaları	20
Şekil 2.16 İstampa ile basma	20
Şekil 2.17 Dar kalıpta dövme	21
Şekil 2.18 (a) Uzatma, (b) Toplama	21
Şekil 2.19 Dövme işleminde katmer oluşumu	24
Şekil 2.20 Fazla büyük hammaddenin parçada iç çatlaklar oluşturması	24

Şekil 2.21 Malzeme akışı sırasında kalın komşu kesitin sebep olduğu yüzey boşluğu	25
Şekil 2.22 İkincil çekme gerilmelerinin neden olduğu çatlaklar	26
Şekil 3.1 Çeliğin sünekliğine ikinci faz partiküllerinin etkisi	30
Şekil 3.2 Kristalografik yönlenmenin sünekliğe etkisi	30
Şekil 3.3 Faz değişiminin sünekliğe etkisi	31
Şekil 3.4 Yüksek sıcaklıklarda burmada sünekliğin şekil değiştirme hızı ile değişimi	33
Şekil 3.5 Şekil değiştirme hızının burmada gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine etkisi	33
Şekil 3.6 Farklı malzemeler için sıcaklığın sünekliğe etkisi	34
Şekil 3.7 Farklı alaşım sistemlerinde sıcaklık ile dövülebilirlik davranışlarının değişimi	36
Şekil 3.8 Basmada yağlayıcıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine etkisi	38
Şekil 3.9 Basmada birim şekil değiştirme	38
Şekil 3.10 Basmada sürtünmenin sünekliğe etkisi	38
Şekil 3.11 AISI 1045 Çeliğine ait Şekillendirme Sınır Diyagramı	44
Şekil 3.12 Eğmede asal gerilme - birim şekil değiştirmeleri	45
Şekil 4.1 Numune üzerinde sertlik değeri alınan noktaların şematik gösterimi	52
Şekil 4.2 Çekme deney numuneleri	52
Şekil 4.3 Çekme ve çentikli çekme deneylerinin gerçekleştirildiği TREBEL çekme makinası	53
Şekil 4.4 Burma deney numuneleri	54
Şekil 4.5 Burma deney cihazı	55
Şekil 4.6 Yivli basma takımı	55
Şekil 4.7 Dolu silindir basma deney numuneleri	57
Şekil 4.8 Halkalı dolu silindir basma deney numuneleri	58

Şekil 4.9 Basma deney cihazı	61
Şekil 4.10 Çentikli çekme deney numuneleri	62
Şekil 5.1 AISI 1040 çeliğinde kalıntılar. Malzeme sıcak haddelenmiş durumda. Eksene paralel kesit	64
Şekil 5.2 AISI 1040 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda MnS kalıntısı (SEM). Eksene paralel kesit	64
Şekil 5.3 AISI 1040 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda Al_2O_3 kalıntısı (SEM). Eksene paralel kesit	65
Şekil 5.4 AISI 1050 çeliğinde kalıntılar. Malzeme sıcak haddelenmiş durumda. Eksene paralel kesit	65
Şekil 5.5 AISI 1050 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda MnS kalıntısı (SEM). Eksene paralel kesit	66
Şekil 5.6 AISI 1050 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda MnS ve Al_2O_3 kalıntıları (SEM). Eksene paralel kesit	66
Şekil 5.7 AISI 4140 çeliğinde kalıntılar. Malzeme sıcak haddelenmiş durumda. Eksene paralel kesit	67
Şekil 5.8 AISI 4140 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda MnS kalıntısı (SEM). Eksene paralel kesit	67
Şekil 5.9 AISI 4140 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda Al_2O_3 kalıntısı (SEM). Eksene paralel kesit	68
Şekil 5.10 AISI 5140 çeliğinde kalıntılar. Malzeme sıcak haddelenmiş durumda. Eksene paralel kesit	68
Şekil 5.11 AISI 5140 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda MnS kalıntısı (SEM). Eksene paralel kesit	69
Şekil 5.12 AISI 5140 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda Al_2O_3 kalıntısı (SEM). Eksene paralel kesit	69
Şekil 5.13 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	71
Şekil 5.14 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	71
Şekil 5.15 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	72

Şekil 5.16 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	72
Şekil 5.17 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital	73
Şekil 5.18 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital	73
Şekil 5.19 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	74
Şekil 5.20 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	74
Şekil 5.21 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	75
Şekil 5.22 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	75
Şekil 5.23 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital	76
Şekil 5.24 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital	76
Şekil 5.25 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital	77
Şekil 5.26 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital	77
Şekil 5.27 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	78
Şekil 5.28 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	78
Şekil 5.29 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital	79
Şekil 5.30 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital	79
Şekil 5.31 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	80

Şekil 5.32 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	80
Şekil 5.33 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	81
Şekil 5.34 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital	81
Şekil 5.35 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital	82
Şekil 5.36 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital	82
Şekil 5.37 Sıcak haddelenmiş durumdaki AISI 1040 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10)	91
Şekil 5.38 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10)	92
Şekil 5.39 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10)	92
Şekil 5.40 Sıcak haddelenmiş durumdaki AISI 1050 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10)	93
Şekil 5.41 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10)	93
Şekil 5.42 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10)	94
Şekil 5.43 Sıcak haddelenmiş durumdaki AISI 4140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10)	94
Şekil 5.44 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10)	95
Şekil 5.45 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10)	95
Şekil 5.46 Sıcak haddelenmiş durumdaki AISI 5140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10)	96
Şekil 5.47 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10)	96

Şekil 5.48 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotografı (x 10)	97
Şekil 5.49 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	100
Şekil 5.50 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	100
Şekil 5.51 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	101
Şekil 5.52 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	101
Şekil 5.53 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetlerinin yükseklik azalması ile değişimi.	102
Şekil 5.54 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	102
Şekil 5.55 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	103
Şekil 5.56 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	103
Şekil 5.57 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	104
Şekil 5.58 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	104
Şekil 5.59 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	105
Şekil 5.60 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	105
Şekil 5.61 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	106

Şekil 5.62 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	106
Şekil 5.63 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	107
Şekil 5.64 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	107
Şekil 5.65 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	108
Şekil 5.66 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	108
Şekil 5.67 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	109
Şekil 5.68 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	109
Şekil 5.69 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	110
Şekil 5.70 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	110
Şekil 5.71 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	111
Şekil 5.72 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	111
Şekil 5.73 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	112
Şekil 5.74 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	112

Şekil 5.75 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	113
Şekil 5.76 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	113
Şekil 5.77 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	114
Şekil 5.78 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	114
Şekil 5.79 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	115
Şekil 5.80 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	115
Şekil 5.81 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	116
Şekil 5.82 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	116
Şekil 5.83 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	117
Şekil 5.84 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	117
Şekil 5.85 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	118
Şekil 5.86 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	118
Şekil 5.87 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	119
Şekil 5.88 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	119

Şekil 5.89 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	120
Şekil 5.90 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	120
Şekil 5.91 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	121
Şekil 5.92 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	121
Şekil 5.93 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	122
Şekil 5.94 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.	122
Şekil 5.95 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	123
Şekil 5.96 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	123
Şekil 5.97 Dolu silindir basma deneyinde şekil değiştirmiş deney örneğinde akma çizgileri.	127
Şekil 5.98 Dolu silindir basma deneyinde oluşan çatlak görüntüleri (x10)	128
Şekil 5.99 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	132
Şekil 5.100 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	132
Şekil 5.101 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	133
Şekil 5.102 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	133

Şekil 5.103 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	134
Şekil 5.104 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	134
Şekil 5.105 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	135
Şekil 5.106 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	135
Şekil 5.107 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	136
Şekil 5.108 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	136
Şekil 5.109 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	137
Şekil 5.110 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	137
Şekil 5.111 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	138
Şekil 5.112 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	138
Şekil 5.113 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	139
Şekil 5.114 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	139
Şekil 5.115 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	140
Şekil 5.116 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	140

Şekil 5.117 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	141
Şekil 5.118 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	141
Şekil 5.119 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	142
Şekil 5.120 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	142
Şekil 5.121 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	143
Şekil 5.122 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	143
Şekil 5.123 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	144
Şekil 5.124 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	144
Şekil 5.125 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	145
Şekil 5.126 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	145
Şekil 5.127 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	146
Şekil 5.128 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	146
Şekil 5.129 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	147

Şekil 5.130 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	147
Şekil 5.131 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	148
Şekil 5.132 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.	148
Şekil 5.133 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.	149
Şekil 5.134 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.	149
Şekil 5.135 Halkalı dolu silindir basma deneyinde akma çizgileri.	153
Şekil 5.136 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde oluşan çatlak görüntüleri.	154
Şekil 5.137 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	156
Şekil 5.138 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneylerinden eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.	156
Şekil 5.139 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	157
Şekil 5.140 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.	157
Şekil 5.141 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	158
Şekil 5.142 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.	158
Şekil 5.143 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	159
Şekil 5.144 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.	159
Şekil 5.145 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	160

Şekil 5.146 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.	160
Şekil 5.147 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	161
Şekil 5.148 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.	161
Şekil 5.149 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	162
Şekil 5.150 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.	162
Şekil 5.151 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	163
Şekil 5.152 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.	163
Şekil 5.153 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	164
Şekil 5.154 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değilimi.	164
Şekil 5.155 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	165
Şekil 5.156 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.	165
Şekil 5.157 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	166
Şekil 5.158 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.	166
Şekil 5.159 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.	167
Şekil 5.160 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.	167
Şekil 6.1 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.	176
Şekil 6.2 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.	176
Şekil 6.3 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.	177

Şekil 6.4 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.	177
Şekil 6.5 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.	178
Şekil 6.6 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.	178
Şekil 6.7 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.	179
Şekil 6.8 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.	179
Şekil 6.9 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.	180
Şekil 6.10 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.	180
Şekil 6.11 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.	181
Şekil 6.12 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı .	181
Şekil 6.13 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	183
Şekil 6.14 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	184
Şekil 6.15 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	184
Şekil 6.16 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	185
Şekil 6.17 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	185
Şekil 6.18 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	186
Şekil 6.19 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	186
Şekil 6.20 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	187
Şekil 6.21 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	187
Şekil 6.22 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	188
Şekil 6.23 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	188
Şekil 6.24 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliği dövülebilirlik eğrisi.	189
Şekil 6.25 Her tip malzeme ve ısı işlem durumu için basma, halkalı basma ve çentikli çekme deneyleri kopma değerlerini gösteren dövülebilirlik diyagramı.	191

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1 Normalizasyon tavlı sıcaklıkları	49
Tablo 4.2 Küreselleştirme tavlama ile ilgili sıcaklık ve süreler	50
Tablo 5.1 MKE standardı kimyasal analiz değerleri	63
Tablo 5.2 Kimyasal analiz sonuçları	63
Tablo 5.3 Tane boyutları	83
Tablo 5.4 AISI 1040 çeliği Vickers sertlik değerleri	84
Tablo 5.5 AISI 1050 çeliği Vickers sertlik değerleri	85
Tablo 5.6 AISI 4140 çeliği Vickers sertlik değerleri	86
Tablo 5.7 AISI 5140 çeliği Vickers sertlik değerleri	87
Tablo 5.8 Çekme deneyi sonuçları	88
Tablo 5.9 Burma deneyi sonuçları	90
Tablo 5.10 Dolu silindir basma deneyi sonuçları	99
Tablo 5.11 Dolu silindir basma deneyi kopma anındaki birim şekil değiştirme - hidrostatik gerilme efektif gerilme oranı sonuçları	124
Tablo 5.12 Dolu silindir basma deneyi çatlak tipi sonuçları	129
Tablo 5.13 Halkalı dolu silindir basma deneyi sonuçları	131
Tablo 5.14 Halkalı dolu silindir basma deneyi kopma birim şekil değiştirme ve kopma gerilme elemanları efektif gerilme oranları sonuçları	150
Tablo 5.15 Çentikli çekme deneyi sonuçları	168
Tablo 6.1 Burma deneyinde kopmaya yol açan devir sayısı değerlerinden dövülebilirlik sıralaması	172
Tablo 6.2 Dolu silindir basma deneyinde hasar anında yükseklik azalması değerlerinden dövülebilirlik sıralaması	173

Tablo 6.3 Halkalı dolu silindir basma deneyinde hasar anında yükseklik azalması değerlerinden dövülebilirlik sıralaması	174
Tablo 6.4 Kuhn dövülebilirlik endisine göre dövülebilirlik sıralaması	182
Tablo 6.5 Çalışmada incelenen çeliklerin basma, halkalı basma ve çentikli çekme deneyleri dövülebilirlik sıralaması	192



ÖZET

Bir dövme işlemini hasarsız gerçekleştirebilmek için şekil verilmek istenen malzemenin şekillendirilebilme kabiliyetinin bilinmesi istenir. Bu nedenle, dövme işlemlerinde malzemeyi hasara uğratmadan istenen şekli verebilmek için “Dövülebilirlik” terimi tanımlanmıştır. Dövülebilirliğin ölçülmesi amacıyla çeşitli deneyler ve sünek kırılma kriterleri geliştirilmiştir. Hiçbir deney yöntemi ve kırılma kriteri tek başına dövülebilirliği ifade etmek için yeterli görülmemektedir.

Bu çalışmada, dövmenin tanımı yapılarak dövme yöntemleri hakkında kısa bilgiler verilmiş ve dövülebilirliğin tanımı yapılarak dövülebilirliği etkileyen değişkenler ve dövülebilirliği saptamada kullanılan deneyler açıklanmıştır.

DeneySEL çalışmalarla, Vickers sertlik deneyleri, basit çekme deneyleri, burma deneyleri, dört farklı sürtünme koşulunda dolu silindir basma deneyleri, iki farklı sürtünme koşulunda halkalı dolu silindir basma deneyleri ve üç farklı çentik yarıçapına sahip çentikli çekme deneyleri AISI 1040, 1050, 4140 ve 5140 çeliklerinin sıcak haddelenmiş, normalize edilmiş ve küreleştirilmiş durumlarına uygulanarak dövülebilirliğin saptanması için uygun deney yöntemleri araştırılmıştır.

Basit çekme deneylerinden akma sınırı, çekme dayanımı, %uzama ve %kesit daralması değerleri elde edilerek dövülebilirlik incelenmiştir.

Burma deneylerinden kopmaya yol açan devir sayısı ve moment ölçülerek elde edilen değerlerden efektif birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi değerleri hesaplanmıştır. Kopmaya yol açan devir sayılarının kıyaslanmasıyla dövülebilirlik sıralaması yapılmıştır.

Dolu silindir basma ve halkalı dolu silindir basma deneylerinde elde edilen değerlerden, yükseklik azalması ile gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının değişimi, çevresel ve eksenel birim şekil değiştirme değişimi ve şekillendirme sınır diyagramları kullanılarak dövülebilirlik araştırılmıştır.

Çentikli çekme deneylerinden, deney süresince kesit daralması ölçülerek kesit daralması değişimi ile gerilme elemanları efektif gerilme oranları değişimi diyagramları elde edilmiş ve bunlarla dövülebilirlik araştırılmıştır.

Sonuç olarak, burmada kopmaya yol açan devir sayısı, basma ve halkalı basmada yükseklik azalması ve dövülebilirlik endisi ve basma, halkalı basma, çentikli çekme kopma sonuçlarını birlikte değerlendiren dövülebilirlik eğrileri ile dövülebilirlik kriterleri karşılaştırılmıştır. Çentikli çekme ve basma deneylerinin dövülebilirlik eğrileri ile incelenmesi dövülebilirliğin saptanması için ideal uygulama kabul edilmiştir.

THE INVESTIGATION OF FORGEABILITY IN THE STEELS BY USING TORSION, COMPRESSION AND TENSION TESTS.

SUMMARY

The manufacture of many engineering components involves the deformation of metals and alloys. Deformation processes are relatively simple and yield products with good mechanical properties. Traditionally, the feasibility of a forming process was determined to a great extent by trial and error. Even today, many concerns rely on experience and operator skill for the successful manufacture of components. This approach often leads to the production of defective components that have to be scrapped, and time is lost while tools are modified or redesigned. Recent research has shown that forgeability tests can be useful in predicting the behavior of a workpiece under industrial conditions. Thus, the feasibility of a process can be determined in the laboratory at relatively low cost. Many forgeability tests have been used by various investigators whose choice of test appears to be governed by the availability of equipment and the nature of the forming process under consideration. This work involves tests of hardness, tension, torsion, compression, collar and notched tension and examination of these test results.

Forgeability

Forgeability can be defined as the amount of deformation that a material will withstand without fracture in the forging processes. It is not a unique property of the material, but depends on such process variables as the stress system, strain rate, temperature, and friction conditions can be ductile under hydrostatic pressure.

The concept of forgeability can be expressed by the following relationship.

$$\text{Forgeability} = f_1 (\text{material}) \times f_2 (\text{process})$$

where f_1 is a function of the basic ductility of the material, and f_2 is a function of the stress and strain system imposed by the process.

Techniques for Testing Forgeability

Metal forgeability can be assessed by the use of different techniques such as tension, torsion, bending, and compression tests. The geometry of the test specimen and the test conditions can be varied to provide a wide range of stress and strain states. The investigator can then use the results of such tests to predict the conditions under which fracture will occur.

The Tension Test

The tension test is widely used to determine the mechanical properties of a material. The uniform elongation of the specimen, its total elongation, and especially the reduction in area at fracture can be used as indices of ductility. However, the amount of deformation possible in a tensile test is limited by necking, which introduces a triaxial stress and leads to failure.

The Torsion Test

In the torsion test, deformation is caused by pure shear, and large strains are achieved without the limitations imposed by plastic instability. Since the strain rate is proportional to the rotational speed, high strain rates are obtained readily. There is no friction between the deforming specimen and the tools as there is in the compression test.

One of the limitations of the torsion test is that the strain rate varies linearly along the radius of the specimen and is at a maximum at the surface. This difficulty can be partly overcome by the use of tubular specimen in which the strain rate is nearly uniform. Although the stress states in the torsion test may represent those of metal-working processes, the deformation is not an accurate simulation of that encountered in industrial processes. This is probably the greatest limitation of the torsion test.

The Bend Test

The bend test can be used in the assessment of metal forgeability, especially when the geometry of the workpiece is not suitable for compression tests. The stress and strain states on the outer surface of the specimen are similar to those obtained in a compression test and can be varied by alteration of the width-to thickness ratio of the specimens.

The Compression Test

Compression tests invariably involve the axial compression of cylindrical specimens. The average stress state is similar to that in most bulk deformation processes, but problems due to necking and material reorientation do not arise, and a large degree of deformation can be obtained before cracking occurs. Barreling of the cylindrical surface of a specimen furnishes considerable flexibility for testing of its forgeability by causing failure of the material after an amount of deformation that is characteristic of the forgeability of that material. Friction between the tools and the specimen and Barreling can be controlled by the use of lubricants and, thus, the behavior of the material can be assessed after varying amounts of deformation.

Experimental Procedure

Materials

AISI 1040, 1050, 4140 and 5140 steels in the hot rolled, normalized and spheroidized condition were used in the present investigation. The composition of

the steels tested are given in Table 1. Spheroidized conditions are given in Table 2. Normalization temperatures are given in Table 3.

Table 1. Chemical composition of the steels.

Material	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
AISI 1040	0.398	0.189	0.769	0.0137	0.0389	0.158	0.0247
AISI 5140	0.375	0.194	0.753	0.0143	0.0332	0.813	0.0317
AISI 4140	0.365	0.178	0.796	0.0086	0.0236	0.802	0.167
AISI 1050	0.463	0.176	0.679	0.0097	0.0308	0.174	0.0375

Table 2. Spheroidized conditions of the steels.

Material	AISI 1040	AISI 1050	AISI 4140	AISI 5140
Oustonite temperature	750 ⁰ C	750 ⁰ C	765 ⁰ C	760 ⁰ C
Annealing temperature	685 ⁰ C	685 ⁰ C	700 ⁰ C	685 ⁰ C
Annealing time	14 hour	14 hour	12 hour	13 hour

Table 3. Normalization temperatures of the steels.

Material	AISI 1040	AISI 1050	AISI 4140	AISI 5140
Annealing temperature	890 ⁰ C	860 ⁰ C	870 ⁰ C	850 ⁰ C

Mechanical Tests

Hardness measurements were used by Vickers method. Forgeability was determined from of the reduction in area and elongation which were taken from tensile testing. Number of turn until fracture and moment at the fracture were measurement by torsion testing, then forgeability was investigated from these values. For the compression tests, cylindrical specimens having a diameter of 10 mm and heights of 15 mm, were turned. Critical reductions leading to fracture were measured by friction conditions. For the determination of the forgeability diagrams, a grid of 1.27 mm square was etched on the free surface of the specimens by permanent pencil. Collar tests were performed by smooth dies and grooved dies. Forgeability diagrams were settled by changing collar thickness and diameter which were 3 mm and 15 mm at the beginning. Notched tension tests for investigation of effect of stress-triaxiality on the ductile tearing and the cleavage fracture of steels were completed by using specimens having radius of 2 mm, 5 mm, and 10 mm.

Experimental Results

The results of the tensile tests are given in Table 4. Steels in spheroidized conditions had very high values for the reduction in area and elongation.

The results of the torsion tests are given in Table 5. Steels AISI 4140 and 5140 had very high and AISI 1040 and 1050 relatively low values for number of turn until fracture.

Table 4. Tensile testing results.

Material	Heat treatment	σ_0 (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	% e_f	% q
AISI 1040	Hot rolled	447.45	712.59	21.06	49.46
	Normalized	482	676.62	24.74	54.814
	Spheroidized	351	568	25.53	60.3
AISI 1050	Hot rolled	484.4	781	17.4	44.12
	Normalized	492	753	21.96	48.05
	Spheroidized	355.6	582.5	21.48	54.5
AISI 4140	Hod rolled	428	638	23.15	65.55
	Normalized	695	936.4	12.13	44.39
	Spheroidized	364	564	24.52	67.8
AISI 5140	Hot rolled	517.35	825	16.76	56.4
	Normalized	488.2	731.6	20.64	59.4
	Spheroidized	343.6	585.3	24.25	61.3

Table 5. Torsion testing results.

Material	Heat treatment	number of turn until fracture	Torsion moment (M) (Nm)	Shear strain (γ)	Shear stress (τ) (N/mm ²)
AISI 1040	Hot rolled	3.0516	26.3	0.75487	620.11
	Normalized	3.1541	27.8	0.78022	655.48
	Spheroidized	3.7033	23.4	0.91608	551.73
AISI 1050	Hot rolled	3.0333	28.9	0.75034	681.42
	Normalized	3.0391	27.5	0.75178	648.41
	Spheroidized	3.3166	23.4	0.82042	551.73
AISI 4140	Hot rolled	5.175	26.7	1.28013	629.54
	Normalized	2.0691	34	0.51183	801.67
	Spheroidized	5.2666	22.9	1.30279	539.94
AISI 5140	Hot rolled	3.8633	31.1	0.95566	733.29
	Normalized	4.1291	29.9	1.02141	704.99
	Spheroidized	5.0433	23.4	1.24755	551.73

Forgeability was studied by the compression tests including the equatorial strains and stresses versus height reduction curves and formability limit diagrams. These curves are illustrated in the figures 1-2-3.

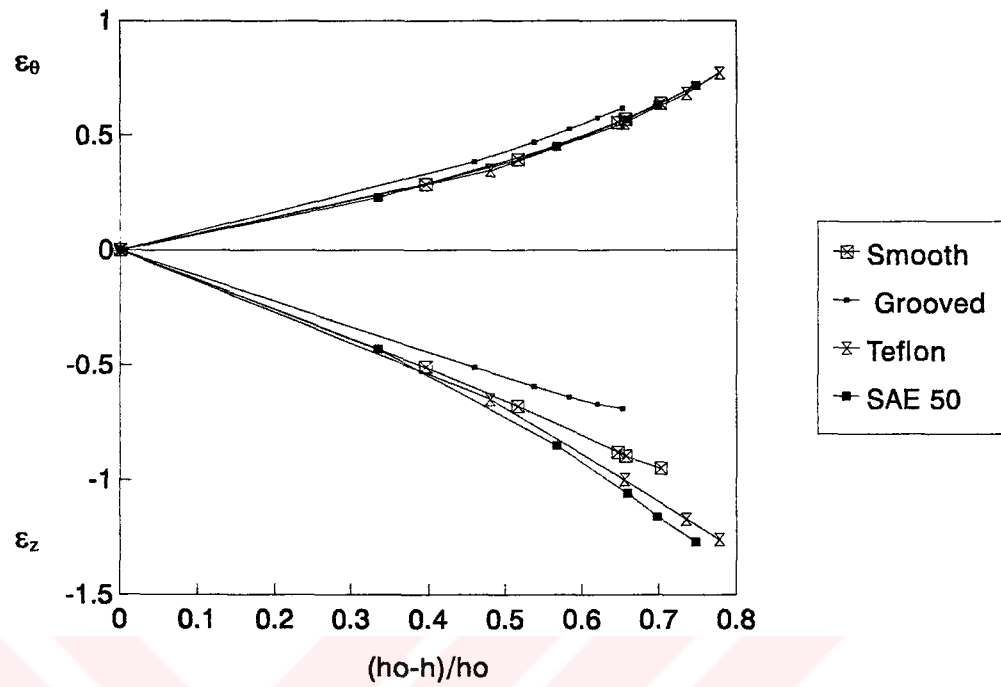


Fig. 1 Strain paths for four conditions of lubrication : Spheroidized AISI 4140 steel.

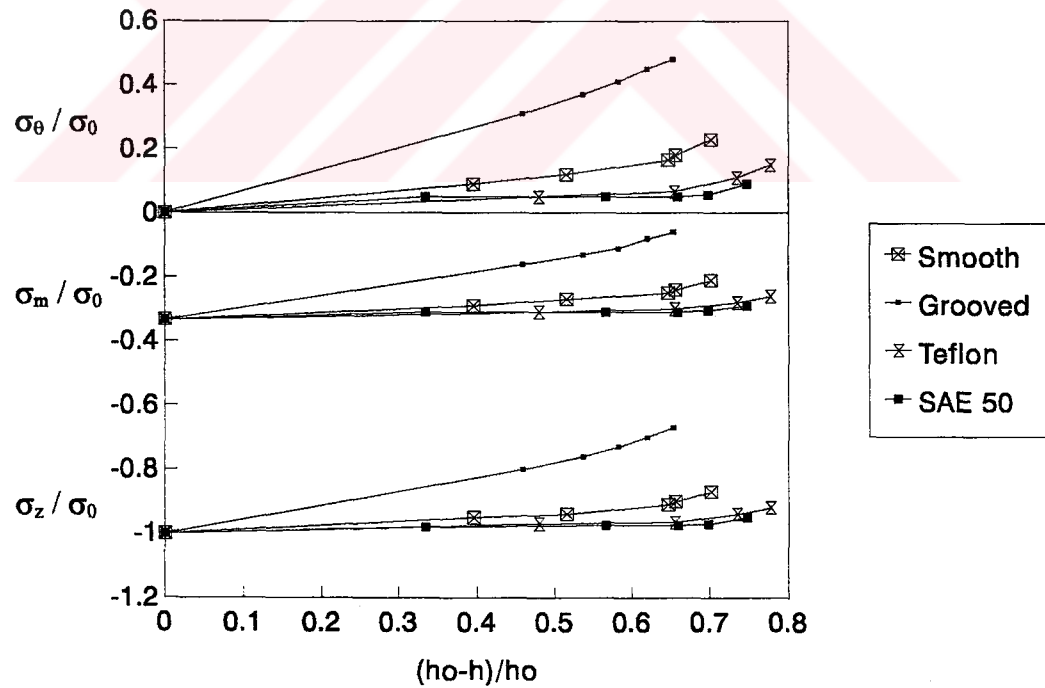


Fig. 2 Stress paths for four conditions of lubrication : Spheroidized AISI 4140 steel.

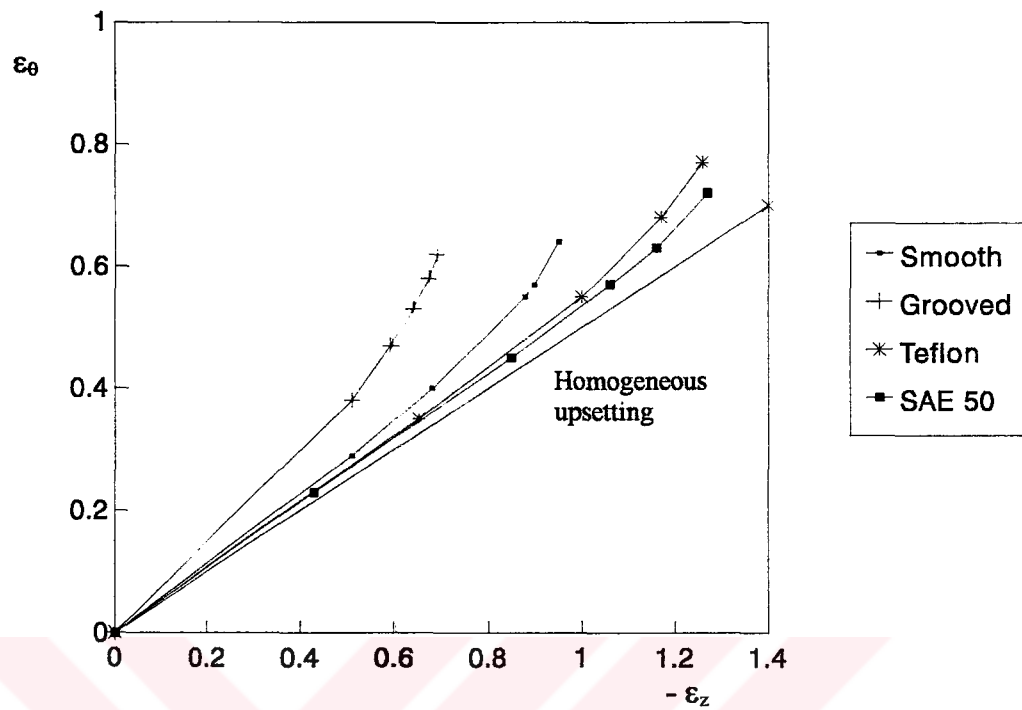


Fig. 3 Formability limit diagram : Spheroidized AISI 4140 steel.

Forgeability was studied by the collar tests including the collar strains and stresses versus height reduction curves and formability limit diagrams. These curves are illustrated in the figures 4-5.

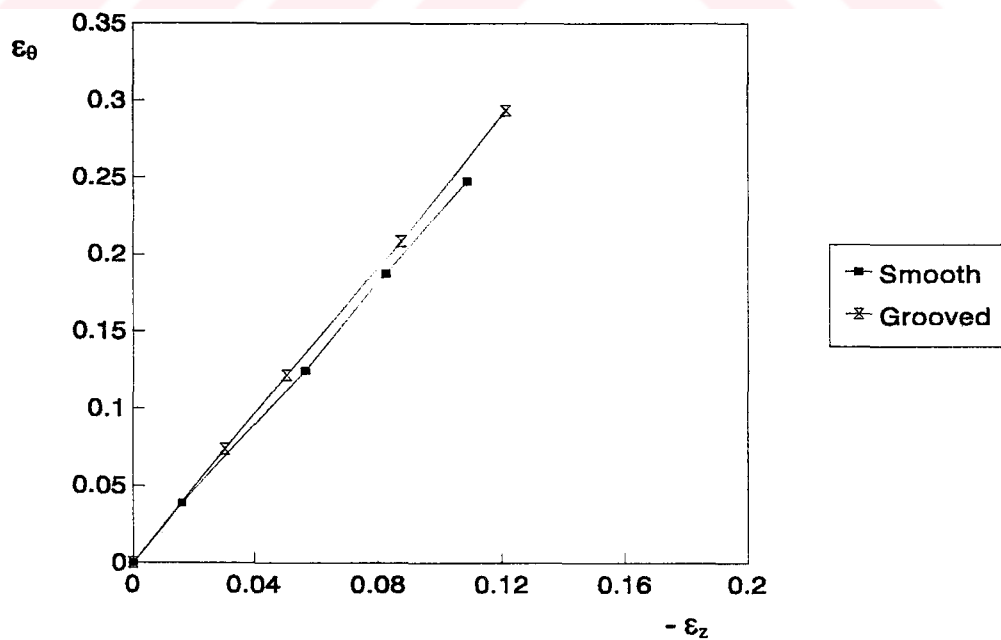


Fig. 4 Strain paths for two conditions of lubrication : Normalized AISI 5140 steels.

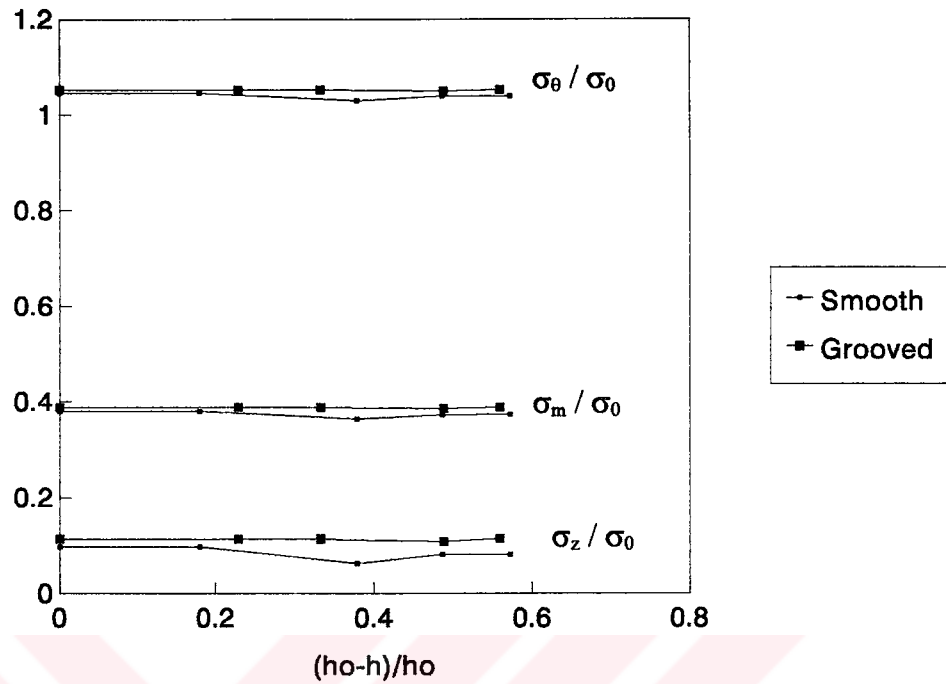


Fig. 5 Relation between reduction of height and axial and mean stress values : Normalized AISI 5140 steel.

In the notched tension tests, reduction of notched area was measured. Changing curves between axial and mean stress - notched area were taken from these values (Fig. 6)

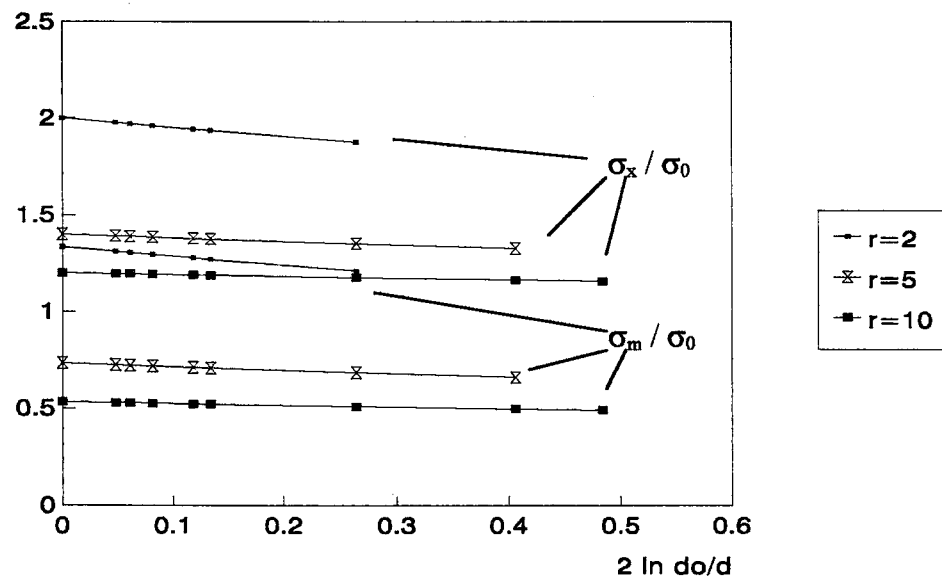


Fig. 6 Axial and mean stress values calculated by analytical model in the minimum cross section of cylindrical notched specimens : Normalized AISI 1050 steels.

Conclusions

Correlation of fracture values among compression, collar and notched tension tests is given in Figure 7.

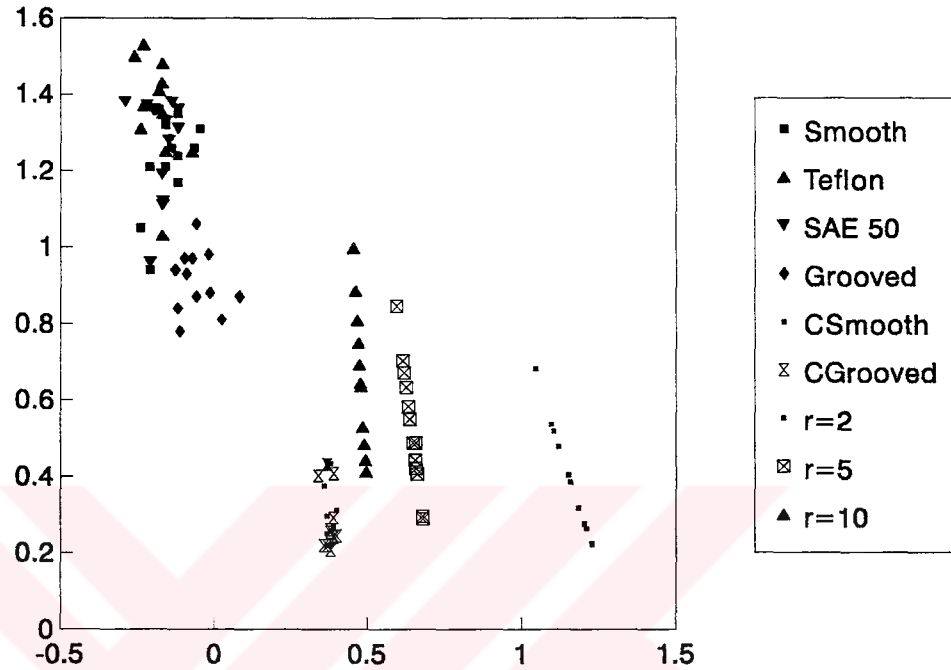


Fig. 7 Forgeability diagram of fracture values for all materials and every heat treatment condition.

In the experimental investigation of this work, tests mentioned before was practiced to different steels and their different internal structures which found out by heat treatment and materials are classified according to their forgeability. For this aim, forgeability curves which give changing between $\epsilon_{\text{fracture}}$ and $(\sigma_m/\sigma_0)_{\text{fracture}}$ were used. These curves are very fitting for a lot of industrial forming like forging, upsetting, extrusion, and drawing. Classification of forgeability in this work clearly shows that there are very close relation between forgeability and type of stress state. Therefore, we can certainly say that notched tension and compression tests are ideal for estimation of forgeability.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Metallere şekil verme, genel olarak döküm, kaynak, plastik şekil verme, talaşlı imalat, toz metalurjisi yöntemlerinin biri veya birkaçının uygulanması ile gerçekleştirilir. Plastik şekil verme, dövme, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme, derin çekme, sıvama, bükme ve kesme gibi çeşitli işlemleri içerir. Bu işlemler şekil verme biçimine göre kütle şekil verme ve levha biçimlendirme işlemleri olarak sınıflandırılır. Buna göre, dövme, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme kütle şekil verme işlemleri; derin çekme, sıvama, bükme levha biçimlendirme işlemleri olarak tanımlanır. Dövme, metallere katı durumda akış sağlayacak mertebelerde basınç uygulayarak metalin istenilen biçimi almasını sağlayan bir üretim yöntemidir. Dövme yöntemiyle şekil verilmek istenen metal malzemelerin şekillendirilmelerini sınırlandıran etkenler vardır. Bir dövme işlemini hasarsız gerçekleştirebilmek için şekil verilmek istenen malzemenin şekillendirilebilme kabiliyetinin bilinmesi istenir. Bu nedenle, dövme işlemlerinde malzemeyi hasara uğratmadan istenen şekli verebilmek için “Dövülebilirlik” terimi tanımlanmıştır.

Bir metalin dövülebilirliği, dövmede çatlamadan şekil değiştirme kabiliyeti olarak tanımlanır. Dövülebilirliğin ölçülmesi amacıyla çeşitli deneyler ve sünek kırılma kriterleri geliştirilmiştir. Hiçbir deney yöntemi ve kırılma kriteri tek başına dövülebilirliği ifade etmek için yeterli görülmemektedir.

Dövülebilirliğin saptanması konusunda yapılmış olan belli başlı çalışmalar aşağıda kısaca sunulmuştur.

Malzemelerin şekil değiştirme miktarının saptanmasında ilk düşünülen yöntem çekme deneyinde toplam uzama ve kesit daralmasının ölçümü olmaktadır. Fakat tek eksenli gerilme halinin etkisi altında başlanan deneyde, meydana gelen boyun verme nedeniyle, üç eksenli gerilme hali oluşur. Bunun sonucu olarak elde edilen şekil değiştirme miktarı azalır ve malzemenin daha büyük şekil değiştirmelerde nasıl davranacağını görmek için önlenmiş olur. Bu nedenle, Davidenkov ve Spiridonova tarafından yapılan bir çalışmada, çekme deneylerinde boyun vermenin gelişimi incelenerek üç eksenliliğin etkisi altında şekil değiştirmeye ilgili bir denklem geliştirilmiştir [1]. Araştırmacılar bu denklemle boyun vermedeki belirsizliği gidermeye çalışmışlardır.

Blain'in sunduğu bir çalışmada ise dövülebilirlik sıcak burma deneyleri ile incelenmiştir [2]. Bu çalışmada, farklı bileşimde çelik malzemelere yüksek sıcaklıklarda ve farklı şekil değiştirme hızlarında burma deneyleri uygulanmıştır.

Cockcroft ve Latham dövülebilirliği gerçek süneklik olarak kabul ederek çekme ve burma deneylerinden elde edilen verileri bir integralde kullanmak suretiyle gerçek süneklik değerinin saptanabileceğini ifade etmektedirler [3].

Thomason basma deneyleriyle sünek kırılma kriteri çalışmaları yapmıştır[4]. Bu çalışmada, basmada serbest yüzeydeki birim şekil değiştirme artışı ile serbest yüzey gerilme elemanları ilişkisinden sünek kırılma tahmine çalışılmış, serbest yüzey elemanlarının hasar oluşumuna kadarki farklı birim şekil değiştirme miktarları için akma dayanımına oranları kullanılmıştır (σ_θ/σ_0 , σ_z/σ_0 ve σ_m/σ_0).

Morozumi ve Hirasaka ekvatoruna farklı derinliklerde çentikler açılmış basma örnekleriyle dövülebilirlik değerlendirmesi çalışmışlardır [5]. Bu çalışmada, çentikli basma örnekleriyle dövme kusurlarının oluşumu ve çentik faktörünün kritik basma miktarına etkisi incelenmiştir.

Kulkarni ve Kalpakjian ise basmada oluşan fıçılasmayı analitik olarak incelemişlerdir [6].

Koboyashi basmada sünek kırılma konusunda çalışarak serbest yüzeyde birim şekil değiştirme ve fiçılasmada takım-iş parçası ara yüzey farklılıkları üzerine incelemeler yapmıştır [7]. Araştırmacı bu çalışmasında en uygun kriterde plastik akışın tüm geçmişinin, gerilme ve birim şekil değiştirme elemanlarının dikkate alınması gerektiği sonucuna varmıştır.

Miyagawa ve arkadaşları uzunlama V-çentikli basma örnekleriyle yığma - dövülebilirliğinin karşılaştırması için çentik ölçüsü ve geometrisi teklif etmişlerdir [8]. Bununla beraber, araştırmacılar çekmede kesit daralması ile yığma sınırı arasında net bir ilişkinin olmadığı sonucuna varmışlardır.

Kuhn ve Lee yığmada serbest yüzey birim şekil değiştirme miktarını saptamak için yeni bir ölçme metodu üzerine yaptıkları çalışmada, yığmada azalma ile serbest yüzey birim şekil değiştirme ilişkilerini araştırmışlardır [9].

Kuhn, Lee ve Ertürk basma, eğme ve haddeme deneylerinin herhangi biri veya hepsi birlikte kullanılarak elde edilebilen Şekillendirme Sınır Diyagramı kırılma kriterini geliştirmişlerdir [10]. Araştırmacılar bu kriterin Cockcroft kırılma kriteri ile uygunluk sağladığını da göstermişlerdir.

Fujita ve arkadaşları basma örneklerinin serbest yüzeyine uzunlamasına V-çentik açarak yığma sınırı ile çentik ilişkisini incelemişlerdir [11]. Bu çalışmada, çeliklerin bileşimindeki karbon yüzdesi ile yığma sınırı değişimi de araştırılmıştır.

Ravassard yığmada yivli basma takımları ile düz basma takımları kullanarak eksen yüksekliğindeki azalmayı esas alan bir dövülebilirlik kavramı üzerinde çalışmıştır [12].

Kuhn eğme ve yığma deneyleri vasıtasıyla haddelenmiş kütükten hadde yönüne paralel, hadde yönüne dik ve yan kesitten hadde yönüne dik örneklerle dövülebilirliği

şekillendirme sınır diyagramı yöntemi ile araştırmış ve şekil verme yönünün etkisini incelemiştir [13].

Kivivuori ve Sulonen şekillendirme sınır diyagramları ile çatlak şeklinin ilişkisini, birim şekil değiştirme eğrileri ve şekillendirme sınır diyagramını aynı grafikte kullanarak sünek kırılmayı, serbest yüzeyde ϵ_z artışı ile gerilme elemanları değişimini incelemişlerdir [14].

Beremin çentikli çekme deneyleri vasıtasıyla sünek kırılmaya üç eksenli gerilme halinin etkisini araştırmıştır [15]. Değerlendirmelerinde hidrostatik gerilmenin efektif gerilmeye oranının birim şekil değiştirme ile ilişkisini esas almıştır.

Tozawa ve arkadaşları yığılabilirlik deneyi için deney şartlarını araştırmışlardır [16].

Gelin ve arkadaşları basmada sünek kırılmayı incelemek için Cockcroft, Oyane ve Hill kırılma kriterlerini karşılaştırmışlar, deneysel ϵ_0 - hesaplanmış ϵ_0 ilişkilerinden en uygun değerlerin Oyane kırılma kriteri ile elde edildiği sonucuna varmışlardır [17].

Chandrasekaran ve arkadaşları basmada serbest yüzeyde gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerini ölçerek eğriler oluşturmuş, şekillendirme sınır diyagramı eğrilerini α değerleri ile lineerleştirmeye çalışmışlardır [18]. Deneylerden $\epsilon_0 - \epsilon_z$ birim şekil değiştirme eğrileri saptanarak önemli sapmalar olmadan gerilme aralıklarında bir azalma olduğu gösterilmiş, sonuç olarak dövülebilirlik tahminin tek bir yöntemle yapılamayacağına karar verilmiştir.

Ulván ve Koursaris basma deneylerini esas alarak yaptıkları karşılaştırmalarda endüstri şartlarına en uygun kırılma kriterinin şekillendirme sınır diyagramı olduğu sonucuna varmışlardır [19].

Gelin ve arkadaşları başka bir çalışmalarında, çentikli çekme deneyi ve basma deneyi ile dövülebilirlik tayinini araştırmışlardır [20]. Bu çalışmada, Oyane integrali gerilme ve birim şekil değiştirme elemanlarından (intristic) süneklik eğrileri geliştirilmiştir.

Sowerby ve Chandrasekaran üç farklı basma deneyi örneği kullanarak sünek kırılma kriterini araştırmışlardır [21]. Bu çalışmada, Cockcroft, Oyane, maksimum kayma gerilmesi hipotezi ve bir hidrostatik gerilme integrali değerleri karşılaştırılmış, basma deneylerinden halkalı örneklerle basma deneyi ve bu deneyde halka serbest yüzeyinde birim şekil değiştirme ile gerilme elemanları değişimi incelemesi en uygun yöntem olarak tavsiye edilmiştir.

Darvas basma deneyleri vasıtasıyla yaptığı araştırmada, aynı deney sonuçlarını şekillendirme sınır diyagramı ve Kivivuori ve Solunen kırılma eğrisine birlikte uygulayarak karşılaştırmıştır [22]. Araştırmacı hiçbir yöntemin yeterince güvenilir olmadığı sonucuna varmıştır.

Kivivuori, (1) çekmede kesit daralması ile yığmada kritik azalma ve şekillendirme sınır diyagramı değerleri ile çekmede kesit daralması - yığmada kritik azalma arasında bir bağıntı kurulamayacağı, (2) yığmada kritik azalma değerleri ile dövülebilirliğin tanımlanamayacağı, (3) şekillendirme sınır diyagramında -0.5 eğiminin geçerli olmayacağı sonucuna varmıştır [23].

Spittel'ler standartlaştırılmış deney şartları ve sonuç değerlendirmesi ile burma deneyinin soğuk şekillendirilebilirliğin saptanmasında en uygun yöntem olduğu sonucuna varmışlardır [24].

Moritaki Şekillendirme Sınır Diyagramındaki -0.5 eğimin basma deneylerinden elde ettiği sonuçlarla çok iyi bir uyum sağladığı sonucuna varmıştır [25].

Bu çalışmada, dövmenin tanımı yapılarak dövme yöntemleri hakkında kısa bilgiler verilmiş ve dövülebilirliğin tanımı yapılarak dövülebilirliği etkileyen değişkenler ve dövülebilirliği saptamada kullanılan deneyler açıklanmıştır.

Deneysel çalışmalarla, sertlik deneyleri, basit çekme deneyleri, burma deneyleri, dört farklı sürtünme koşulunda dolu silindir basma deneyleri, iki farklı sürtünme koşulunda halkalı dolu silindir basma deneyleri ve üç farklı çentik yarıçapına sahip çentikli çekme deneyleri AISI 1040, 1050, 4140 ve 5140 çeliklerinin sıcak haddelenmiş, normalize edilmiş ve küreleştirilmiş durumlarına uygulanarak dövülebilirliğin saptanması için uygun deney yöntemleri araştırılmıştır.

Sertlik deneyleri Vickers sertlik ölçme yöntemi ile yapılmıştır.

Basit çekme deneylerinden akma sınırı, çekme dayanımı, %uzama ve %kesit daralması değerleri elde edilerek dövülebilirlik incelenmiştir.

Burma deneylerinden kopmaya yol açan devir sayısı ve moment ölçülerek elde edilen değerlerden efektif birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi değerleri hesaplanmıştır. Kopmaya yol açan devir sayılarının kıyaslanmasıyla dövülebilirlik sıralaması yapılmıştır.

Dolu silindir basma ve halkalı dolu silindir basma deneylerinde elde edilen değerlerden, yükseklik azalması ile gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının değişimi, çevresel ve eksenel birim şekil değiştirme değişimi ve şekillendirme sınır diyagramları kullanılarak dövülebilirlik araştırılmıştır.

Çentikli çekme deneylerinden, deney süresince kesit daralması ölçülerek kesit daralması değişimi ile gerilme elemanları efektif gerilme oranları değişimi diyagramları elde edilmiş ve bunlarla dövülebilirlik araştırılmıştır.

Sonuç olarak, burmada kopmaya yol açan devir sayısı, basma ve halkalı basmada yükseklik azalması ve dövülebilirlik endisi ve basma, halkalı basma, çentikli çekme kopma sonuçlarını birlikte değerlendiren dövülebilirlik eğrileri ile dövülebilirlik kriterleri karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 2

DÖVME

2.1 DÖVMENİN TANIMI

Dövme, iş parçasının darbeli veya darbesiz şekilde uygulanan basma kuvvetleri vasıtasıyla plastik şekil değiştirdiği bir şekil verme yöntemidir. Bu yöntemle değişik boyut ve şekillerde parçalar üretilebilmektedir. Dövme ürünleri, taşıtlarda, tarım makina ve aletlerinde, inşaat ve yol makinalarında, füze ve roketlerde, silah endüstrisinde, türbin, motor v.b. makinalarda kullanılmaktadır. Dövme yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinde iyileşme görülmektedir.

Dövme sıcak, ılık ve soğuk olarak uygulanmaktadır. Malzemenin mutlak erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$) T_e ve şekil verme sıcaklığı da T ile gösterilirse, genel olarak, $T/T_e < 0.3$ ise soğuk şekil verme, $T/T_e = 0.3 - 0.5$ arası ise ılık şekil verme, $T/T_e > 0.6$ ise sıcak şekil verme söz konusudur [26,27,28].

Dövme işleminde iş parçasına uygulanan basma kuvvetleri şahmerdan çekiç veya preslerden elde edilmektedir.

2.2 DÖVME YÖNTEMLERİ

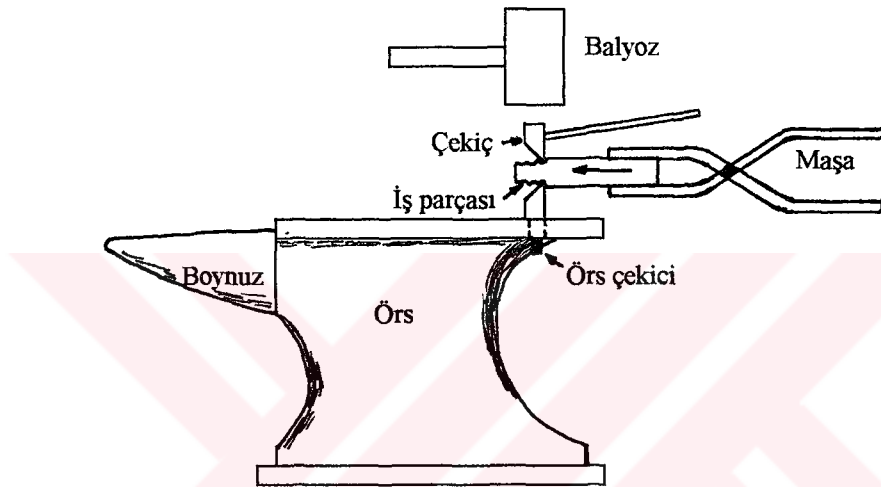
Dövme işlemi değişik kriterlere göre farklı şekillerde sınıflandırılır :

1. Kullanılan makinaların çalışma prensibine göre : şahmerdanla dövme ve presle dövme.
2. Uygulama sıcaklığına göre : soğuk dövme, ılık dövme ve sıcak dövme.

3. İzlenen yol veya kullanılan kalıp özelliklerine göre : açık kalıpta dövme, kapalı kalıpta dövme, yığma v.b.

2.2.1 Elde Dövme

El takımları kullanılarak ısıtılmış metalin çekişlenmesiyle gerçekleştirilen ve ilk dövme işlemi olarak bilinen bir dövme yöntemidir (Şekil 2.1).



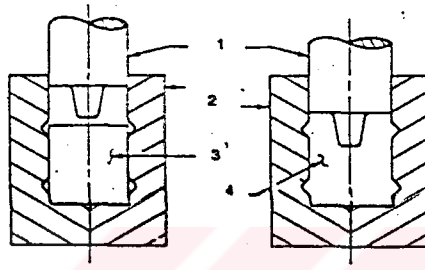
Şekil 2.1 Elde dövme ekipmanı [29].

2.2.2 Açık Kalıpta Dövme

Açık kalıpta dövme yönteminde, malzeme düzlemsel veya basit şekilli kalıplar arasında dövülmektedir[30]. Kuvvet üst kalıba şahmerdan çekiç veya presler ile uygulanmaktadır. Şekil 2.2’de açık kalıpta dövme kalıpları gösterilmiştir. Bu yöntem, kapalı kalıpta işlenemeyecek kadar büyük parçaların dövülmesinde, kalıp maliyetinden dolayı sayıca az üretimlerde tercih edilmekte ve bütün dövülebilir metaller açık kalıpta dövülebilmektedir[31].

2.2.4 Kapalı Kalıpta Çapaksız Dövme

Sıcak veya soğuk olarak uygulanan bu yöntemde kalıp tamamen kapanmakta ve çapak oluşmamaktadır (Şekil 2.4). Bu nedenle, hammadde hacmi çok hassas bir şekilde kontrol edilmelidir. Malzeme olarak avantaj sağlamakta fakat kalıp tasarımı ve işlemin kontrolü çok zor olmaktadır [34]. Bu yöntem çoğunlukla disk şeklindeki parçalar için kullanılmaktadır [35].



Şekil 2.4 Kapalı kalıpta çapaksız dövme, (1) Istamp. (2) Kalıp. (3) Hammadde. (4) İş parçası [30].

2.2.5 Yatay Dövme

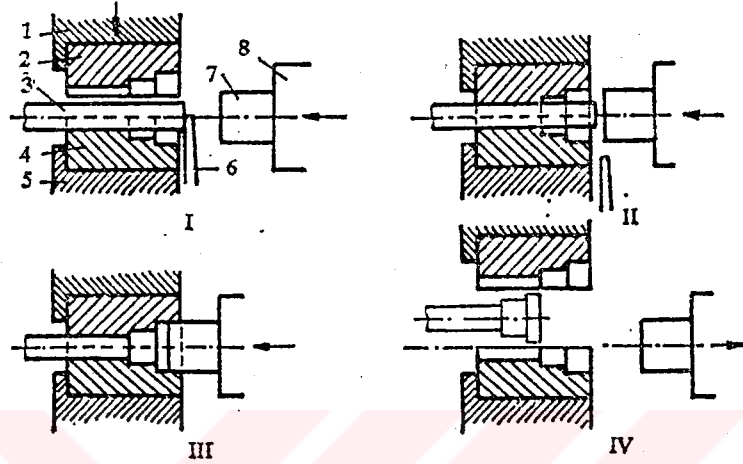
Genellikle dairesel kesitli metal bir çubuğun, eksenine doğrultusunda uygulanan basma kuvveti etkisiyle, bir ucunun yığılarak şekillendirilmesidir. Özel yatay makinalarda sıcak, yarı sıcak veya soğuk olarak uygulanır. İşlem biri sabit diğeri hareketli iki yarı kalıp tarafından sıkı bir şekilde kavranan çubuğun serbest ucu ıstampa tarafından kalıp boşluğunu doldurmaya zorlanması şeklinde gerçekleşir (Şekil 2.5).. Uygulamaya örnek olarak civata kafalarının şekillendirilmesi verilebilir.

İşlemin sağlıklı gerçekleşebilmesi için burkulmanın önlenmesi gerekmektedir. Bunun için işlem bazı kurallara uygun olarak gerçekleştirilir [26]. Bu kurallar şunlardır :

- 1- Dairesel kesitli bir çubuğun kalıp dışında kalan serbest kısmının uzunluğu çapının üç katından büyük olamaz.

2- Kalıp çapı çubuk çapının 1.5 katını geçmediği takdirde yığılabilecek boy sonsuz uzunlukta olabilir.

3- İkinci kuralın koşulları içinde, çubuğun kalıplar arasından dışarı taşması halinde, taşan kısmın uzunluğu en çok çubuk çapına eşit olmalıdır.



Şekil 2.5 Yatay dövme, (1) Çene. (2) Hareketli kalıp. (3) Çubuk. (4) Sabit kalıp. (5) Gövde (6) Dayama. (7) Istamp. (8) Kızak [26].

2.2.6 Hassas Dövme

Hassas dövme çok az veya hiç bir makina işlemi gerektirmeksizin 0° veya bu değere çok yakın tasarım açıları ile dar toleranslarda gerçekleştirilen bir dövme işlemidir. Bilinen kapalı kalıpta dövme yöntemleri ile hassas dövmede kullanılan üretim işlemleri esas olarak benzerdir. Bu yöntem, kapalı kalıpta çapaklı dövme ile kapalı kalıpta çapaksız dövme arası bir orta yol gibi düşünülebilir [35].

Hassas dövme ile çok parçalı kapalı kalıp teknolojisi kullanılarak üretim yapıldığı halde iz oluşmamış yüzeye sahip parçalar elde edilir. Genelde, bilinen yöntemlerle dövülmüş ve işlenmiş bir parça ile karşılaştırıldığında, aynı alaşımdan hassas dövme ile elde edilen parça çok daha yüksek mukavemet / ağırlık oranına sahiptir [32].

2.2.7 İzotermal Dövme

Geleneksel kalıpla dövme işlemlerinde, iş parçası ile kalıp arasındaki sıcaklık farkı 1000°C olabilmektedir. İzotermal dövmede ise uygun bir teçhizat vasıtasıyla kalıplar iş parçası sıcaklığına kadar ısıtılır. Dövme işlemi süresince de kalıplar ile iş parçası yaklaşık aynı sıcaklık mertebesinde tutularak iş parçasının soğuması önlenir. Böylece, yüksek sıcaklıkta akma sınırı nisbeten düşük olan malzemenin kalıp boşluğunu tamamen doldurması sağlanır. Bu yöntemle en çok dövülen malzemeler, akma sınırının yüksekliği nedeniyle çok zor şekillendirilebilen titanyum ve yüksek sıcaklığa dayanıklı nikel esaslı alaşımlardır. İzotermal dövme oldukça yavaş birim şekil değişimi hızlarında gerçekleştirilir [36].

İzotermal dövmenin geleneksel kalıpla dövmeğe göre üstünlükleri, işlem sonrası çok az talaş kaldırmaya gerek kalması ve dövme kuvvetinin % 20-25 oranında azalmasıdır [36]. Bu yöntemde hidrolik presler kullanılır. Ekonomik kullanım için seri üretim parça sayısı 100 ile 1000 adet arası olmalıdır [35].

2.2.8 Sıcak Kalıpta Dövme

Kapalı kalıpta dövmeden farklı olarak iş parçası ile kalıp arasındaki sıcaklık farkının 1000 °C civarı olduğu durumlarda kalıp 110-225°C civarına ısıtılmaktadır [36]. Sıcak kalıpta dövme yöntemi nikel esaslı malzemelerin dövülmesi için geliştirilmiştir [35].

Bu işlem izotermal dövme ile kapalı kalıpta dövme yöntemi arası bir yöntem olarak görülebilir ve kalıp ömrünü kısaltmasından dolayı yaygın olarak kullanılmamaktadır.

2.2.9 Süperplastik Dövme

Süperplastik dövme işlemi izotermal dövmenin benzeridir. İki işlem arasındaki tek farklılık daha az birim şekil değişimi hızında uygulanmasıdır. Süperplastik dövme

işleminde basınç etki süresinde bir artış söz konusudur. Bir malzemenin süperplastik davranışı için ön şartlar vardır. Bu şartlar aşağıda verilmiştir :

- 1- Tane boyutu birkaç mikron olan çok ince yapı ve bu yapıda işlem süresince tane irileşmesi olmamalıdır.
- 2- Dövme sıcaklıkları yaklaşık $1/2 T_e$ olmalıdır.
- 3- Birim şekil değişim hızları çok küçük olmalıdır.

Bu işlem için genellikle molibden alaşımlı çelikten üretilmiş kalıplar kullanılmaktadır. Süperplastik dövme çoğunlukla yüksek sıcaklığa dayanıklı motor elemanlarının üretiminde uygulanmaktadır [35].

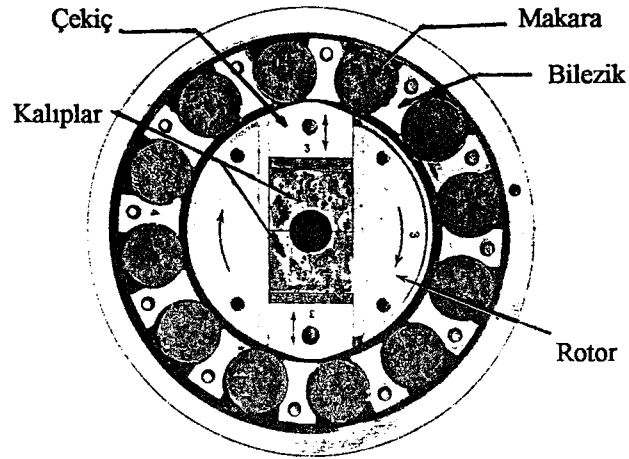
2.2.10 Radyal Dövme

Soğuk veya sıcak olarak uygulanan bu yöntemde, iki veya daha çok sayıda kalıbın radyal hareketi ile uzunluğu boyunca sabit veya değişken kesitli dolu veya içi boş parçalar üretilir [29].

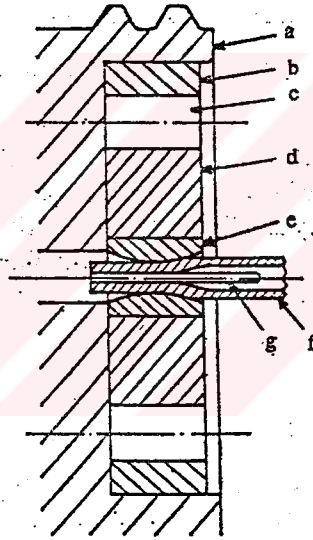
Yöntem, prensip olarak rotorun dönme hareketiyle çekiçlerin merkezkaç kuvveti etkisiyle yerleşmiş oldukları rotor kanalları içinde açılması ve sinüzoidal biçimli arka yüzeylerinin makaralara her çarpışında kapanmak zorunda kalması esasına göre çalışır (Şekil 2.6).

Küçük çaplı çubukların dövülmesi için iki çekiçli makinalar yeterli olmaktadır. Büyük makinalar ise genellikle dört çekiçlidir.

Tüpler, içlerine malafa sokularak radyal dövülebilir (Şekil 2.7). Dış yüzeyin daima dairesel almasına karşılık iç yüzeye herhangi bir şekil verilebilir (Şekil 2.8).



Şekil 2.6 Radyal dövme teçizatı [28].



Şekil 2.7 Bir tübün radyal dövülmesi, (a) Gövde. (b) Ring. (c) Makara. (d) Çekiç. (e) Matris. (f) İş parçası. (g) Malafa [26].

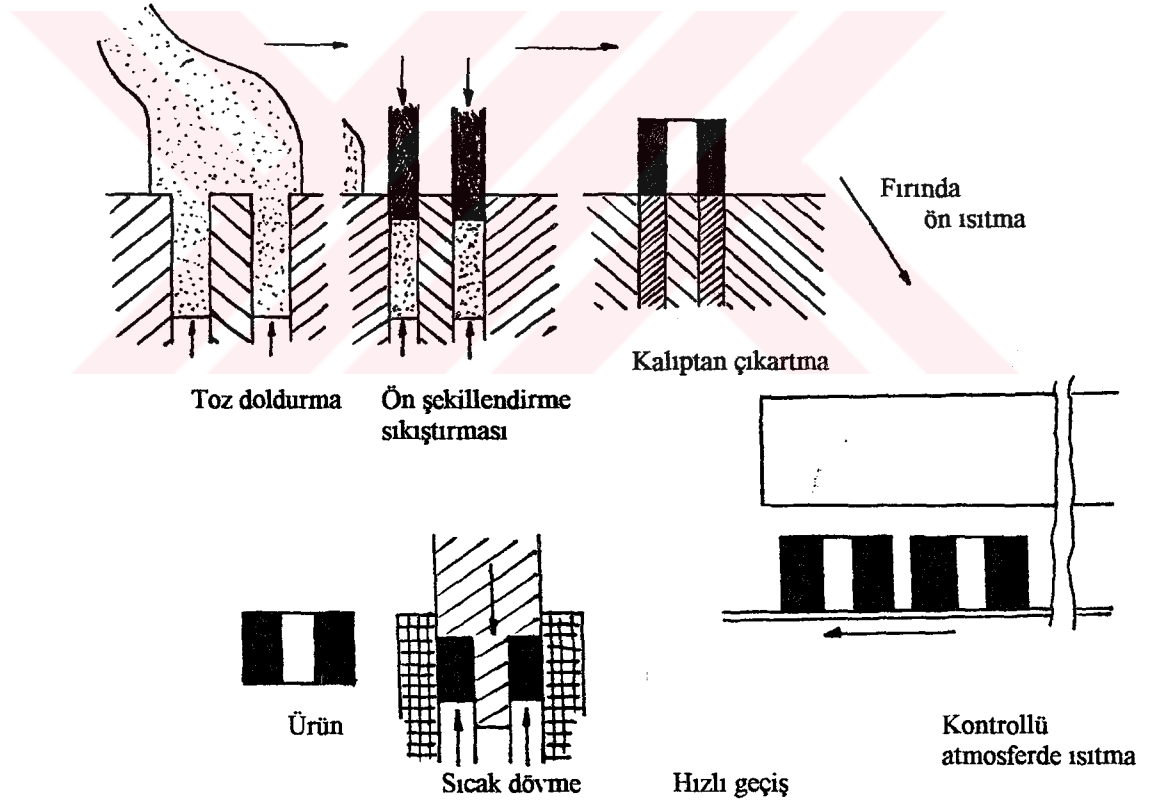


Şekil 2.8 Radyal dövülmüş tüblere ait kesit örnekleri [26].

2.2.11 Sinter Dövme

Sinter dövme (Şekil 2.9), sinterleme ile elde edilen taslakların sıcak veya soğuk olarak kapalı kalıpla dövülmesi yöntemidir [30,37].

Sinter dövme işlemi görmüş parçaların yapısı çok ince taneli ve homojendir. Mekanik özellikleri ekseriyetle izotrop olup yorulma mukavemeti üzerine olumlu etki meydana getirir. Endüstride, piston kolları, dişli ve bağlantı parçaları, eş hareketli halkaların üretiminde kullanılmaktadır. Bitmiş yüzeylerin boyut toleransları 5 - 30 μm arasındadır [35].



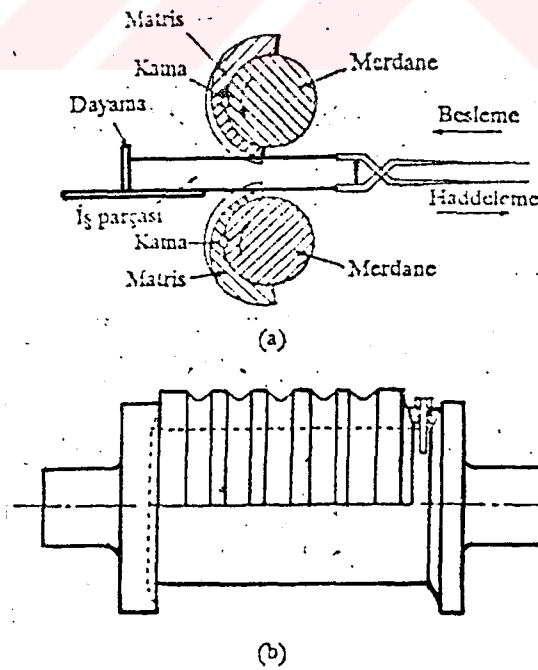
Şekil 2.9 Sinter dövme işlemi [37].

2.2.12 Dövmeye Haddeleri ile Şekillendirme

Önceleri kapalı kalıpla dövme için taslak hazırlama (özellikle uzun ve ince parçaların ön şekillendirilmesi) amacıyla uygulanan bu işlem daha sonra büyük bir gelişme göstererek bitmiş parça üretiminde de kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel yöntemde, sıcak iş parçası, üzerine uygun gravürler açılmış iki matris arasında haddelenerek arzu edilen şekil elde edilir. Her matris bir merdaneye tespit edilmiştir. Matrisler merdane çevresinin ancak bir kısmını kaplar (Şekil 2.10.a). Bir matris üzerinde yan yana ve birbirinden farklı gravürler bulunur (Şekil 2.10.b).

Çapraz (kamalı) haddelemede ise iş parçası üzerinde birer kama bulunan iki merdane arasında şekil verilir (Şekil 2.11). Merdaneler dönerken, konumu kılavuzlarla tespit edilmiş olan iş parçasının orta kısmı kamalar vasıtasıyla kademeli olarak şekil değiştirir.

Bu yöntemle akslar, uçak pervaneleri, bıçak sapları, keskiler, oluklu tüpler ve yaprak yayların uçları şekillendirilir [38].



Şekil 2.10 (a) Dövmeye haddeleri ile şekillendirme (konvansiyonel yöntem),
(b) Matris gravürleri [26].

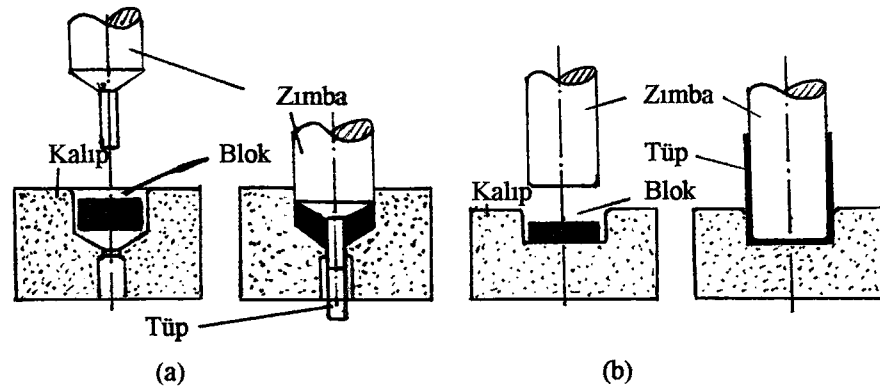
Yatay dövme makinasının birkaç işlemde gerçekleştirilebileceği bir şekil, elektrohidrolik bir makinada yığma ile, malzemenin çubuğun bir ucunda sürekli toplanması sonucunda, kolayca elde edilebilmektedir [39].

2.2.14 Darbeli Ekstrüzyon (Püskürtme)

Püskürtme yöntemleri “ileri” ve “geri” olmak üzere ikiye ayrılır. İleri püskürtmede (Şekil 2.13.a) alıcı içerisine yerleştirilen sıcak veya soğuk malzeme ıstampa tarafından uygulanan basma kuvvetini etkisiyle kalıp deliğinden geçirilerek şekillendirilir. Malzemenin hareket yönü ıstampa ile aynıdır. Geri püskürtmede ise malzeme ıstampaya zıt yönde hareket eder (Şekil 2.13.b).

Bu yöntem ile traş kremi tüpleri, diş macunu tüpleri, boya pigmentleri tüpleri, ilaç kutuları v.b. ürünlerin imalatı gerçekleştirilir. Ürünün dış çapı, kalıbın çapı ile aynıdır. Cidar kalınlığı zımba ile kalıp arasındaki açıklıkla kontrol edilir [38].

Darbeli ekstrüzyonun maliyeti düşüktür. Ürünler mükemmel bir yüzey kalitesine sahiptir ve yıllık 100000 - 20 milyon adetlik üretimle gerçekleştirilebilir. Kalıp maliyetleri yüksektir, fakat parça sayısı yüksek olan imalatlarda parça başına düşen kalıp maliyeti düşük olmaktadır.

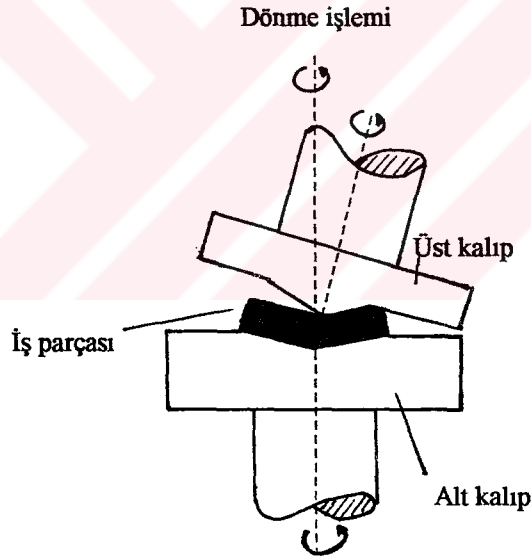


Şekil 2.13 (a) İleri püskürtme, (b) Geri püskürtme [38].

2.2.15 Orbital Dövme

Orbital dövme, malzemenin yörüngesel hareket yapan bir üst ve herhangi bir rotasyon hareketi olmayan bir alt kalıp (matris) arasında dövülerek şekillendirilmesidir. Alt matris eksenel olarak üst matrise doğru yükselirken üst kalıbın eksenel dairesel, spiral, doğrusal veya episikloidal hareketler yapar (Şekil 2.14).

Yığmada tüm kesite uygulanan kuvvet, orbital dövmede yüzeyin ancak bir kısmına uygulanmaktadır [40]. Bu nedenle, işlem daha az kuvvetle gerçekleşir. Bunun yanında bir defada şekil değiştirme miktarı artmaktadır [32].

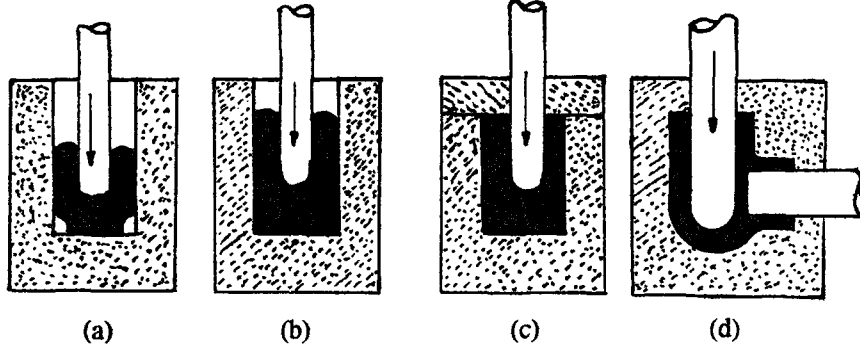


Şekil 2.14 Orbital dövme [40].

2.2.16 Delme

Delme, kalın cidarlı içi boş parçalar elde etmek için uygulanan bir yöntemdir (Şekil 2.15). Bazı hallerde ön delme işlemi olarak da uygulanır. Bu işlem, kapalı

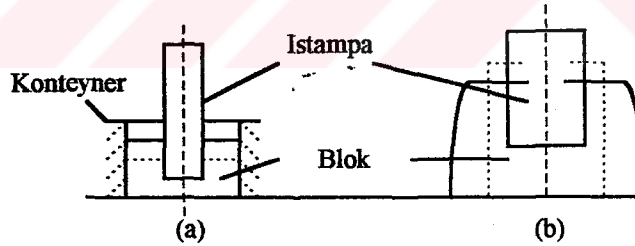
kalıpta dövmedeki işlem sayısını azaltmak için tek taraflı veya çift taraflı olarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.15 Delme işlemi uygulamaları, (a) Radyal metal akışı. (b) Yükselen metal akışı. (c) Kapalı kalıpta delme. (d) Delme+radyal ekstrüzyon [26].

2.2.17 İstampa ile Basma

Bu işlemde sertleştirilmiş bir istampanın sıcak veya soğuk bir kalıp blokuna bastırılması ile istampanın şekline sahip kalıp boşluğu elde edilir (Şekil 2.16). Gerekli basınç, kalıp malzemesinin çekme dayanımının yaklaşık 3 katıdır.



Şekil 2.16 İstampa ile basma, (a) Konteynerde, (b) Serbest [26].

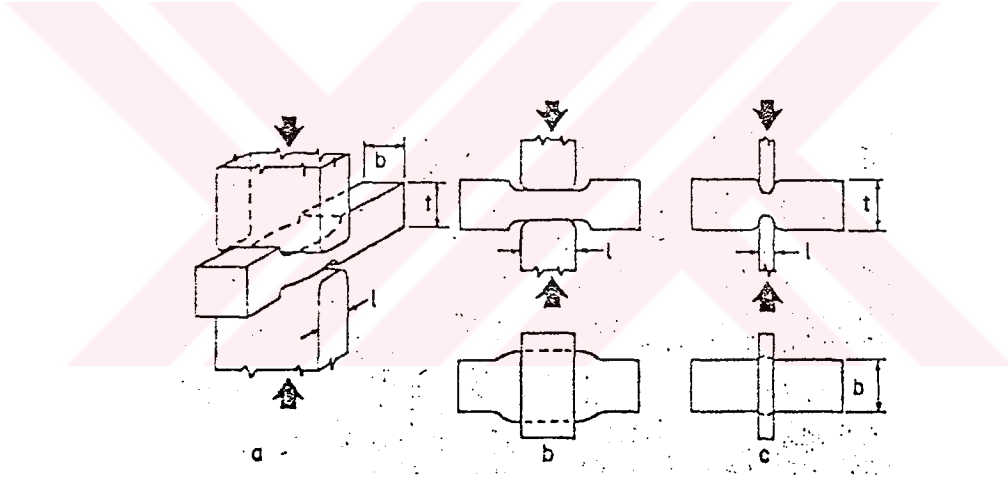
2.2.18 Dar Kalıplar Arasında Dövme. Uzatma. Toplama

Yığmada şekil değişimi parçanın yanlarına doğru yaklaşık simetrik olarak meydana gelir. Bazı hallerde ise şekil değiştirmenin tek doğrultuda yoğunlaşması arzu edilir. Bu durumda Şekil 2.17’de gösterildiği gibi dövme işlemi gayeye uygun olarak yapılan dar kalıplarla gerçekleştirilir. Bu durumda şekil değiştirme sürtünme kuvvetinin daha az olduğu dar boyut doğrultusunda daha fazla olur. Bu işlem

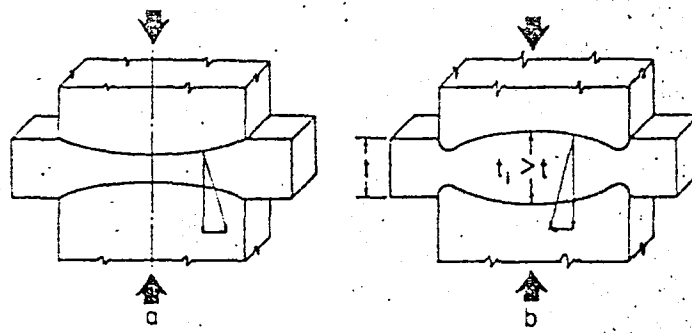
esnasında istenen boyut uzatılırken az miktarda genişleme de olur. Kalıp genişliği azaldıkça, genişleme miktarı azalır (Şekil 2.17.b). Ancak kalıp genişliği belirli ölçülerin altına indirilemez, aksi halde uzatma işlemi yerine kesme işlemi (Şekil 2.17.c) gerçekleşir [27].

Kalıp yüzeylerini özel olarak şekillendirerek de malzeme akışına etkili olunabilir (Şekil 2.18). Düşey dövme kuvvetinin yatay bileşeni malzemeyi uzatmada dışa doğru, toplamada ise içe doğru hareket etmeye zorlar.

Malzemenin çubuk eksenine dik doğrultuda az da olsa bir miktar hareket etmesi kaçınılmaz olduğundan uzatmada ardarda vurulan iki darbe arasında iş parçası 90° döndürülür. Bunun sonucunda, çubuğun iki ucu arasında kalan bir kısmının veya bir ucunun kesit yüzeyi küçültülerek boyu uzatılmış olur.



Şekil 2.17 Dar kalıpta dövme [27].



Şekil 2.18 (a) Uzatma, (b) Toplama [27].

2.3 DÖVMEDE OLUŞAN KUSURLAR

Dövme parçalarında görülen kusurlar çıkış nedenlerine göre üç grupta sınıflandırılabilir [41].

- a- Malzeme kusurları.
- b- Isıtmadan kaynaklanan kusurlar.
- c- Dövmeden kaynaklanan kusurlar.

2.3.1 Malzeme Kusurları

Dövme parçalarda görülen birçok kusurun kaynağı dövmeden önceki işlemlerdir. Örneğin hammadde olarak kullanılan haddelenmiş malzemede katmer gibi bir kusur varsa bunun dövme parçada da bulunacağı açıktır. Yalnız, dövme işleminin karakterine bağlı olarak, bu kusurlar dövme parçada açığa çıkıp gözle görülebilecekleri gibi içerde gizli de kalabilirler. Hammaddenin boy kesilmesi sırasında uçlarda şekil bozukluğu oluşması ise özellikle yığma işleminde yüzey kusurlarına yol açar. Bu nedenle kritik uygulamalarda boy kesme makas yerine daha pahalı olmasına rağmen testerede yapılmalıdır [26]. Haddemele hatasından oluşan kusurlar genellikle boyuna çatlaklar ve kesit çatlakları olarak görülür [41].

Kalıntı, segregasyon ve gözenek gibi oluşumlar da hammaddede bulunmaları sonucunda dövme parçaya geçen kusurlardır [26,29,41]. Hammaddede bu kusurların bulunmasına karşı, böyle bir malzemenin kullanılmaması dışında, alınabilecek herhangi bir önlem yoktur. Yalnız, gözeneklerin dövme sırasında kapanabilecekleri de belirtilmelidir. Fakat normal olarak gözeneklerin kütüğün haddelenmesi sırasında kapanmış olmaları gerekir [26]. Bu hata nedeniyle oluşan kusurlar yüzey boşlukları şeklinde de görülebilmektedir [41].

2.3.2 Isıtmadan Kaynaklanan Kusurlar

Hammaddenin dövme için ısıtılması sırasında önlem alınmaması halinde tufal oluşur. Tufal, dövme işleminden önce yeterli biçimde giderilmelidir. Aksi takdirde dövme sırasında iş parçasının yüzeyine gömülerek yüzey görünümünü bozar. Tufalın başka bir sakıncası da, dövmeden sonra talaş kaldırma işlemleri gerektiği takdirde, kalem ömrünü kısaltması ve / veya talaş kaldırma işleminden sonra dahi yüzey görünümünün fena, pürüzlülüğün ise yüksek olmasına yol açmasıdır. İş parçalarından dökülen tufal gravürün girintilerinde toplanarak tufal cepleri de oluşturabilir; bu durum dövülen malzemenin gravürü tam olarak dolduramamasına ve iş parçasında tufal kalıntıları bulunmasına neden olur. Tufalın doğurduğu sakıncaların giderilmesi için ısıtma atmosfer kontrollü fırında yapılmalı ve dövme işleminden önce tufal giderilmelidir[26,29].

Dövme parçalarda görülen ve hammaddenin ısıtılması sırasında oluşan bir başka kusur da dekarbürizasyondur. Fakat dövmeden sonra iş parçası talaş kaldırarak işlenecek ve bu arada da karbon kaybına uğramış tabaka tamamen giderilecekse, dekarbürizasyon önemini kaybeder [26].

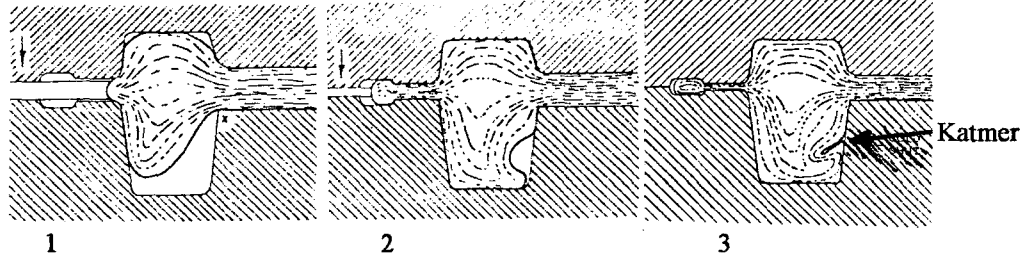
Dövme işlemi için ısıtılan malzemenin yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu tane sınırları oksitlenerek yapı bozulur. Bu durum kırılganlığa yol açar [41].

Dövme işlemi için ısıtılan malzemenin yüksek sıcaklıkta uzun süre tutulması sonucunda malzemenin tane yapısında kaba taneler oluşur. Tane büyümesi oluşmuş bu yapıya dövme işlemi sonrası normalizasyon ısıl işlemi uygulanır [29].

2.3.3 Dövmeden Kaynaklanan Kusurlar

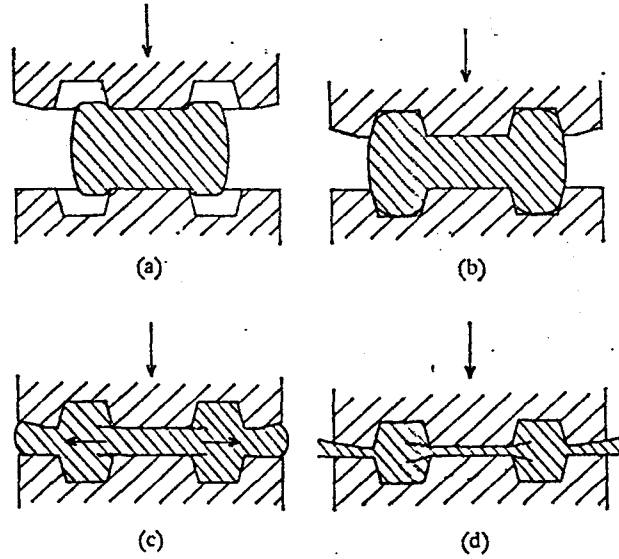
Yanlış tasarım, küçük meme yarı çapı, bölgesel aşırı soğuma ve kötü malzeme akışı (aşırı sürtünmeli) gibi nedenlerden dolayı dövme parçalarda kusurlar oluşabilir. Şekil 2.19'da küçük meme yarıçapının neden olduğu katmer oluşumu gösterilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi, kalıpta kenar yuvarlatmasının gereğinden küçük

olması nedeniyle malzeme gravür yüzeyini takip edemiyerek ayrılmakta ve kesiti tam olarak dolduramadan üst yüzeye ulaşmaktadır. Bu durumda, gravürün dolması için malzeme akışı ters yöne döner. Sonuçta gravür tam olarak dolsa da kusurlu bir parça üretilmiş olur. Bu kusur katmer olarak adlandırılır [26,27,29,30,34].



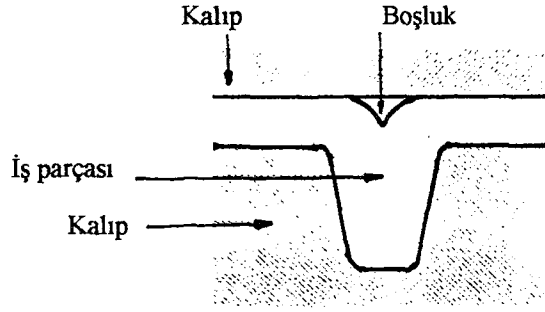
Şekil 2.19 Dövme işleminde katmer oluşumu [29].

Tasarlanan hacimden daha büyük hammadde ile gerçekleştirilen dövme işlemi sonucu parçada iç çatlaklar oluşur (Şekil 2.20). Bunun nedeni, hammadde fazla büyük olduğu takdirde gravür çapak oluşmaya başlamadan önce hemen tamamen dolar (Şekil 2.20.b). Fazla malzeme yanlara doğru hareket etmeye zorlandığında, gravür derinliğindeki malzemenin hareket etmemesi nedeniyle oluşan kayma gerilmeleri çatlamaya yol açar (Şekil 2.20.c,d) [26].



Şekil 2.20 Fazla büyük hammaddenin parçada iç çatlaklar oluşturması [26].

Parçanın oldukça kalın bir kesitinin komşu kesitin ince olması nedeniyle malzeme akışı sırasında yeterince doldurulamaması halinde yüzeyde boşluk oluşur (Şekil 2.21). Meydana gelen bu kusur ekstrüzyon kusuru olarak adlandırılmaktadır [26,42]. Gravürün eksiksiz dolması için kesitler arasında yumuşak bir geçiş sağlanmalı ve yeterli kalınlıkta bir ön şekil seçilmelidir.



Şekil 2.21 Malzeme akışı sırasında kalın komşu kesitin sebep olduğu yüzey boşluğu [42].

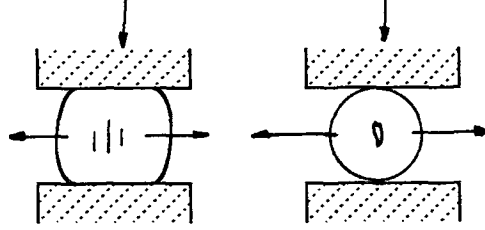
Döküm yapısına sahip küçük parçaların şahmerdan ile dövülmesi sırasında, plastik şekil değişimi yüzeyde kalıyorsa, iç kısımlardaki dendritik yapı kırılmayacak ve mukavemet açısından parça zayıf olacaktır. Bunu önlemek için, şahmerdan yerine presler kullanılmalıdır [34].

Genellikle soğuk yüzeye sahip parçaların çok fazla plastik şekil değiştirmesi sonucu yüzeyinde çatlaklar oluşur [34].

Fırın atmosferinde aşırı kükürt konsantrasyonu çeliklerde ve nikel alaşımlarında sıcak yırtılmaya sebep olur [34].

Çapak, ana parça kalınlığına oranla çok ince ise çapakta çatlak oluşur [26,29,34,41]. Çapak kesme işlemi esnasında veya dövme işlemi sonrası ısıtma işlem uygulamalarında bu çatlak parçaya uzayabilir. Çapak kalınlığını arttırarak veya çapağı parçanın önemsiz kısmına rastlatarak bu tip kusurlar önlenir.

Dairesel kesitli parçalar açık kalıpta yığıldığı zaman, çevresel çekme gerilmelerinden ötürü çatlaklar oluşabilir (Şekil 2.22) [34]. Bunu önlemek için kalıpların tasarımı değiştirilir ve genellikle iç bükey kalıplar kullanılır. Kapalı kalıpla dövmede bu olay daha azdır. Bunun nedeni kalıbın yan yüzeylerinin çevresel çekme gerilmelerini önlemesidir [41].



Şekil 2.22 İkincil çekme gerilmelerinin neden olduğu çatlaklar [34].

Dövme işlemi esnasında taneler ve segregasyonlar, metalin akış yönünde uzayarak lifli bir görünüm verirler. Metal akışının aşırı hızlı olması lifli yapının kırılması ile sonuçlanır. Bunlar kusur değildir, ancak anizotropik özelliklere neden olurlar. Bu yapı zayıf mekanik özelliklere yol açar [29,34]. Değişik yönlerdeki özellikleri dengeli şekilde elde edebilmek için, plastik şekil değiştirme % 50-70 arasında tutulmaya çalışılmalıdır [34].

Kalın kesitli parçaların hızlı soğutulması sonucunda iç kısımlarda çatlaklar oluşabilir. Çatlaklara, hem sıcaklık değişiminden ötürü oluşan kalıcı iç gerilmeler, hem de çelikteki hidrojen basıncı neden olabilir. Çelikteki ikinci faz partikülleri, gaz boşlukları, inklüzyonlar çatlak oluşumunu teşvik ederler [27].

Dövme parçalar, homojen bir şekilde soğumadıkları takdirde veya su verme sırasında çarpılabilirler. Çarpılma tolerans sınırları dışına çıkarsa parçanın doğrultulması gerekir[30].

Dövme sırasında gravür giderek büyür ve sonuçta iş parçası boyutları tolerans sınırları dışına çıkar. Belirli sayıda dövmeden sonra iş parçası veya kalıp boyutları kontrol edilmelidir [27,30].

Bir parça dövüldükten sonra kalıp yeterli şekilde temizlenmediği takdirde gravürde kalan yağlayıcı artıkları, tufal ve metal zerrecikleri i parçası yüzeyinde bozulmalara neden olur. Her işlem arasında kalıbın basınçlı hava ile temizlenmesi gerekir[27].

Kalıbın aşırı sıcaklık değişimlerinin etkisi altında olan kısımlarında yüzey çatlakları oluşabilir. Bu çatlaklar i parçası yüzeyinde çizik veya benzer hasarlar oluştururlar[30].

Kapalı kalıpla dövmede alt ve st kalıplar birbirini iyi karılamadıkları takdirde i parçası bölüm yüzeyinde kaçıklık görülür. Bunun sonucu olarak kusurlu bir parça üretilmiş olacağı açıktır [27,29].

Kalıp tasarımında yapılan hatalar veya işlem koşullarındaki aksaklıklar nedeniyle kalıplar yeterince dolmayabilir ve sonuçta parça eksik çıkar. İşlem koşullarındaki aksaklıklar, işlem sıcaklığının düşük olması, yağlamanın iyi yapılmaması, dövme kuvveti veya dövme sayısının yeterli olmaması olarak tanımlanır [27,29].

BÖLÜM 3

DÖVÜLEBİLİRLİK

3.1 DÖVÜLEBİLİRLİĞİN TANIMI

Bir metalin dövülebilirliği, dövmede çatlamadan şekil değiştirme kabiliyeti olarak tanımlanır [42,43,44]. Düşük kuvvetlerde çatlamaksızın dövülerek şekillendirilebilen bir malzeme için “dövülebilirliği iyi” denir [26,42].

3.2 DÖVÜLEBİLİRLİĞİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Dövülebilirliğin değerlendirilmesinde kırılma plastik şekil değiştirme miktarı (süneklik) ve gerilme elemanları kullanılmaktadır. Bu nedenle, bir malzemenin dövülebilirliğinin tanımı çeşitli değişkenlere bağlı olarak belirlenir [45]. Bu değişkenler, malzeme değişkenleri ve işlem değişkenleri olarak iki ana başlık altında toplanmıştır. Birim şekil değiştirme (ϵ), birim şekil değiştirme hızı ($\dot{\epsilon}$), sıcaklık, sürtünme ve gerilme hali işlem değişkenleri, ikinci faz partikülleri, inklüzyonlar ve tane boyutu ise malzeme değişkenleridir. Bu nedenle, dövülebilirlik malzeme ve işlem değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir [19] :

$$\text{Dövülebilirlik} = f_1 (\text{malzeme}) \times f_2 (\text{işlem}) \quad (3.1)$$

3.2.1 Malzeme Değişkenleri

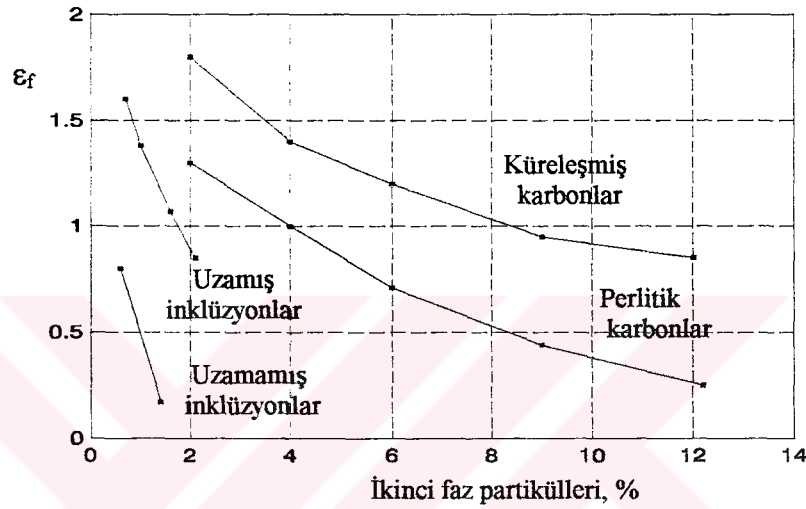
3.2.1.1 Tane boyutunun etkisi

Metalik malzemelerin dövülebilirliğine etki eden parametrelerden tane boyutu için genel bir yaklaşım, ince taneli yapıların yüksek kırılma tokluğu ve süneklilik özelliklerine sahip olmasına karşılık mukavemetlerinin yüksek olması nedeniyle plastik şekil değişimi için daha büyük gerilme gerektiğidir [27]. Malzemenin dövülebilirliği için bir referans olabilecek çekmedeki üniform uzama ile tane boyutu ilişkisi üzerine yapılan çalışmalar sonucunda tane boyutunun 10 μm 'ye (ASTM 10) kadar artışı ile üniform uzamanın da arttığı, bu değerden sonra üniform uzamanın tane boyutundan bağımsız olduğu görülmüştür [46]. Nisbeten büyük tane boyutuna sahip ticari döküm ingot yapılarda ise çatlakların tane sınırları boyunca kolayca ilerleyebileceği için dövülebilirliği azaltacağı ifade edilmektedir [45].

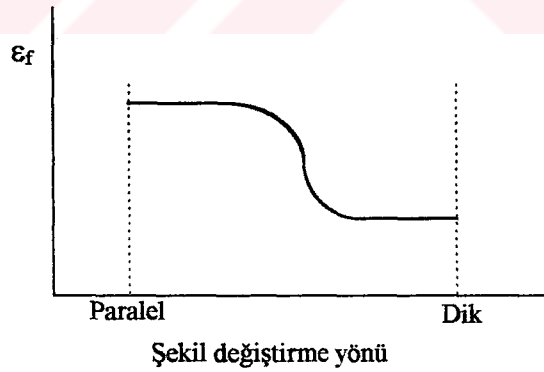
3.2.1.2 İkinci Faz Partikülleri, İnküzyonlar, Kimyasal Bileşim ve Tane Yapısının Etkisi

Metalik malzemelerin yapısında bulunan inküzyonlara ve ikinci faz partiküllerinin yapısına bağlı olarak dövülebilirlik farklılık göstermektedir. Bunun nedeni, şekil değişimi süresince şekil değiştiren ve şekil değiştirmeyen özelliğe sahip farklı yapılardır. Sünek kırılmanın başlangıç safhası çoğunlukla şekil değiştirmeyen ikinci faz partikülleri veya inküzyonların oluşturduğu boşluklardan başlamaktadır. Bunun nedeni, şekil değiştirmeyen partiküllerin boşluk oluşumuna yol açması ve partikül etrafındaki sünek matriksin normalden çok daha fazla şekil değiştirmesidir. Pekleşme nedeniyle partiküllerin çevresindeki matrikste çok yüksek bir gerilme meydana gelmektedir. Bu gerilmeler yeter derecede büyük olduğunda ara yüzey ayrılması veya partikül çatlaması görülebilir. Bu durumda, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi süneklilik, ikinci faz partikülleri ve inküzyonların yoğunluğuna ve boyutuna önemli derecede bağımlı olmaktadır [45].

Şekil değişimi süresince şekil değişimi doğrultusuna paralel yönlenebilen inklüzyonlar, ikinci faz partikülleri ve malzemenin üretimi sırasında oluşan tanelerin kristalografik açıdan yönlenmesi sonucu meydana gelen lifli yapı sünekliği etkiler. Malzemenin lifli yapısı şekil değişimi yönüne paralel doğrultuda şekil değiştirme miktarına olumlu ve şekil değişimi yönüne dik doğrultuda şekil değiştirme miktarına olumsuz etki yapar (Şekil 3.2).



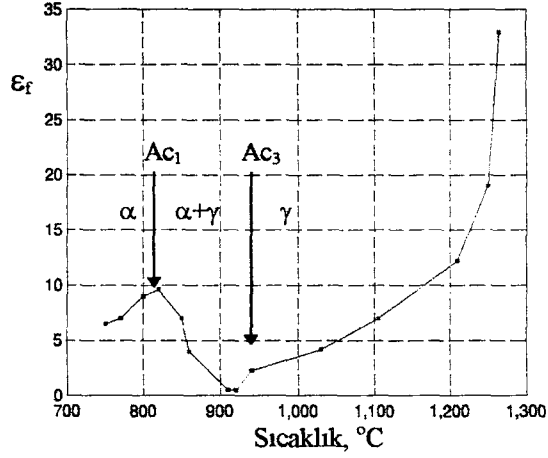
Şekil 3.1 Çeliğin sünekliğine ikinci faz partiküllerinin etkisi [45].



Şekil 3.2 Kristalografik yönlenmenin sünekliğe etkisi [45].

Metalik malzemelerin kimyasal bileşimine ve tane yapısına bağlı olarak sünekliğinde farklılık görülmektedir. Çelik içersindeki karbonun yüzdesi ve geometrisi buna örnek olarak verilebilir (Şekil 3.1).

Faz değişimi de şekil 3.3'de görüldüğü gibi dövülebilirliği azaltır [44].



şekil 3.3 Faz değişiminin sünekliğe etkisi [47].

3.2.2 İşlem Değişkenleri

Gerilme ve birim şekil değiştirmenin şekil değişimi boyunca izlediği yollar f_2 işlem değişkenlerine bağlı olarak değişirler. Böylece, f_2 dövülebilirlik eşitliğinde işlem değişkenlerini temsil eder [48].

3.2.2.1 Gerilme halinin etkisi

Metal malzemelerin dövülebilirliğini tanımlamada faydalanılan mukavemet ve süneklik değerleri şekil değişimi süresince uygulanan gerilme hallerinden etkilenmektedir. Bunun nedeni, hasara neden olan gerilme değerinin tek eksenli, çift eksenli ve üç eksenli olması durumuna göre değişim göstermesi ve hasar oluşum mekanizmalarına etki etmesidir.

Tek eksenli gerilme halinin geçerli olduğu basit çekme deneyinde homojen plastik şekil değişimi bölgesindeki koşullar boyun verme ile değişerek üç eksenli gerilme hali geçerli olmaktadır. Tek eksenli çekme gerilme halinin hasara neden olduğu bir malzemede süneklik değeri boyun verme nedeniyle oluşan üç eksenli gerilme halinin hasara neden olduğu süneklik değerinden daha büyük olmaktadır. Bunun nedeni,

karmaşık bir gerilme sistemi tarifi için geliştirilen gerçek gerilme değerindeki farklılıktır. Basit çekme ile çentikli çekme deney sonuçları incelendiğinde üç eksenli gerilme etkisindeki çentiğin plastik akışı sınırladığı ve hasarı artırdığı görülmektedir [49]. Von Mises akma kriteri kullanılarak yapılan bir karşılaştırmaya göre, burmadaki iki eksenli gerilme hali akma başlangıcı tek eksenli çekmedeki akma başlangıcının 0.577 katı olmaktadır [27]. Hidrostatik basınçta ise üç eksenli gerilme hali hasara neden olan mikroboşlukların geciktirilme etkisi nedeniyle dövülebilirlik iyileşmektedir[42].

3.2.2.2 Şekil değiştirmenin etkisi

Bir malzemenin dövülebilirliği birim şekil değiştirme (ϵ) kabiliyeti ile ifade edilmektedir. Bu nedenle, çalışmalar, malzemelerin birim şekil değiştirme miktarını artırarak dövme işlemini daha az kademede gerçekleştirme doğrultusunda yapılmaktadır. Birim şekil değiştirme çekmede, üniform uzama ve kesit daralması oranı, basmada, boyca kısalma oranı, çap değişim oranı, burmada, kayma açısı veya hasara neden olan burma turu sayısından saptanır.

3.2.2.3 Şekil değiştirme hızının etkisi

Tarif olarak şekil değiştirme hızı $\dot{\epsilon} = d\epsilon / dt$ şeklinde ifade edilir. Dövülebilirlik deneylerinde önemli bir değişken olup kontrolü zor olmaktadır[45]. h yüksekliğindeki bir silindirin yığılmasında gerçek birim şekil değiştirme hızı ($\dot{\epsilon}$) :

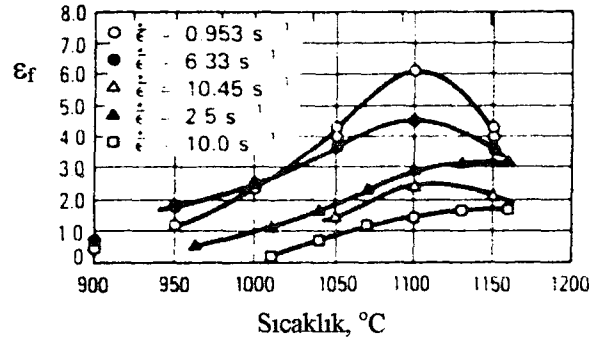
$$\dot{\epsilon} = d\epsilon / dt = (1/h) \times (dh / dt) = v / h \quad (3.2)$$

t = zaman

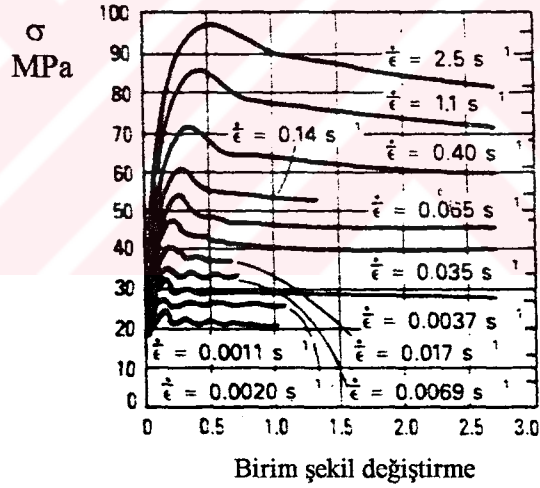
v = takım hızı

Metal malzemelerin dövülebilirliği üzerine birim şekil değiştirme hızının etkisi işlem sıcaklığına göre farklılık göstermektedir. Oda sıcaklığında yapılan şekil değiştirme işlemlerindeki etkisi nisbeten önemsizdir [50]. Fakat çok yüksek birim şekil değiştirme hızları için bu geçerli değildir ve hasar daha az şekil değişiminde gerçekleşir. Yüksek

sıcaklıklarda yapılan şekil değiştirme işlemlerindeki etkisi Şekil 3.4’de görüldüğü gibi daha belirgin olmaktadır [47]. Birim şekil değiştirme hızı işlemi gerçekleştiren gerilme değerleri üzerinde de etkili olmaktadır. Genel olarak hızın artışı ile akma dayanımı ve hasara neden olan gerilme değeri artmaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.4 Yüksek sıcaklıklarda burmada sünekliğin şekil değiştirme hızı ile değişimi [47].

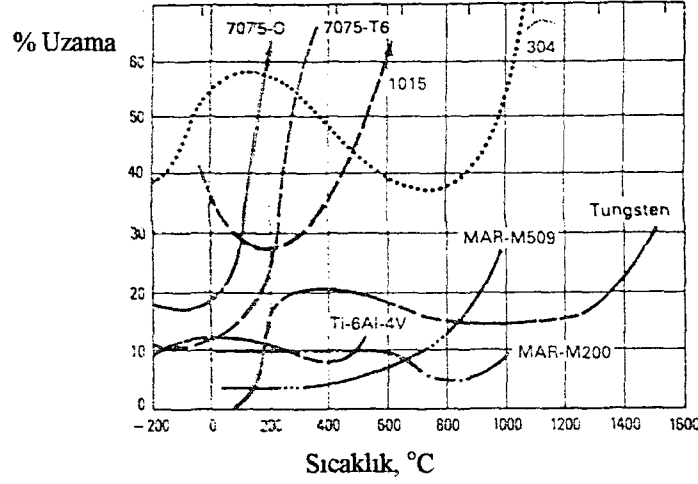


Şekil 3.5 Şekil değiştirme hızının burmada gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine etkisi [47].

3.2.2.4 Sıcaklığın etkisi

Sıcaklığın dövülebilirliğe etkisi için genel bir ifade, sıcaklık artışı ile şekil değişimi için gereken yükün azaldığı ve birim şekil değiştirme miktarının arttığı şeklindedir [27,28,45,51]. Basit olmakla beraber, kararlı alaşımlarda yükselen sıcaklıklar ile süneklik artış gösterir. Çoğu mühendislik malzemeleri için sıcaklık - süneklik

davranışları değişkendir (Şekil 3.6). Çoğunlukla, sıcaklık artışı ile süneklikteki süreksizlikler metalurjik kararsızlıklar nedeniyledir [51].



Şekil 3.6 Farklı malzemeler için sıcaklığın sünekliğe etkisi [51].

Metal malzemelerin plastik şekil değişimi genel olarak belirli düzlemlerde ve doğrultularda atomların kayması ile gerçekleşir. Kaymanın kolaylıkla olmadığı şekil değiştirme hızının yüksek, sıcaklığın düşük olması durumlarında şekil değişimine ikizlenme katkıda bulunabilir. Yüksek sıcaklıklarda ise şekil değişimi tane sınırları kayması veya atomların yayınması ile olur. Bu nedenle, sıcaklık ile dayanım ve süneklikte değişimler genelde bu mekanizmalara sıcaklığın etkisi ile ilgilidir. Bundan dolayı deformasyon işlemleri sıcaklığa bağlı olarak soğuk iş, ılık iş ve sıcak iş şeklinde ifade edilerek her bir bölgede sıcaklığın etkisi ayrı ayrı incelenebilir.

Soğuk şekil vermede kayma sistemleri sayısı sınırlıdır ve toparlanma işlemleri mümkün değildir. Bundan dolayı, pekleşme mekanizmaları şekil değişiminin gerçekleşmesi için gittikçe artan bir kuvvet gerektirmektedir [45,47,51]. Bu durum, ikinci faz partikülleri ve inklüzyonlarda hasarın hızlanmasına neden olarak süneklikte azalma meydana getirir [47].

Ilık şekil verme sıcaklıklarında ısı aktivasyon işlemleri sayesinde pekleşmenin şekil değişimi kabiliyetine etkisi soğuk şekil vermedeki etkisinden daha az olur ve şekil değişimi için gerekli yük azalır [26,27,33,51].

Sıcak şekil vermede difüzyon işlemi önemlidir. Toparlanma, dislokasyon tırmanması, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi gibi mekanizmalar dislokasyon yoğunluğu ve dislokasyon yığılmasını azaltır ve dayanım düşer.

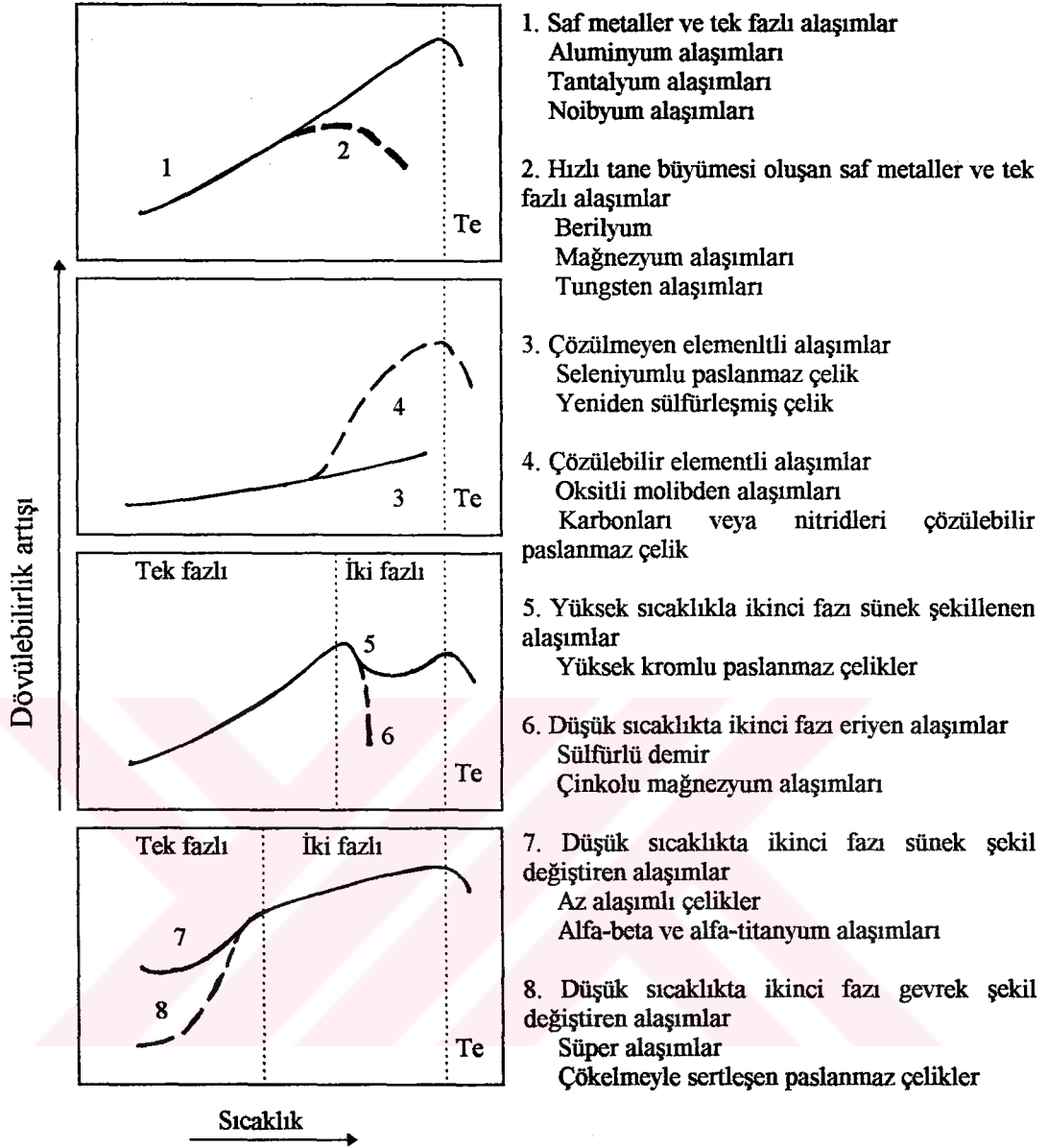
Şekil değişimine, çekme koşulları altında kristal yapı vasıtası ile bir dereceye kadar hakim olunabilir. Sıcaklık azaldıkça genellikle yüzey merkezli kübik malzemeler süneklikte kademeli bir değişim gösterir. Bu gibi değişimler 304 tipi paslanmaz çelikler için Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bazı hacim merkezli kübik alaşımlarda dislokasyonların hareketi, sünek durumdan gevrek duruma geçiş sıcaklığı aralığında (yumuşak çelik için 200°C - 370°C) yayınan atomlar tarafından büyük ölçüde engellendiği için malzemenin akma sınırı yükselir ve sünekliği düşer (Şekil 3.6'da 1015 çeliği).

Sıkı paket hegzagonal ve hacim merkezli kübik malzemelerde mekanik ikizlenme meydana gelebilir. İkizlenmenin toplam uzamaya katkısı az olup, esas rolü faydalı olmayan kayma sistemlerini faydalı hale döndürmektir [51].

Dövülebilirliğe etkileyebilecek diğer faktörlerin özel etkileri kolaylıkla tahmin edilemez. İki fazlı alaşımlarda deneye kadar olan ısıtma süresince ve deney sırasında yeniden ergime, çökme ve yaşlanma meydana gelebilir. Bunlar, malzemeye bağlı dövülebilirlik davranışlarında tamamen bir farklılık oluştur [47,51]. Bununla ilgili genel bir açıklama Şekil 3.7'de verilmiştir.

3.2.2.5 Sürtünmenin etkisi

Bütün plastik şekil verme işlemlerinde iş parçası ile takımlar ve/veya kalıplar arasında sürtünme vardır. Bu nedenle, malzeme akışı engellenir ve hasara eğilim oluşur.



Şekil 3.7 Farklı alaşım sistemlerinde sıcaklık ile dövülebilirlik davranışlarının değişimi [47].

Sürtünme değerinin artışı ile iş parçası yüzeyinde hasar oluşumu daha az şekil değişiminde gerçekleşir.

Yağlama ile sürtünmenin kontrolü metallere plastik şekil vermede önemlidir.. Dövülebilirlik deneylerinde sürtünme koşullarındaki farklılık sonuçların yorumunu güçleştirmektedir. Bununla beraber, dövülebilirlik deneylerinde sürtünme olmayan veya kolaylıkla kontrol edilmesini sağlayan koşullar kullanılmıştır. Farklı sürtünme katsayılarına sahip yağlayıcılardan faydalanılarak gerçekleştirilen yığma deneyi

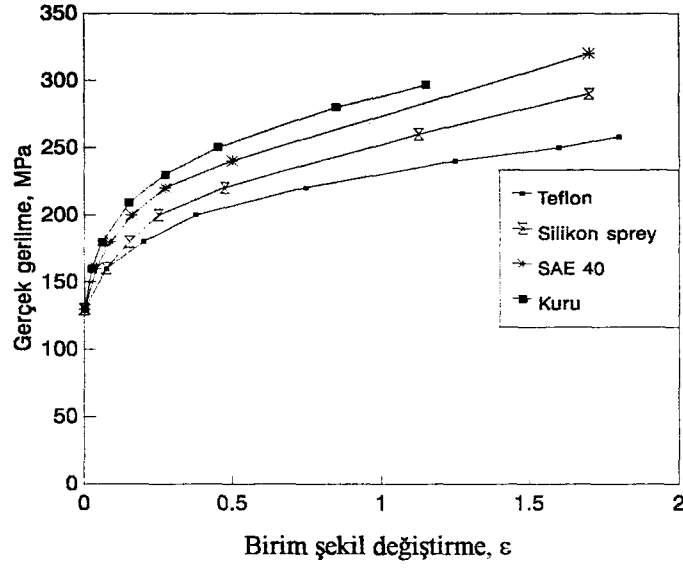
sonuçlarından sürtünme katsayısı azalışı ile deformasyon için gereken gerilme değerinin azaldığı ifade edilebilir (Şekil 3.8).

Sürtünme koşullarının birim şekil değiştirme eğrisi şekline etkisi de ayrı bir önem taşır. Sürtünmesiz koşullar altında yapılan bir basma deneyinde silindirin yüzeyinde fiçilaşma olmaz, şekil değişimi homojendir ve teğetsel gerilmeler yoktur [10,52]. Bu koşullar altında, yüzeyde çekme birim şekil değiştirmesinin basma birim şekil değiştirmesine oranı 0.5'e eşittir. AISI 1045 çeliğiyle yapılan deneyler, hasar oluşumuna yol açan şekil değiştirme miktarının % 90 gibi yüksek bir değere ulaştığını göstermektedir [10].

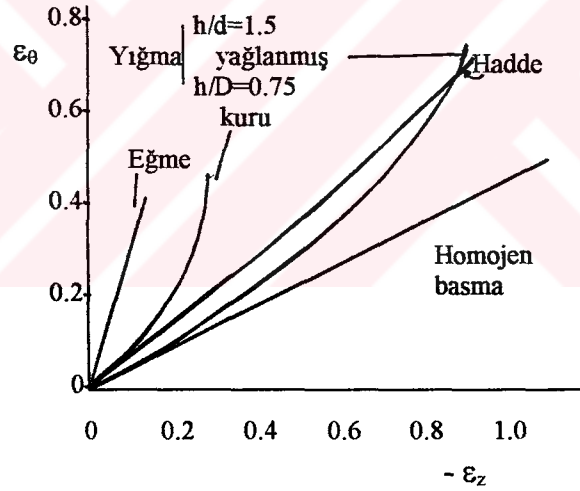
Sürtünmeli durumda, homojen olmayan şekil değişimi nedeniyle fiçilaşma meydana gelir. Homojensizliğin derecesi ve fiçilaşma sürtünme katsayısı ile beraber artar [10,53,54,55]. İkincil çekme gerilmeleri fiçilaşmış silindirin ekvatorunda maksimumdur [9,10,55]. Yükseklikteki azalma oranı karşılaştırıldığında, çevresel çekme birim şekil değişimi homojen basmadakinden büyüktür [10].

Eğer sürtünme düşükse, basma birim şekil değiştirme - çekme birim şekil değiştirme doğrusaldır. Yüksek şekil değişimlerinde ilişki doğrusal değildir ve eğim yükselir [10,52,53]. Bir noktadan sonra doğrusallık bozulur, sürtünmenin artışıyla birim şekil değiştirme azalır (Şekil 3.9). Bu nedenle, sürtünmenin azalışı ile hasara kadar oluşan şekil değiştirme miktarında büyükçe bir artış meydana gelir. Yükseklik - çap oranı büyük silindirlerin şekil değiştirme miktarında büyüktür [10,52].

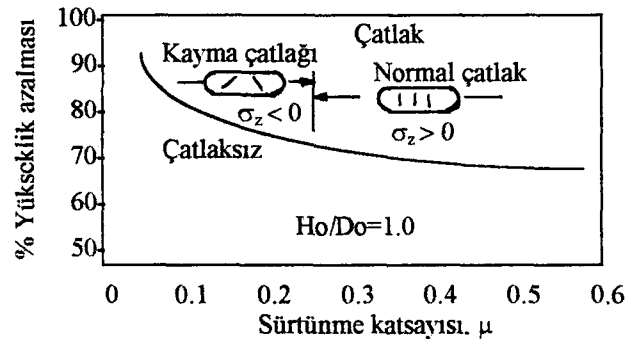
Sonuç olarak sürtünme - süneklilik ilişkisi Şekil 3.10'daki gibi kabul edilebilir [19].



Şekil 3.8 Basmada yağlayıcıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine etkisi [56].



Şekil 3.9 Basmada birim şekil değiştirme [10].



Şekil 3.10 Basmada sürtünmenin süneklığe etkisi [19].

3.3 DÖVÜLEBİLİRLİĞİN SAPTANMASI

Dövülebilirlik malzemenin karmaşık bir özelliğidir. Gerilme hali, iş parçası geometrisi, sürtünme, sıcaklık gibi parametrelerden etkilenir. Bundan dolayı, metal şekillendirme işlemlerine benzer özellikleri sağlayan deneyler kullanılarak malzemenin dövülebilirliği tayin edilir. Bunun için bir çok deney yapılabilir. En bilinenleri çekme, burma, basma ve eğme deneyleridir.

Bütün dövülebilirlik deneyleri malzemede hasar oluşumuna yol açan şekil değiştirme miktarını belirlemede kullanılmasına karşın bazı deneylerle de bölgesel şekil değiştirme miktarı ve hasarın şiddeti saptanır [57]. Dövülebilirlik deneylerinin hiçbiri universal bir deney olarak kabul edilmemektedir [26,42,43].

3.3.1 Çekme Deneyi

Çekme deneyi bir malzemenin çeşitli mekanik özelliklerinin saptanmasında yaygın olarak kullanılır. Deney örneğinin uniform uzaması, toplam kopma uzaması ve özellikle kesit daralması sünekliğin saptanmasında kullanılabilir [19,57]. Bununla beraber, bir çekme deneyinden saptanan şekil değiştirme miktarı boyun verme nedeniyle güvenilir değildir. Boyun verme başlangıcı ile tek eksenli gerilme halinden üç eksenli gerilme haline geçilir ve kopma bu gerilme hali etkisiyle gerçekleşir.

Çekme deneyleri kolay yapılır, fakat boyun verme şekil değiştirme hızının kontrolünü güçleştirir ve kopmadaki birim şekil değiştirmenin gerçek değeri hakkında belirsizliğe yol açar.

Uniform uzama, deney örneğinde başlangıç ölçü boyunun boyun verme başlangıcına kadarki uzama miktarıdır. Uniform uzama miktarı kullanılarak hesaplanan birim şekil değiştirme değeri pekleşme üssü n ile aynı olmakta ve malzemenin sünekliği hakkında bilgi vermektedir. Uniform uzama miktarının artışı dövülebilirliğin artışı ifade eder. Δ_u uniform uzama, l_u boyun vermenin başladığı andaki ölçü boyu uzunluğu, l_0 başlangıç ölçü boyu ise :

$$\Delta_u = l_u - l_0 \quad (3.3)$$

Kopma uzaması, deney örneğinin kopması sonucu ölçü boyunda gerçekleşen şekil değiştirme (uzama) miktarı olup, bu değer büyük olması malzemenin sünekliğinin iyi olduğunu ifade eder. Buradan da malzemenin dövülebilirliğinin iyi olduğu genel bir yaklaşım olarak ifade edilir. Δ_k kopma uzaması, l_k kopmada ölçü boyu uzunluğu, l_0 başlangıç ölçü boyu ise :

$$\Delta_k = l_k - l_0 \quad (3.4)$$

Kesit daralması, yerel bir oluşumdur. Boyun verme bölgesinde yüklemenin devam etmesiyle meydana gelir. Başlangıç kesit alanı A_0 , kopma kesit alanı A_k ise, kesit daralması q :

$$q = (A_0 - A_k) / A_0 \quad (3.5)$$

Malzemenin akma sınırının düşük olması da dövülebilirlik açısından arzu edilen bir durumdur.

Çekme deneyi verilerinden faydalanılarak malzemenin “gerçek sünekliğini” incelemede kullanılan en yaygın kırılma kriteri Cockcroft kriteridir. Bu kriter gereğince çekmede birim şekil değiştirme enerjisinin kritik bir değere ulaşması halinde malzemede sünek kırılma meydana gelir :

$$\int_0^{\epsilon_{nf}} \sigma^* d\epsilon = C = \int_0^{\epsilon_{hf}} \sigma d\epsilon \quad (3.6)$$

Bu eşitlikte, ϵ_{nf} , çekme deneyinde kırılma anındaki birim şekil değiştirmeyi ; ϵ_{hf} , gerçek sünekliği, σ^* , maksimum bölgesel çekme gerilmesini ; σ , gerçek çekme dayanımını ; $d\epsilon$, etkin sonsuz küçük birim şekil değiştirmeyi ; C , sıcaklık ve birim şekil değiştirme hızına bağlı malzeme sabitini ifade eder.

3.3.2 Burma Deneyi

Burma deneyinde şekil değişimi saf kayma ile sağlanır ve büyük birim şekil değiştirme miktarları boyun verme olmaksızın gerçekleştirilir [19,47,57]. Birim şekil değiştirme hızı dönme hızı ile doğru orantılı olduğundan yüksek birim şekil değiştirme hızları kolaylıkla elde edilebilir [19]. Basma deneyindeki gibi takım ile deney örneği arasında sürtünme yoktur. Burma deneyinin sakıncalı bir yönü birim şekil değiştirme hızının örneğin yarıçapı ile doğru orantılı olarak değişmesi ve yüzeyde maksimum değerini almasıdır. Bu durum tüp şeklindeki örneklerle kısmen halledilir. Tüplerde birim şekil değiştirme hızı yaklaşık sabittir. Gerilme hali ise şekillendirme işlemlerindeki tipik gerilme halleri gibidir. Fakat şekil değişimi endüstrideki işlemlerle karşılaştırıldığında benzeşim tam doğru değildir. Bu burma deneyinin en büyük sakıncasıdır [19,57].

Burma deneyi akma sınırının hesaplanmasında ve sıcak şekil verme koşullarında gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri elde etmek amacıyla sıklıkla kullanılır [57].

Burma deneyinde, kopmaya yol açan devir sayısı, kopma anındaki burma momenti, kayma ve kayma gerilmesi değerleri elde edilerek dövülebilirlik için değerlendirilir. Kopmaya yol açan devir sayısının artışı malzemenin dövülebilirliği ile doğru orantılıdır. Kopma anındaki burma momenti (M_T) kopmaya neden olan kuvvetle bağlantılıdır ve küçük değerde olması tercih edilir. Bu değerler deney makinasından elde edilir. Kayma birim şekil değişimi (γ) ve kayma gerilmesi (τ) elde edilen değerler kullanılarak aşağıdaki eşitliklerden bulunur.

$$\gamma = d \theta / 2 L \quad (3.7)$$

$$\tau = 16 M_T / \pi d^3 (N / m^2) \quad (3.8)$$

Bu eşitliklerde, d örnek çapı, L numune ölçü boyu, θ radyan olarak burma değeridir.

Burmada kırılmayı tahmin için Von Mises kriterinden faydalanılarak bir kriter geliştirilmiştir. Önerilen kritere göre bir deney örneği burmada aşağıda ifade edilen halde kırılır :

$$\sigma = (3\tau)^{1/2} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon = \gamma / 3^{1/2} \quad (3.10)$$

$$C = \int_0^{\varepsilon_{\text{eff}}} (1/3^{1/2}) \sigma \, d\varepsilon \quad (3.11)$$

Bu eşitlikte, ε_{eff} , kırılmaya yol açan birim şekil değiştirmesidir. Çekmedeki kriterle birleştirilerek burma verilerinden “gerçek süneklik” hesaplanabilir [3].

Burma deneylerinden elde edilen kırılma verileri hasara yol açan devir sayısı veya yüzeydeki kırılma birim şekil değiştirme miktarı olarak yayınlanır [57].

3.3.3 Basma Deneyi

Basma deneyi silindirik bir parçanın düz kalıplar arasında yığılması ile yapılır. Deney sırasında ortalama gerilme durumu pek çok kütle şekillendirme işlemi ile benzerlik gösterir. Çekmedeki boyun verme ve burmadaki malzemenin yeniden yönlenmesi problemleri basmada yoktur. Bundan dolayı, kırılma olmadan önce şekil değişimi fazladır.

Basma deneyinin en belirgin sakıncaları sürtünmenin varlığı, şekil değişimi ilerledikçe kesitin artması sonucunda yükün de artması ve deneylerin sabit birim şekil değiştirme hızında gerçekleşmesi için özel araç ve gereçlerin gerekmesidir.

Deney örneğinin basma yüzeyleri yağlanmadığı takdirde sürtünme yüzeyin hareketini engeller. Karmaşık gerilme hali sonucunda oluşan fiçılama, kırılma deneyleri için faydalıdır. Sürtünme, plastik şekil değişiminin homojenliğini olumsuz yönde etkiler. En az şekil değişimi deney örneğinin basma takımlarına temas ettiği yerlerde olur. Buna karşılık yüksek şekil değişimi deney örneğinin alt ve üst kenarları arasında

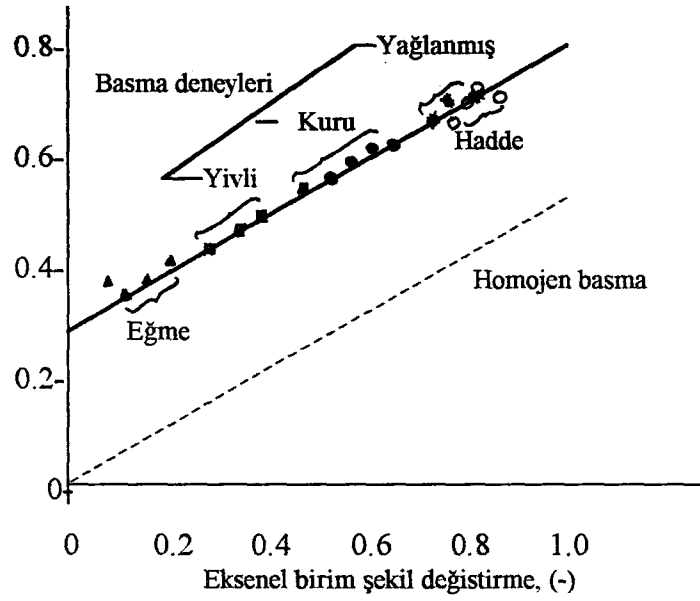
çapraz pozisyonudur. Yeterli yağlama %90'a kadar şekil değişimini sağlar ve böylece şekil değişimi homojen olur [19,10,57].

Dövülebilirliğin saptanması amacıyla, hasar oluşana kadar farklı şekil değişimi oranlarında basma deneyleri yapılır. Her bir deneyde yükseklikteki azalma, çaptaki artış ve bunu gerçekleştiren basma kuvvet ölçülür. Bu değerler kullanılarak dövülebilirlik için gerekli parametreler hesaplanır [55,23,58,18].

Deney örneğinin başlangıçtaki yüksekliği h_0 , çapı D_0 ile gösterilirse, basma sırasında bu boyutların h ve D değerlerini aldığı anda yükseklik azalması $\Delta h = h_0 - h$, çevresel birim şekil değiştirme $\epsilon_\theta = \ln (D / D_0)$ ve eksenel birim şekil değiştirme de $\epsilon_z = \ln (h / h_0)$ ifadeleriyle hesaplanır. Malzemenin düşük kuvvetlerle ve hasara uğramadan fazla şekil değiştirmesi dövme kabiliyetinin iyi olduğu anlamını taşır.

Basma deneylerinden elde edilen verilerden malzemenin şekillendirilebilirliği için Şekillendirme Sınır Diyagramı kırılma kriteri geliştirilmiştir (Şekil 3.11). Bu diyagram incelendiğinde, homojen (sürtünmesiz) basmada, eksenel birim şekil değiştirmenin (ϵ_z), çevresel birim şekil değiştirmenin (ϵ_θ) mutlak değer olarak 2 katı olduğu görülür ve fıçılama olmaz. Basmanın sürtünmeli koşullarda yapılması durumunda, sürtünmesiz haldeki -1/2 eğimli doğru, yukarıya doğru yönelen eğri haline dönüşür.

Aynı malzeme için farklı deney tür ve koşulları kullanılarak, farklı şekil değişimi çizgileri ve bunun sonucu farklı sünek kırılma değerleri elde edilir. Sünek kırılma durumuna ait noktalar birleştirildiğinde eğimi -1/2 olan eğri elde edilir. Burada, doğrunun dik eksenini kestiği nokta malzemeden malzemeye değişiklik gösterir.

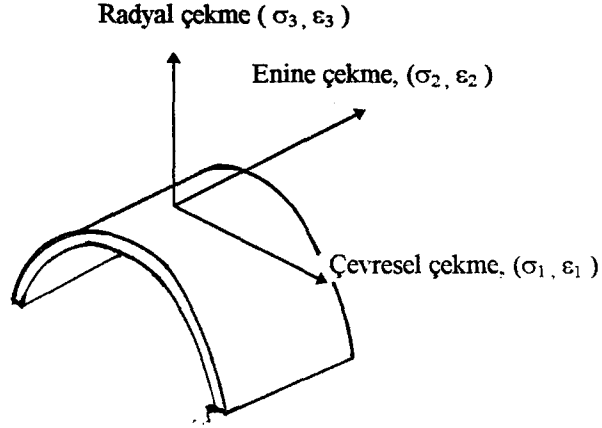


Şekil 3.11 AISI 1045 Çeliğine ait Şekillendirme Sınır Diyagramı [10].

Bu kriter ile sürtünme koşullarına bağlı olarak şekillendirilebilirliğin değişimi de tespit edilir. Diyagramda dik eksendeki başlama değeri işlem değişkenlerine bağlı olmayıp bir malzeme özelliğidir. Bu değer belirli sıcaklık ve birim şekil değiştirme hızında malzemenin şekillendirilebilirliğinin bir göstergesidir. Şekillendirme Sınır Diyagramının altında kalan bölge malzemeden elde edilebilecek hasarsız şekil değişimi miktarını belirler. Bu bölge yüksekliğinin artışı güvenli şekillendirilme değerinin artışıdır. O halde, diyagramın yüksekliği malzeme şekillendirilebilirliğinin bir göstergesi olarak kullanılabilir [48].

3.3.4 Eğme Deneyi

Eğme deneyinde, örneğin dış yüzeyinde gerilme ve birim şekil değiştirme hallerinin basma deneyindekilere benzerliklerinden dolayı, eğme deneyi dövülebilirliğin saptanmasında uygulanabilir [19,57]. Şekil 3.12'de eğme sırasında oluşan asal gerilme - birim şekil değiştirmeleri görülmektedir. Kritik parametre genişlik / kalınlık oranıdır (w / t). Eğer $w/t > 8$ ise, eğme düzlem şekil değişimi koşullarını sağlar $\epsilon_2 = 0$ ve $\sigma_2 / \sigma_1 = 0.5$. Eğer eğme $w/t < 8$ ise, gerilme hali ve eğme birim şekil değiştirme w/t oranına şiddetle bağlıdır.



Şekil 3.12 Eğmede asal gerilme - birim şekil değiştirmeleri [57].

Tam plastik eğme için elastik şekil değişimi ihmal edilir. Eğmede maksimum birim şekil değiştirme (ϵ) ;

$$\epsilon = \ln (R_0 / R_i)^{1/2} \quad (3.12)$$

ifadesinden hesaplanır. Burada, R_0 dış yüzey, R_i ise iç yüzey eğrilik yarıçaplarıdır. ϵ değeri süneklikle doğru orantılıdır.

Eğme deneyinin basma ile benzerliğinden, Şekillendirme Sınır Diyagramlarında eğme deneyi verileri şekillendirilebilirlik analizinde kullanılır [48].

3.4 DÖVÜLEBİLİRLİK DENEYLERİNİN TARTIŞILMASI

Metalik malzemelerin dövülebilirliği çeşitli teknikler kullanılarak tayin edilebilir. Seçilen teknik mümkün olduğu kadar endüstriyel koşullara benzerlik sağlamalıdır[19].

Basit çekme deneyi boyun verme nedeniyle sakıncalıdır.

Burmada hidrostatik gerilme çok düşük ve dolayısıyla kopmada birim şekil değiştirme basit çekmeye göre çok büyüktür (4...5 kat). Bu nedenle burma özellikle dövülebilirliği iyi malzemelerin sınıflandırılmasına uygun bir deneydir.

Basma deneyinin sağladığı avantajlar dövülebilirlik tayini için diğer tekniklerden üstündür. Bunun nedeni, deney örneğindeki gerilmeler şekil değişimi süresince endüstriyel malzemelerin karşılaştığı koşullara benzer olmasıdır. Şekillendirme Sınır Diyagramları malzemenin şekillenme karakteristiğini gösteren deneylerden elde edilmiş olup diğer kırılma kriterlerinden daha güvenilirdir [10,19,23,57]. Şekillendirme Sınır Diyagramları metallerin dövülebilirliği ile ilgili problemlerin çözümü için endüstriyel şekillendirme işlemlerinden elde edilen birim şekil değiştirme eğrileriyle birlikte kullanılabilir. Bu yaklaşıklık sıcak ve soğuk şekil verme işlemlerinin her ikisinde de yağlama, kalıp tasarımı ve şekillendirme kademelerinde faydalıdır[19]. Basma deneyi örneklerinin farklılığı nedeniyle kendi aralarında sınıflandırılır. Farklı basma örnekleri ile yapılan soğuk dövülebilirlik deneyleri sonucunda sünek malzemelerin dövülebilirlik tayini için halkalı basma deneyi önerilir. Halkalı basma deneyinde ϵ_0 - ϵ_z ilişkisi lineer olur [23,58].

Basma deneyinde sürtünme koşulları birim şekil değiştirme değerini ve birim şekil değişimi eğrisini çok etkiler. Basma altında şekil değişimine uğrayan bir malzemenin dövülebilirliğinin saptanması için elde edilen değerler, sürtünme koşullarının standartlaştırılması ve çok dikkatli kontrolü ile güvenilir değerlerdir [10].

Eğme deneyi halkalı basmaya benzer gerilme ve şekil değişimi hallerine sahiptir.

3.5 BASMADA ÇATLAK OLUŞMA MEKANİZMASI VE ÇATLAK DOĞRULTUSUNUN İNCELENMESİ

Kütle deformasyon işlemlerinde 2 tip çatlak meydana gelir :

- (1) Yığma, eğme ve haddeleme gibi işlemlerde serbest yüzey çatlakları
- (2) Ekstrüzyon ve çekme gibi işlemlerde ok ucu şeklinde iç çatlaklar

Bu çatlaklar sünek kırılma mekanizmaları tarafından oluşturulur [59]. Sünek kırılma üç aşamada oluşur. Birinci aşama ikinci faz partikülleri ve inklüzyon benzeri etkiler nedeniyle boşluk başlangıcıdır. İkinci aşama boşluğun yavaş yavaş büyümesidir. Üçüncü aşama ise sünek kırılmaya kadar yükleme sonucunda büyüyen boşlukların birleşerek çatlağa dönüşmesidir [45,59].

Yığılma işlemlerinde, deney örneğinin sünekliği genişleyen yüzey üzerindeki gerilme ve birim şekil değişimi hallerine bağlı olmaktadır. Yüzeydeki çatlaklar ile dövülebilirlik sınırına ulaşılır. Silindirik örneklerin yan yüzeylerinde meydana gelen çatlaklar çıplak gözle Kuhn ve Thomason tarafından, mikroskopla Samanta tarafından incelenmiştir. Örneğin fiçilaşmış bölümünde oluşan çatlaklar çoğunlukla yatay düzleme 45° veya 90° olur. Bu iki tip çatlak ve çatlak tipine neden olan gerilme durumları Şekil 3.10'da görülmektedir [19,59].

Yüksek sürtünme değerlerinde çekme gerilmesi oluşur ve çatlak 90° meydana gelir. Düşük sürtünme değerlerinde ise basma gerilmesi oluşur ve çatlak 45° meydana gelir (Şekil 3.10).

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 DENEY MALZEMELERİNİN İNCELENMESİ

4.1.1 Kimyasal Analiz

Deneysel çalışmalar için Asil Çelik üretimi sıcak haddelenmiş Ø 22 mm AISI 1040, 1050, 4140 ve 5140 dört farklı çelik seçilmiştir. Bu malzemelerin spektral analiz cihazında kimyasal analizleri yapılarak standartlara uygunluğu araştırılmıştır.

Malzemelerin seçilmesinde farklı şekil değiştirme miktarları elde etmek amaçlanmıştır. Bu nedenle dövme yöntemiyle üretimde yaygın olarak kullanılan ve bileşimindeki elementleri veya miktarları birbirinden farklı 4 çelik seçilmiştir. AISI 1040 çeliği çekme kolları, miller, kavramalar, dişliler, kovanlar, zincir dişlileri, saplamalar, motor üst kapakları, vagon dingilleri v.b. gibi makina ve taşıt konstrüksiyonunda kullanılır. AISI 1050 çeliği orta derecede dayanım gerektiren transmisyon parçaları, dişli, çekiç, krank milleri, aks milleri, pernolar v.b. gibi parçaların üretiminde kullanılır. AISI 4140 çeliği çok kullanılan bir makina yapı çeliğidir. Özellikle bükme ve burma yükleri etkisinde kalan makina parçalarının imalatında kullanılır. Krank şaftı, treyler aksı, piston kolu, pompa parçaları gibi yüksek dayanım ve yüksek süneklik istenilen parçalarda kullanılır. AISI 5140 çeliği ise yüksek dayanım gerektiren krank milleri, torna aynası yatakları, punta yatakları, sonsuz vidalar, malafalar, mors kovanları imalatında kullanılır. Seçilen malzemeler makina imalat endüstrisinde çok kullanılan ve kolay bulunan malzemelerdir.

4.1.2 Isıl İşlem Koşullarının Tayini

Deneysel çalışmalarda kullanılan her tip malzemeden üç farklı mekanik özellik elde edilerek dövülebilirlik tayini araştırılmıştır. Bu farklı mekanik özellikler ısıtılma işlem çalışmaları ile elde edilmiştir. Bu nedenle, her tip malzeme sıcak haddelenmiş, normalize edilmiş ve küreleştirilmiş durumda incelenmiştir. Isıl işlem çalışmaları için her tip malzemeden ikişer adet Ø20 mm ve 30 mm uzunluğunda parçalar kesilmiş ve kabuk soyma işlemleri torna tezgahında yapılmıştır. Normalizasyon koşulları literatürden belirlenmiş[60], fakat küreleştirme koşulları için deneme çalışmaları yapılmıştır. Çünkü, küreleştirme çok farklı yöntemler ve tavlama süreleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir [61]. Araştırmalar sonucunda elde edilen koşullar aşağıda açıklanmıştır :

Normalizasyon tavlama için numunelerin her biri tavlama sıcaklığına kadar ısıtılma işlem fırını ile birlikte ısıtılmış, tavlama sıcaklığında 45 dakika tavlama ve soğutma havada soğutulmuştur. Her tip malzemenin tavlama sıcaklığı Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Normalizasyon tavlama sıcaklıkları.

Malzeme	AISI 1040	AISI 1050	AISI 4140	AISI 5140
Tavlama Sıcaklığı	890 ⁰ C	860 ⁰ C	870 ⁰ C	850 ⁰ C

Küreleştirme tavlama için numunelerin her biri ostenitleme sıcaklığına kadar ısıtılma işlem fırını ile birlikte ısıtılmış, her biri için ayrı ayrı belirlenen bu sıcaklıklarda üç saat tutulmuş ve fırında yaklaşık 900⁰C/saat soğuma hızı ile A₁ kritik sıcaklığının hemen altındaki her tip malzeme için belirlenen sıcaklıklara soğutulmuştur. Bu sıcaklıklarda yine her tip malzeme için deneylerle tayin edilen sürelerde numuneler tavlama devam edilmiş ve tavlama sonrası numuneler fırında yavaş soğutulmuştur. Her tip malzeme için ostenitleme sıcaklıkları, tavlama sıcaklıkları ve tavlama süreleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 Küreselleştirme tavlama ile ilgili sıcaklık ve süreler.

Malzeme	AISI 1040	AISI 1050	AISI 4140	AISI 5140
Ostenitleme Sıcaklığı	750°C	750°C	765°C	760°C
Tavlama Sıcaklığı	685°C	685°C	700°C	685°C
Tavlama Süresi	14 saat	14 saat	12 saat	13 saat

Isıl işlemler 3000 W'lık Nüve marka ısıtım fırınında numuneler kendi talaşına gömülerek gerçekleştirilmiştir.

4.1.3 Kalıntıların İncelenmesi

Metal malzemeleri şekillendirme çalışmaları sırasında hasarın başlaması ve ilerlemesine etki eden başlıca parametrelerden biri de kalıntılardır. Bu nedenle, deneylerde kullanacağımız malzemelerdeki kalıntılar incelenmiştir. İncelemeler, her tip malzemeden Ø20 mm ve 30 mm boyunda numunelerin aksel yönde kesilmesi ile elde edilen yüzeylerin son kademe olarak 2µm'lik elmas pasta ile parlatılması sonucu yapılmıştır. Bu yüzeylerden optik mikroskopta x100 büyütmede fotoğraflar çekilerek kalıntıların dağılım ve türleri tayin edilmiştir. Ayrıca, aynı yüzeyler taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiş, kalıntıların tip ve boyları saptanmıştır.

4.1.4 Mikroyapı ve Tane Boyutunun Saptanması

Dövülebilirlik malzeme ve işlem değişkenlerinin bir fonksiyonudur. Malzeme değişkenleri kapsamında olan malzeme mikroyapısı ve tane boyutunun saptanması için her tip malzemeden hazırlanan önceki numunelerden aksel yöndeki ve eksene dik yöndeki yüzeylerden x100 büyütmede optik mikroskopta mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Bunlardan, iç yapıdaki fazların yapısı ve tane boyutu (ASTM 10 standardı esas alınarak eksene dik yöndeki yüzeylerden) tayin edilmiştir [62]. İncelemeler, 2µ'luk elmas pasta ile parlatılmış ve %3'lük Nital ile dağlanmış yüzeylerden yapılmıştır.

4.2 MEKANİK DENEYLER

4.2.1 Sertlik Deneyi

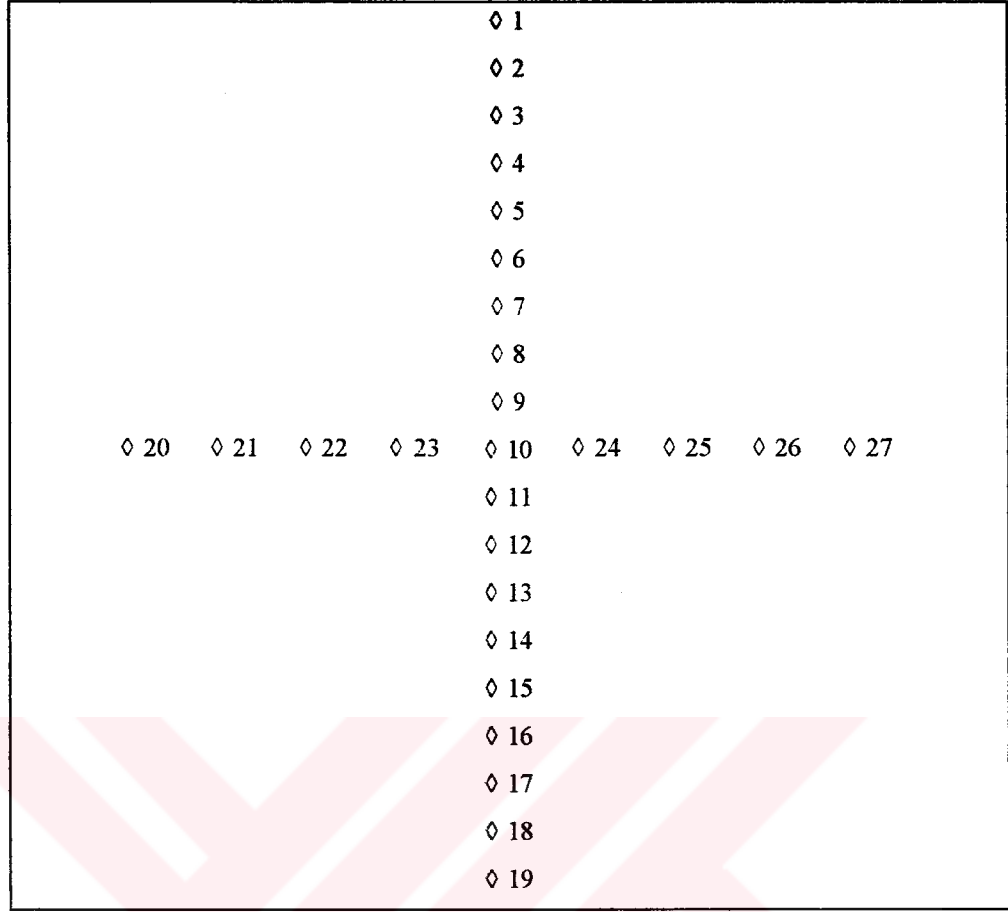
Sertlik değerleri malzemelerin her tipi ve her tip malzemenin üç farklı ısıtım işlem durumu için numunelerin eksene paralel olmak üzere ikiye bölünmüş yüzeylerinden alınmıştır. Sertlik ölçümleri Vickers sertlik cihazında 10 kg yükün 15 saniye 2µm'lik elmas pasta ile parlatılmış yüzeylere uygulanması şeklinde yapılmıştır. İki ölçüm noktası arasında 1 mm mesafe esas alınarak çalışılmıştır (Şekil 4.1).

4.2.2 Çekme Deneyi

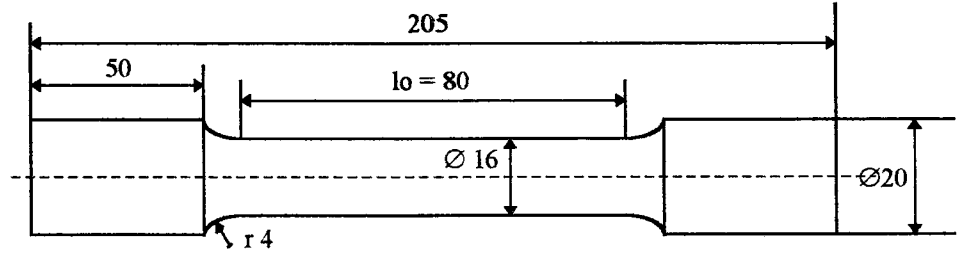
Çekme deneyleri, Zugprobe A 16 x 80 DIN 50125 standardı esas alınarak hazırlanan numuneler kullanılarak 600 kN kapasiteli TREBEL marka çekme cihazında 2 mm/dakika çekme hızında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2 ve 4.3). Her tip malzemenin üç farklı ısıtım işlem durumu için yapılan deneylerde değerlendirmeler üçer adet numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak yapılmıştır. Deneylerden, akma sınırı, çekme dayanımı, % kopma uzaması ve % kopma kesit daralması değerleri elde edilmiştir.

4.2.3 Burma Deneyi

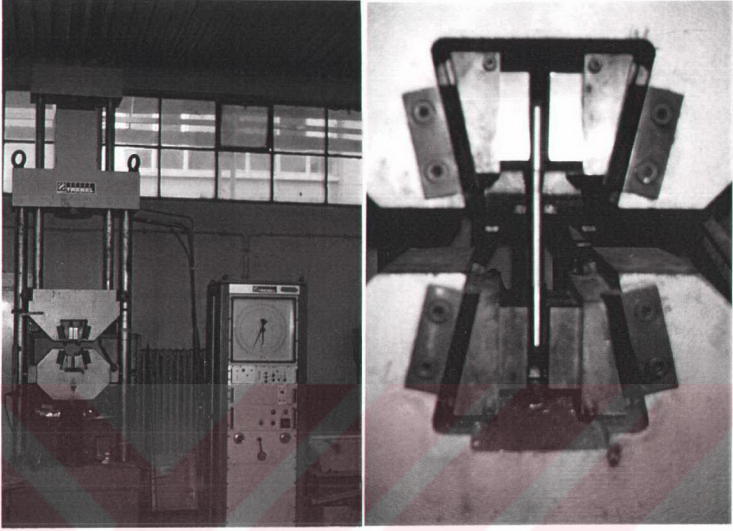
Deney malzemelerinin burmada soğuk şekil değiştirme kapasiteleri hakkında fikir edinebilmek amacıyla oda sıcaklığında burma deneyleri 200 Nm maksimum burma momenti, 187 W motor gücü, 225 derece/dakika maksimum şekil değişimi hızı, 0.3° hassasiyet kapasiteli TECQUIPMENT SM21 burma deney cihazı ve burma cihazı için tasarlanmış deney numuneleriyle (Şekil 4.4 ve 4.5) gerçekleştirilmiştir. Her deney durumu için üçer numuneden, kopmaya yol açan devir sayısı, kopma anındaki burma momenti, kopmadaki kayma (γ) ve kopma anındaki kayma gerilmesi (τ) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.1 Numune üzerinde sertlik değeri alınan noktaların şematik gösterimi.
(Her nokta arası 1 mm' dir.)



Şekil 4.2 Çekme deney numuneleri (DIN 50125).



(a)

(b)

Şekil 4.3 Çekme ve çentikli çekme deneylerinin gerçekleştirildiği TREBEL çekme makinası : (a) genel görünümü (b) numune bağlantı çeneleri görünümü.

Burma deneyi değerleri her tip malzemeden üçer adet numune kullanılarak elde edilen sonuçların ortalaması esas alınarak verilmiştir. Tablo 5.9'daki ifadeler aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır :

Kopmaya yol açan devir sayısı burma cihazındaki sayaçtan elde edilmiştir. Sayacın 1 turu 0.3° açığa eşdeğer olmakta ve 1200 tur 360° olmaktadır.

Kopma anındaki burma momenti (M) değeri cihazdaki dijital torkmetreden elde edilmiştir.

Kopma anındaki kayma (γ) değeri denklem 4.1'den hesaplanmıştır :

$$\gamma = r \times \theta / L$$

(4.1)

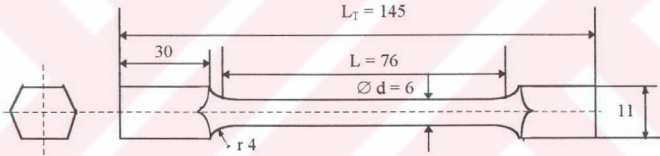
Denklem 4.1'deki r numunenin yarıçapını (mm), θ burma açısını (radyan) ve L numunenin boyunu ifade etmektedir.

Kopma anındaki kayma gerilmesi (τ) değeri denklem 4.2'den hesaplanmıştır :

$$\tau = M \times 16 / (\pi \times D^3) \quad [N / mm^2] \quad (4.2)$$

Denklem 4.2'deki M kopma anındaki burma momentini (Nmm) ve D numunenin çapını ifade etmektedir.

Kırık yüzeylerden her durum için x10 büyütmede fotoğraflar çekilmiştir.

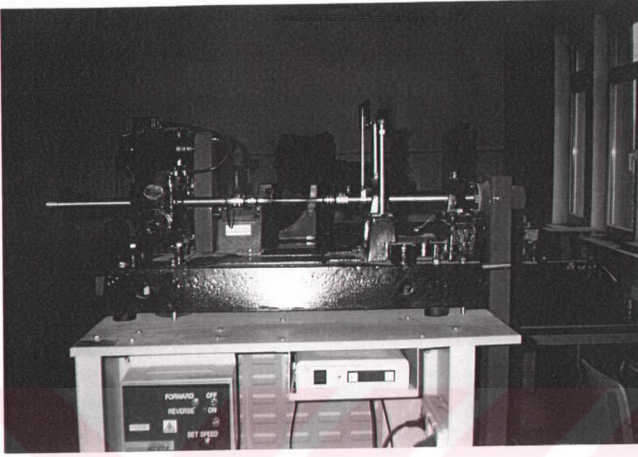


Şekil 4.4 Burma deney numuneleri.

4.2.4 Basma Deneyi

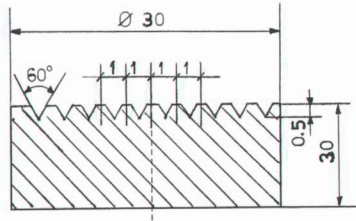
Basma deneyleri dolu silindir basma deneyleri ve halkalı dolu silindir basma deneyleri olmak üzere iki durumda incelenmiştir [58].

Basma deneyleri, 500 kN kapasiteli ZWICK marka çekme cihazında 2 mm/dakika basma hızı ve oda sıcaklığında farklı sürtünme koşulları için dolu silindir ve halkalı dolu silindir numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kuvvet 1 N ve strok 0.01 mm hassasiyetle ölçülmüştür.



Şekil 4.5 Burma deney cihazı.

Numune / basma takımları arayüzündeki sürtünme koşullarının yeteri kadar farklı olmalarını sağlamak amacıyla iki tip basma takımı kullanılmıştır. Birinci tip basma takımı düzlemsel takımlar olup, bunlar $3\mu\text{m}$ 'lik alümina pasta ile parlatılarak $Ra=0.04-0.05\ \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Bu yüzeyler dört deney aralıklı tekrar parlatılmıştır. İkinci tip basma takımları yivli olarak hazırlanmıştır (Şekil 4.6) [12]. Yivli basma takımları düzlemsel takımlarda olduğu gibi aynı şartlarda parlatılmıştır.



Şekil 4.6 Yivli basma takımı [12].

Her iki tip basma takımı X 210 Cr 12 (DIN 1.2080) soğuk iş takım çeliğinden seçilmiş, 950°C de 1 saat tavllanmış ve Mobil Therm R yağında su verilmiş, bunu takiben 250°C de 1 saat menevişlenmiştir. Isıl işlem sonucunda basma yüzeylerinde 58 Rc sertlik elde edilmiştir. Basma takımları $\varnothing$ 30 mm X 30 mm boyutlarında hazırlanmıştır.

Numunelerin alt ve üst yüzeyleri taşlama tezgahında işlenerek $Ra = 0.36 \mu m - 0.46 \mu m$ değerleri arasında çeşitli yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.

Basma işlemi, çıplak gözle çatlak görülene ve bu çatlak en az 0.3 mm uzunluğa ulaşana kadar sürdürülmüş, 0.3 mm çatlak görüldüğü anda hasar oluştuğu kabul edilerek deney durdurulmuştur [2,12,13,17,21,58]. Yüzeyde oluşan çatlakların x 10 büyütmede fotoğrafları çekilmiştir.

Dolu silindirlerle yapılan basma deneylerinde, deneylerden önce h_0 , d_0 , l_0 , t_0 değerleri 0.01 mm hassasiyetle ölçülmüştür (Şekil 4.7). Deney sırasında P basma kuvveti ölçülmüş ve deneyden sonra h , d , d_m , l , t değerleri aynı hassasiyetle ölçülmüştür.

Halkalı dolu silindirlerle yapılan basma deneylerinde, deneylerden önce h_0 , d_0 , d_{ho} , e_0 değerleri aynı hassasiyetle ölçülmüştür (Şekil 4.8). Deney sırasında P basma kuvveti ölçülmüş ve deneyden sonra h , d_h , e , d_m değerleri aynı hassasiyetle ölçülmüştür.

Dolu silindirler, her tip malzeme ve her tip yağlama için, önce hasar oluşana kadar basılarak, hasar anındaki P basma kuvveti ölçülmüş ve $(h_0 - h/h_0)$ ile birlikte Tablo 5.10'da verilmiştir. Ayrıca bu deneylerden hasar oluşumuna yol açan $(\Delta h)_{hasar}$ saptandığından 0 ile $(\Delta h)_{hasar}$ arasında farklı $\Delta h = h_0 - h$ değerleri için basma deneyleri yapılarak, P ile $(h_0 - h)$, ϵ_a ve ϵ_z ile $(h_0 - h/h_0)$, σ_0/σ_0 ve σ_m/σ_0 ve σ_z/σ_0 ile $(h_0 - h)/h_0$ arasındaki ilişkiler her tip malzeme ve ısıl işlem durumu için grafik şeklinde 5. bölümde verilmiştir.

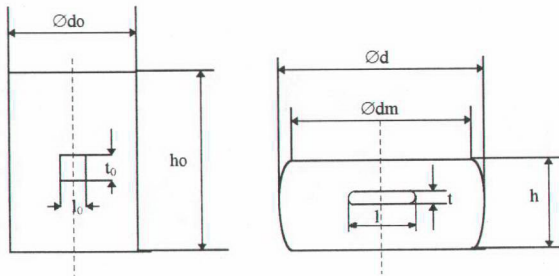
Dolu silindirlerle yapılan basma deneylerinden sonra parçaların makroskopik ve mikroskopik incelenmesi akma çizgilerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu incelemeler için çeşitli uygun parçalar seçilerek basılmış dolu silindir parça eksenini boyunca kesilmiş, kesme yüzeyi $3\text{ }\mu\text{m}$ 'lik alümina pasta ile parlatılmış ve %10 Nital ile dağlanmıştır. Bu yüzeylerden elde edilen fotoğraflar 5. bölümde verilmiştir.

Halkalı dolu silindirlerle de her tip malzeme ve iki tip sürtünme için (düzlemsel ve yivli basma takımları) önce hasar oluşana kadar basma yapılarak hasara neden olan P basma kuvvetleri ölçülmüş ve sonuçlar $(h_0-h)/h_0$ değerleri ile birlikte Tablo 5.13'de verilmiştir. Ayrıca bu deneylerden hasar anına kadar yükseklik azalması $(\Delta h)_{\text{hasar}}$ saptandığından 0 ile $(\Delta h)_{\text{hasar}}$ arasında farklı $\Delta h = h_0-h$ değerleri için basma deneyleri yapılarak; P ile h_0-h , ϵ_θ ile ϵ_z , σ_θ/σ_0 ve σ_m/σ_0 ve σ_z/σ_0 ile $(h_0-h)/h_0$ arasındaki ilişkiler her tip malzeme ve ısıtım işlem durumu için grafik şeklinde 5. bölümde verilmiştir.

Halkalı dolu silindirlerle yapılan basma deneylerinden sonra dolu silindirlerde olduğu gibi akma çizgilerini belirlemek amacıyla makroskopik ve mikroskopik incelemeler çeşitli uygun parçalara yapılarak fotoğrafları 5. bölümde verilmiştir.

Dolu silindirlerin başlangıç ölçüleri ve yağlama koşulları :

$$\varnothing d_0 = 10\text{ mm}, \quad h_0 = 15\text{ mm}, \quad l_0 = 1.27\text{ mm}, \quad t_0 = 1.27\text{ mm}$$

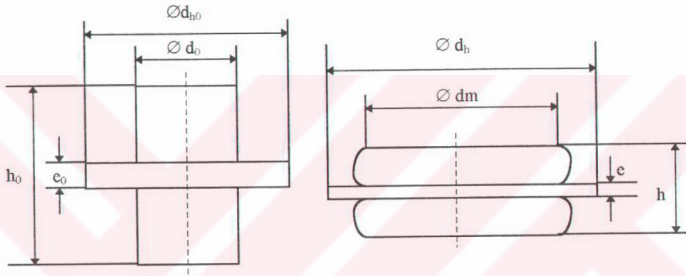


Şekil 4.7 Dolu silindir basma deney numuneleri.

Düzlemsel takımlar ile (1) Yağlamasız, (2) 0.20 mm Teflon standart film, (3) SAE 50 motor yağı kullanılarak üç farklı sürtünme durumu için deneyler gerçekleştirilmiştir. Yivli takımlar yağlamasız durumda kullanılmıştır.

Halkalı dolu silindirlerin başlangıç ölçüleri ve yağlama koşulları :

$$\varnothing d_o = 10 \text{ mm}, \quad d_{ho} = 15 \text{ mm}, \quad e_o = 3 \text{ mm}, \quad h_o = 15 \text{ mm}$$



Şekil 4.8 Halkalı dolu silindir basma deney numuneleri.

Halkalı dolu silindirlerle yapılan basma deneyleri düzlemsel ve yivli basma takımlarının yağlamasız şartlarındaki iki sürtünme durumu ile gerçekleştirilmiştir.

Her bir durum için üçer adet numune ile ölçüm yapılarak ortalama değerler esas alınmıştır.

Dolu silindir basma deneyi sonuçlarını değerlendirmede aşağıdaki denklemler kullanılmıştır :

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \ln D/D_0 \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{zz} = \ln h/h_0 \quad (4.4)$$

$\epsilon_{\theta\theta}$ ile ϵ_{zz} arasında :

$$\epsilon_{\theta\theta} = \alpha \epsilon_{zz} \quad (4.5)$$

gibi bir bağıntı olduğu kabul edilmiştir [20]. Burada α , deney parçası - kalıp arayüzündeki sürtünmeye bağlı bir katsayıdır.

Deney sırasında $\epsilon_{\theta\theta}$ ve ϵ_{zz} değerlerinin ölçüldüğü her an için α denklem 4.5'den hesaplanır. Dolayısıyla o an içinde $\sigma_{\theta\theta} / \sigma_0$, σ_{zz} / σ_0 , σ_m / σ_0 aşağıdaki denklemlerden hesaplanır [20].

$$\sigma_{\theta\theta} / \sigma_0 = [-1/(3)^{1/2}] \times [(2\alpha + 1) / (1 + \alpha + \alpha^2)^{1/2}] \quad (4.6)$$

$$\sigma_{zz} / \sigma_0 = [-1/(3)^{1/2}] \times [(\alpha + 2) / (1 + \alpha + \alpha^2)^{1/2}] \quad (4.7)$$

$$\sigma_m / \sigma_0 = [-1/(3)^{1/2}] \times [(\alpha + 1) / (1 + \alpha + \alpha^2)^{1/2}] \quad (4.8)$$

Bu ifadelerde σ_0 efektif gerilmedir (malzemenin her anki akma sınırı $\sigma_0 = C \epsilon^n$).

Halkalı dolu silindir basma deneyi sonuçlarını değerlendirmede aşağıdaki denklemler kullanılmıştır :

$$\epsilon_{\theta\theta} = \ln d_h / d_{h0} \quad (4.9)$$

$$\epsilon_{zz} = \ln e / e_0 \quad (4.10)$$

$$\epsilon_{\theta\theta} / \epsilon_{zz} = \beta \quad (4.11)$$

Eğrilerin çiziminde, her nokta için, β nın o anki deneysel değeri denklem 4.11'den hesaplanır [18].

$$\sigma_{\theta\theta} / \sigma_0 = [-1/(3)^{1/2}] \times [(1 + 2\beta) / (1 + \beta + \beta^2)^{1/2}] \quad (4.12)$$

$$\sigma_{zz} / \sigma_0 = [-1/(3)^{1/2}] \times [(2 + \beta) / (1 + \beta + \beta^2)^{1/2}] \quad (4.13)$$

$$\sigma_m / \sigma_0 = [-1/(3)^{1/2}] \times [(1 + \beta) / (1 + \beta + \beta^2)^{1/2}] \quad (4.14)$$

$$\epsilon_k = [2 / (3)^{1/2}] \times (1 + \beta + \beta^2)^{1/2} \times I \epsilon_{zz} I \quad (4.15)$$

4.2.5 Çentikli Çekme Deneyi

Çentikli çekme deneyleri, üç eksenliliğin sünek kırılmaya etkisini incelemek için 2, 5 ve 10 mm yarıçapında üç ayrı çentik açılmış (Şekil 4.10) [20] numunelerin 600 kN kapasiteli TREBEL çekme cihazında 2 mm/dakika sabit çene hızı ve oda sıcaklığında çekilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kesit daralması 0.01 mm hassasiyetle ölçülmüştür.

Deneyler çentikli kesitteki çeşitli azalma değerlerini sağlayan kuvvetlerin ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilmiş ve numuneler koparılan kadar deneyler sürdürülmüştür.. Deneylerden elde edilen σ_d ve buna karşılık gelen P değerlerinden, her malzeme ve ısıtım durumu için üç farklı çentik yarıçapını birlikte içeren P ile (d_0-d), σ_x/σ_0 ve σ_m/σ_0 ile $2 \ln d_0/d$ arasındaki ilişkiler grafik şeklinde ve kopmaya yol açan değerler 5. bölümde Tablo 5.15’de verilmiştir.

Numuneler her tip malzeme ve ısıtım durumu için üçer adet olmak üzere kopya torna tezgahında işlenmiştir.

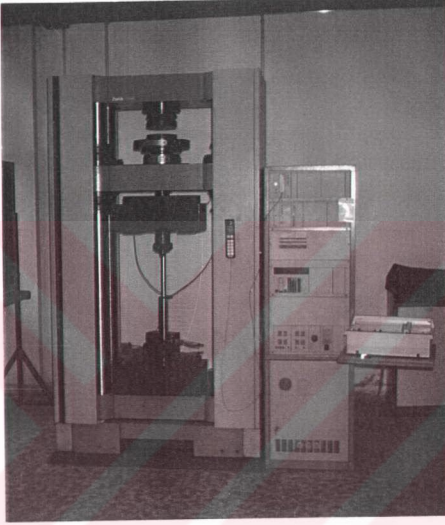
Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan değerler ile gerçekleştirilen grafikler ve tablo aşağıdaki denklemler ile bulunmuştur [20] :

$$\sigma_x / \sigma_0 = 1 + (d/2) / 2R \quad (4.16)$$

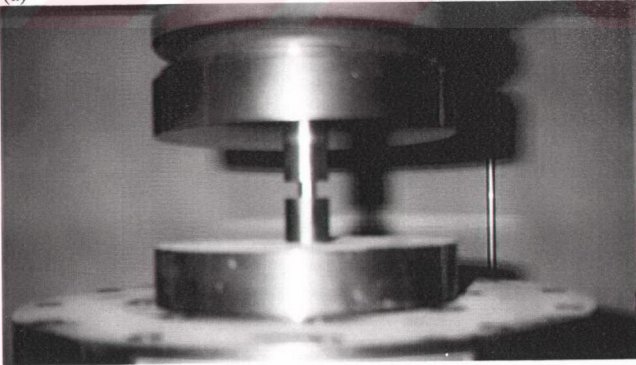
$$\sigma_m / \sigma_0 = (1/3) + (d/2) / 2R \quad (4.17)$$

$$\varepsilon_{\text{kopma}} = 2 \ln d_0/d_{\text{kopma}} \quad (4.18)$$

Bu ifadelerde σ_0 efektif gerilmedir.

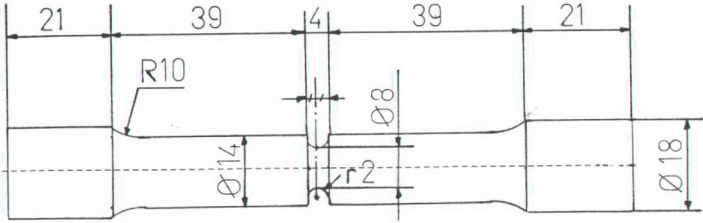


(a)

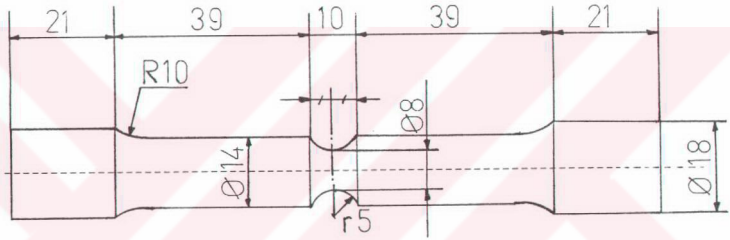


(b)

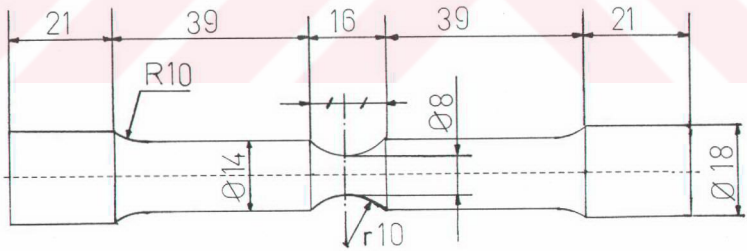
Şekil 4.9 Basma deney cihazı : (a) genel görünümü (b) basma takımları ve numune görünümü.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.10 Çentikli çekme deney numuneleri.

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARI

5.1 DENEY MALZEMELERİNİN İNCELENMESİ

5.1.1 Kimyasal Analiz

Deney malzemelerinin MKE standardına göre olması gereken kimyasal bileşimleri Tablo 5.1 de, kimyasal analiz sonuçları ise Tablo 5.2 de verilmiştir.

Tablo 5.1 MKE standardı kimyasal analiz değerleri.

Malzeme	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
AISI 1040	0.35-0.44	0.10-0.30	0.60-0.90	0.050 max.	0.040 max.	-	-
AISI 5140	0.35-0.44	0.15-0.35	0.60-0.90	0.040 max.	0.040 max.	0.80-1.10	-
AISI 4140	0.35-0.44	0.15-0.35	0.60-0.90	0.040 max.	0.040 max.	0.80-1.10	0.15-0.25
AISI 1050	0.45-0.54	0.10-0.30	0.60-0.90	0.050 max.	0.040 max.	-	-

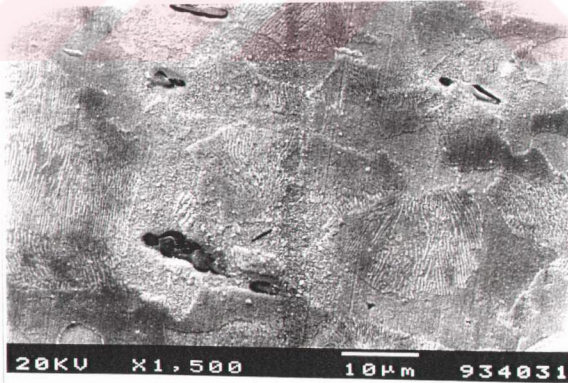
Tablo 5.2 Kimyasal analiz sonuçları.

Malzeme	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
AISI 1040	0.398	0.189	0.769	0.0137	0.0389	0.158	0.0247
AISI 5140	0.375	0.194	0.753	0.0143	0.0332	0.813	0.0317
AISI 4140	0.365	0.178	0.796	0.0086	0.0236	0.802	0.167
AISI 1050	0.463	0.176	0.679	0.0097	0.0308	0.174	0.0375

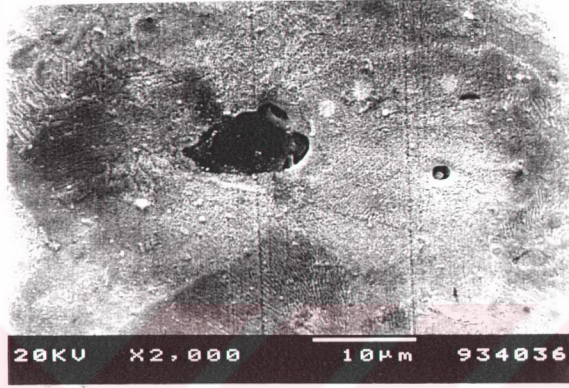
5.1.2 Kalıntıların İncelenmesi



Şekil 5.1 AISI 1040 çeliğinde kalıntılar. Malzeme sıcak haddelenmiş durumda.
Eksene paralel kesit (x 100).



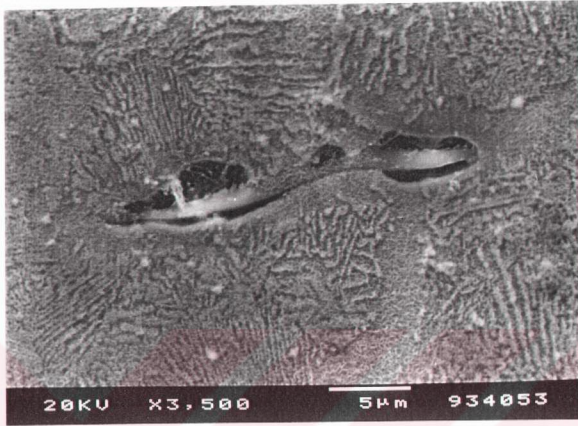
Şekil 5.2 AISI 1040 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda MnS kalıntısı (SEM).
Eksene paralel kesit.



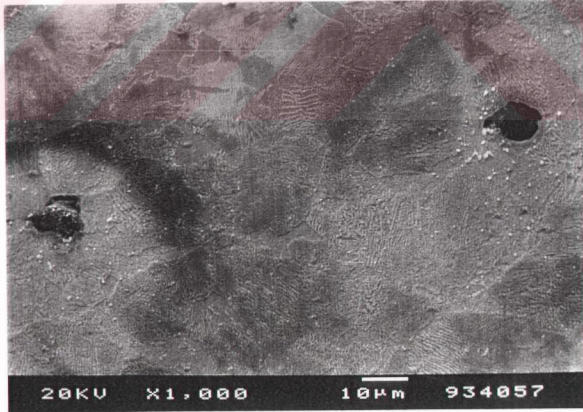
Şekil 5.3 AISI 1040 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda Al_2O_3 kalıntısı (SEM).
Eksene paralel kesit.

100 μm

Şekil 5.4 AISI 1050 çeliğinde kalıntılar. Malzeme sıcak haddelenmiş durumda.
Eksene paralel kesit (x 100).



Şekil 5.5 AISI 1050 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda MnS kalıntısı (SEM).
Eksene paralel kesit.

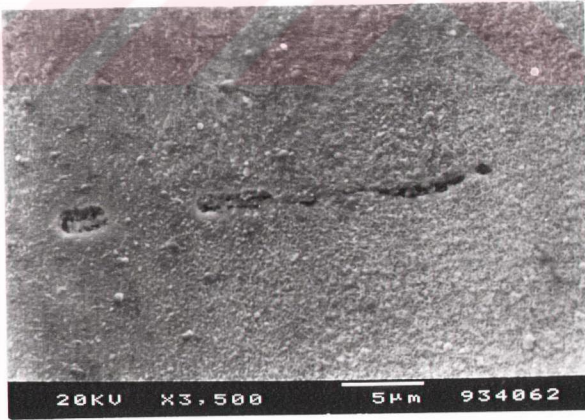


Şekil 5.6 AISI 1050 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda MnS ve Al₂O₃ kalıntıları
(SEM). Eksene paralel kesit.

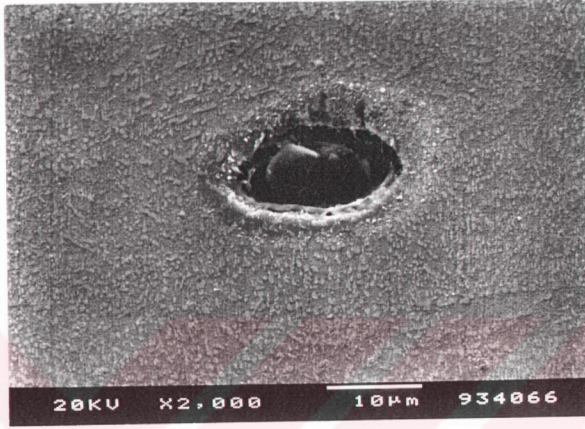


100 μm

Şekil 5.7 AISI 4140 çeliğinde kalıntılar. Malzeme sıcak haddelenmiş durumda.
Eksene paralel kesit (x 100).



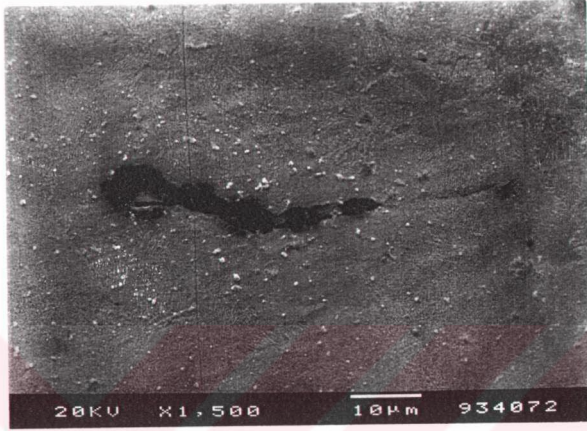
Şekil 5.8 AISI 4140 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda MnS kalıntısı (SEM).
Eksene paralel kesit.



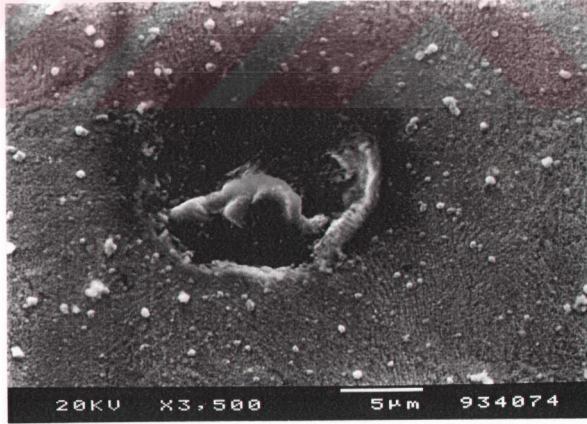
Şekil 5.9 AISI 4140 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda Al_2O_3 kalıntısı (SEM).
Eksene paralel kesit.



Şekil 5.10 AISI 5140 çeliğinde kalıntılar. Malzeme sıcak haddelenmiş durumda.
Eksene paralel kesit (x 100).



Şekil 5.11 AISI 5140 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda MnS kalıntısı (SEM).
Eksene paralel kesit.



Şekil 5.12 AISI 5140 çeliğinde sıcak haddelenmiş durumda Al₂O₃ kalıntısı (SEM).
Eksene paralel kesit.

Sıcak hadde mamulü 1040 çeliğinde, uzamış halde MnS ve küreler halinde Al_2O_3 kalıntılarına rastlanmıştır. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi, uzamış haldeki MnS kalıntılarının dağılımı 6-9 μm boyutunda bulunmakta ve küre halindeki Al_2O_3 kalıntılarının dağılımı 9-13 μm boyutunda bulunmaktadır. MnS kalıntıları için yapılan SEM çalışması Şekil 5.2'de, küresel Al_2O_3 kalıntıları için yapılan SEM çalışması Şekil 5.3'de görülmektedir.

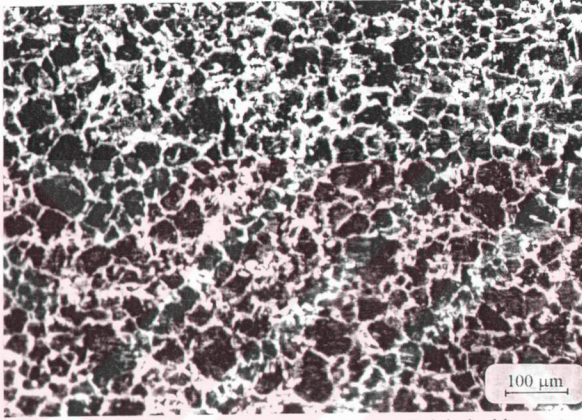
Sıcak hadde 1050 çeliğinde, uzamış halde MnS ve küreler halinde Al_2O_3 kalıntılarına rastlanmıştır. Şekil 5.4'de görüldüğü gibi, uzamış haldeki MnS kalıntılarının dağılımı 6-9 μm boyutunda bulunmakta ve küre halindeki Al_2O_3 kalıntılarının dağılımı 9-13 μm boyutunda bulunmaktadır. MnS kalıntıları için yapılan SEM çalışması Şekil 5.5'de, küresel Al_2O_3 kalıntıları için yapılan SEM çalışması Şekil 5.6'da görülmektedir.

Sıcak hadde 4140 çeliğinde, uzamış halde MnS ve küreler halinde Al_2O_3 kalıntılarına rastlanmıştır. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi, uzamış haldeki MnS kalıntılarının dağılımı 9-14 μm boyutunda bulunmakta ve küre halindeki Al_2O_3 kalıntılarının dağılımı 9-13 μm boyutunda bulunmaktadır. MnS kalıntıları için yapılan SEM çalışması Şekil 5.8'de, küresel Al_2O_3 kalıntıları için yapılan SEM çalışması Şekil 5.9'da görülmektedir.

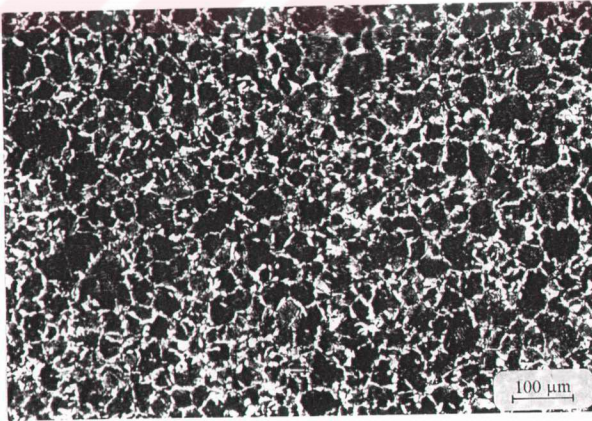
Sıcak hadde 5140 çeliğinde, uzamış halde MnS ve küreler halinde Al_2O_3 kalıntılarına rastlanmıştır. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi, uzamış haldeki MnS kalıntılarının dağılımı 14-21 μm boyutunda bulunmakta ve küre halindeki Al_2O_3 kalıntılarının dağılımı 9-13 μm boyutunda bulunmaktadır. MnS kalıntıları için yapılan SEM çalışması Şekil 5.11'de, küresel Al_2O_3 kalıntıları için yapılan SEM çalışması Şekil 5.12'de görülmektedir.

5.1.3 Mikroyapı ve Tane Boyutu

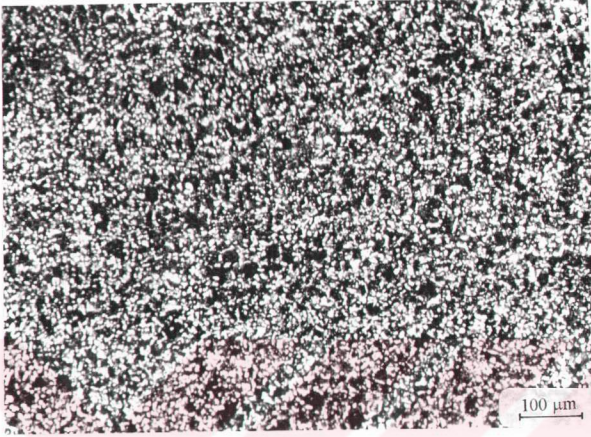
Her tip malzeme ve herbir ısıt işlem durumu için eksene paralel ve eksene dik kesitlerden optik mikroskopta çekilen mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.13-5.36'da sunulmuştur. Eksene dik kesitlerden saptanan ASTM 10 standardı tane boyutu değerleri Tablo 5.3 te verilmiştir.



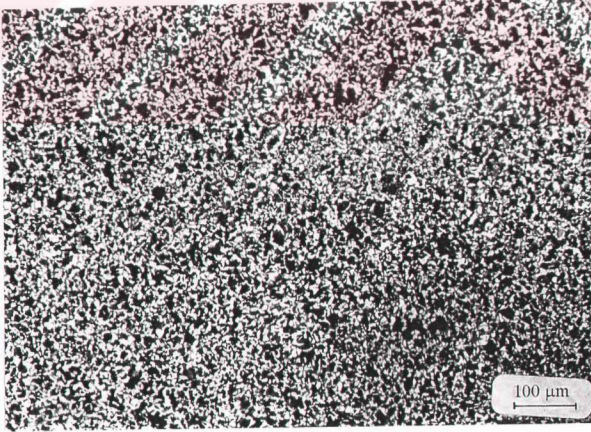
Şekil 5.13 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. (x 100).



Şekil 5.14 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. (x 100).



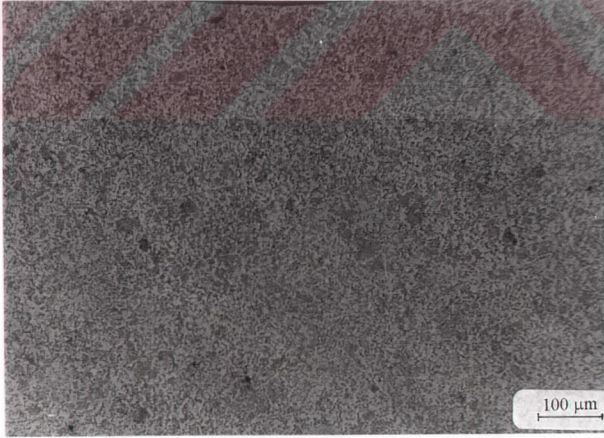
Şekil 5.15 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).



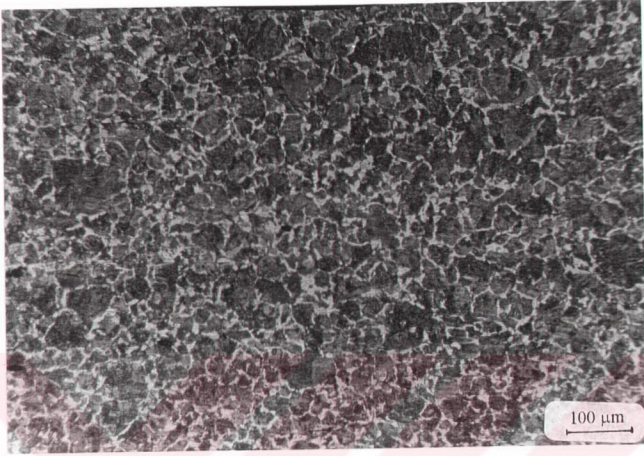
Şekil 5.16 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).



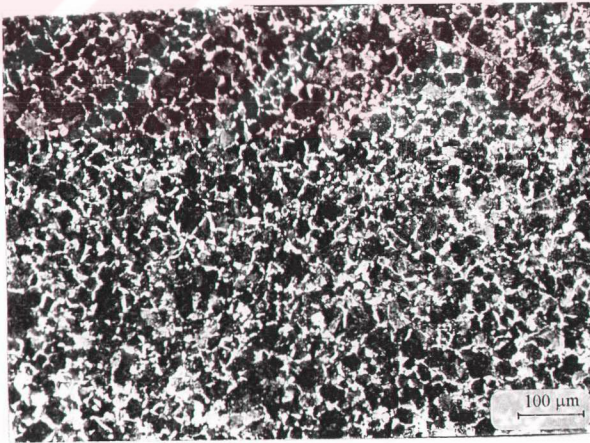
Şekil 5.17 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).



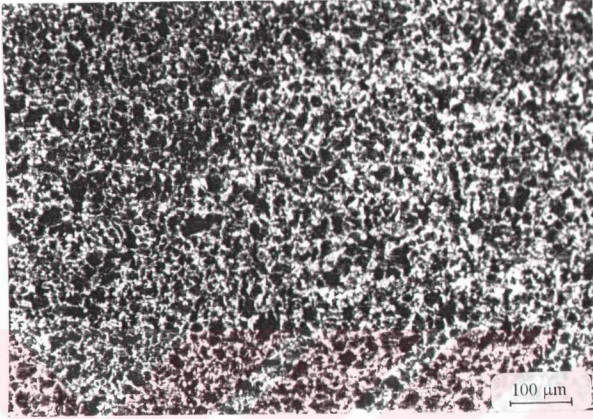
Şekil 5.18 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).



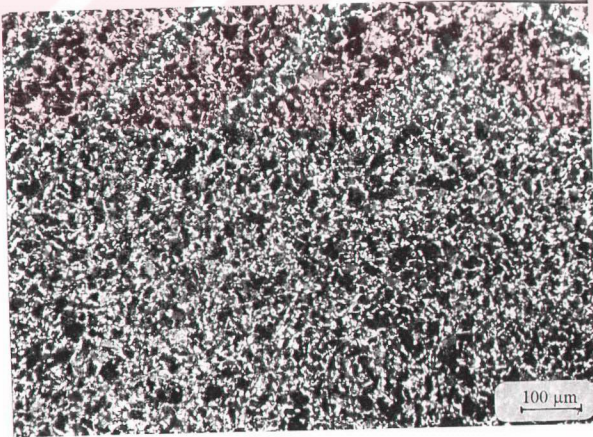
Şekil 5.19 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. (x 100).



Şekil 5.20 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. (x 100).



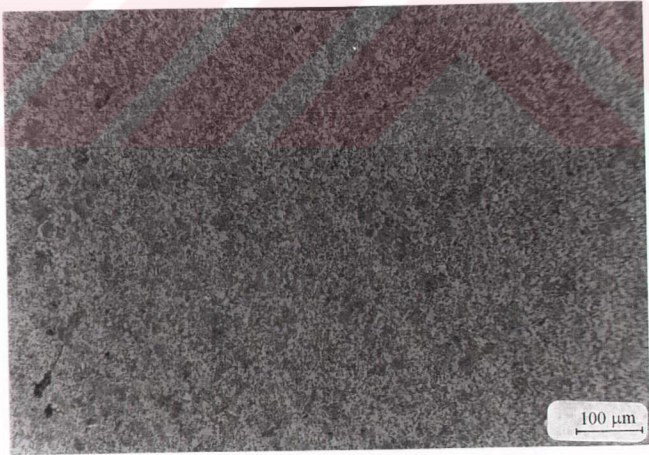
Şekil 5.21 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).



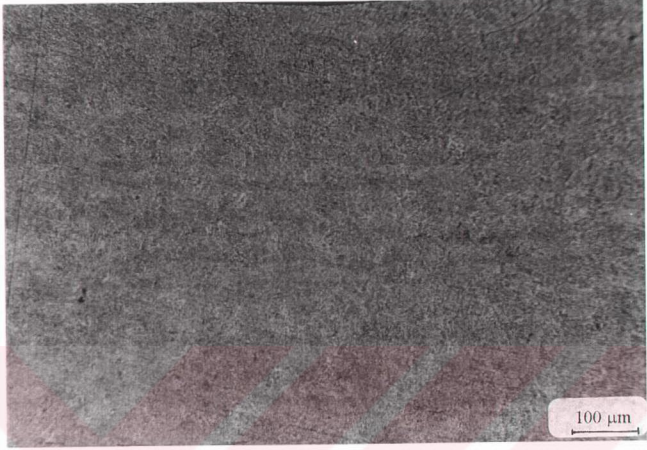
Şekil 5.22 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).



Şekil 5.23 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).



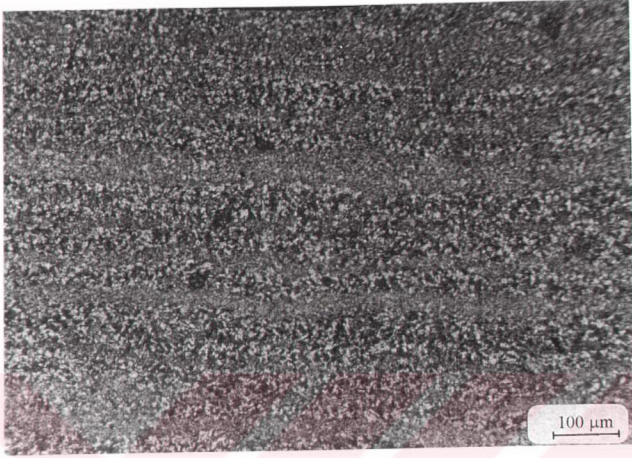
Şekil 5.24 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).



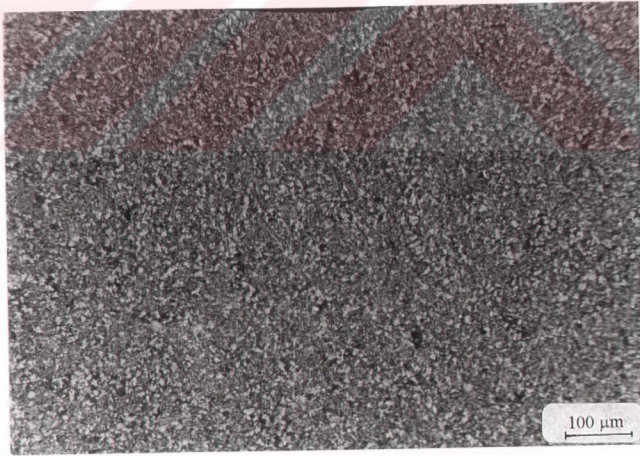
Şekil 5.25 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital. (x100).



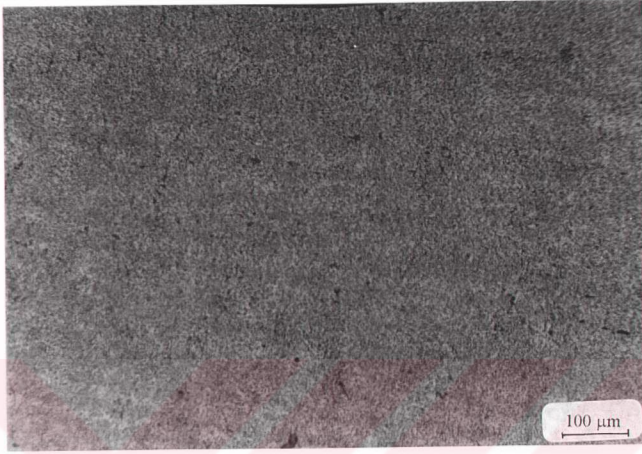
Şekil 5.26 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital. (x100).



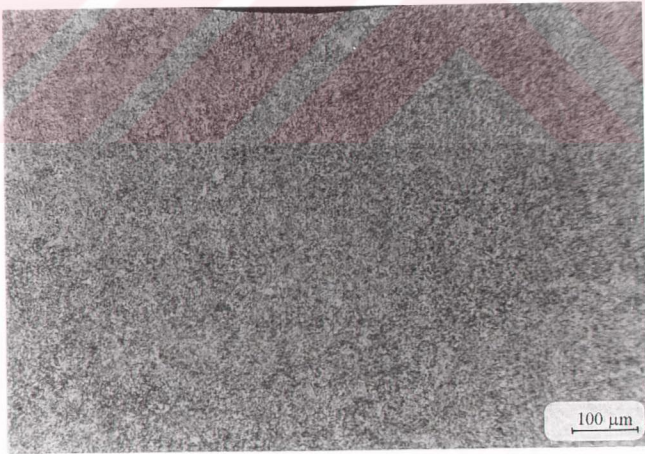
Şekil 5.27 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).



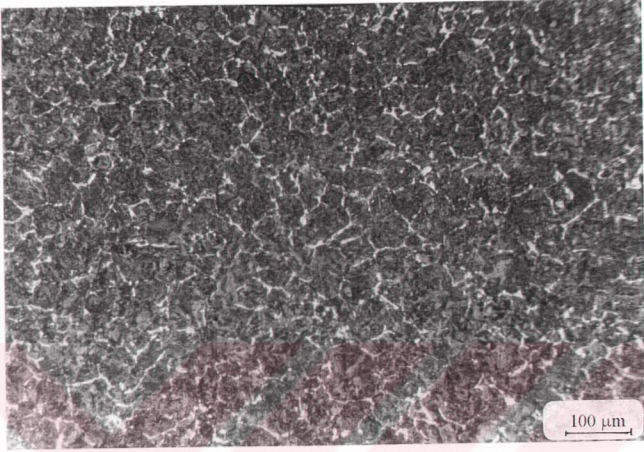
Şekil 5.28 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).



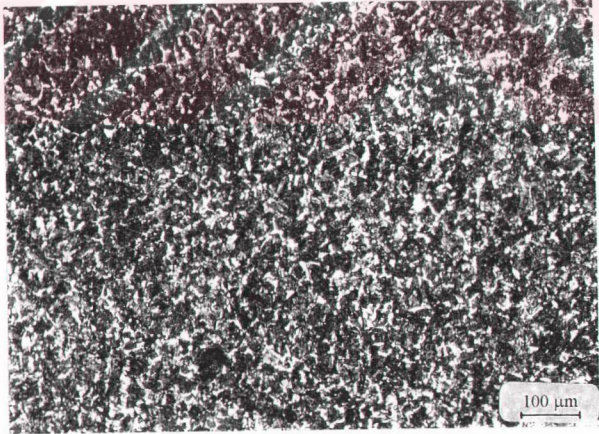
Şekil 5.29 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital. (x 100).



Şekil 5.30 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital. (x 100).



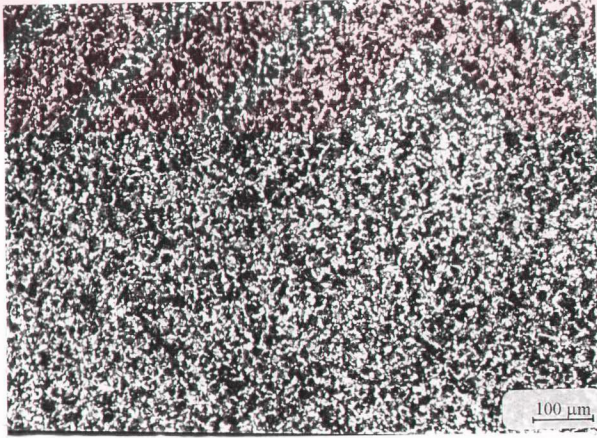
Şekil 5.31 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. (x 100).



Şekil 5.32 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. (x 100).



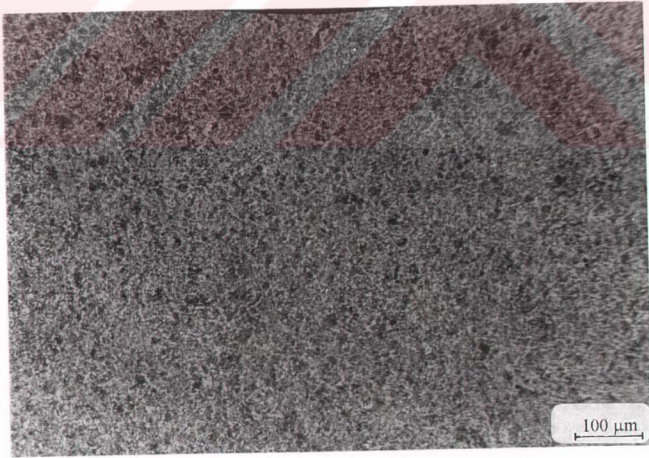
Şekil 5.33 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. (x 100)



Şekil 5.34 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Perlit). Dağlama %3 nital. (x 100).



Şekil 5.35 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne paralel mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).



Şekil 5.36 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin hadde yönüne dik mikroyapısı (Ferrit + Küreleşmiş karbonlar). Dağlama %3 nital. ($\times 100$).

Tablo 5.3 Tane boyutları.

Malzeme	AISI 1040	AISI 1050	AISI 4140	AISI 5140
Sıcak haddelenmiş durumda	6	7	7	7
Normalize edilmiş	10	9	10	9
Küreleştirilmiş	6	7	7	7

Tablo 5.3'den görüldüğü gibi normalizasyon ile malzemelerin tane boyutları küçülmektedir. Küreleştirme ile perlit içerisindeki lamel şeklindeki karbonlar küreleşmekte ve tane boyutu değişmemektedir.

5.2 MEKANİK DENEY SONUÇLARI

5.2.1 Sertlik Deneyi

Malzemelerin hadde yönüne paralel kesitinden ölçülen Vickers sertlik değerleri Tablo 5.4-5.7'de verilmiştir.

Elde edilen değerlerden, malzemelerdeki sertlik dağılımlarında büyük sapmaların olmadığı görülmektedir. Normalizasyon ile sertlik değerlerinde genel olarak küçük bir azalma, küreleştirme ile daha fazla azalma elde edilmiştir. AISI 4140 çeliğinin sıcak haddelenmiş durumu üretiminde tav çukurunda bekletilmiş olarak çıkarılması nedeniyle düşük sertlik değeri vermiş ve normalizasyon ile sertlik değeri yükselmiştir.

Malzemelerin yüzeye yakın bölgelerinde sertlik değerleri malzemelerin merkezindeki sertlik değerlerinden biraz daha yüksek bulunmuştur. Fakat aradaki farklılık makul seviyededir. En yüksek sertlik değerini normalize edilmiş AISI 4140 çeliği göstermiştir. Çünkü, AISI 4140 normalizasyonda havada soğutulurken dahi su alarak sertleşebilen bir malzemedir. AISI 5140 çeliği de diğer malzemelere göre yüksek sertlik değerleri göstermiştir. Bileşiminde daha fazla karbon bulunan AISI 1050 çeliği beklendiği gibi AISI 1040 çeliğinden daha büyük sertlik değerleri göstermiştir.

Malzemelerden birbirine yakın sertlik değerleri elde etmek için küreleştirme işlemleri her bir malzeme için farklı tavlama sürelerinde gerçekleştirilmiş ve bunun sonucunda küreleştirilmiş durumlarda çok yakın sertlik değerleri elde edilmiştir.

Tablo 5.4 AISI 1040 çeliği Vickers sertlik değerleri.

Ölçüm yapılan nokta	Sıcak haddelenmiş durumda	Normalize edilmiş	Küreleştirilmiş
1	210	207	158
2	206	207	158
3	204	207	156
4	206	207	155
5	206	207	157
6	201	207	156
7	201	202	156
8	201	202	155
9	199	205	155
10	205	198	155
11	206	198	155
12	206	196	155
13	206	196	156
14	206	196	156
15	206	200	154
16	206	200	154
17	206	200	154
18	206	200	156
19	214	198	157
20	207	198	153
21	206	198	154
22	206	198	154
23	206	204	155
24	206	198	154
25	205	197	154
26	206	198	154
27	205	202	155
Ortalama değer	206 Hv	202 Hv	155 Hv

Tablo 5.5 AISI 1050 çeliği Vickers sertlik değerleri.

Ölçüm yapılan nokta	Sıcak haddelenmiş durumda	Normalize edilmiş	Küreleşmiş
1	242	228	164
2	234	225	165
3	232	228	162
4	225	216	160
5	220	225	159
6	221	225	159
7	226	220	156
8	224	220	156
9	220	208	158
10	225	207	156
11	219	217	157
12	232	226	160
13	224	222	156
14	224	214	158
15	224	216	159
16	228	219	158
17	228	219	160
18	228	216	162
19	234	218	162
20	232	215	156
21	228	214	158
22	228	214	157
23	224	214	157
24	235	206	156
25	226	207	156
26	226	208	157
27	230	207	157
Ortalama değer	227 Hv	219 Hv	159 Hv

Tablo 5.6 AISI 4140 çeliği Vickers sertlik değerleri.

Ölçüm yapılan nokta	Sıcak haddelenmiş durumda	Normalize edilmiş	Küreleşmiş
1	201	305	157
2	201	305	157
3	201	305	155
4	201	297	155
5	201	295	152
6	201	297	152
7	201	292	152
8	201	292	148
9	196	287	148
10	198	292	148
11	200	287	150
12	198	292	152
13	198	292	154
14	196	297	152
15	200	297	152
16	195	295	155
17	206	292	154
18	206	295	156
19	206	297	157
20	200	295	154
21	198	297	152
22	200	292	152
23	198	297	148
24	195	292	149
25	204	292	154
26	198	292	152
27	198	292	152
Ortalama değer	200 Hv	295 Hv	153 Hv

Tablo 5.7 AISI 5140 çeliği Vickers sertlik değerleri.

Ölçüm yapılan nokta	Sıcak haddelenmiş durumda	Normalize edilmiş	Küreleşmiş
1	265	232	163
2	265	232	160
3	255	232	162
4	247	232	161
5	249	232	160
6	247	233	160
7	249	232	160
8	247	233	159
9	247	225	161
10	245	225	158
11	245	224	158
12	245	233	160
13	245	230	158
14	245	232	159
15	247	232	162
16	247	232	160
17	252	232	162
18	265	232	163
19	265	232	164
20	245	225	158
21	245	226	158
22	245	224	161
23	245	225	160
24	240	224	158
25	240	224	158
26	245	226	158
27	245	222	161
Ortalama değer	251 Hv	231 Hv	160 Hv

5.2.2 Çekme Deneyi

Her tip malzeme ve ısıt işlemleri durumu için yapılan çekme deneyi sonuçları Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8 Çekme deneyi sonuçları.

Malzeme	Isıt işlem	σ_0 (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	% e_f	% q
AISI 1040	S.h. durum ¹	447.45	712.59	21.06	49.46
	Normalize	482	676.62	24.74	54.814
	Küreleştirir.	351	568	25.53	60.3
AISI 1050	S.h. durum ¹	484.4	781	17.4	44.12
	Normalize	492	753	21.96	48.05
	Küreleştirir.	355.6	582.5	21.48	54.5
AISI 4140	S.h. durum ¹	428	638	23.15	65.55
	Normalize	695	936.4	12.13	44.39
	Küreleştirir.	364	564	24.52	67.8
AISI 5140	S.h. durum ¹	517.35	825	16.76	56.4
	Normalize	488.2	731.6	20.64	59.4
	Küreleştirir.	343.6	585.3	24.25	61.3

1- Sıcak haddelenmiş durumda.

Çekme deneyleri sonuçlarına göre, akma sınırı ve çekme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değer normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinde, daha sonra sırasıyla AISI 5140 ve AISI 1050 çeliğinde, en az ise AISI 1040 çeliğinde olduğu görülür. %uzama değerleri karşılaştırıldığında en fazla %uzamanın AISI 1040 çeliğinde, daha sonra sırasıyla AISI 1050 ve AISI 5140 çeliğinde, en az ise normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinde olduğu görülür. %kesit daralması değerleri karşılaştırıldığında en fazla %kesit daralmasının AISI 5140 çeliğinde, daha sonra sırasıyla AISI 1040 ve AISI 1050 çeliğinde, en az ise normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinde olduğu görülür. Karşılaştırmalara malzemelerin küreleştirilmiş durumları katılmamıştır. Malzemeler küreleştirilmiş durumda yüksek %uzama ve %kesit daralması, düşük akma sınırı ve çekme dayanımı değerleri göstermişlerdir. Akma sınırı, çekme dayanımı, %uzama ve %kesit daralması değerleri arasında belirgin bir uygunluk görülmemektedir. Küreleştirilmiş durumlar dikkate alınarak %kesit

daralması değerlerinden dövülebilirliği en iyi olan malzemenin AISI 4140, daha sonra sırasıyla AISI 5140 ve AISI 1040 , en az olan ise AISI 1050 çeliği olduğu görülmüştür.

Çekme deneylerinden elde edilen sonuçlardan : (1) Akma sınırı ve çekme dayanımı ile %uzama ve %kesit daralması değerleri arasında belirgin bir bağıntı kurulamamıştır. (2) %uzama ile %kesit daralması değerleri arasında bir bağıntı kurulamamıştır. (3) Her tip malzemenin küreleştirilmiş durumlarındaki akma sınırı ve çekme dayanımı değerlerinin birbirine yakınlığı dikkate alınarak yapılan değerlendirmeye %kesit daralması değerlerinin dövülebilirliği çok genel olarak ifade edebileceği tahmin edilebilir. (4) Normalizasyon ısı işlemi %uzama ve %kesit daralması miktarını artırmakta, çekme dayanımını azaltmaktadır. AISI 1040 ve 1050 çeliklerinde akma sınırı yükselmiştir, fakat AISI 5140 çeliğinde akma sınırı değeri azalmıştır. AISI 4140 çeliğinin sıcak haddelenmiş durumu tav çukurunda beklemiş olduğu için küreleştirilmiş duruma çok benzemektedir. Bu nedenle AISI 4140 çeliğinde normalizasyon ısı işlemi ile akma sınırı ve çekme dayanımı yükselmekte, %uzama ve %kesit daralması miktarları azalmaktadır. Küreleştirme ısı işlemi ise her tip malzemenin akma sınırı ve çekme dayanımı değerlerini büyük miktarda azaltmakta, %uzama ve %kesit daralması değerlerini büyük miktarda artırmaktadır.

5.2.3 Burma Deneyi

Her tip malzeme ve ısı işlem durumu için yapılan burma deneyi sonuçları tablo 5.9'da görülmektedir. Şekil 5.37-5.48'de ise kırık yüzeylerin x10 büyütmede makrofotografı verilmektedir.

Burma deneyi sonuçlarına göre, malzemeler sıcak haddelenmiş durumdan normalize edilerek kopma dayanımında küçük bir azalma, şekil değiştirme miktarında ise küçük bir artma göstermişlerdir. Küreleştirme ile çok daha büyük kopma dayanımı azalması ve şekil değiştirme miktarı artışı görülmüştür. Isıl işlemlerin etkisiyle malzemelerin kopma dayanımı ve şekil değiştirme miktarları çok önemli derecede değişmektedir.

Tablo 5.9 Burma deneyi sonuçları.

Malzeme	Isıl İşlem durumu	Kopmaya yol açan devir sayısı	Kopmadaki burma momenti (M) (Nm)	Kopmadaki kayma (γ) (Radyan)	Kopmadaki kayma gerilmesi (τ) (N/mm ²)
AISI 1040	S.h. durum ¹	3,051	26.3	0.755	620.11
	Normalize	3,154	27.8	0.780	655.48
	Küreleştirir.	3,703	23.4	0.916	551.73
AISI 1050	S.h. durum ¹	3,033	28.9	0.750	681.42
	Normalize	3,039	27.5	0.752	648.41
	Küreleştirir.	3,317	23.4	0.820	551.73
AISI 4140	S.h. durum ¹	5,175	26.7	1.280	629.54
	Normalize	2,069	34	0.512	801.67
	Küreleştirir.	5,267	22.9	1.303	539.94
AISI 5140	S.h. durum ¹	3,863	31.1	0.956	733.29
	Normalize	4,129	29.9	1.021	704.99
	Küreleştirir.	5,043	23.4	1.248	551.73

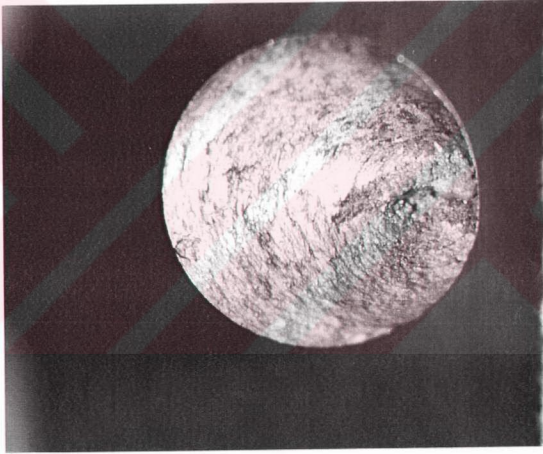
1- Sıcak haddelenmiş durumda.

Burma deneyi sonuçları ile malzemelerin dövülebilirliğini karşılaştırmada küreleştirilmiş durumdaki değerlerin dikkate alınması benzer kopma dayanımı değerleri nedeniyle yararlıdır. Aynı kopma dayanımına sahip küreleştirilmiş malzemeler karşılaştırıldığında dövülebilirliği en iyi olan malzemenin AISI 4140, daha sonra sırasıyla AISI 5140, 1040 ve 1050 olduğu görülmektedir.

Küreleştirilmiş durumun dikkate alınmadığı değerler incelendiğinde, burmada malzemelerin bileşiminde bulunan elementlerin çok etkili olduğu görülür. Örnek olarak AISI 5140 çeliğinde yüksek kopma dayanımı ve yüksek şekil değiştirme değerleri görülmüştür. AISI 1040 ve 1050 çeliklerindeki karbon elementi oranı farklılığı uygun bir kopma dayanımı ve şekil değiştirme değer farklılıkları ile etkisini göstermiştir.

Elde edilen değerlerden çıkarılan sonuç, burma deney sonuçlarının dövülebilirlik saptamasında güvenilir olacaktır.

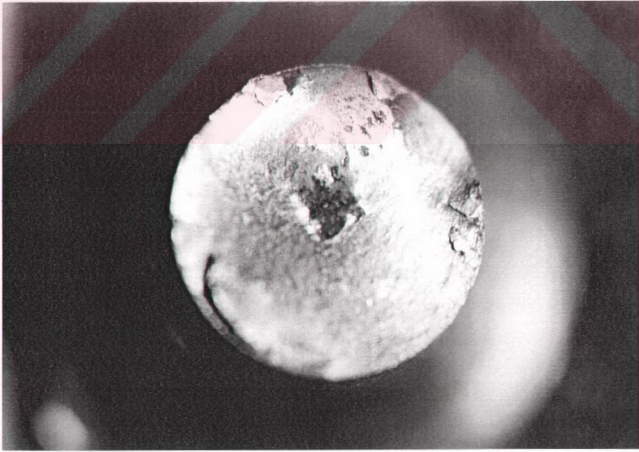
Burma deneylerinden elde edilen sonuçlardan : (1) Her tip malzeme kendi aralarında her bir ısı işlem durumu için kopma dayanımı azalışı ile şekil değiştirme miktarı artışı göstermiştir. (2) Yaklaşık kopma dayanımı değerleri sonucu veren küreleştirilmiş durumlar göz önüne alınarak yapılan değerlendirmeye, şekil değiştirme miktarındaki farklılıkların malzemelerin bileşimindeki elementler ve/veya oranlarının etkisiyle olduğu sonucuna varılmıştır. (3) Kopma dayanımı ve şekil değiştirme miktarları arasındaki dağılım ile dövülebilirlik sıralaması AISI 4140, 5140, 1040 ve 1050 şeklinde değerlendirilmiştir. (4) Her tip malzemenin küreleştirilmesi ile şekil değiştirme miktarında belirgin bir artış görülmüştür.



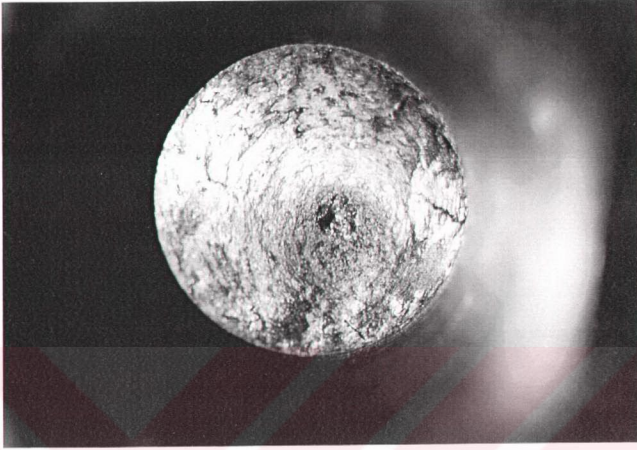
Şekil 5.37 Sıcak haddelenmiş durumdaki AISI 1040 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotografı (x 10).



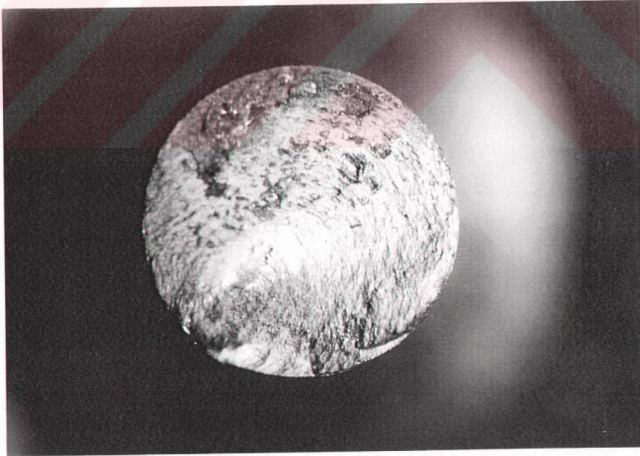
Şekil 5.38 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10).



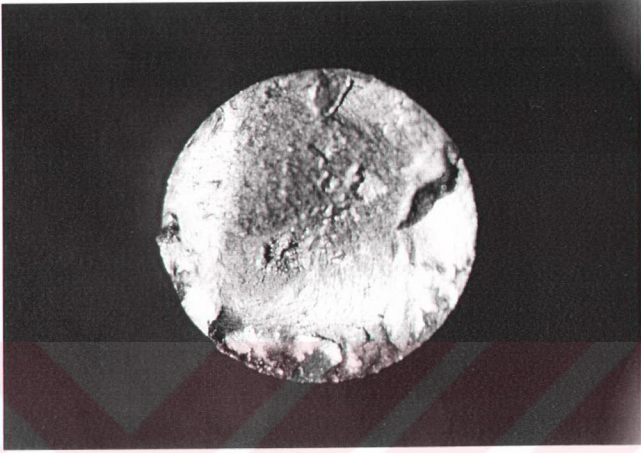
Şekil 5.39 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10).



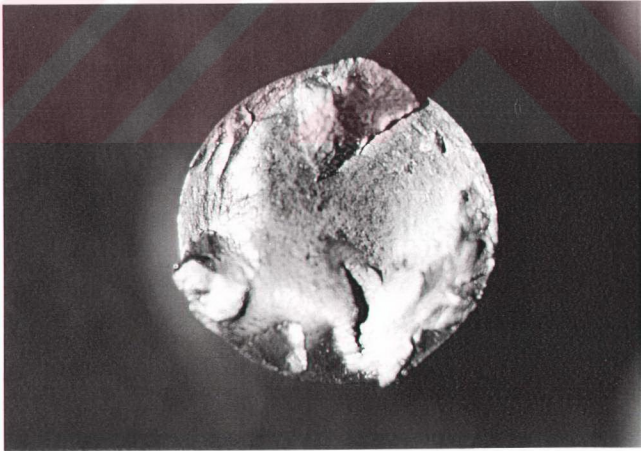
Şekil 5.40 Sıcak haddelenmiş durumdaki AISI 1050 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10).



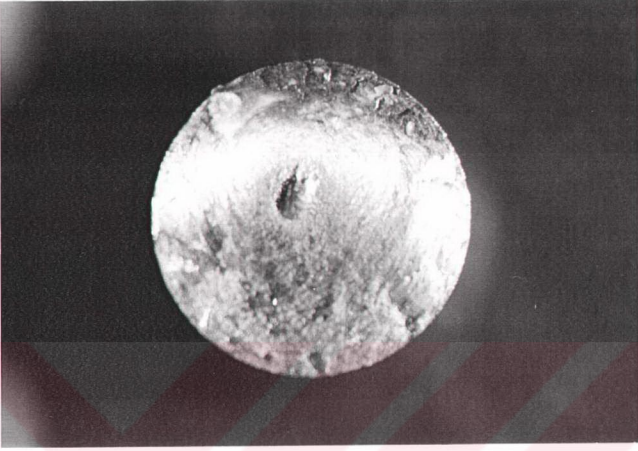
Şekil 5.41 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10).



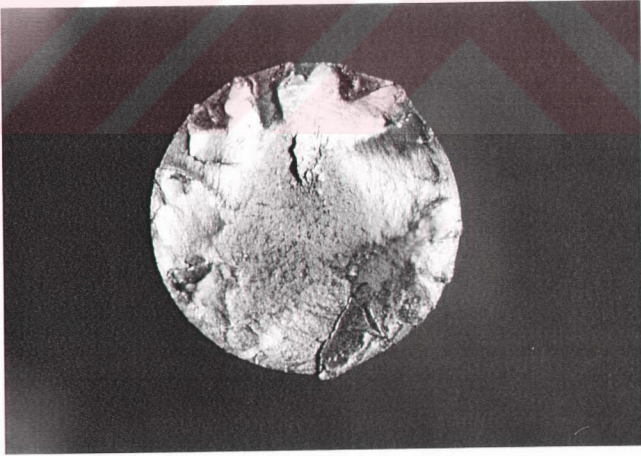
Şekil 5.42 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10).



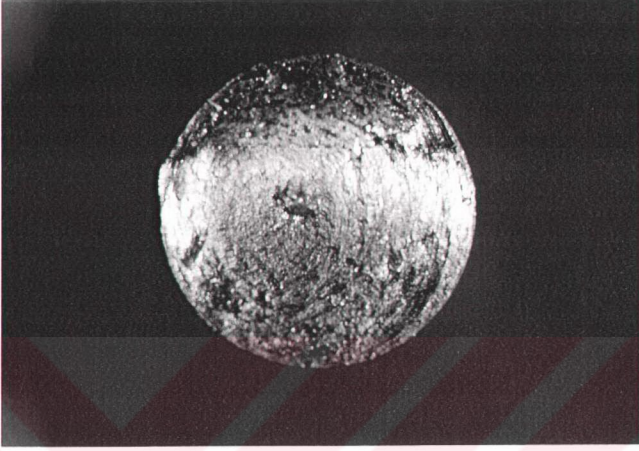
Şekil 5.43 Sıcak haddelenmiş durumdaki AISI 4140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10).



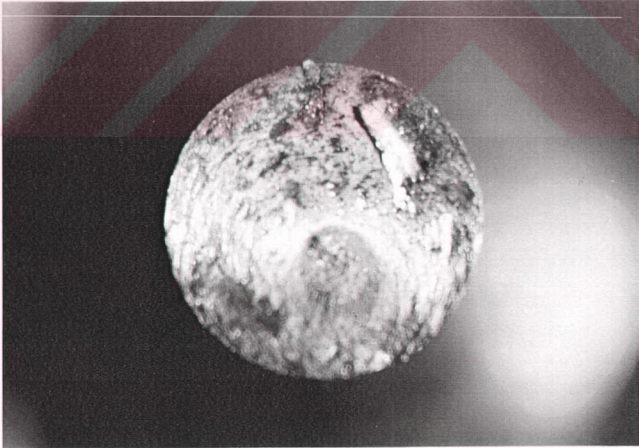
Şekil 5.44 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10).



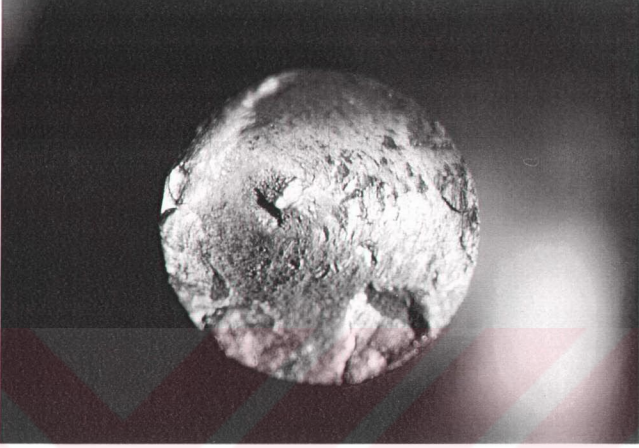
Şekil 5.45 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10).



Şekil 5.46 Sıcak haddelenmiş durumdaki AISI 5140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi ($\times 10$).



Şekil 5.47 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi ($\times 10$).



Şekil 5.48 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin burma kopması sonucu kırık yüzey makrofotoğrafi (x 10).

5.2.4 Basma Deneyleri

5.2.4.1 Dolu Silindir Basma Deneyi

Dolu silindirlerle yapılan basma deneylerinden elde edilen sonuçlar tablo 5.10 da verilmiştir. Bu tabloda P hasar olduğu andaki basma kuvveti, $(h_0-h)/h_0$ ise yükseklik doğrultusunda birim şekil değiştirmedir.

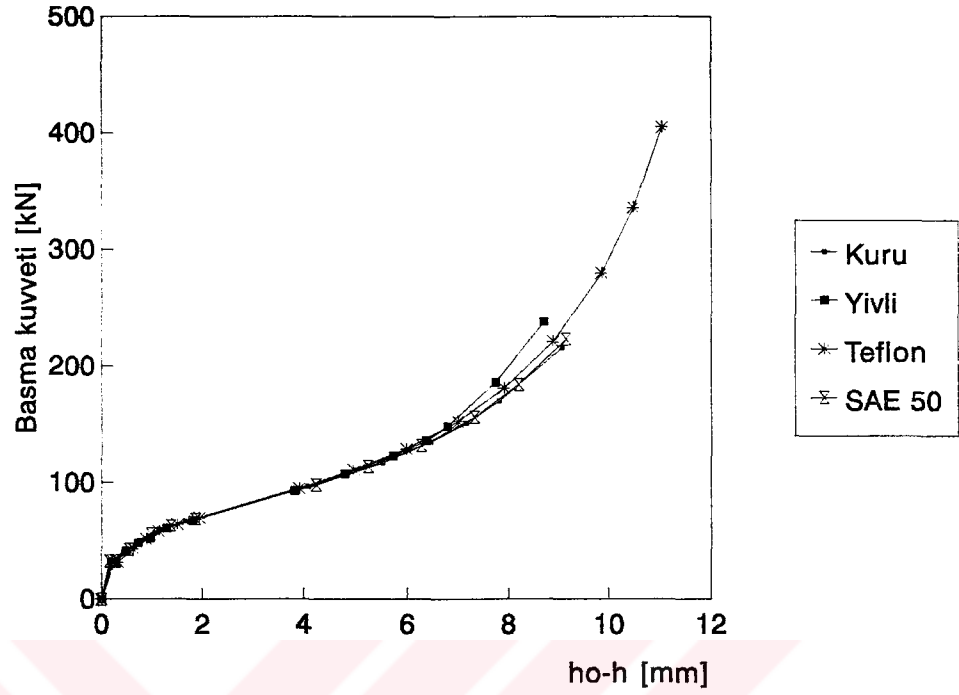
Tablo 5.10 daki dolu silindir basma deneyi sonuçlarına incelendiğinde :

Yivli basma takımlarıyla çok daha az şekil değiştirmenin gerçekleştiği ve bu nedenle iş parçası ile basma takımı ara yüzeyi şartlarının dövülebilirliğe etkisi açıkça görülmektedir.

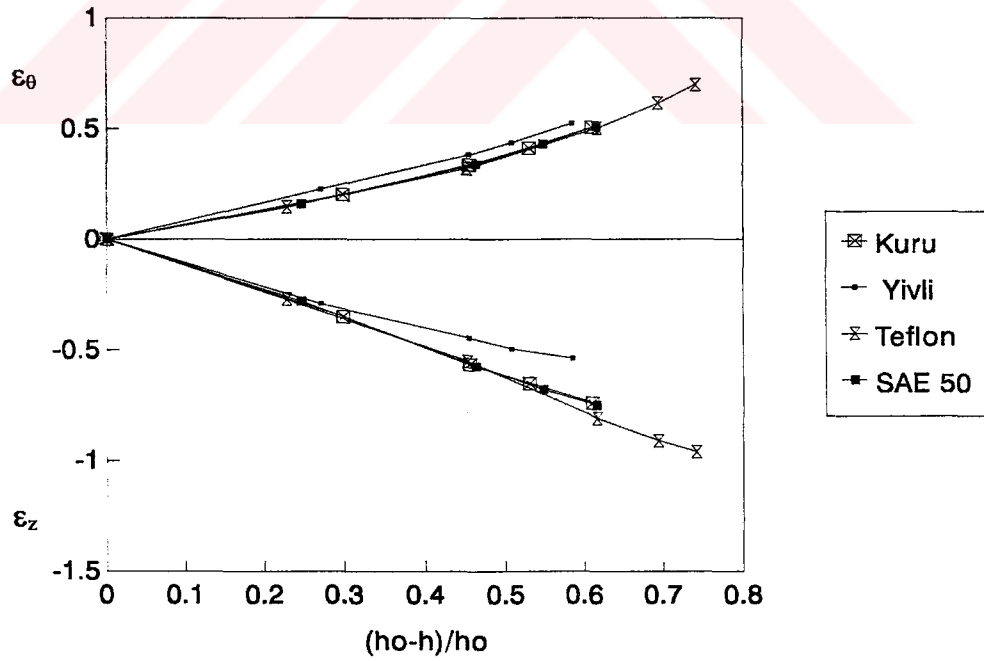
Dolu silindir basma deneylerinde düz basma takımlarıyla % 76 ve yivli basma takımlarıyla % 60 gibi büyük şekil değiştirme miktarları elde edilmiştir. Genellikle teflon kullanılarak elde edilen sürtünme koşullarında en büyük yükseklik azalması değerleri görülmektedir. Düz basma takımlarıyla farklı sürtünme koşullarında elde edilen yükseklik azalması değerleri birbirine çok yakın olduğu için dövülebilirliği karşılaştırmada güvenilir değildir. Aynı şekilde yivli basma takımları ile elde edilen yükseklik azalması değerleri de birbirine çok yakın değerler olduğu için dövülebilirliği karşılaştırmada güvenilir değildir.

Tablo 5.10 Dolu silindir basma deneyi sonuçları

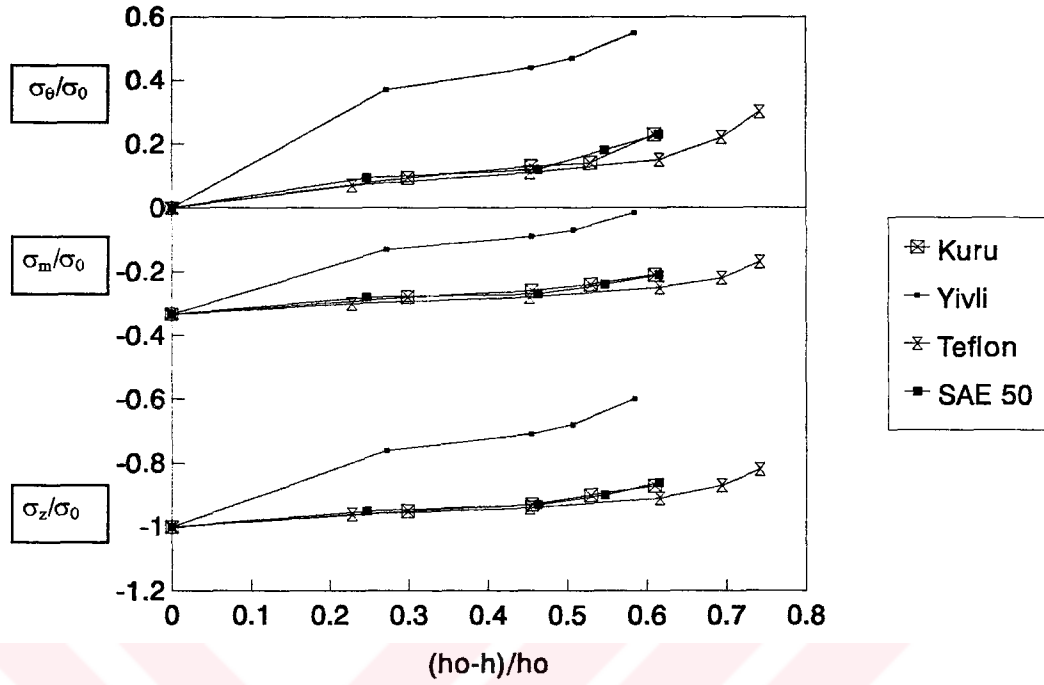
Malzeme	Yağlama	P (kN)	$(h_0-h)/h_0$
AISI 1040 Sıcak haddelenmiş durumda	Kuru	216	0.61
	Teflon	405	0.74
	SAE 50	223	0.62
	Yivli	238	0.58
AISI 1040 Normalize edilmiş	Kuru	252	0.65
	Teflon	390	0.74
	SAE 50	400	0.74
	Yivli	235	0.58
AISI 1040 Küreleştirilmiş	Kuru	410	0.74
	Teflon	380	0.75
	SAE 50	392	0.74
	Yivli	225	0.58
AISI 1050 Sıcak haddelenmiş durumda	Kuru	398	0.72
	Teflon	400	0.73
	SAE 50	430	0.73
	Yivli	245	0.57
AISI 1050 Normalize edilmiş	Kuru	411	0.73
	Teflon	364	0.71
	SAE 50	291	0.67
	Yivli	226	0.56
AISI 1050 Küreleştirilmiş	Kuru	322	0.70
	Teflon	330	0.71
	SAE 50	408	0.75
	Yivli	184	0.54
AISI 4140 Sıcak haddelenmiş durumda	Kuru	343	0.72
	Teflon	420	0.77
	SAE 50	350	0.72
	Yivli	265	0.61
AISI 4140 Normalize edilmiş	Kuru	310	0.69
	Teflon	305	0.64
	SAE 50	353	0.67
	Yivli	350	0.61
AISI 4140 Küreleştirilmiş	Kuru	325	0.70
	Teflon	442	0.78
	SAE 50	434	0.75
	Yivli	354	0.65
AISI 5140 Sıcak haddelenmiş durumda	Kuru	386	0.71
	Teflon	440	0.76
	SAE 50	438	0.74
	Yivli	320	0.62
AISI 5140 Normalize edilmiş	Kuru	399	0.73
	Teflon	423	0.76
	SAE 50	325	0.69
	Yivli	298	0.62
AISI 5140 Küreleştirilmiş	Kuru	398	0.74
	Teflon	438	0.78
	SAE 50	418	0.75
	Yivli	258	0.62



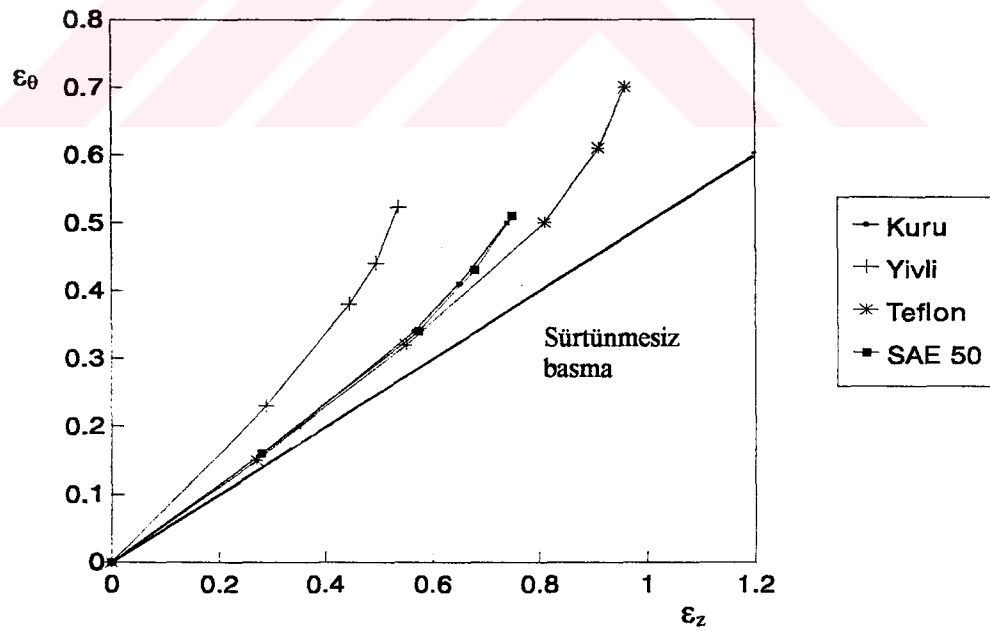
Şekil 5.49 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



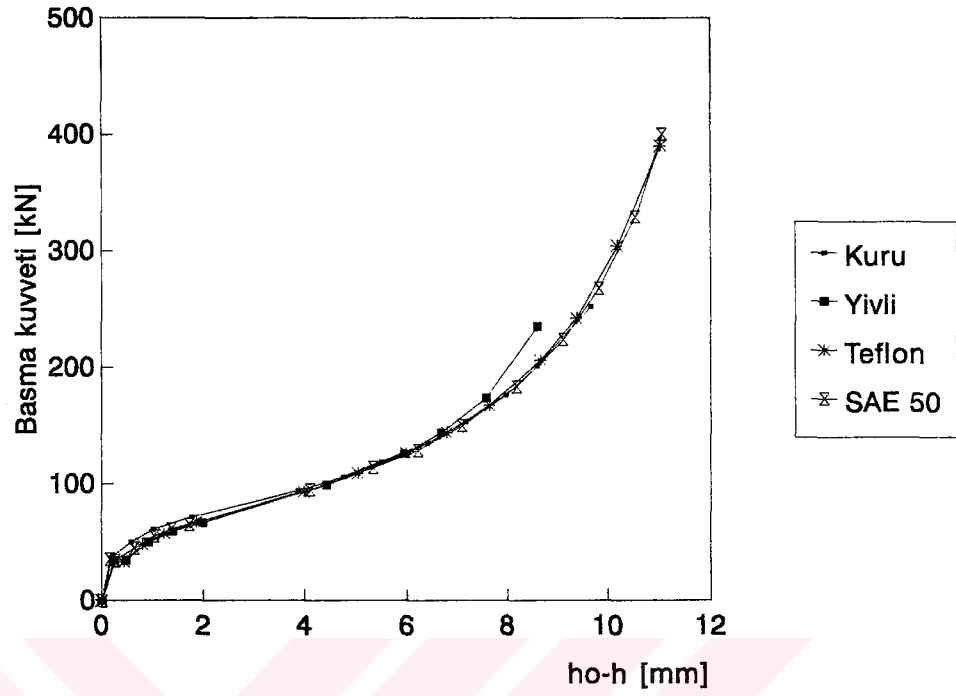
Şekil 5.50 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



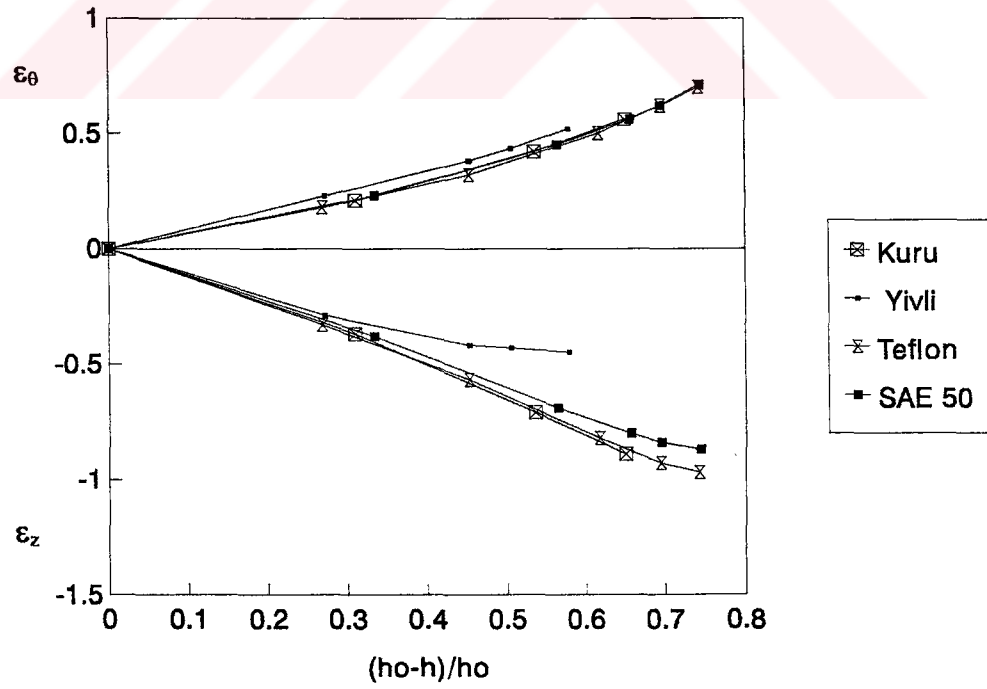
Şekil 5.51 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



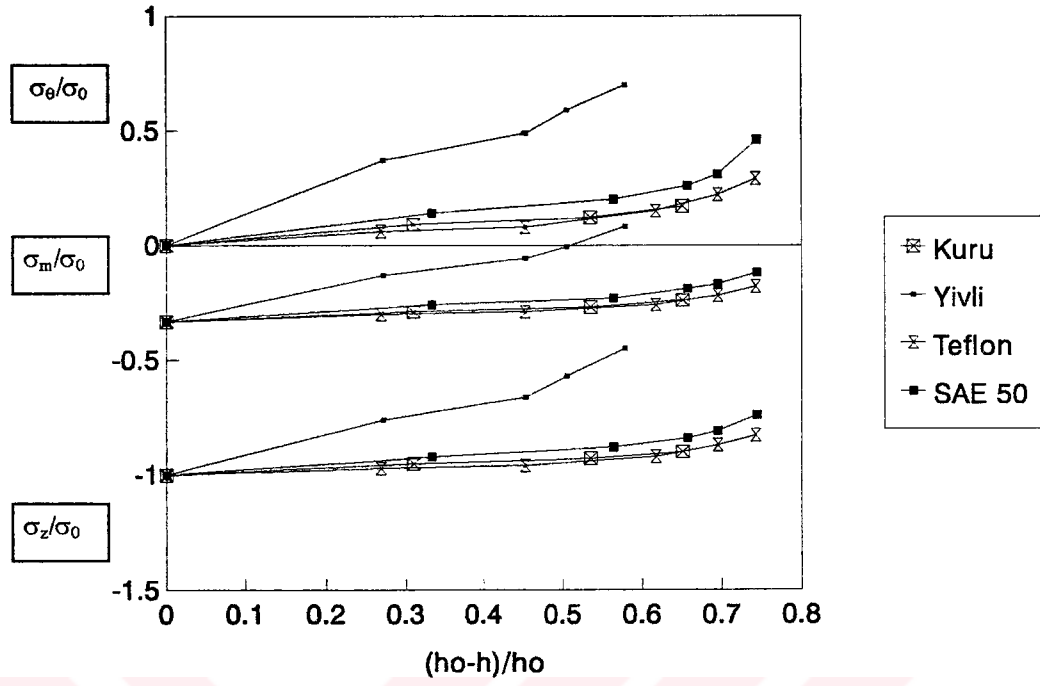
Şekil 5.52 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



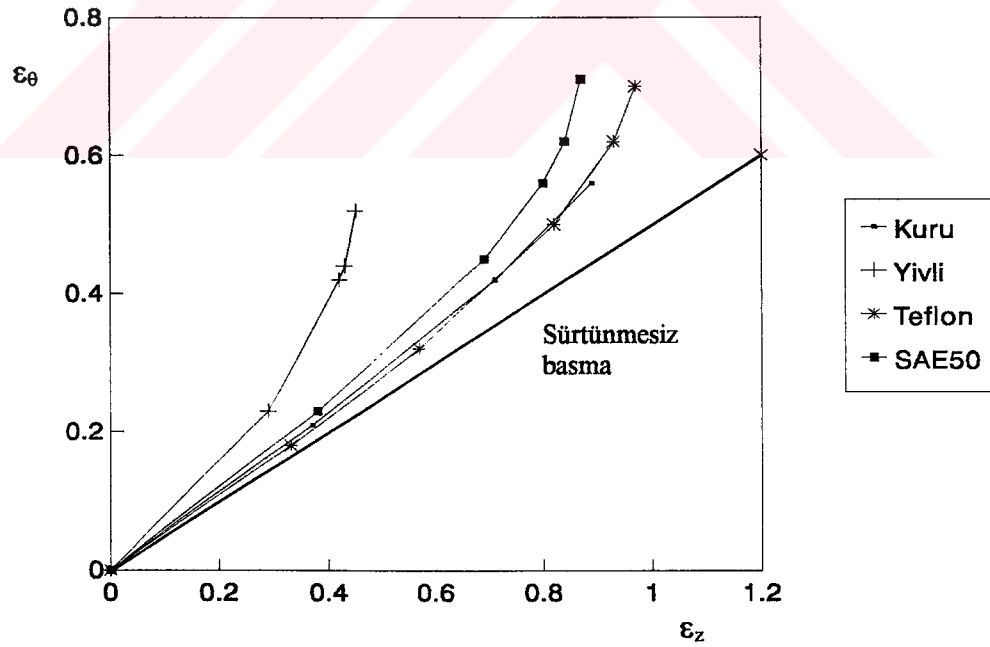
Şekil 5.53 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetlerinin yükseklik azalması ile değişimi.



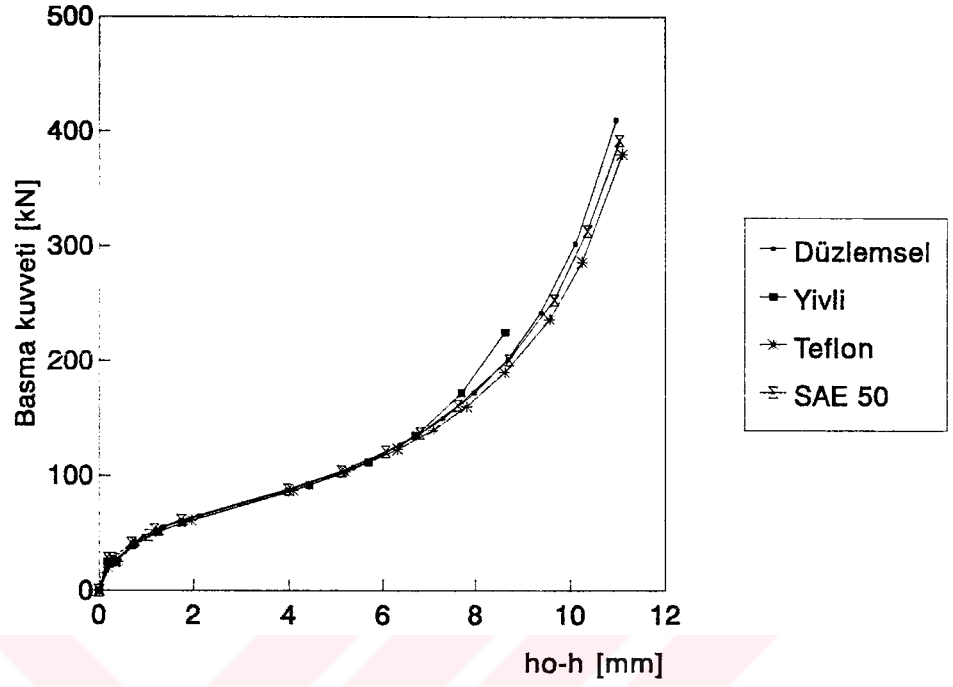
Şekil 5.54 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



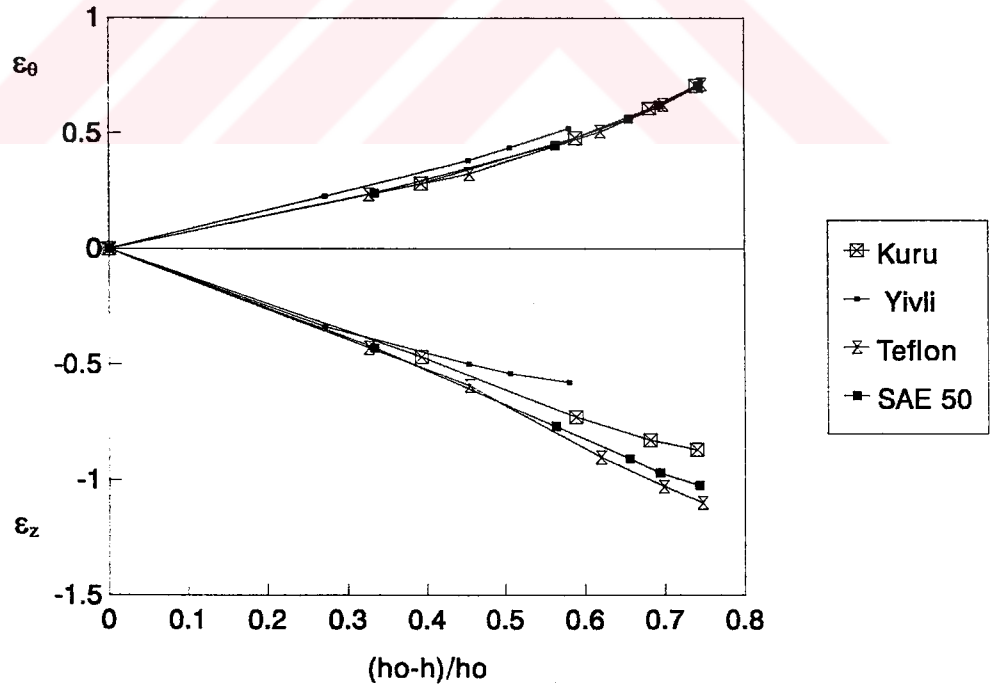
Şekil 5.55 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



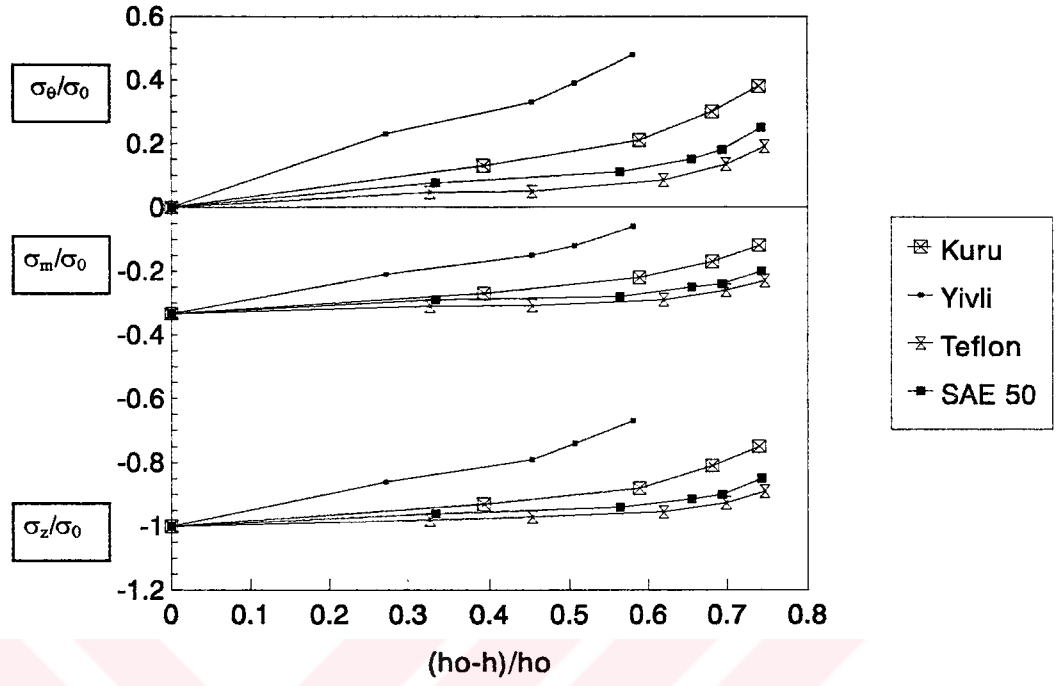
Şekil 5.56 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



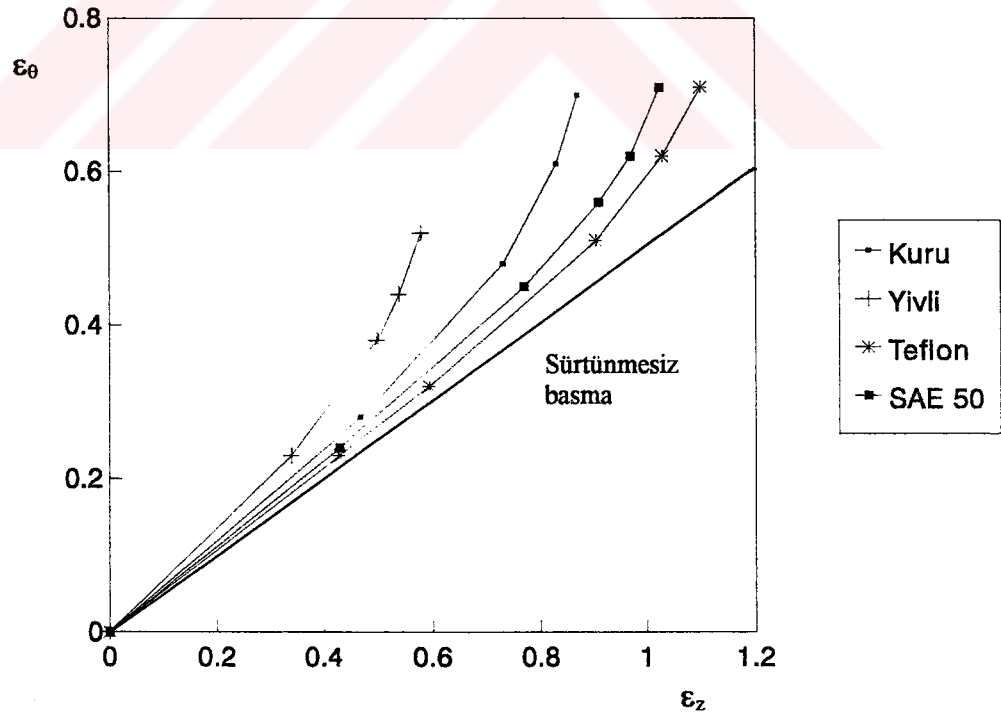
Şekil 5.57 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



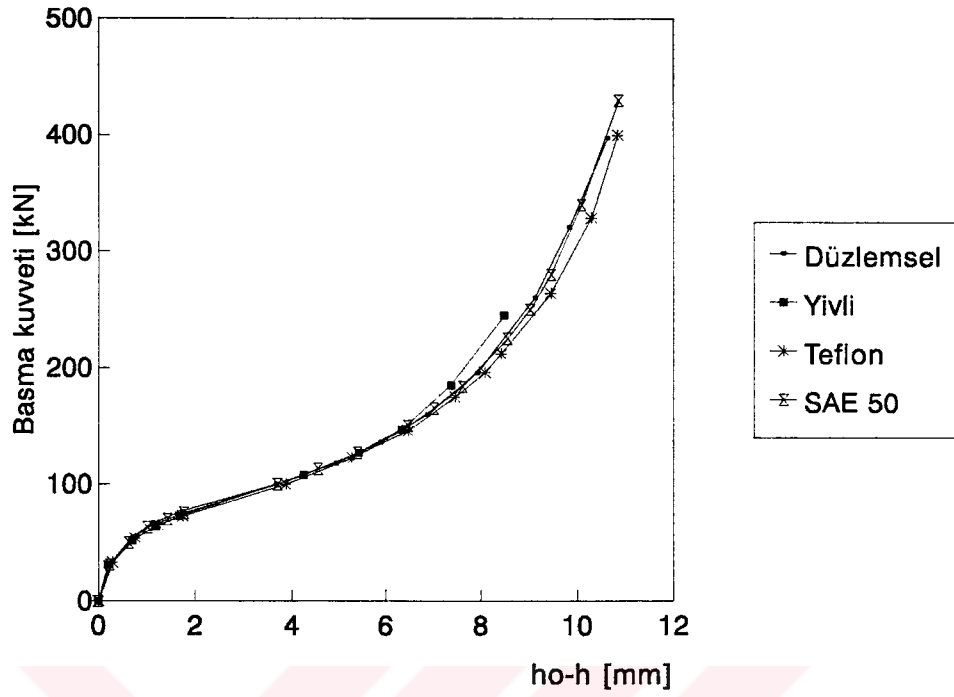
Şekil 5.58 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



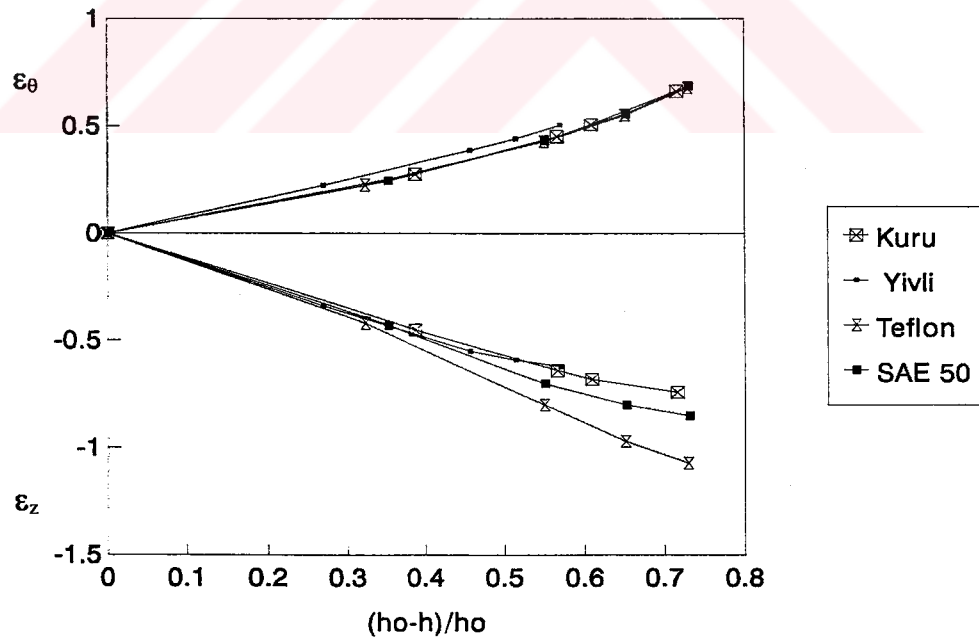
Şekil 5.59 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



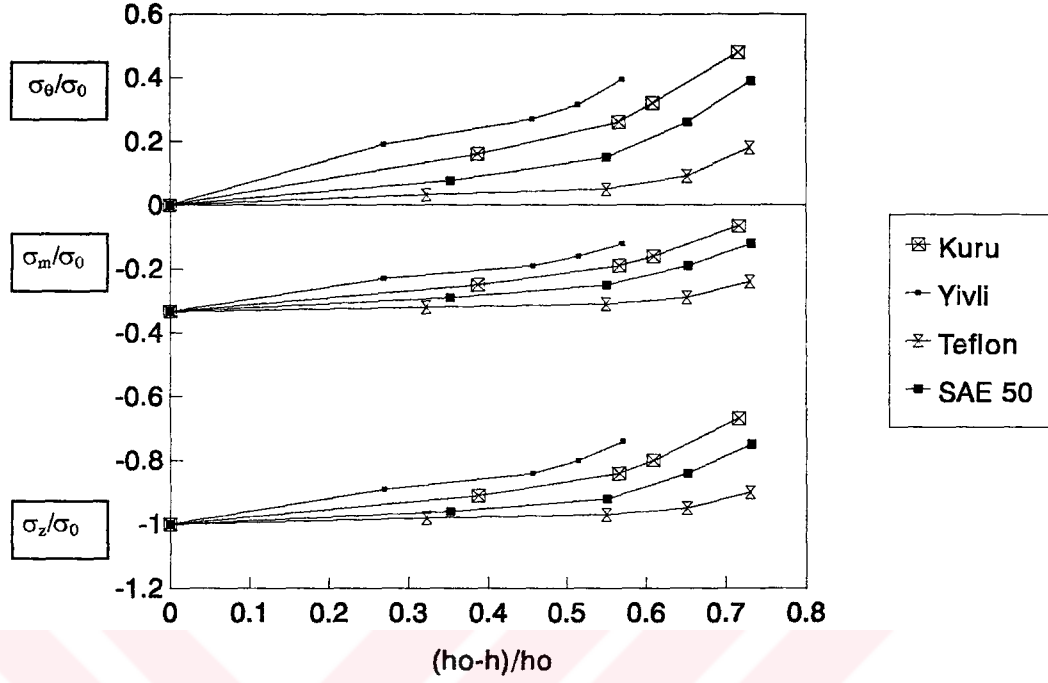
Şekil 5.60 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



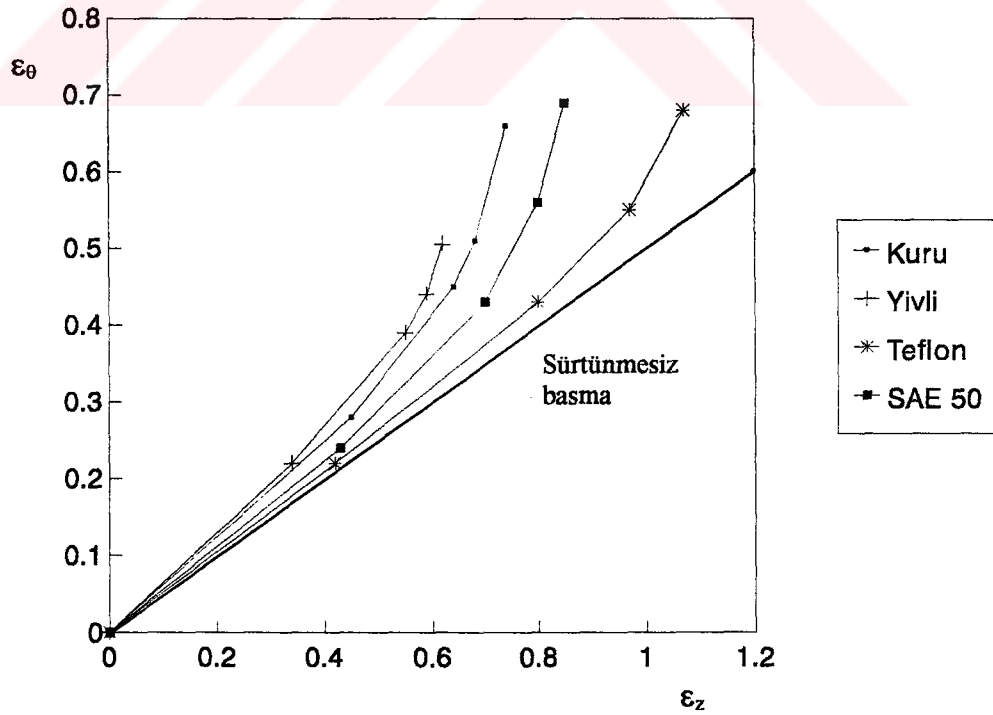
Şekil 5.61 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



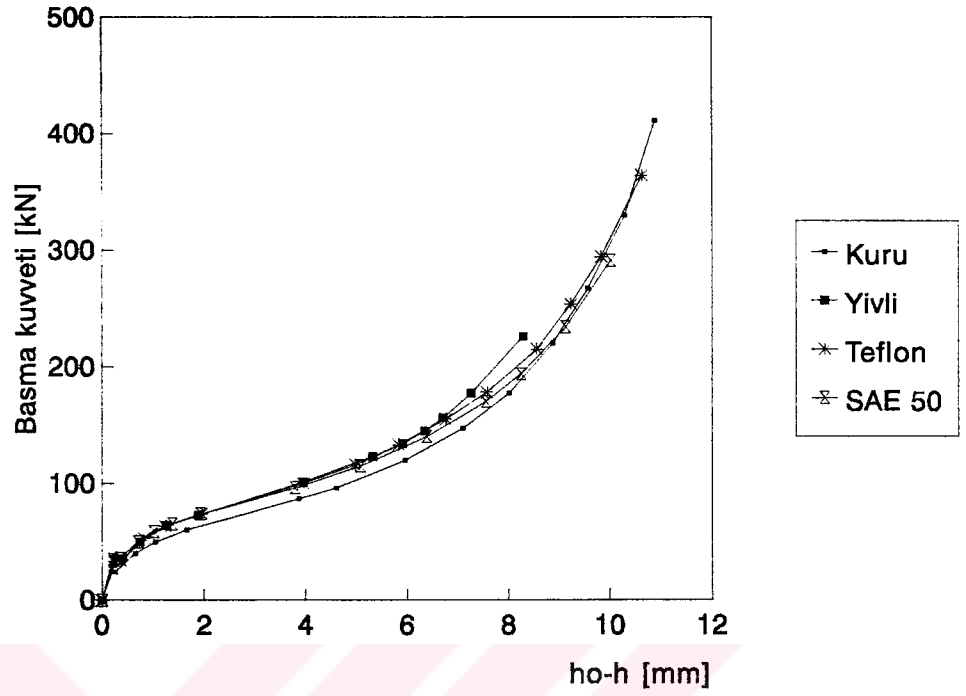
Şekil 5.62 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



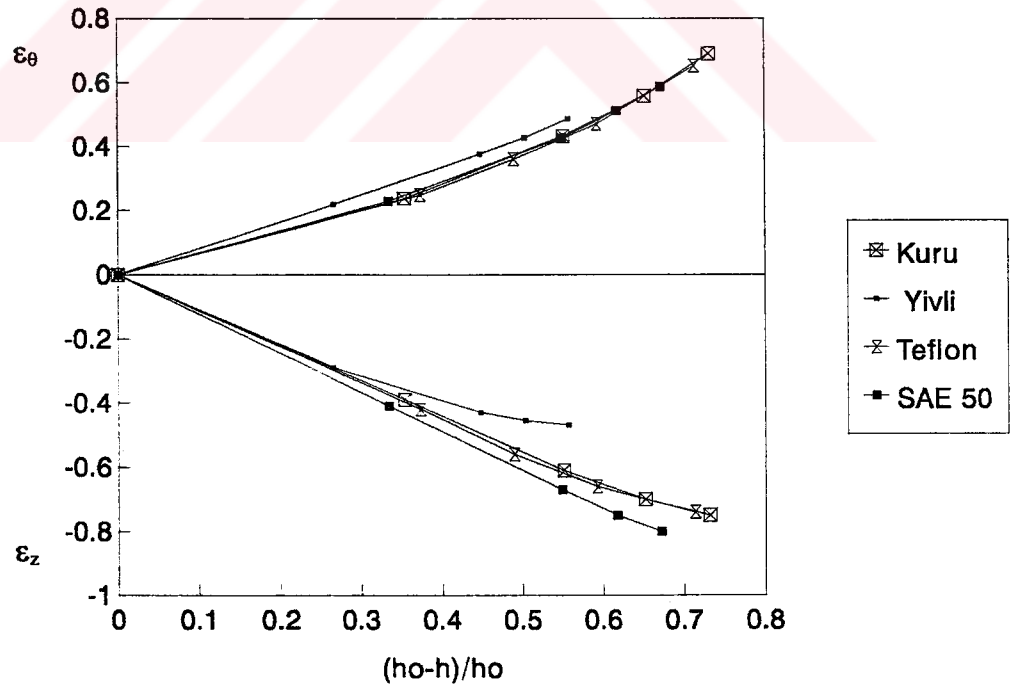
Şekil 5.63 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



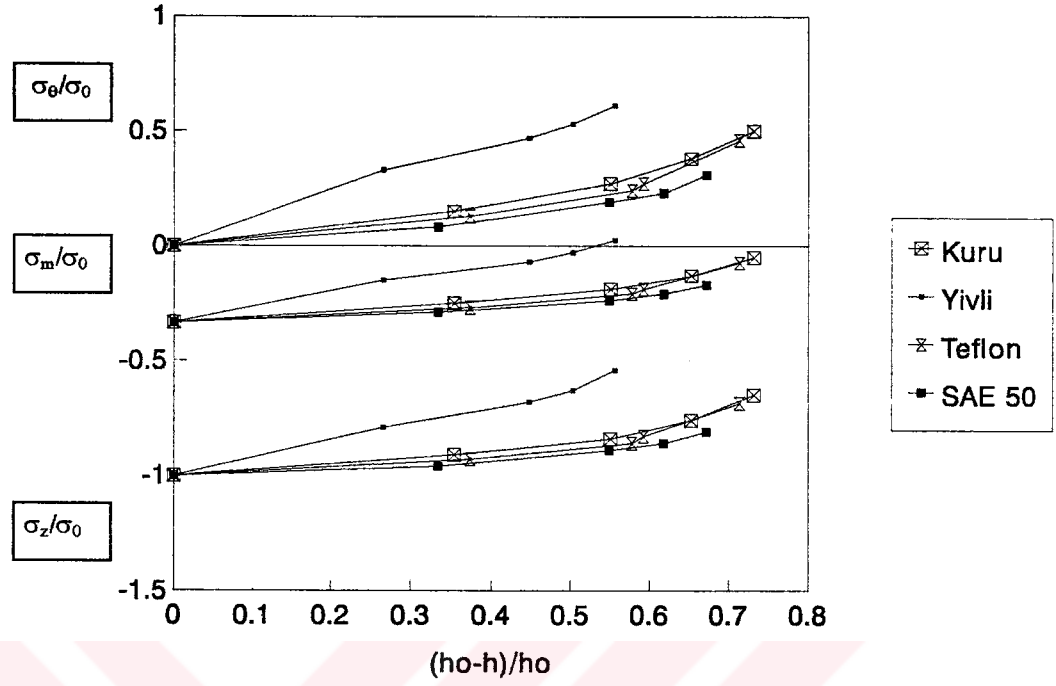
Şekil 5.64 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - aksel birim şekil değiştirme ilişkisi.



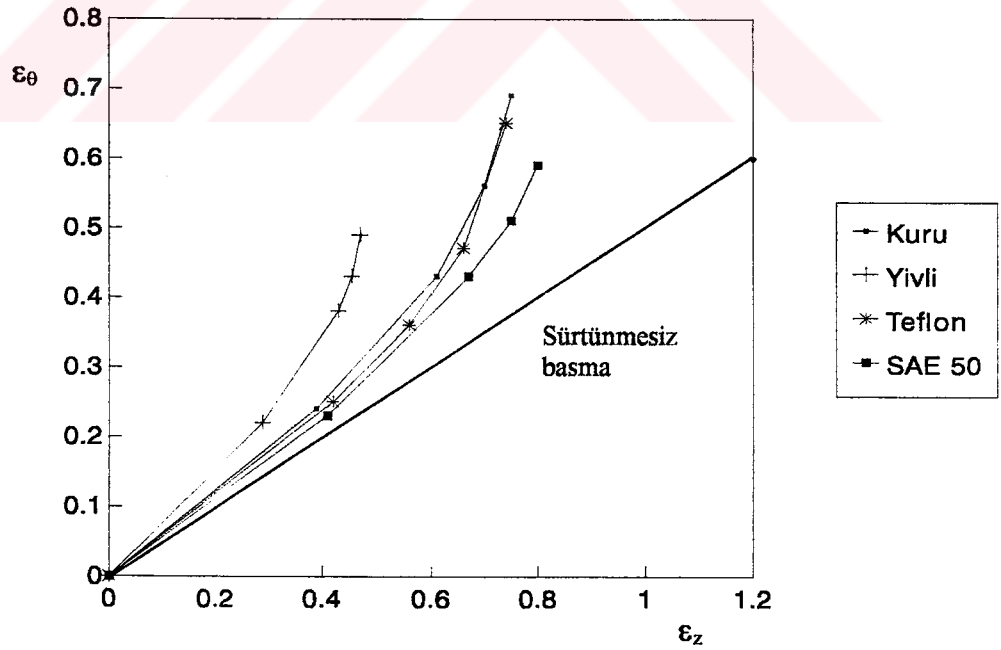
Şekil 5.65 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



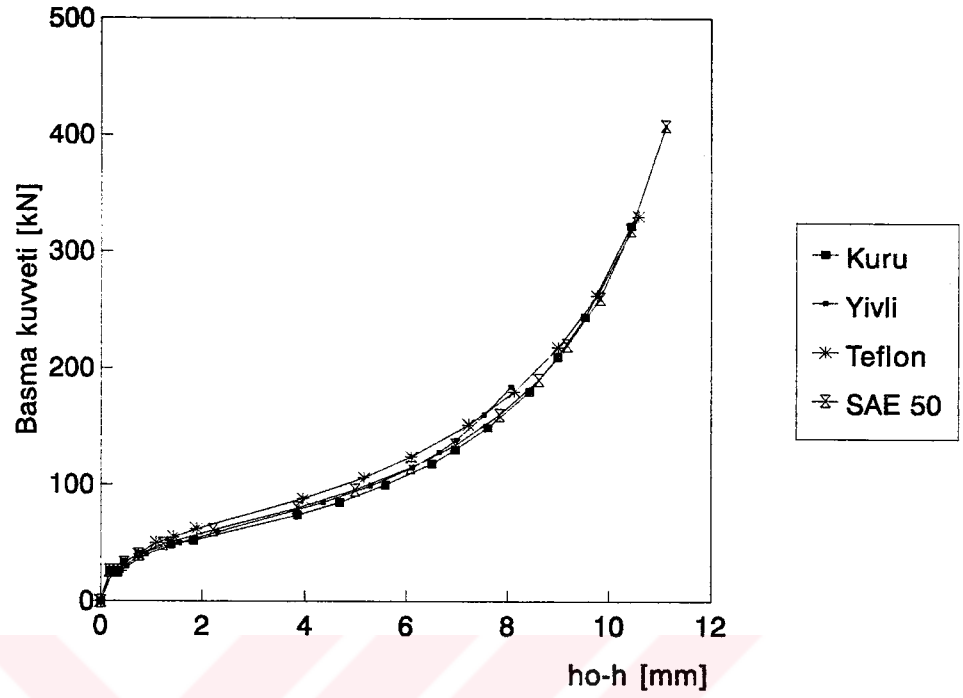
Şekil 5.66 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



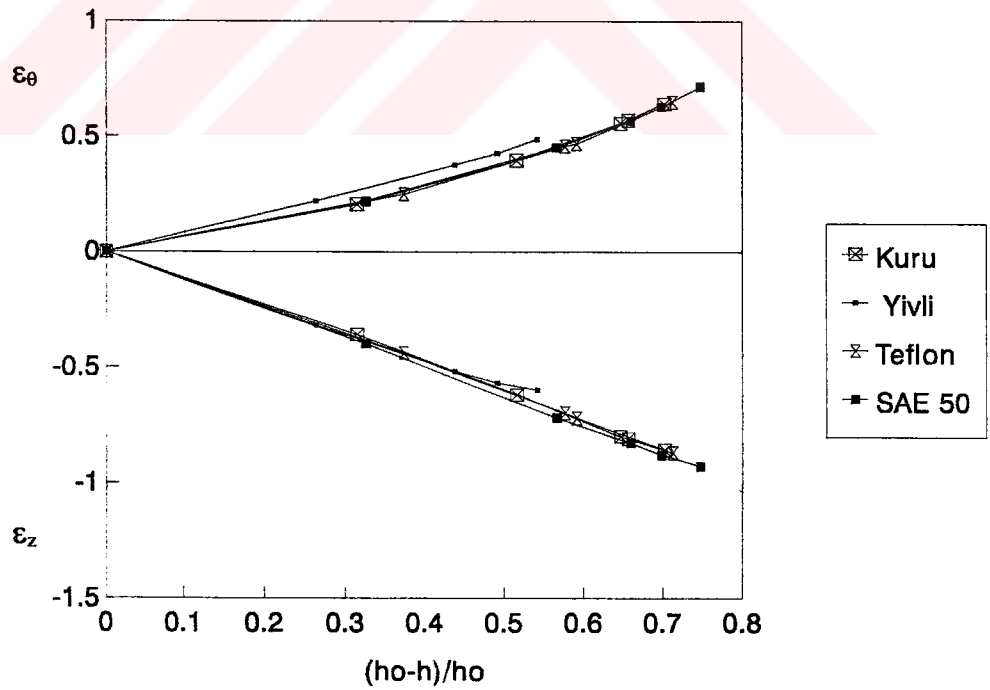
Şekil 5.67 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



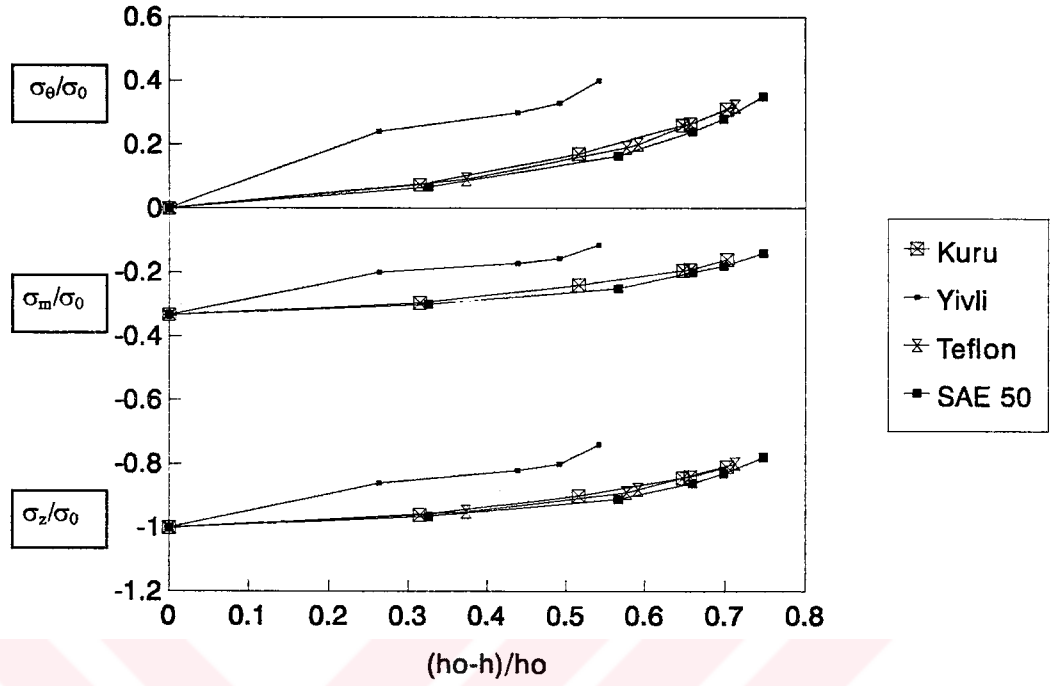
Şekil 5.68 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



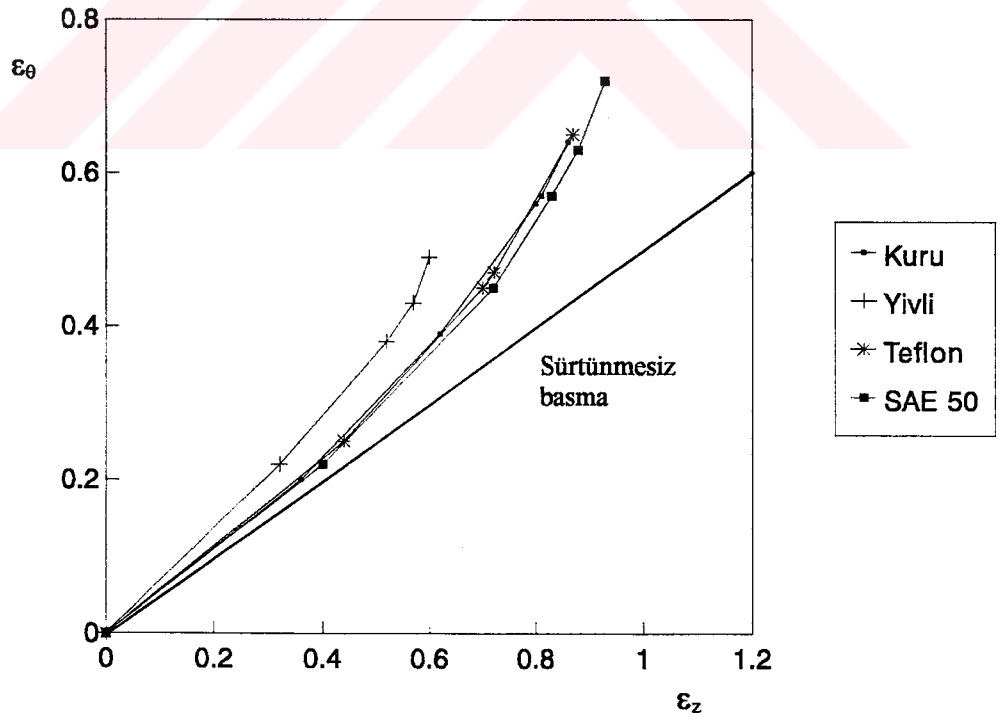
Şekil 5.69 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



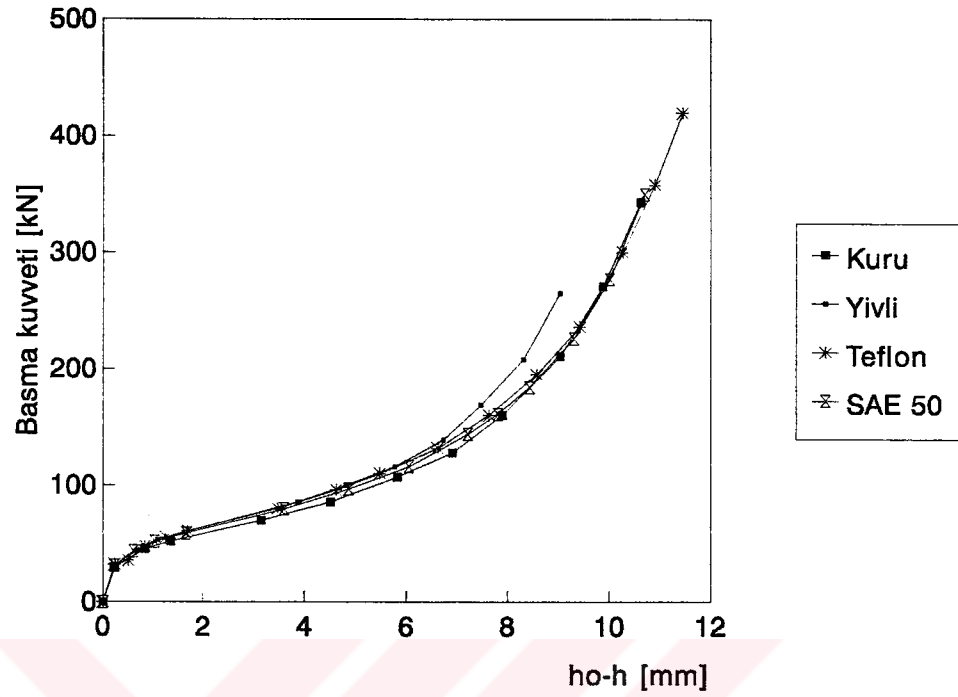
Şekil 5.70 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



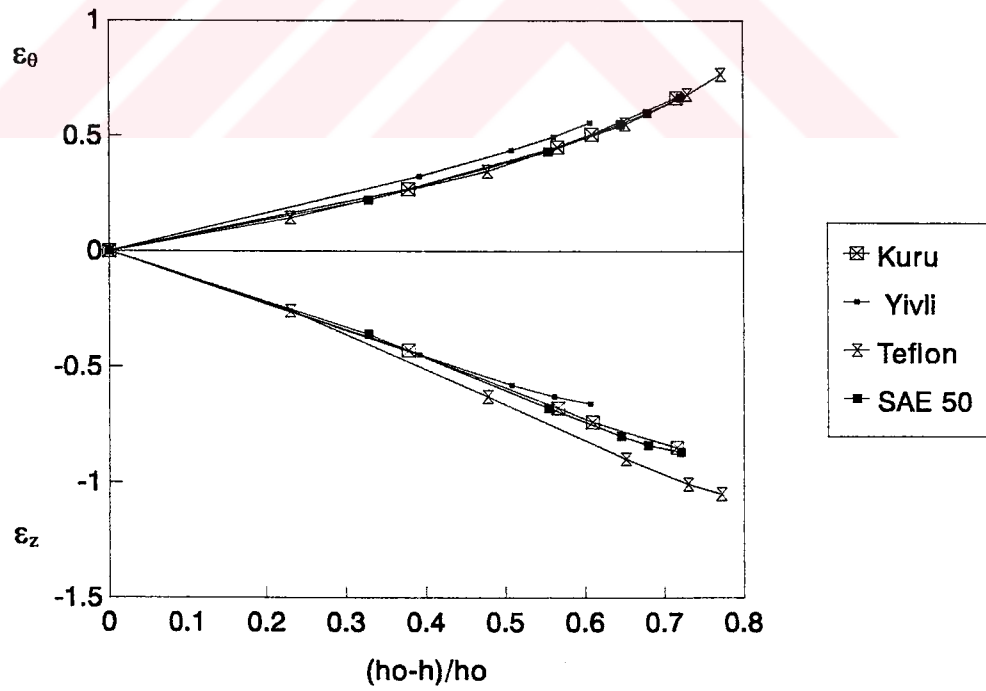
Şekil 5.71 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



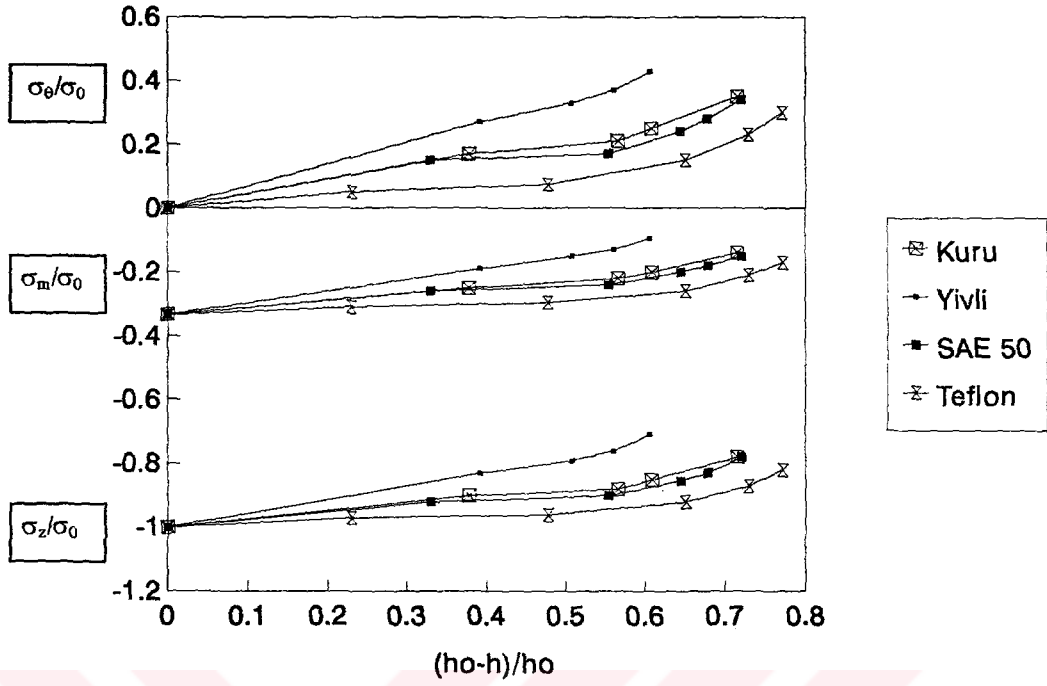
Şekil 5.72 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



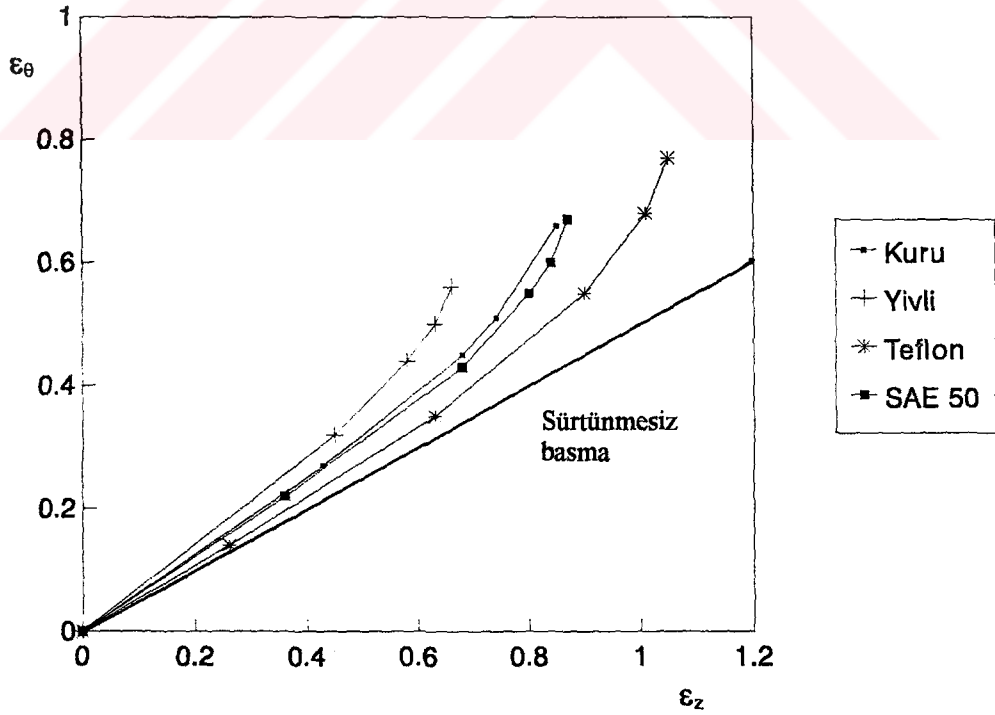
Şekil 5.73 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



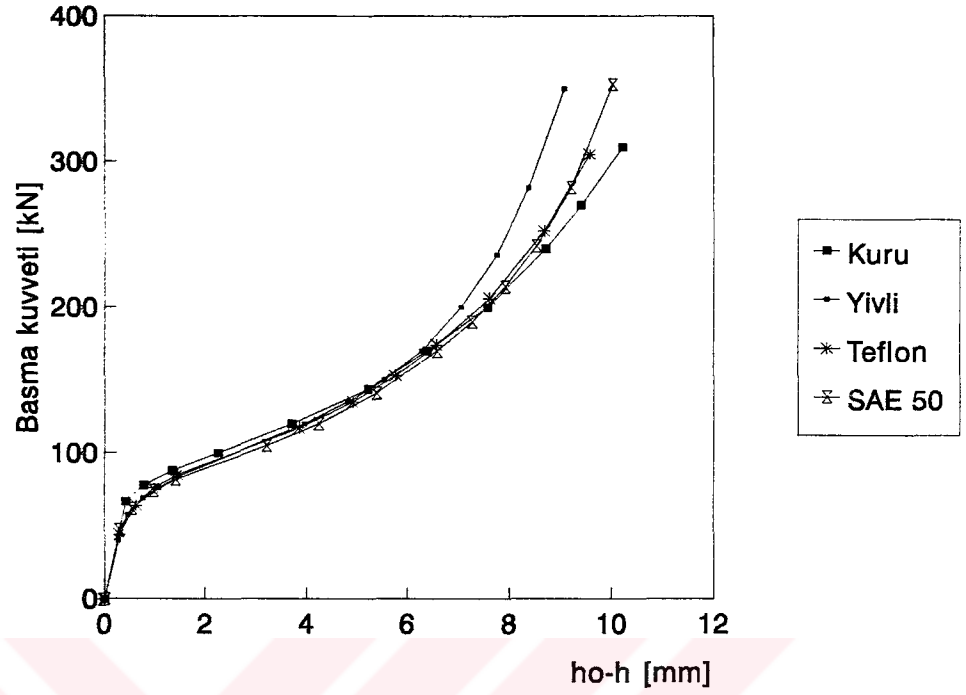
Şekil 5.74 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



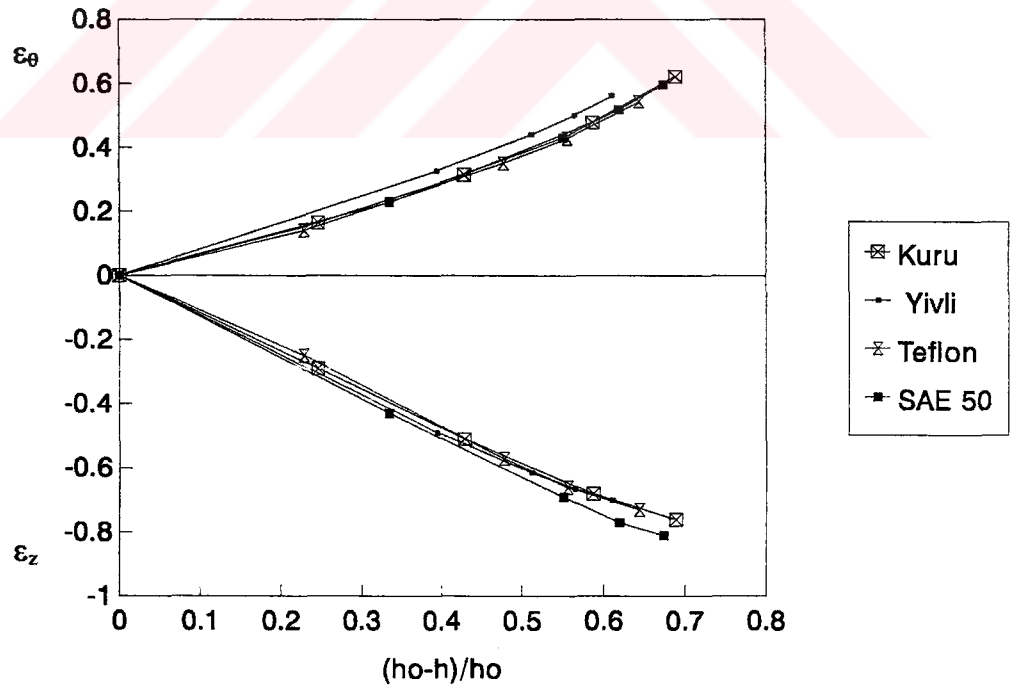
Şekil 5.75 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



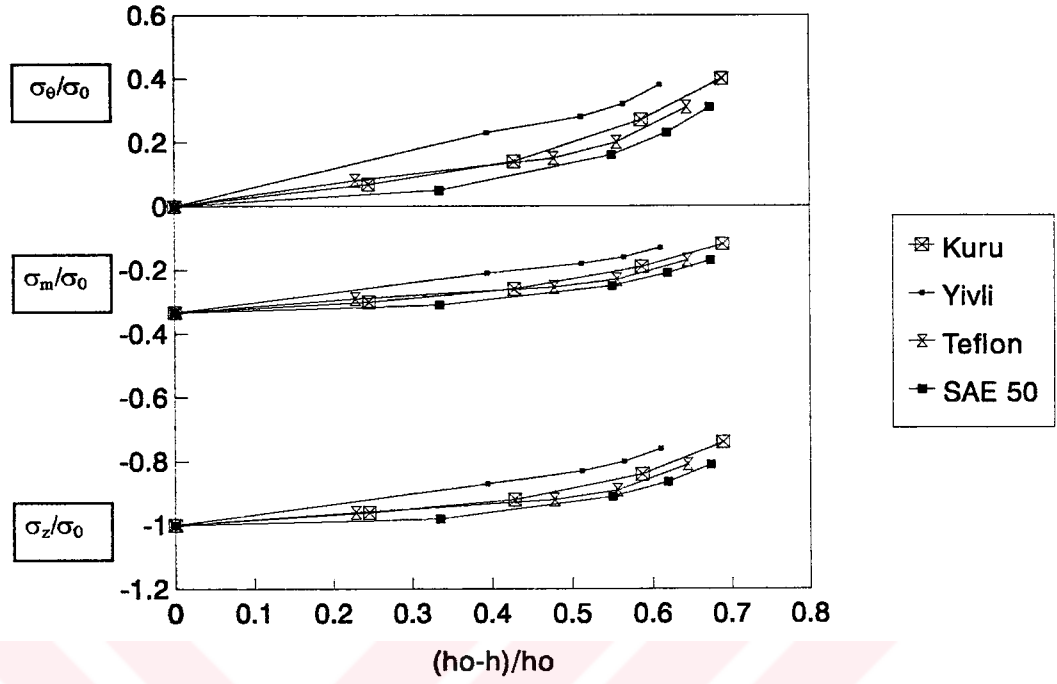
Şekil 5.76 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



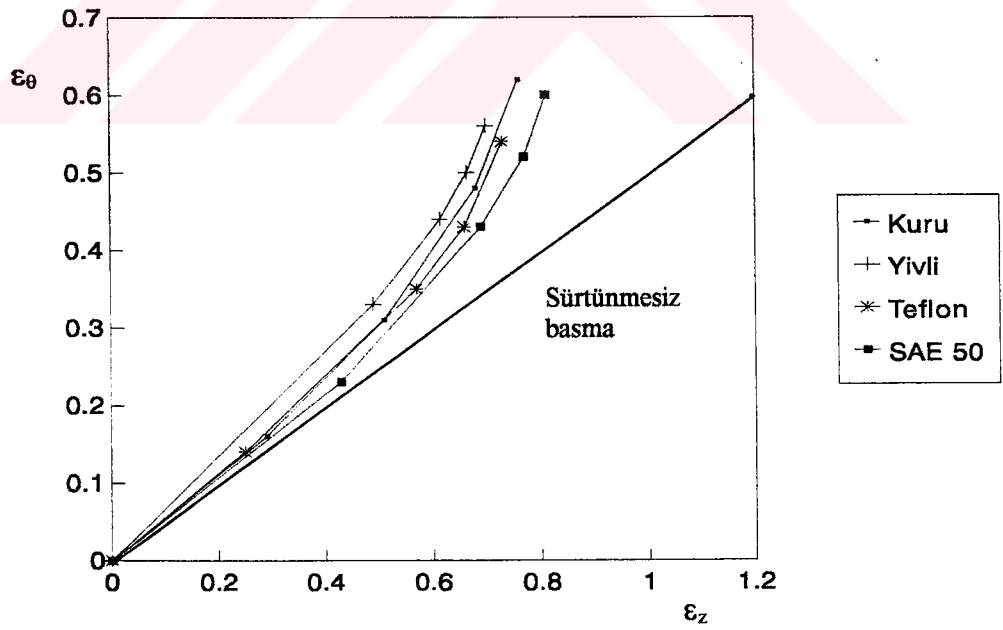
Şekil 5.77 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



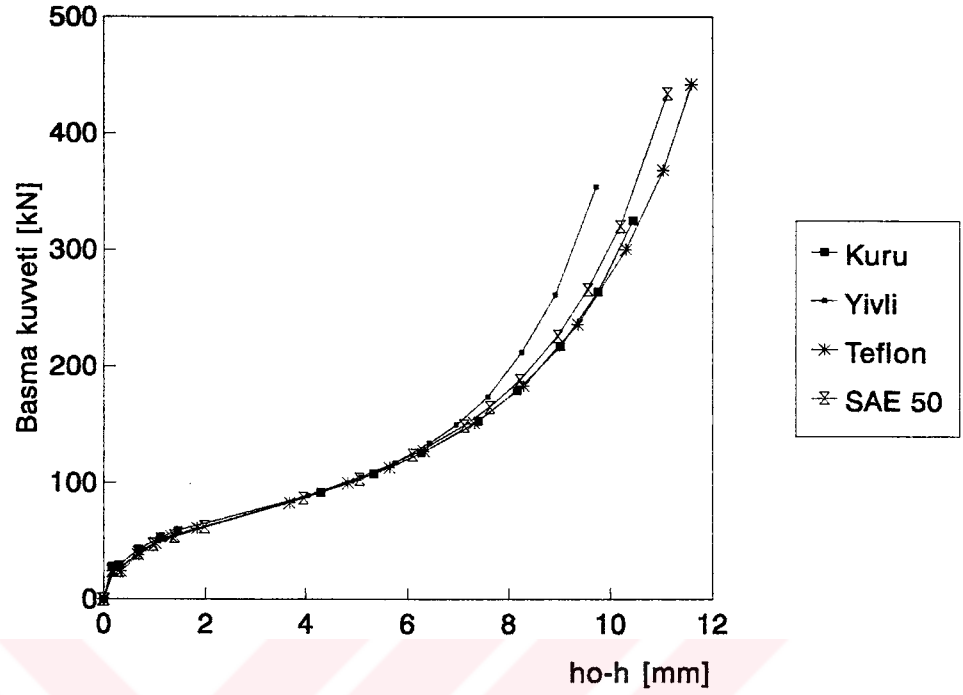
Şekil 5.78 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



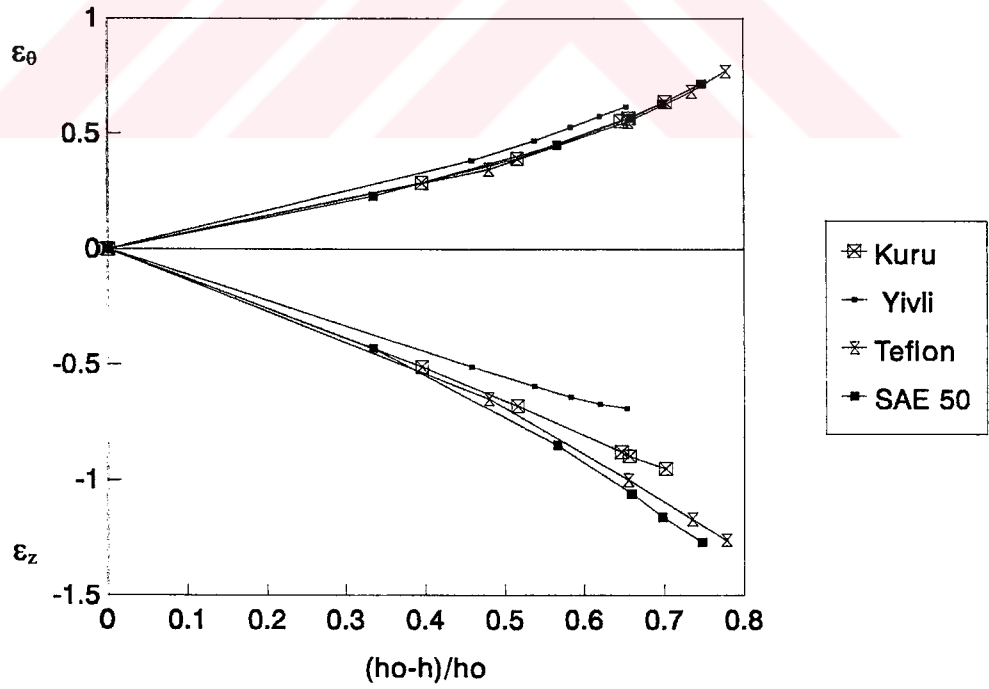
Şekil 5.79 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



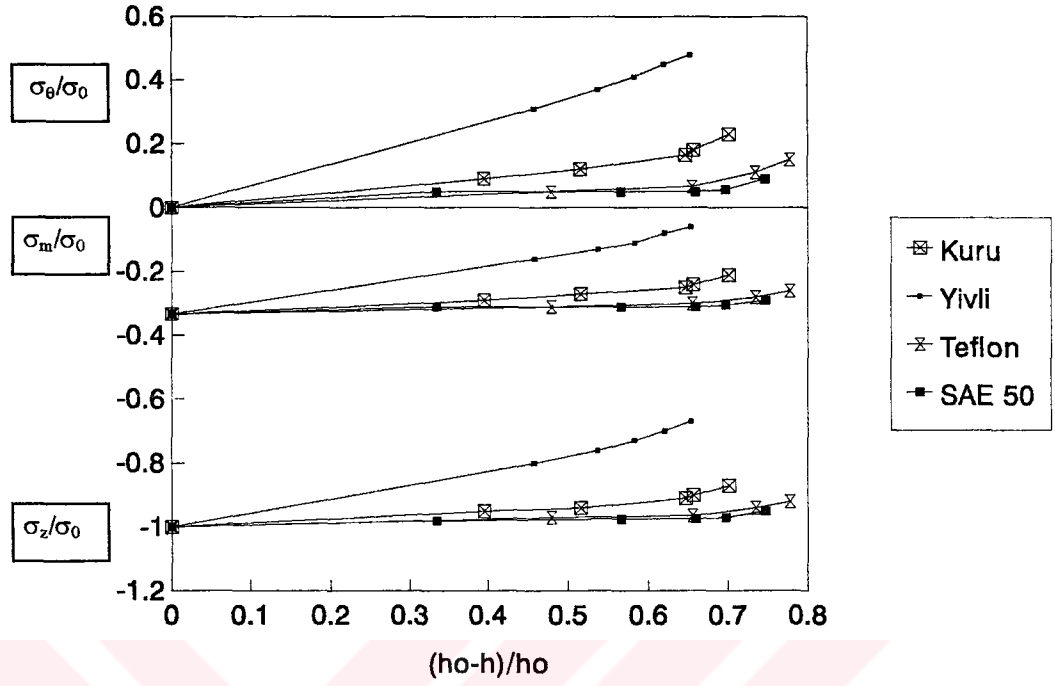
Şekil 5.80 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



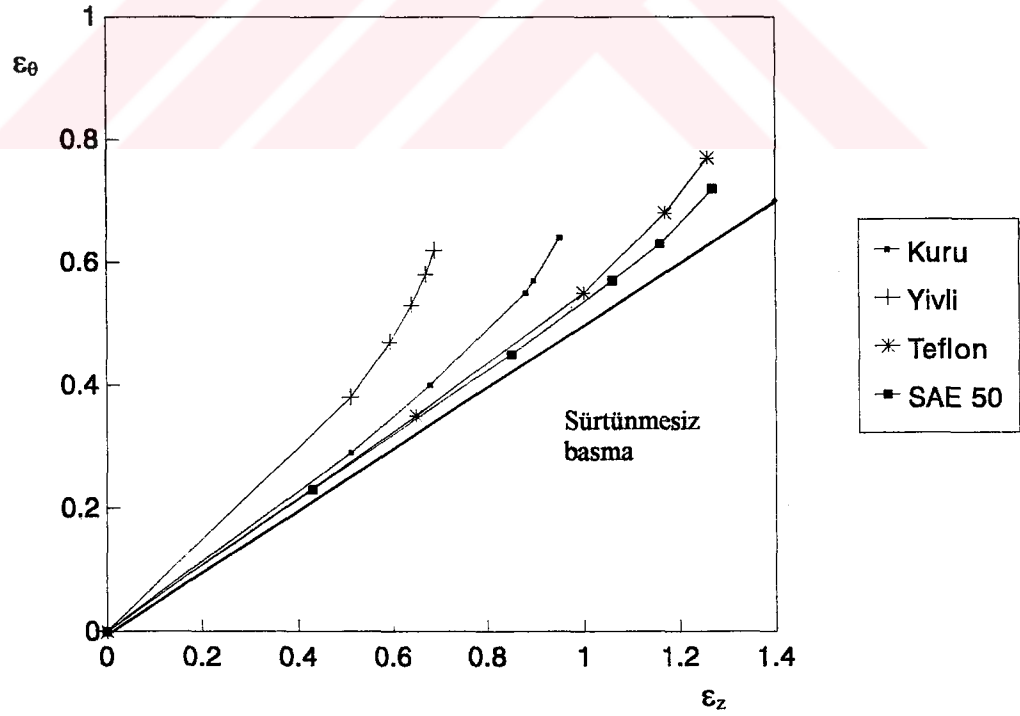
Şekil 5.81 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



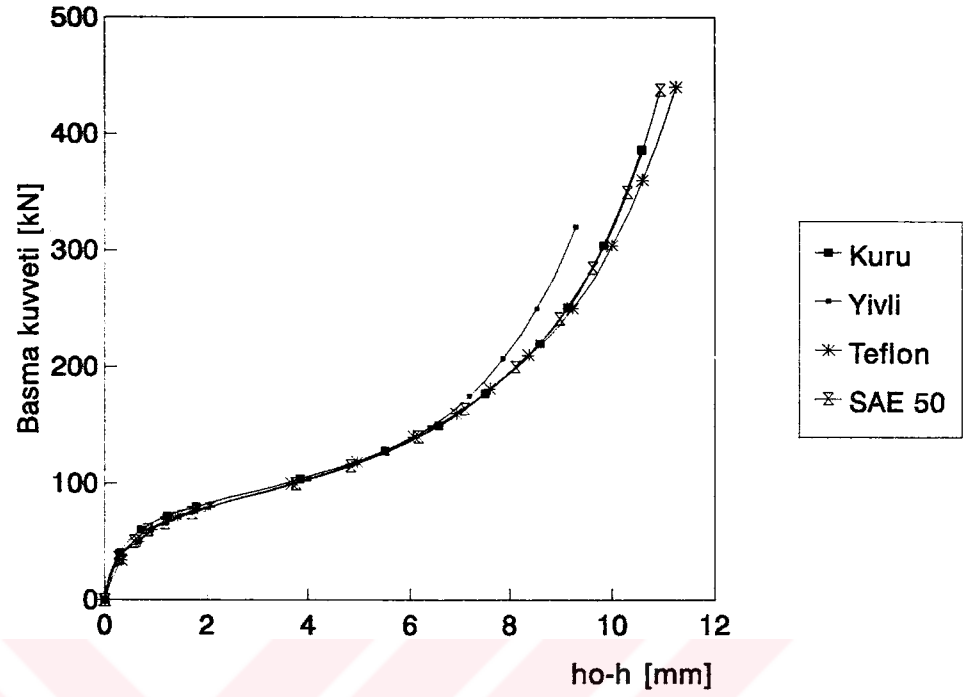
Şekil 5.82 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



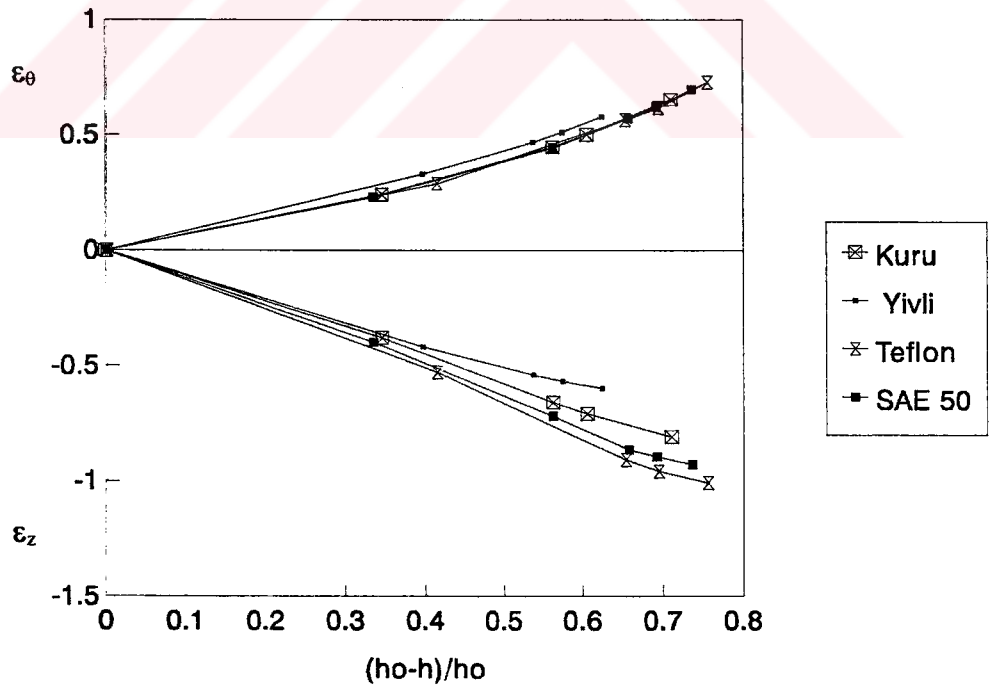
Şekil 5.83 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



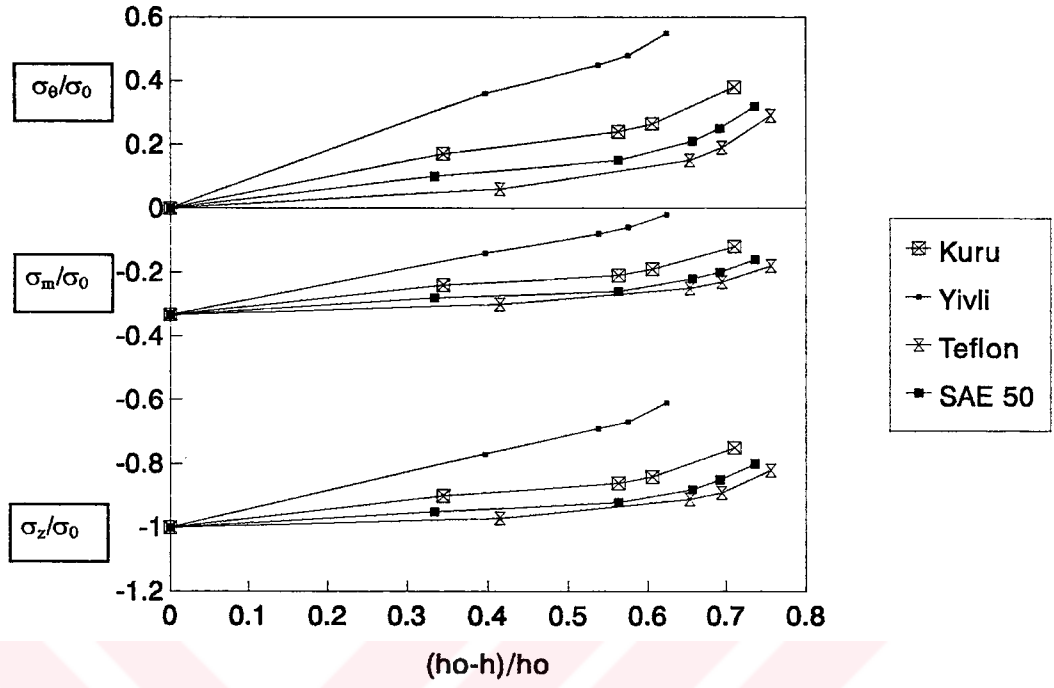
Şekil 5.84 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



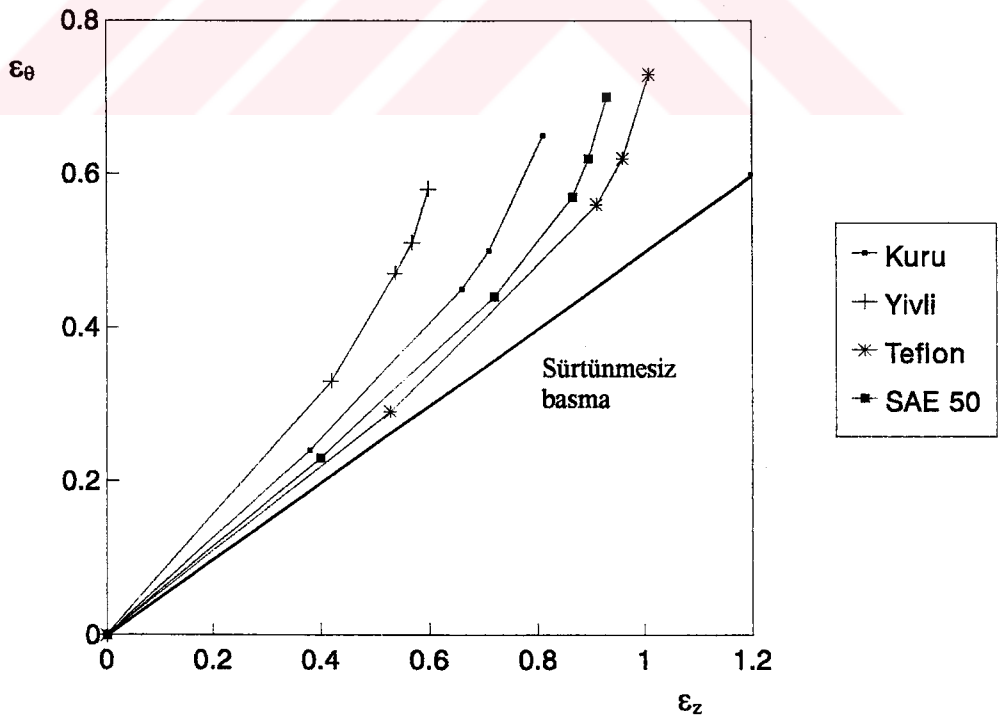
Şekil 5.85 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



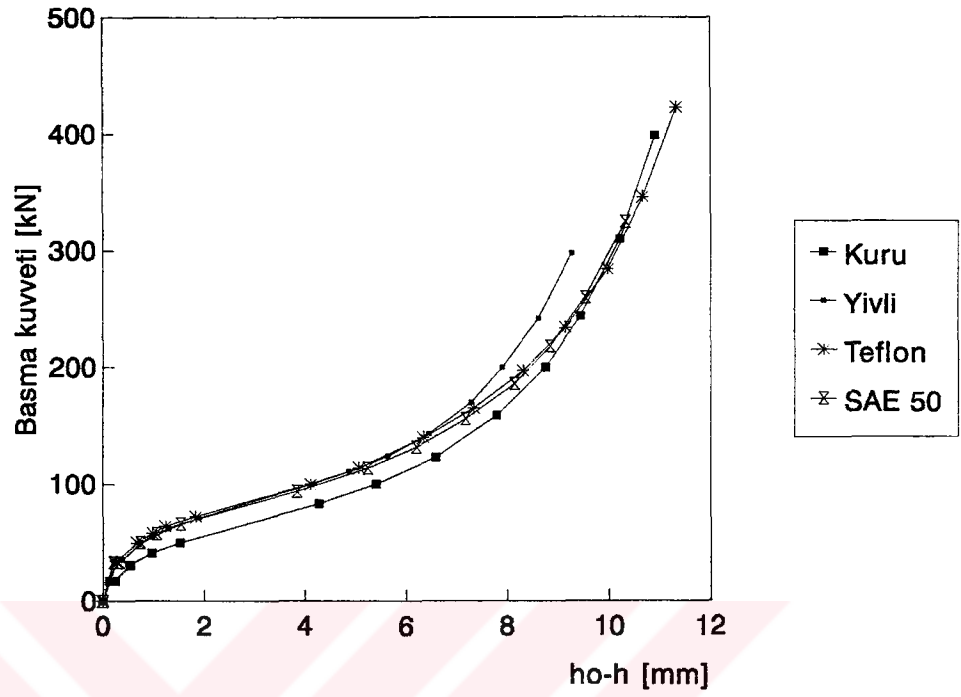
Şekil 5.86 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



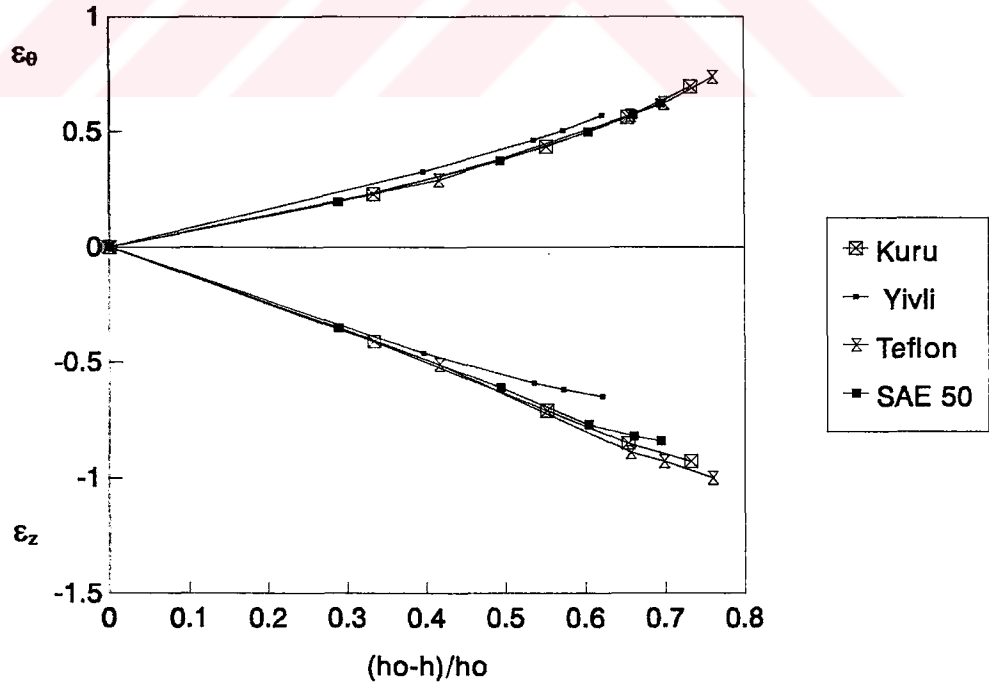
Şekil 5.87 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



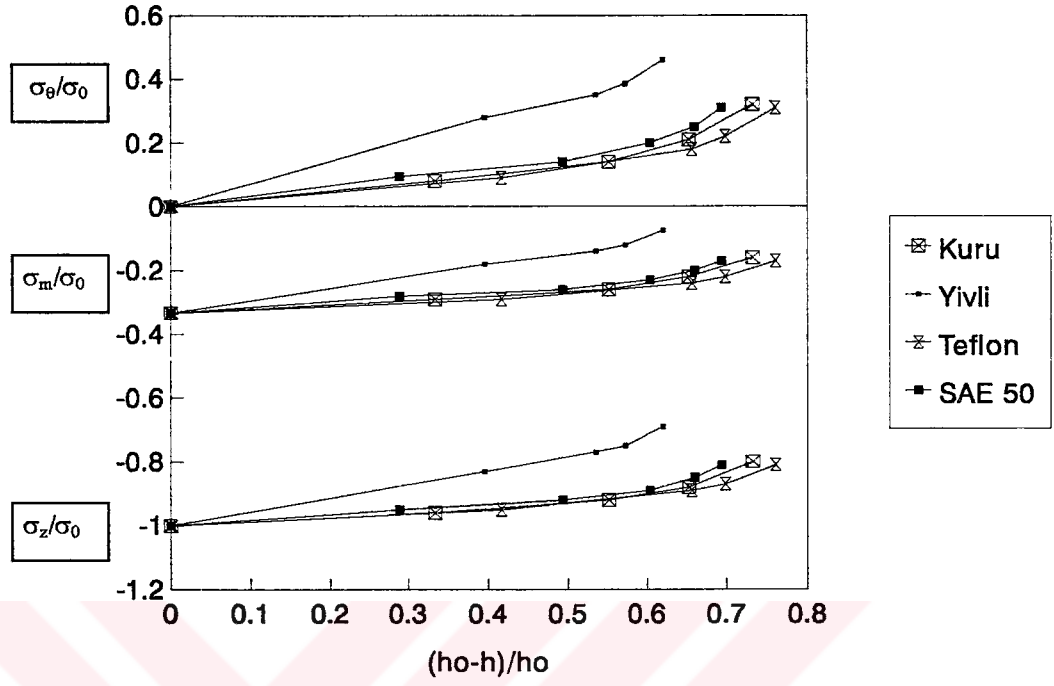
Şekil 5.88 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



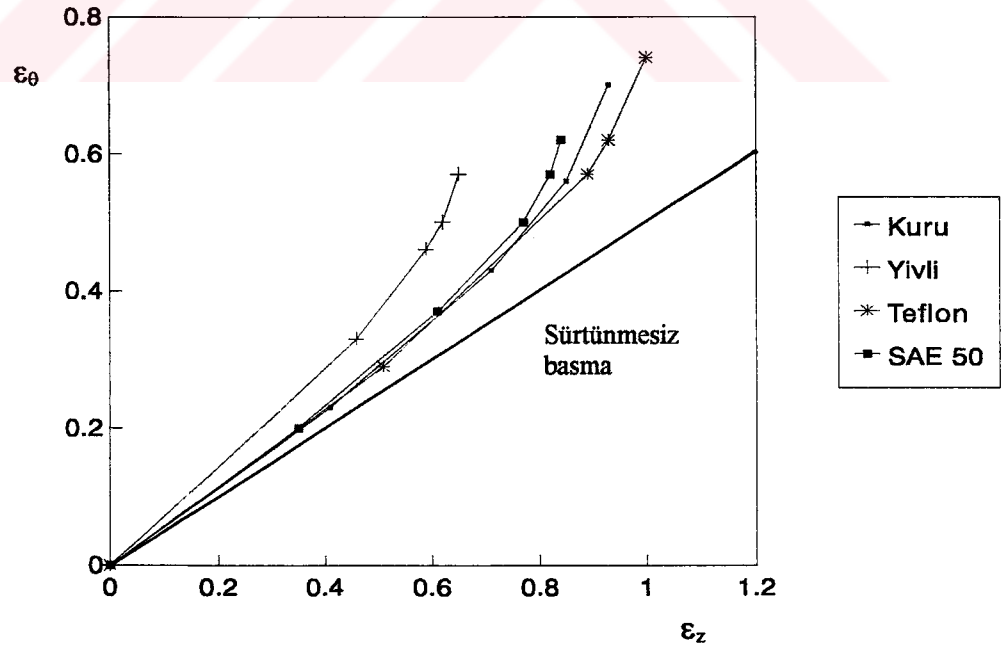
Şekil 5.89 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



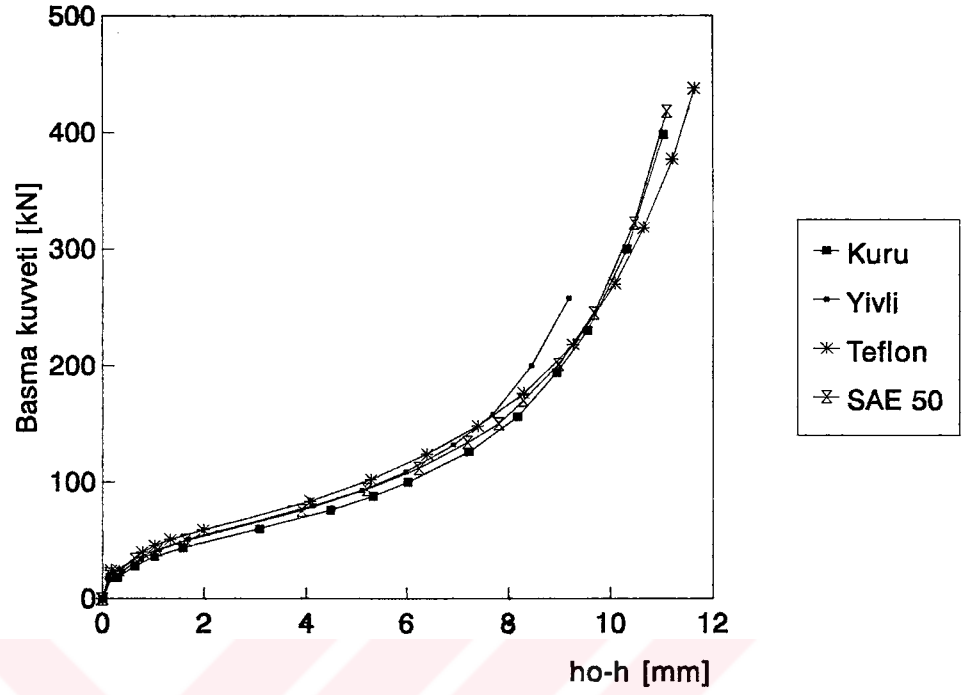
Şekil 5.90 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



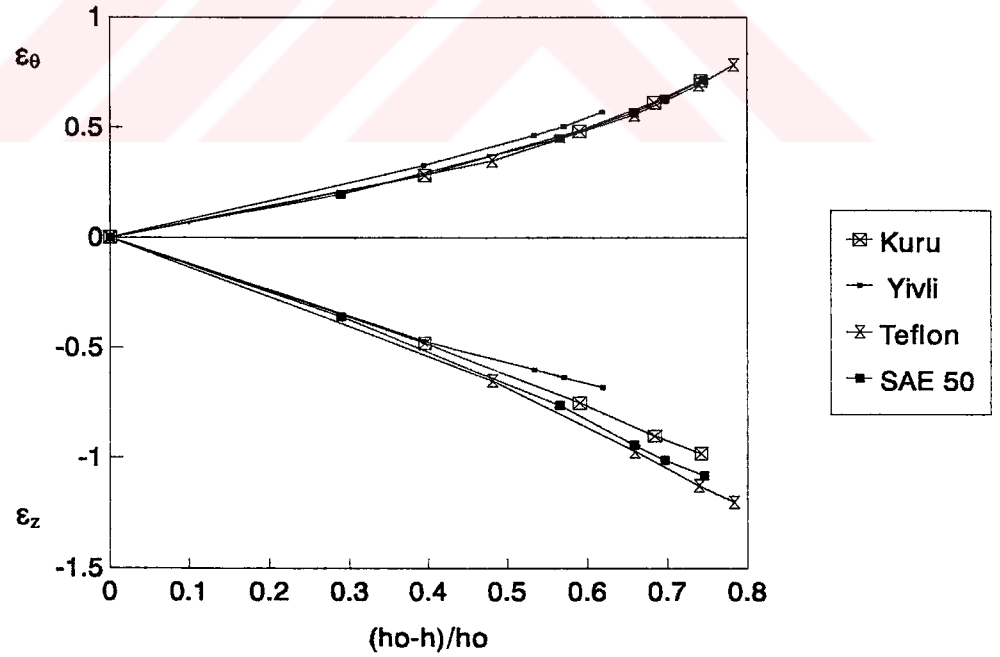
Şekil 5.91 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



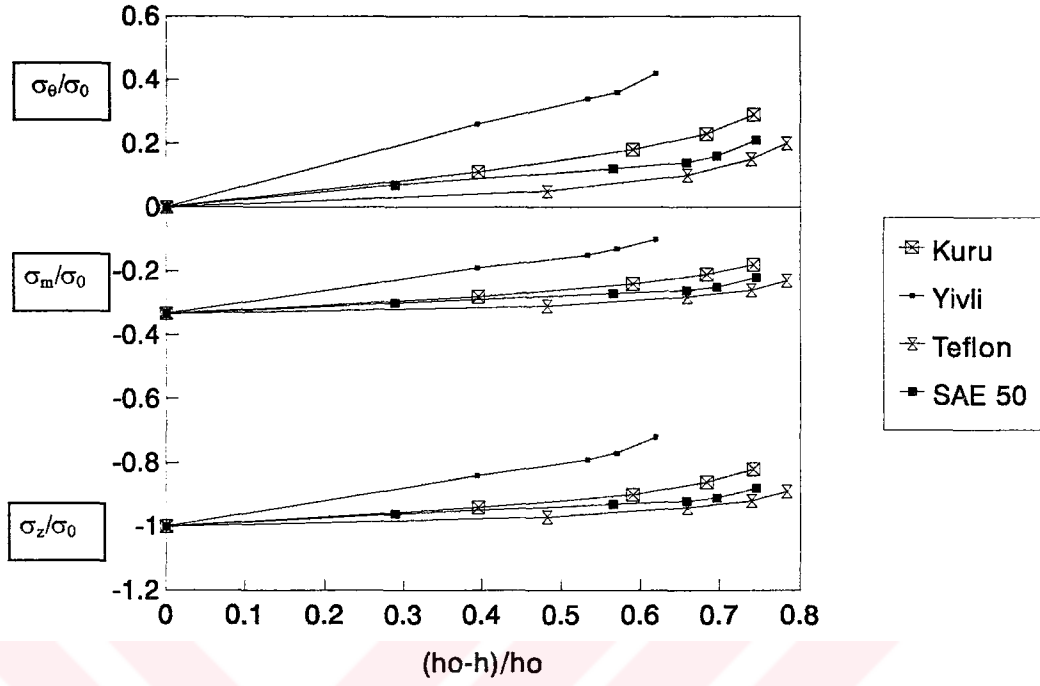
Şekil 5.92 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



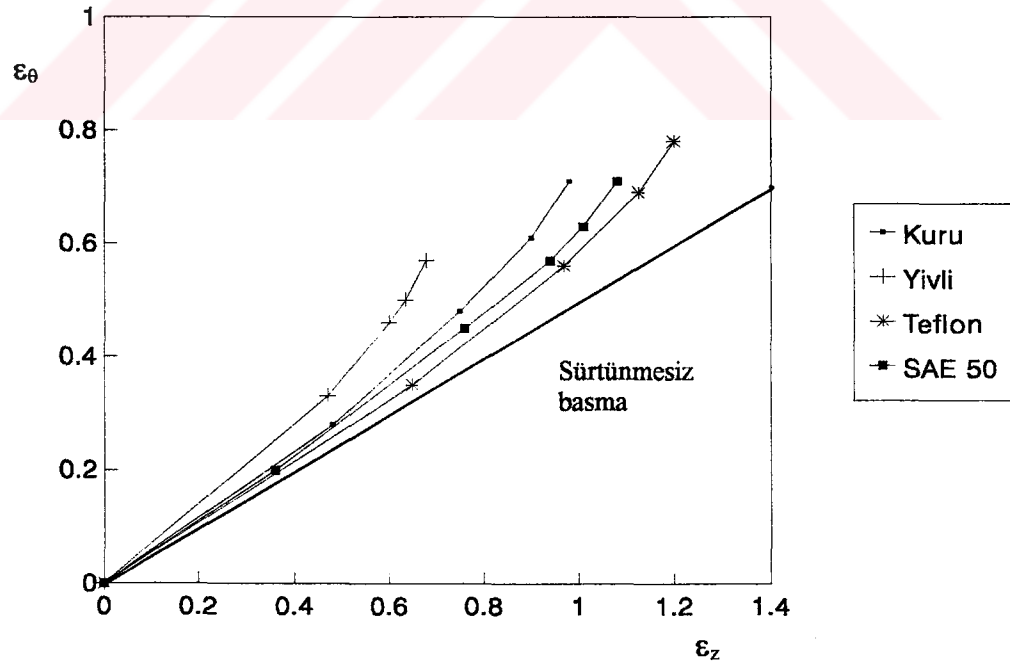
Şekil 5.93 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



Şekil 5.94 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi.



Şekil 5.95 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



Şekil 5.96 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.

Tablo 5.11 Dolu silindir basma deneyi kopma anındaki birim şekil değiştirme-hidrostatik gerilme efektif gerilme oranı sonuçları.

Malzeme	Yağlama	ϵ_{kopma}	$(\sigma_m / \sigma_0)_{kopma}$
AISI 1040 Sıcak haddelenmiş durumda	Kuru	0.94	-0.21
	Teflon	1.35	-0.17
	SAE 50	0.96	-0.21
	Yivli	0.88	-0.015
AISI 1040 Normalize edilmiş	Kuru	1.05	-0.24
	Teflon	1.36	-0.18
	SAE 50	1.36	-0.12
	Yivli	0.87	0.083
AISI 1040 Küreleştirilmiş	Kuru	1.35	-0.12
	Teflon	1.37	-0.23
	SAE 50	1.36	-0.20
	Yivli	0.87	-0.06
AISI 1050 Sıcak haddelenmiş durumda	Kuru	1.26	-0.066
	Teflon	1.31	-0.24
	SAE 50	1.31	-0.12
	Yivli	0.84	-0.12
AISI 1050 Normalize edilmiş	Kuru	1.31	-0.05
	Teflon	1.25	-0.074
	SAE 50	1.11	-0.17
	Yivli	0.81	0.024
AISI 1050 Küreleştirilmiş	Kuru	1.21	-0.16
	Teflon	1.25	-0.16
	SAE 50	1.38	-0.14
	Yivli	0.78	-0.115
AISI 4140 Sıcak haddelenmiş durumda	Kuru	1.26	-0.14
	Teflon	1.48	-0.17
	SAE 50	1.28	-0.15
	Yivli	0.93	-0.094
AISI 4140 Normalize edilmiş	Kuru	1.17	-0.12
	Teflon	1.03	-0.17
	SAE 50	1.12	-0.17
	Yivli	0.94	-0.13
AISI 4140 Küreleştirilmiş	Kuru	1.21	-0.21
	Teflon	1.50	-0.26
	SAE 50	1.38	-0.29
	Yivli	1.06	-0.06
AISI 5140 Sıcak haddelenmiş durumda	Kuru	1.24	-0.12
	Teflon	1.41	-0.18
	SAE 50	1.33	-0.16
	Yivli	0.98	-0.02
AISI 5140 Normalize edilmiş	Kuru	1.32	-0.16
	Teflon	1.43	-0.17
	SAE 50	1.19	-0.17
	Yivli	0.97	-0.075
AISI 5140 Küreleştirilmiş	Kuru	1.36	-0.18
	Teflon	1.53	-0.23
	SAE 50	1.37	-0.22
	Yivli	0.97	-0.10

Dolu silindir basma deneylerinden elde edilen basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi eğrilerinden sürtünme katsayısının büyük olduğu koşullarda genellikle malzemelerin daha az yükseklik azalması değeri gösterdiği ve aynı yükseklik azalması miktarı için daha büyük kuvvetin gerektiği görülür. Yivli basma takımları nedeniyle sürtünmenin arttığı deneylerde hasar anındaki kuvvetin ve yükseklikteki birim azalmanın değeri küçülmektedir. Özellikle hasar anında yükseklik doğrultusundaki % şekil değiştirme malzeme cinsine ve ısı işlem durumuna bağlı olarak % 8 ile % 19 arasında değişmektedir. Söz konusu değişimin geniş sınırlar arasında olması, bu parametrenin (yükseklik doğrultusundaki % şekil değişiminin), hasara neden olan 184 kN ve 442 kN basma kuvveti değerlerinden daha anlamlı olduğu izlenimini doğurmaktadır.

Çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi eğrilerinden, çevresel birim şekil değiştirme eğrilerinin izlediği yolun sürtünme koşullarına çok az bağımlı olduğu görülmektedir. Eksenel birim şekil değiştirme eğrilerinin izlediği yol ise sürtünme koşullarına çevresel birim şekil değiştirmelere kıyasla daha fazla bağımlıdır. Sonuç olarak deney örneği ile basma takımları arayüzündeki kinematik koşulların çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerin yükseklik azalması ile değişimi eğrilerini fazla etkilemedikleri açıktır. Bununla beraber, eksenel birim şekil değiştirme eğrilerinin bu koşullara az da olsa daha hassas oldukları söylenebilir. Çevresel birim şekil değiştirmelerin yükseklik azalması ile değişimi eğrilerinin görünüşleri birbirine benzemektedir. Aynı husus eksenel birim şekil değiştirmeler için de geçerlidir.

Sürtünme katsayısının büyük olduğu yivli koşullarda aynı yükseklik azalması değerlerinde daha büyük çevresel birim şekil değiştirmeleri görülür. Bununla beraber, sürtünme katsayısının küçük olduğu koşullarda daha büyük çevresel birim şekil değiştirmeleri ve yükseklik azalması değerleri elde edilmiştir.

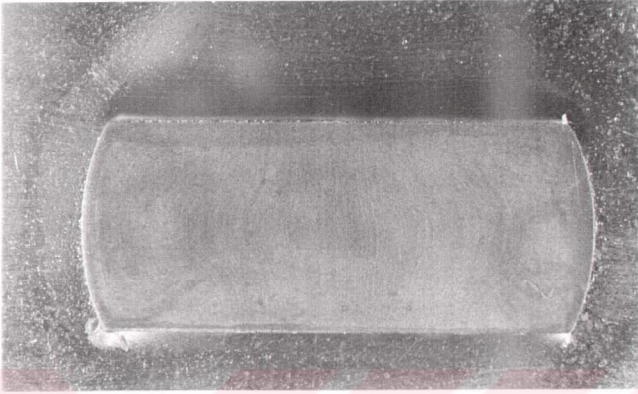
Gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi eğrilerinden malzemelerin sürtünme katsayılarının büyük olduğu koşullarda daha

büyük gerilmelerin etkisinde kaldığı ve daha küçük yükseklik azalması değerlerinde hasara uğradığı görülür.

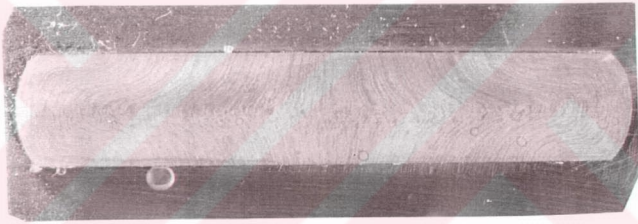
Çevresel - aksenal birim şekil değiştirme eğrilerinde, sürtünme arttıkça üniform basma halinden, diğer bir deyişle eğimi $-1/2$ ($\epsilon_{\theta\theta} = -1/2 \epsilon_{zz}$) olan ideal doğrudan uzaklaşmaktadır. Üniform basmaya en yakın eğrileri küreleştirilmiş AISI 4140 çeliği göstermiştir. Isıl işlem durumları çevresel - aksenal birim şekil değiştirme eğrilerine küreleştirilmiş durum hariç belirgin bir etki göstermemektedir. Küreleştirilmiş durumlarda üniform basmaya daha yakın eğriler elde edilmiş ve hasara yakın çevresel birim şekil değiştirmelerdeki artma daha az olmuştur. Hasar anındaki çevresel birim şekil değiştirme değerleri ısı işlem durumlarından belirgin bir şekilde etkilenmemekte, fakat aksenal birim şekil değiştirme küreleştirilmiş durumlarda daha büyük değerler göstermiştir.

(1) Basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi eğrilerinden malzemelerin şekil değiştirebilmeleri için gerekli kuvvetin saptanmasında, (2) Çevresel ve aksenal birim şekil değiştirmelerinin yükseklik azalması ile değişimi eğrilerinden malzemelerin sürtünmeye bağımlı olarak çevresel birim şekil değiştirme miktarlarının saptanmasında, (3) Gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi eğrilerinden şekil değiştirmenin her anında malzemeyi etkileyen gerilme durumları değerlerinin ve bu değerlerin sürtünme koşullarıyla değişimlerinin saptanmasında, (4) Malzemelerin yalnızca çevresel - aksenal birim şekil değiştirme eğrilerinin bilinmesi dövülebilirliğin saptanmasında gerilme değerlerinin bulunmaması ve değerlerin birbirine çok yakın olması nedeniyle yeterli değildir. Bu eğriler kullanılarak sürtünme şartlarının dövme işlemine etkisinin saptanmasında faydalanılabilir.

Her tip malzeme ve ısı işlem durumu için elde edilen dört farklı grafik, dolu silindir basma deneylerinin sürtünme koşullarındaki farklılıklar nedeniyle yeterince güvenilir olmadığını gösterir.



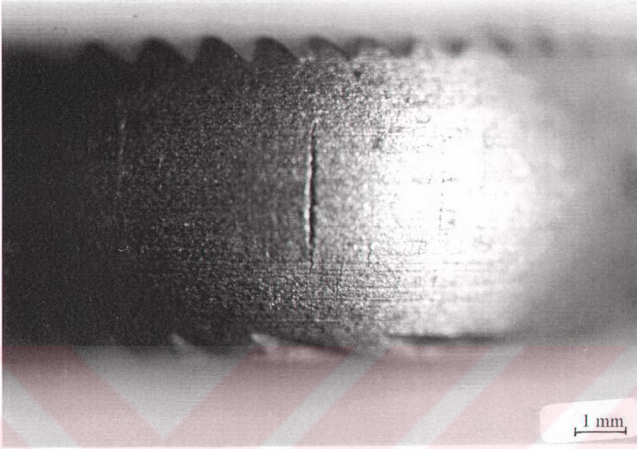
(a)



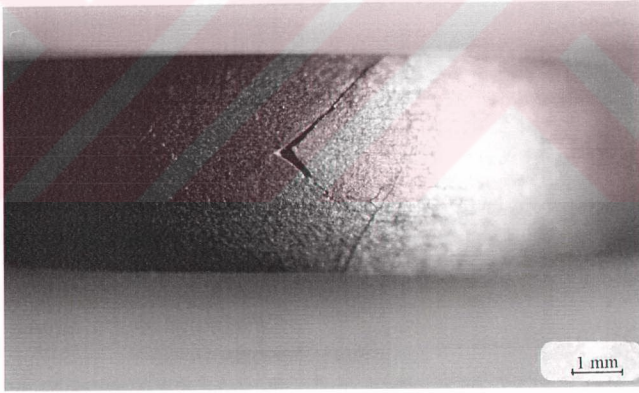
(b)

Şekil 5.97 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin dolu silindir basma deneyinde şekil değiştirmiş deney örneğinde akma çizgileri. (a) % 44 şekil değiştirmiş. (b) % 75 şekil değiştirmiş.

Dolu silindir basma deneyinde akma çizgilerini gösteren Şekil 5.97' den en az şekil değiştiren bölgenin deney örneğinin basma takımı ile temas ettiği eksene yakın bölgesi, en fazla şekil değiştiren bölgenin ise çapraz köşeler birleştirilerek dörde bölünen kesitin serbest yüzeyler bölümü olduğu görülür. Sonuç olarak bu tür bir inceleme ile en az ve en çok şekil değiştirmiş bölgeler ve/veya ölü bölgeler hakkında kalitatif bilgi edinile bildiği söylenebilir. Şekil değişimi ilerledikçe liflerin giderek uzadıkları ve yakınlaştıkları açıktır. Şekil değişiminin homojen (üniform) olmadığı da net olarak görülmektedir; sürtünme arttıkça şekil değişimi de giderek daha heterojen olur.



(a)



(b)

Şekil 5.98 Dolu silindir basma deneyinde oluşan çatlak görüntüleri (x10): (a) Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliği yivli basma takımı ile basılmış. (b) Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliği düz basma takımı ile kuru basılmış.

Şekil 5.98 (a) eksenel gerilmenin sıfırdan büyük değerde olması nedeniyle oluşan normal (90°) çatlağı, (b) eksenel gerilmenin sıfırdan küçük değerde olması nedeniyle

oluşan kayma (45^0) çatlağını göstermektedir. Yüksek sürtünme koşulları nedeniyle eksenel gerilmenin pozitif olduğu durumlarda çekme eksenel gerilmesi oluşması nedeniyle 90^0 çatlak meydana gelir. Düşük sürtünme koşulları nedeniyle eksenel gerilmenin negatif olduğu durumlarda basma eksenel gerilmesi oluşması nedeniyle 45^0 çatlak meydana gelir [19].

Tablo 5.12 Dolu silindir basma deneyi çatlak tipi sonuçları.

Malzeme	Isıl işlem	Yağlama	Çatlak	Yağlama	Çatlak
AISI 1040	Sıcak hadde. durumda	Kuru	90^0	Yivli	90^0
		Teflon	45^0	SAE 50	90^0
	Normalize edilmiş	Kuru	90^0	Yivli	90^0
		Teflon	45^0	SAE 50	45^0
	Küreleştirilmiş	Kuru	45^0	Yivli	90^0
		Teflon	45^0	SAE 50	45^0
AISI 1050	Sıcak hadde. durumda	Kuru	90^0	Yivli	90^0
		Teflon	45^0	SAE 50	90^0
	Normalize edilmiş	Kuru	$90^0 + 45^0$	Yivli	90^0
		Teflon	45^0	SAE 50	90^0
	Küreleştirilmiş	Kuru	45^0	Yivli	90^0
		Teflon	45^0	SAE 50	45^0
AISI 4140	Sıcak hadde. durumda	Kuru	$90^0 + 45^0$	Yivli	90^0
		Teflon	45^0	SAE 50	90^0
	Normalize edilmiş	Kuru	45^0	Yivli	90^0
		Teflon	90^0	SAE 50	45^0
	Küreleştirilmiş	Kuru	90^0	Yivli	90^0
		Teflon	45^0	SAE 50	45^0
AISI 5140	Sıcak hadde. durumda	Kuru	90^0	Yivli	90^0
		Teflon	45^0	SAE 50	45^0
	Normalize edilmiş	Kuru	45^0	Yivli	90^0
		Teflon	45^0	SAE 50	$90^0 + 45^0$
	Küreleştirilmiş	Kuru	$90^0 + 45^0$	Yivli	90^0
		Teflon	45^0	SAE 50	45^0

Yivli basma takımı koşullarında her tip malzeme ve ısıtım işlem durumu için 90^0 çatlak meydana gelmiştir. Düz basma takımı koşullarında birim şekil değiştirme miktarı az olan koşullarda 90^0 çatlak, birim şekil değiştirme miktarı fazla olan koşullarda 45^0

çatlak meydana gelmiştir. Yüksek sürtünme koşullarının etkisiyle daha az birim şekil değiştirme miktarları ve 90^0 çatlak, düşük sürtünme koşullarının etkisiyle daha fazla birim şekil değiştirme miktarları ve 45^0 çatlak, ara değeri oluşturan küçük bir aralıktaki sürtünme koşullarının etkisiyle her iki birim şekil değiştirme değeri arası bir miktar ve her iki çatlak tipi bir arada meydana gelmiştir. Bu sonuçlara göre, çatlak tipi malzemenin sürtünme koşulları için genel bir fikir vermektedir. Dövülebilirlik saptamasını sınırlayan fiçilaşma oluşumu malzemelerin şekil değiştirme miktarını azaltmaktadır. Bu nedenle, 45^0 çatlağın meydana geldiği fiçilaşmanın daha az olduğu koşullar malzemelerin dövülebilirliği hakkında daha olumlu sonuçlar verecektir.

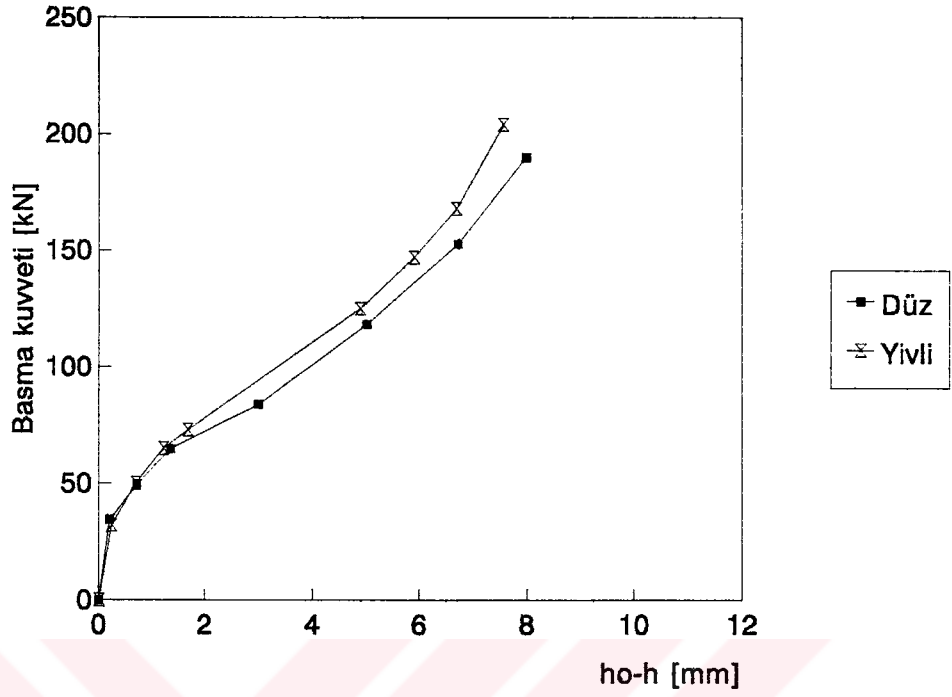


5.2.4.2 Halkalı Dolu Silindir Basma Deneyi

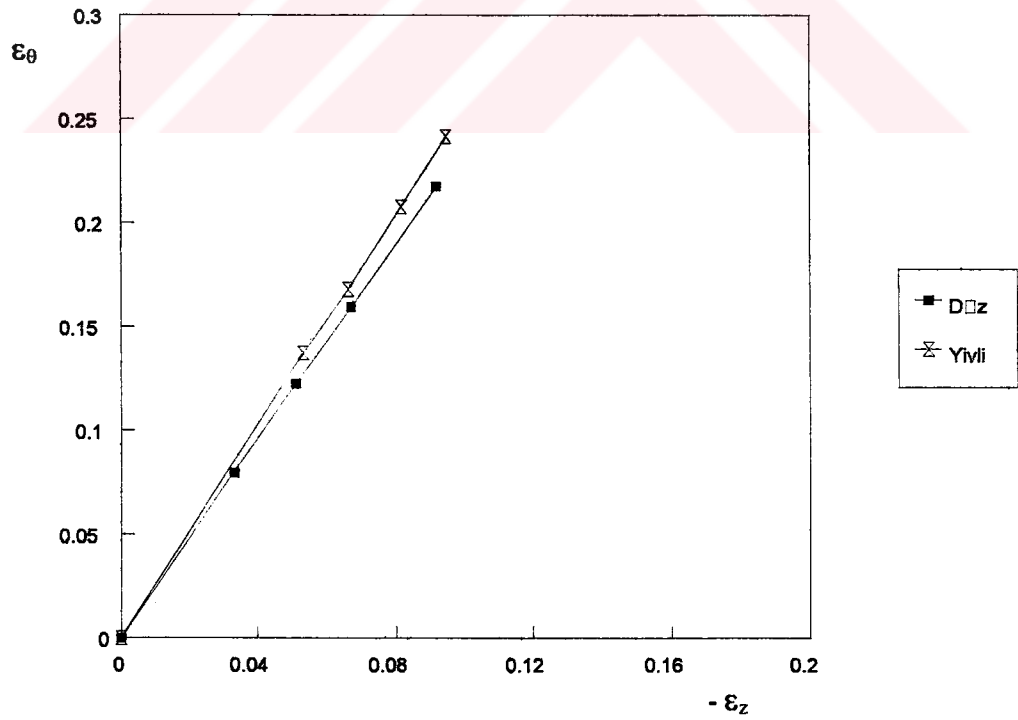
Halkalı dolu silindirlerle yapılan basma deneylerinden elde edilen sonuçlar tablo 5.13’de verilmiştir. Bu tabloda P hasar olduğu andaki basma kuvveti, $(h_0-h)/h_0$ ise yükseklik doğrultusunda birim şekil değiştirmedir.

Tablo 5.13 Halkalı Dolu Silindir Basma deneyi sonuçları.

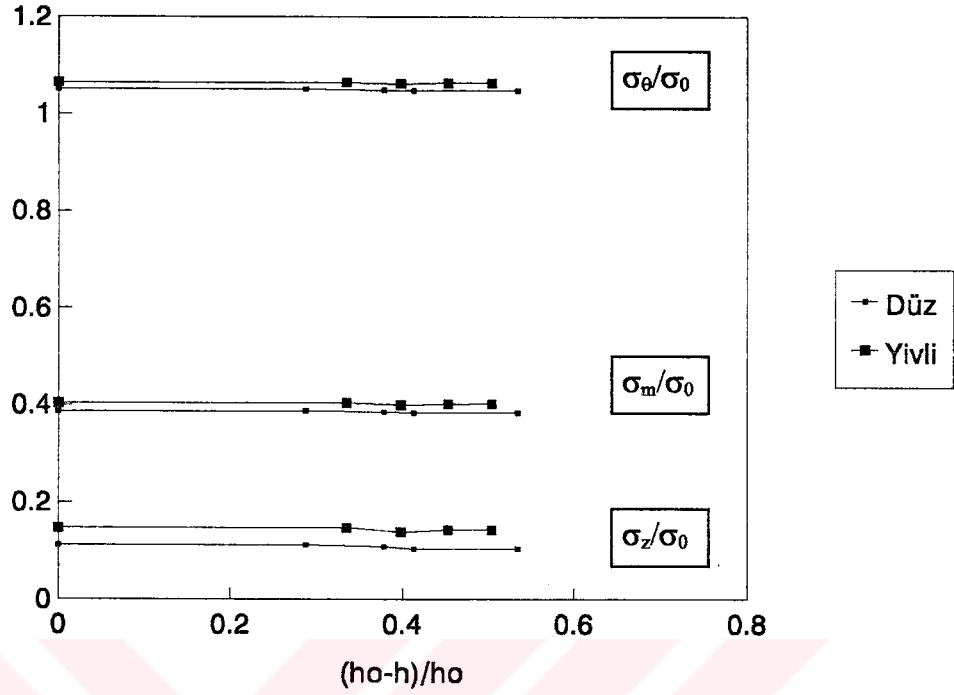
Malzeme	Yağlama	P (Kuvvet) (kN)	$(h_0-h)/h_0$
AISI 1040 Sıcak haddelenmiş durumda	Düz	190	0.54
	Yivli	204	0.51
AISI 1040 Normalize edilmiş	Düz	222	0.58
	Yivli	178	0.47
AISI 1040 Küreleştirilmiş	Düz	258	0.63
	Yivli	186	0.52
AISI 1050 Sıcak haddelenmiş durumda	Düz	238	0.57
	Yivli	192	0.46
AISI 1050 Normalize edilmiş	Düz	222	0.54
	Yivli	200	0.48
AISI 1050 Küreleştirilmiş	Düz	340	0.69
	Yivli	208	0.51
AISI 4140 Sıcak haddelenmiş durumda	Düz	472	0.72
	Yivli	455	0.67
AISI 4140 Normalize edilmiş	Düz	302	0.59
	Yivli	280	0.53
AISI 4140 Küreleştirilmiş	Düz	490	0.73
	Yivli	465	0.67
AISI 5140 Sıcak haddelenmiş durumda	Düz	302	0.63
	Yivli	233	0.52
AISI 5140 Normalize edilmiş	Düz	238	0.57
	Yivli	263	0.56
AISI 5140 Küreleştirilmiş	Düz	435	0.73
	Yivli	497	0.69



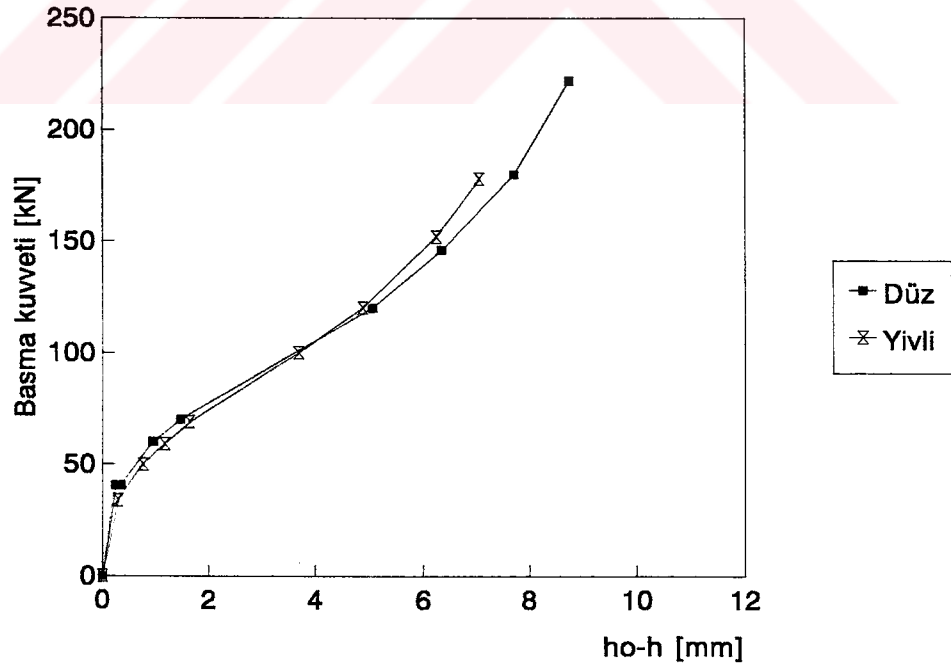
Şekil 5.99 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



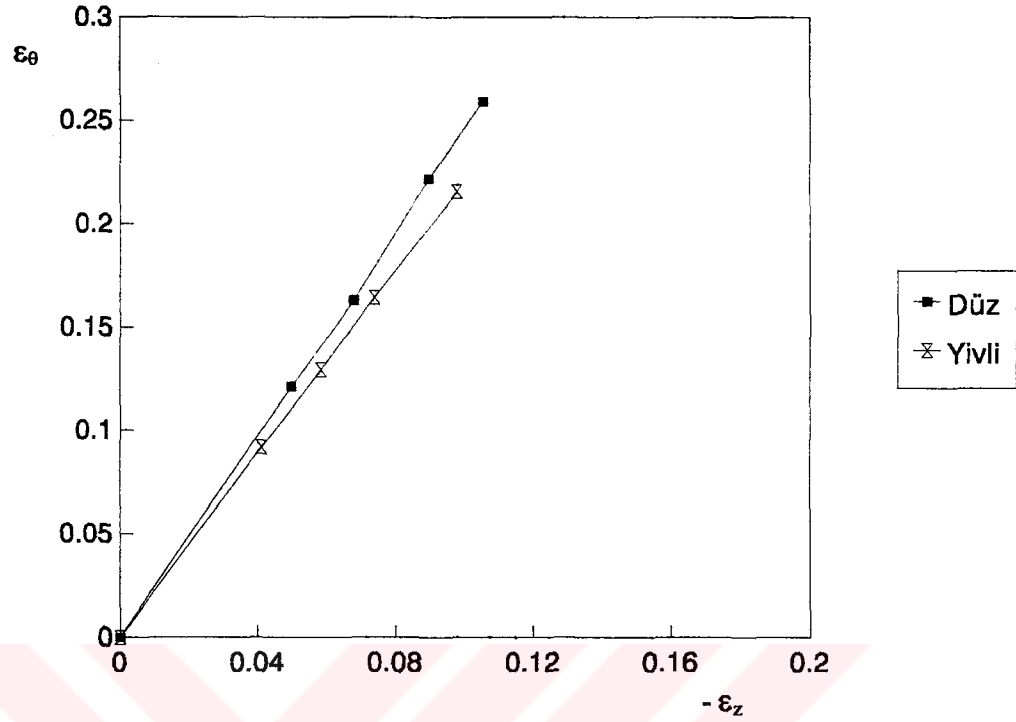
Şekil 5.100 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



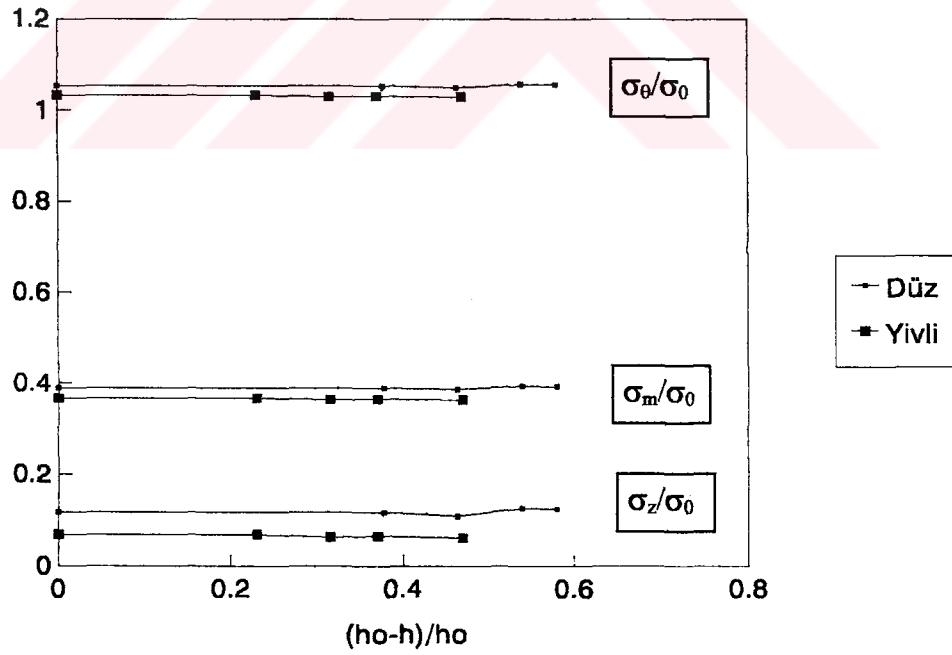
Şekil 5.101 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



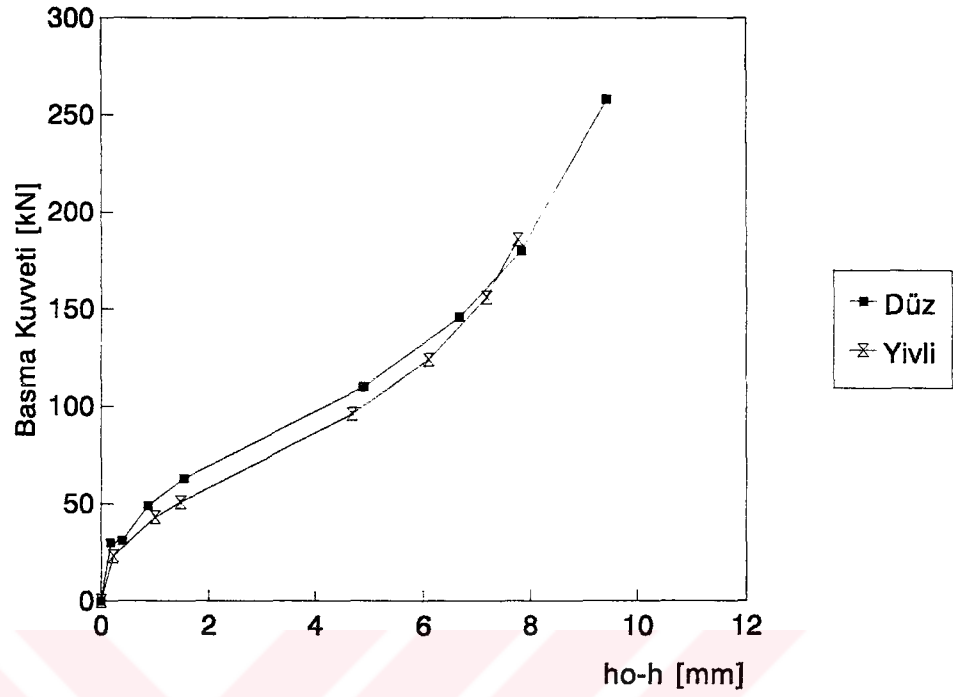
Şekil 5.102 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



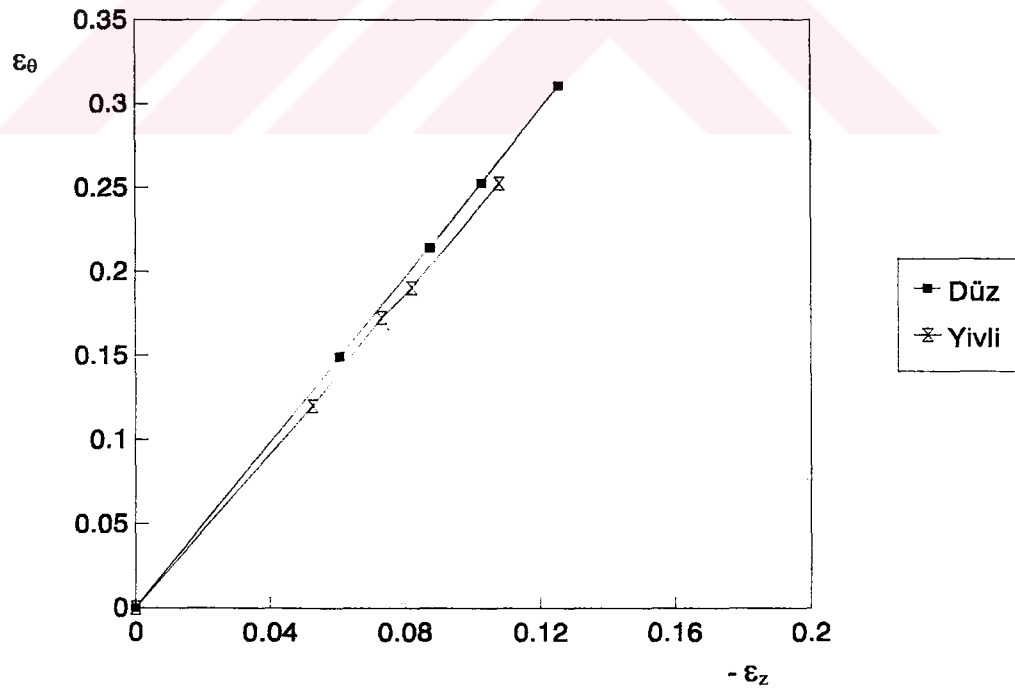
Şekil 5.103 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



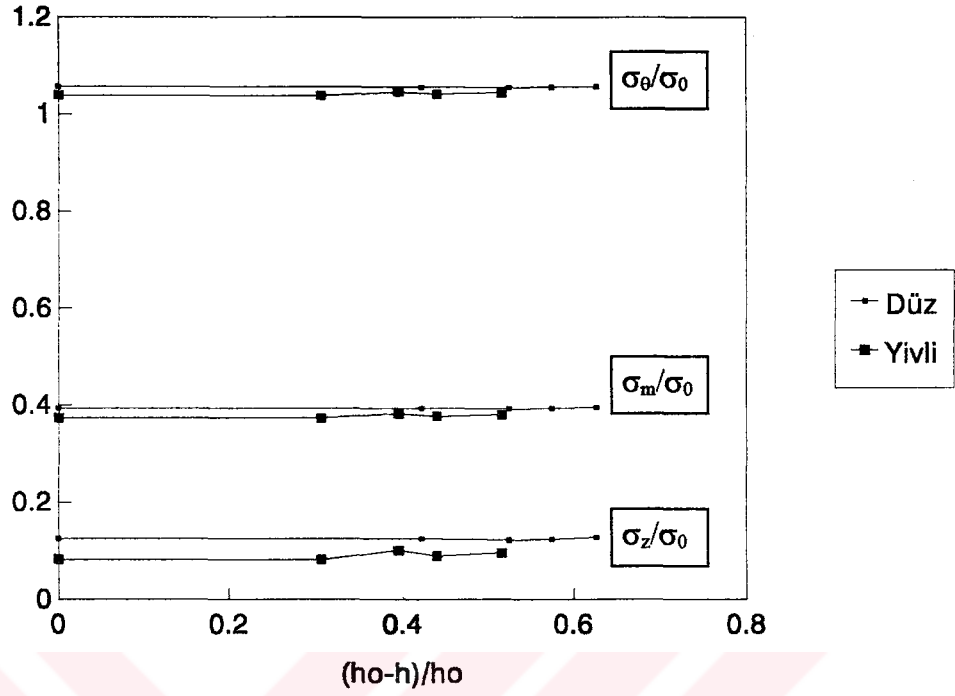
Şekil 5.104 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



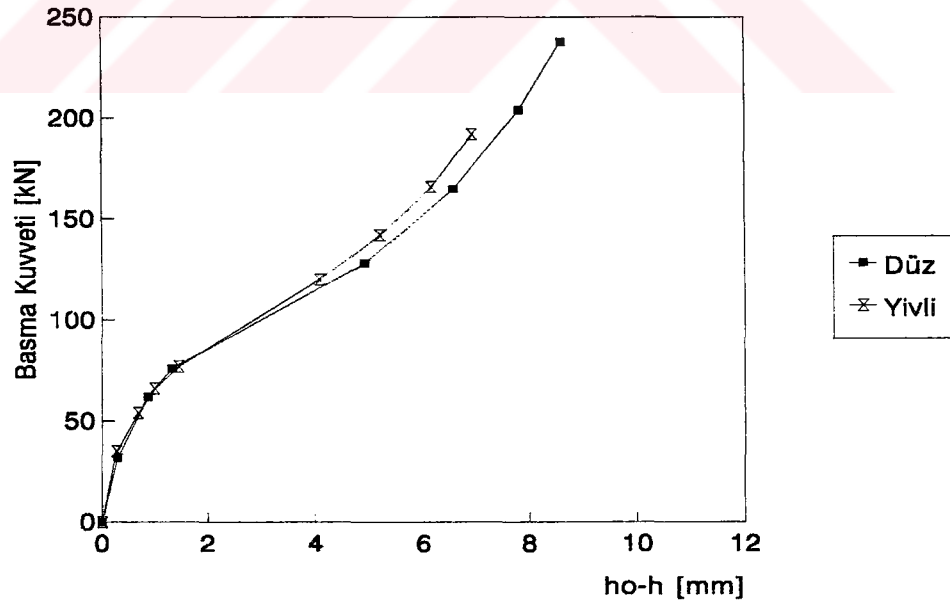
Şekil 5.105 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



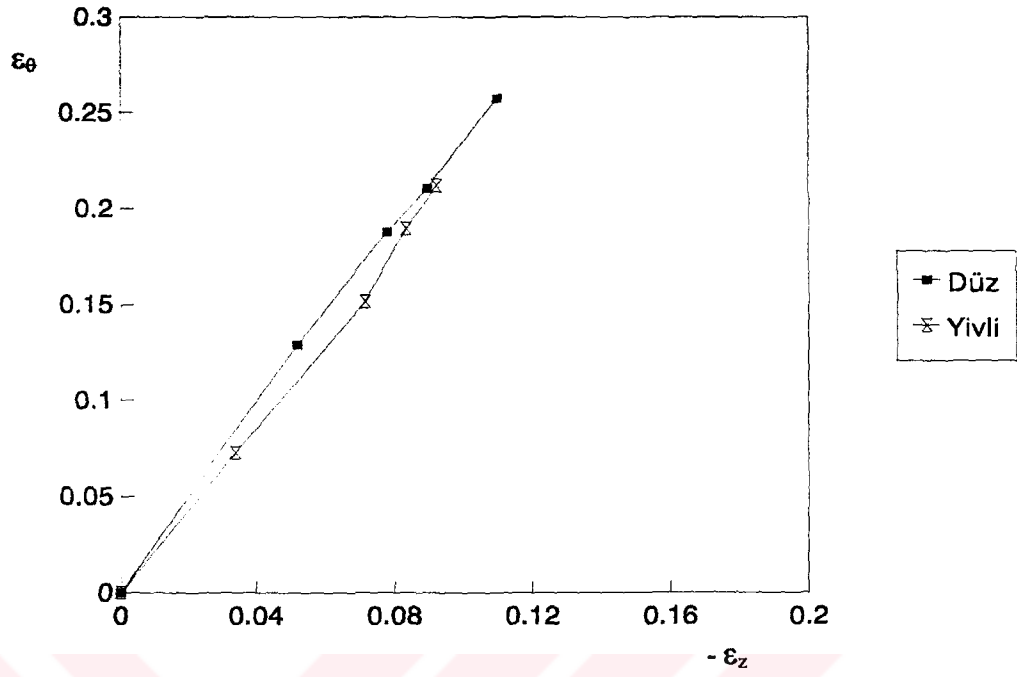
Şekil 5.106 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



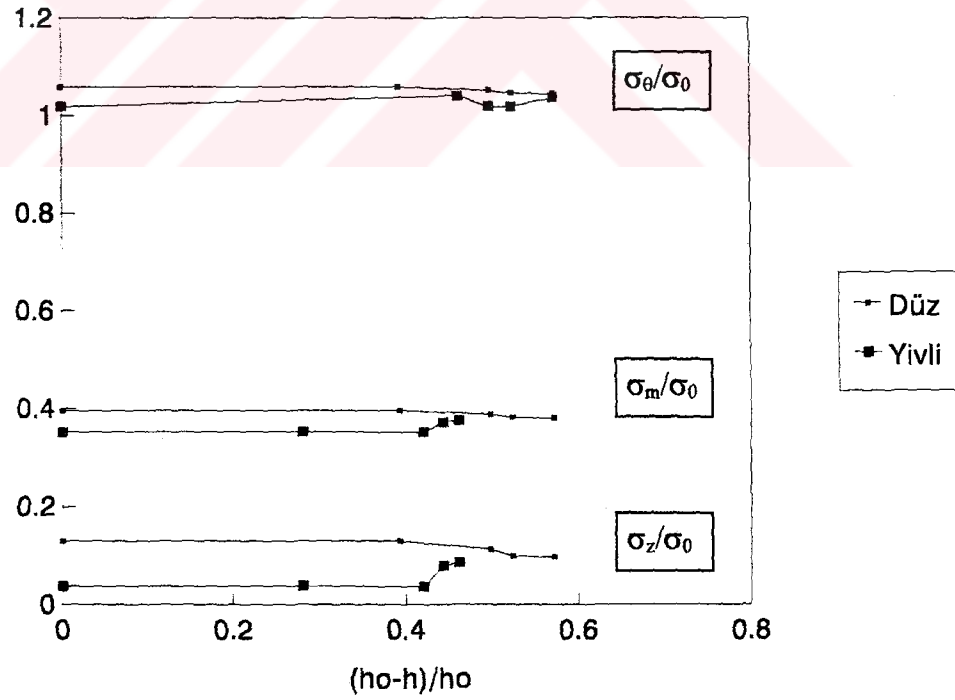
Şekil 5.107 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



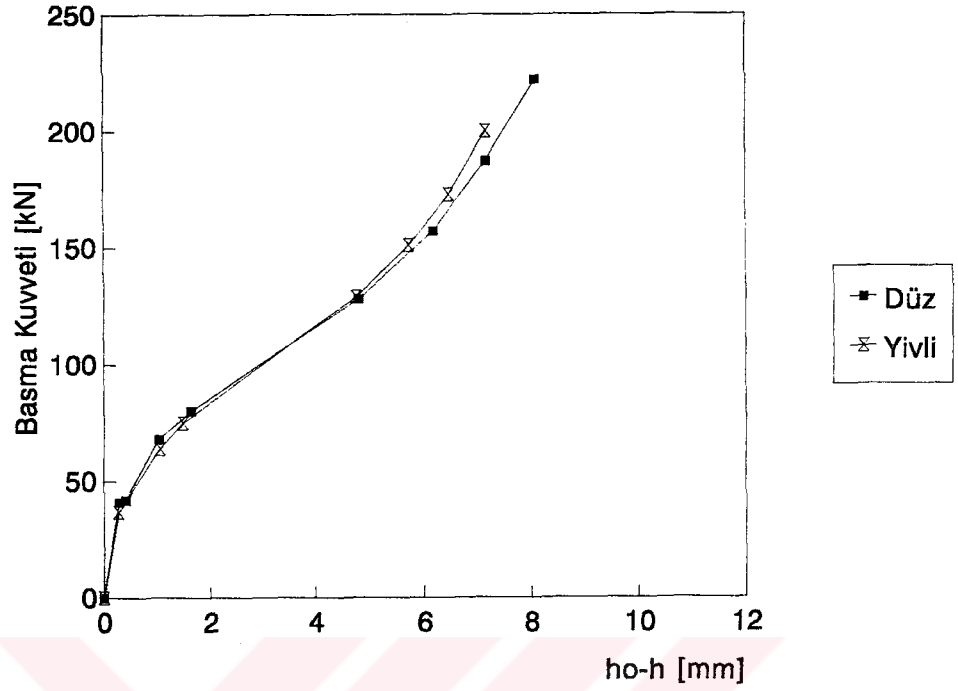
Şekil 5.108 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



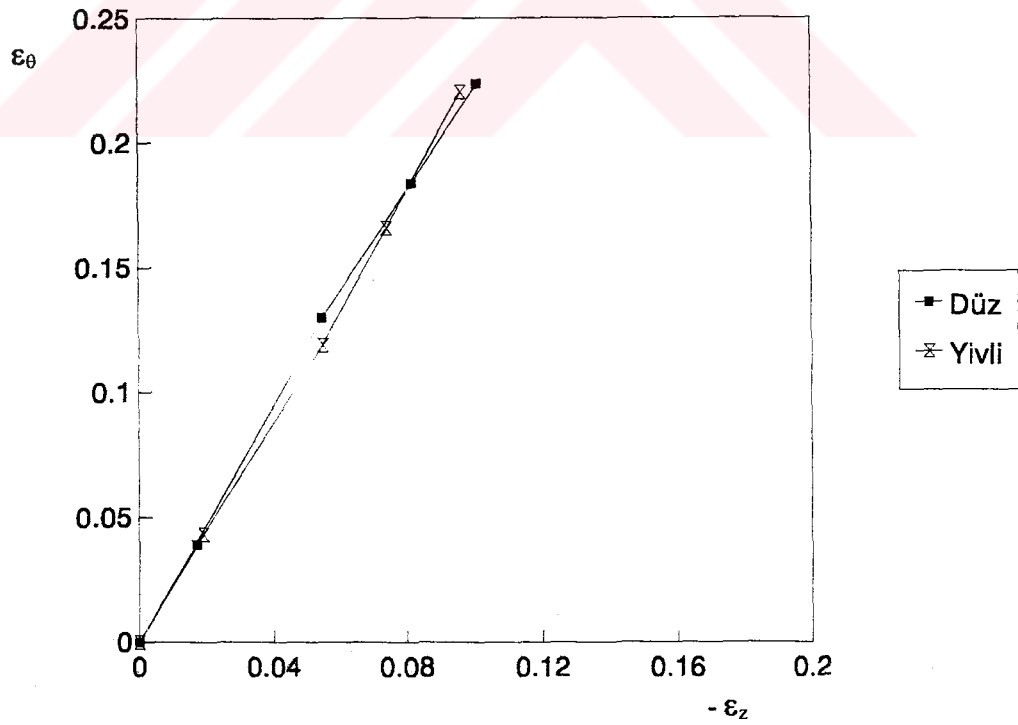
Şekil 5.109 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



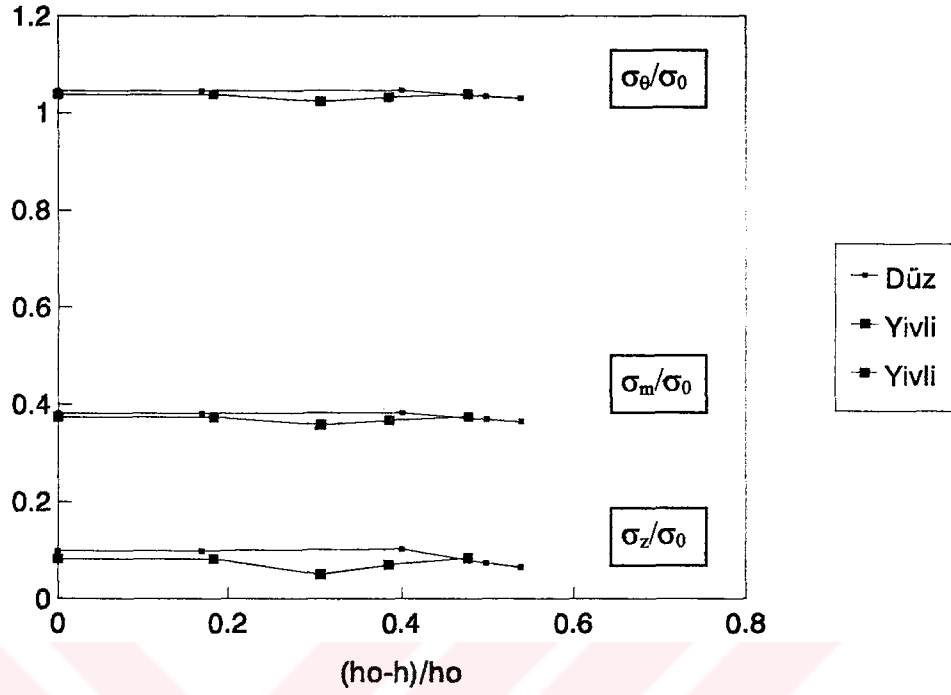
Şekil 5.110 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



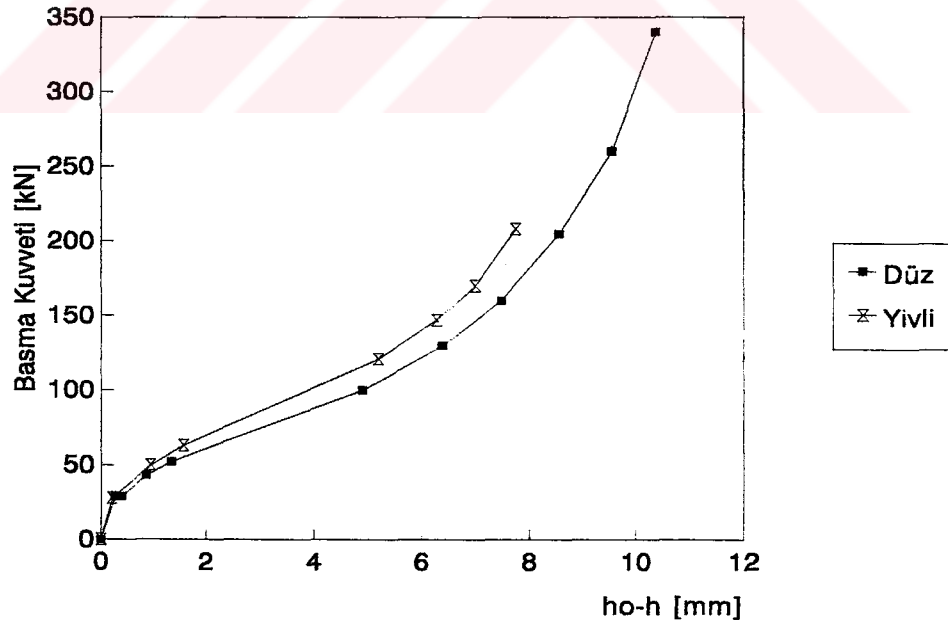
Şekil 5.111 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



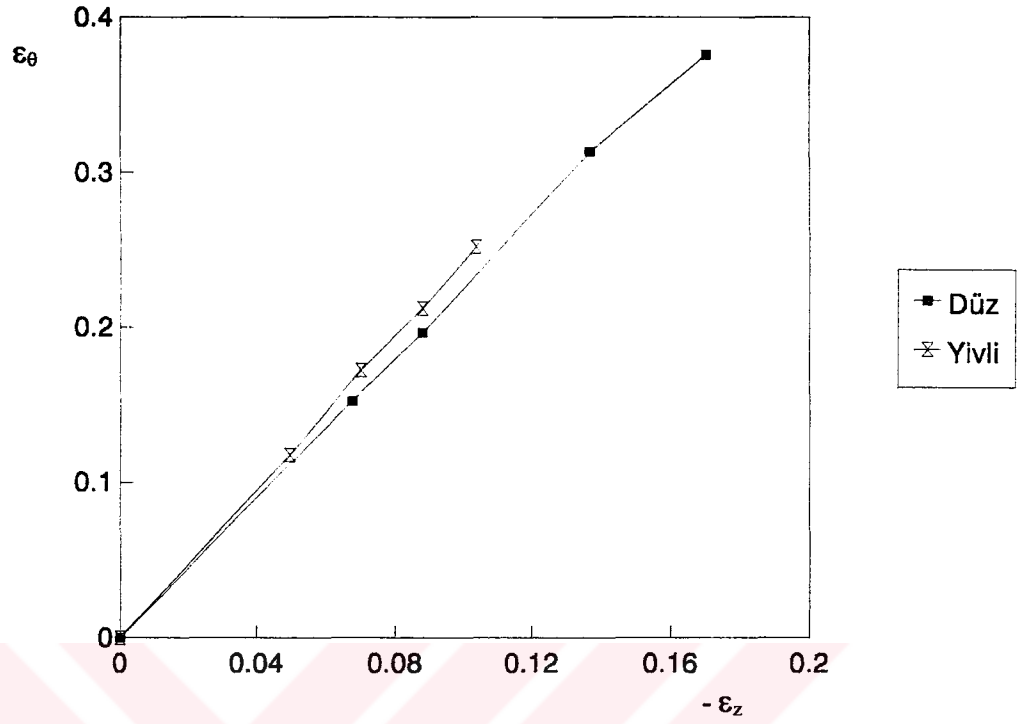
Şekil 5.112 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - aksenal birim şekil değiştirme ilişkisi.



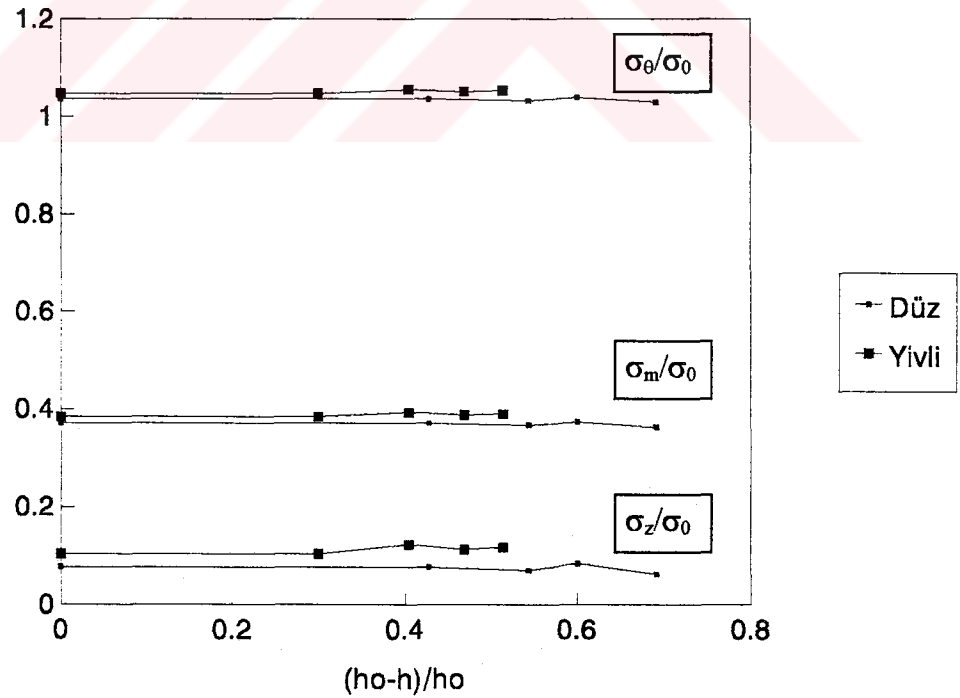
Şekil 5.113 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



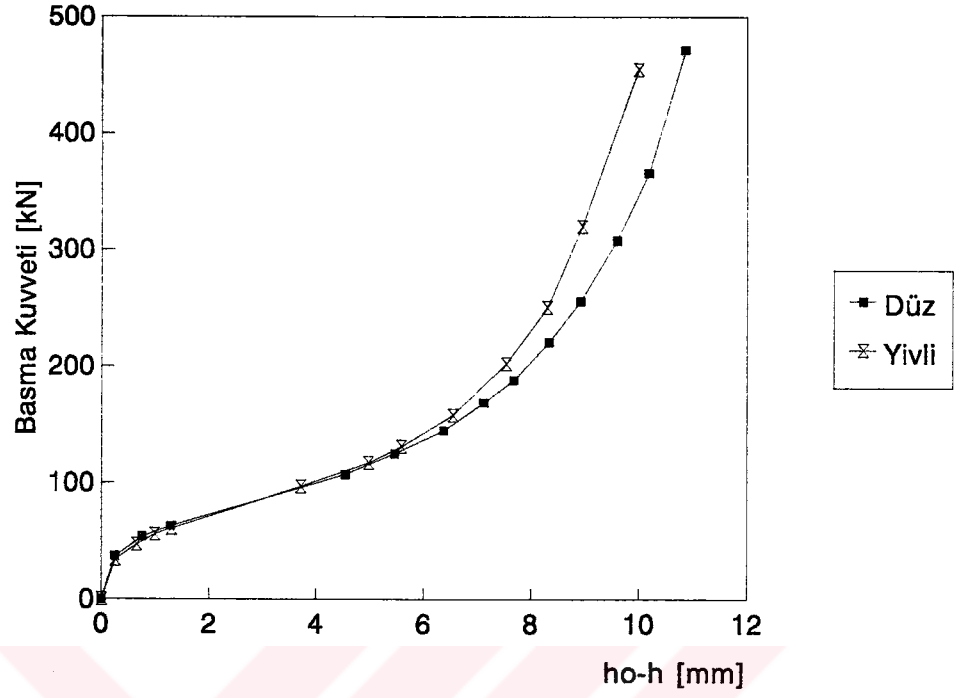
Şekil 5.114 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



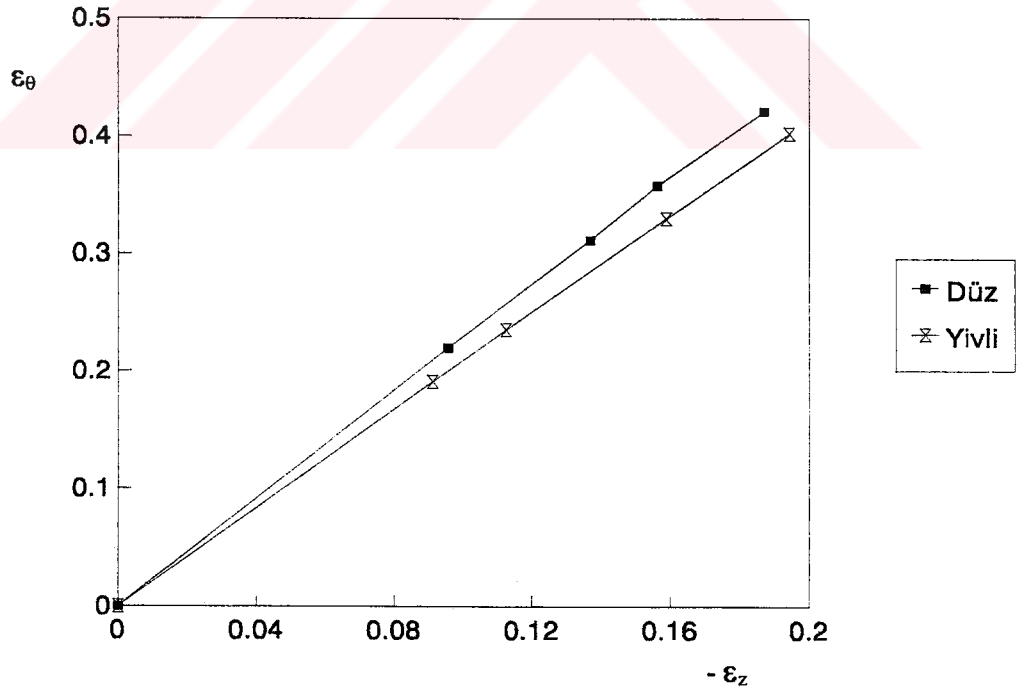
Şekil 5.115 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



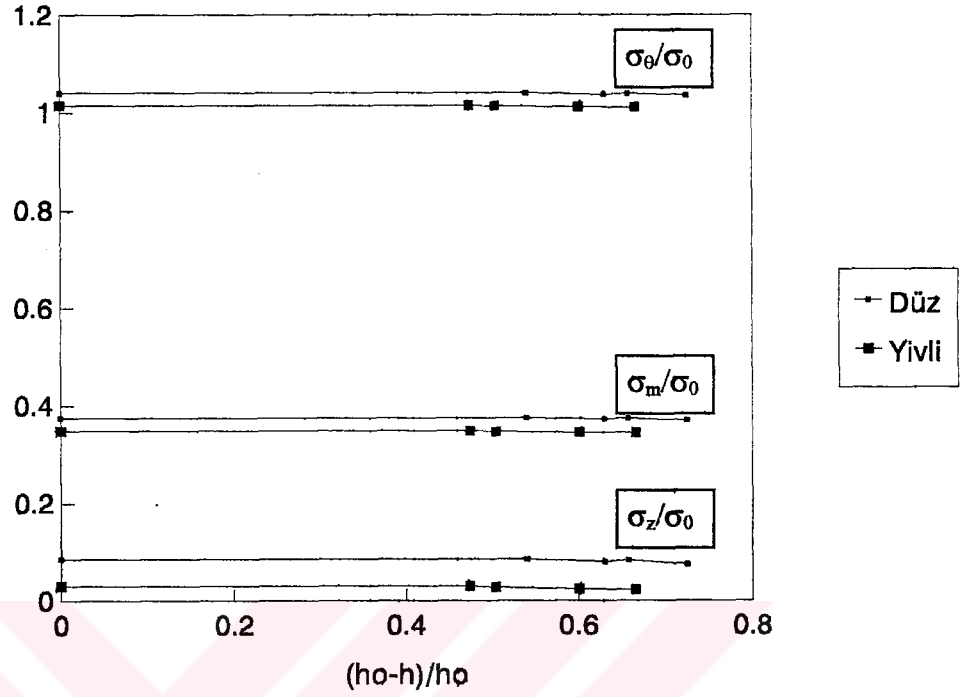
Şekil 5.116 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



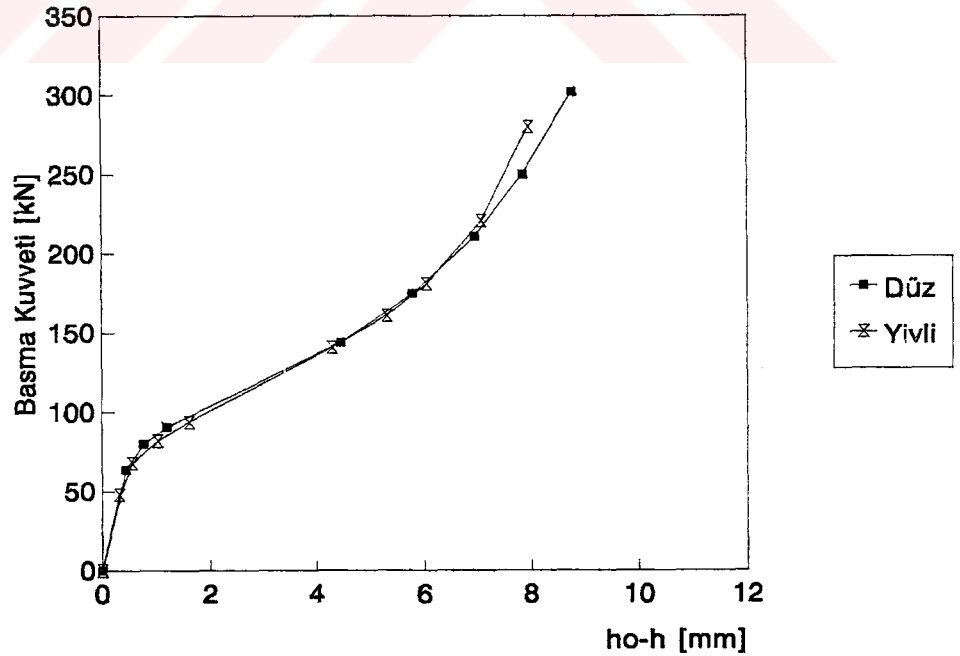
Şekil 5.117 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



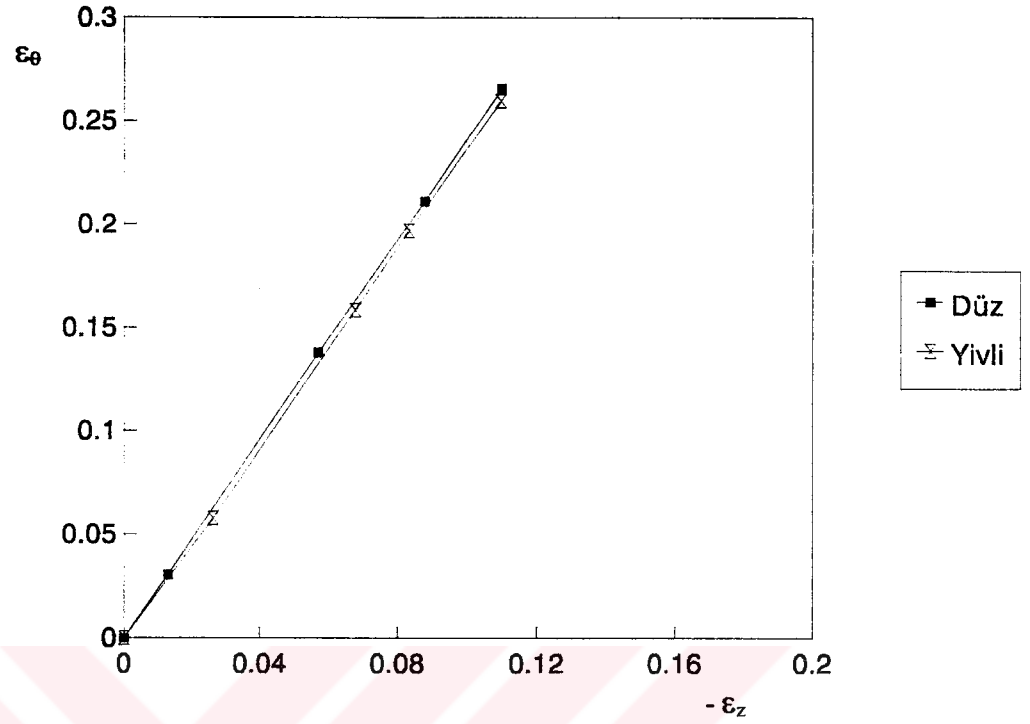
Şekil 5.118 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



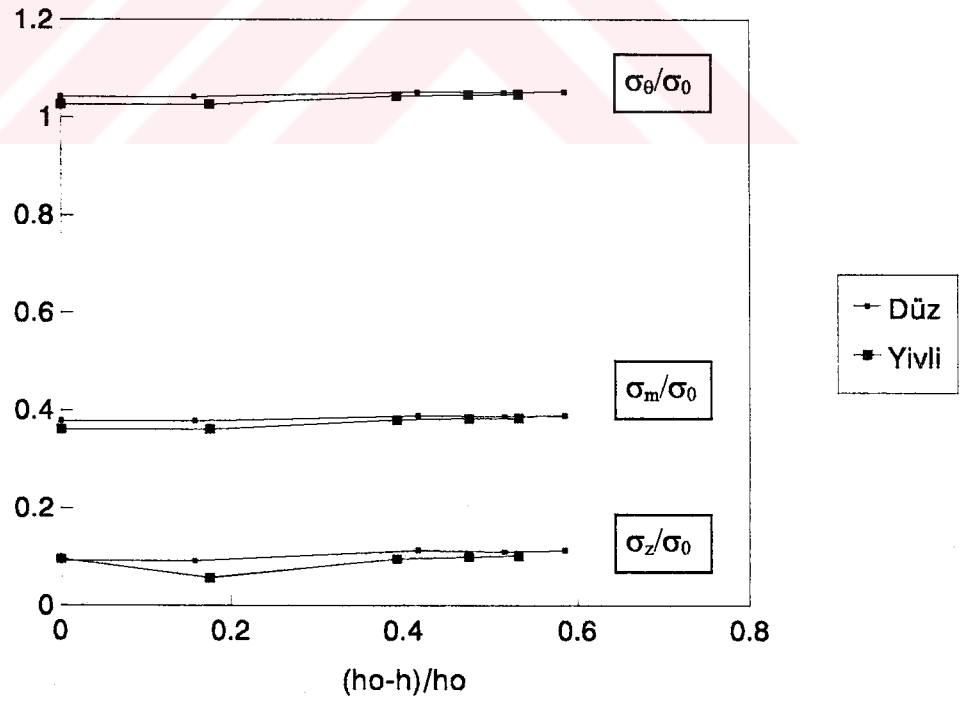
Şekil 5.119 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



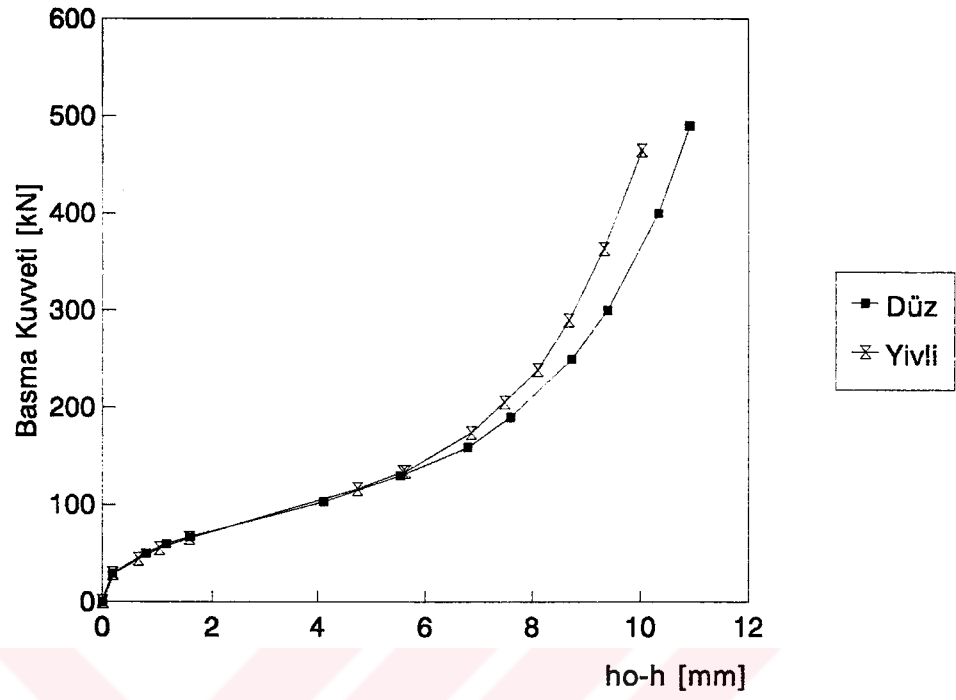
Şekil 5.120 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



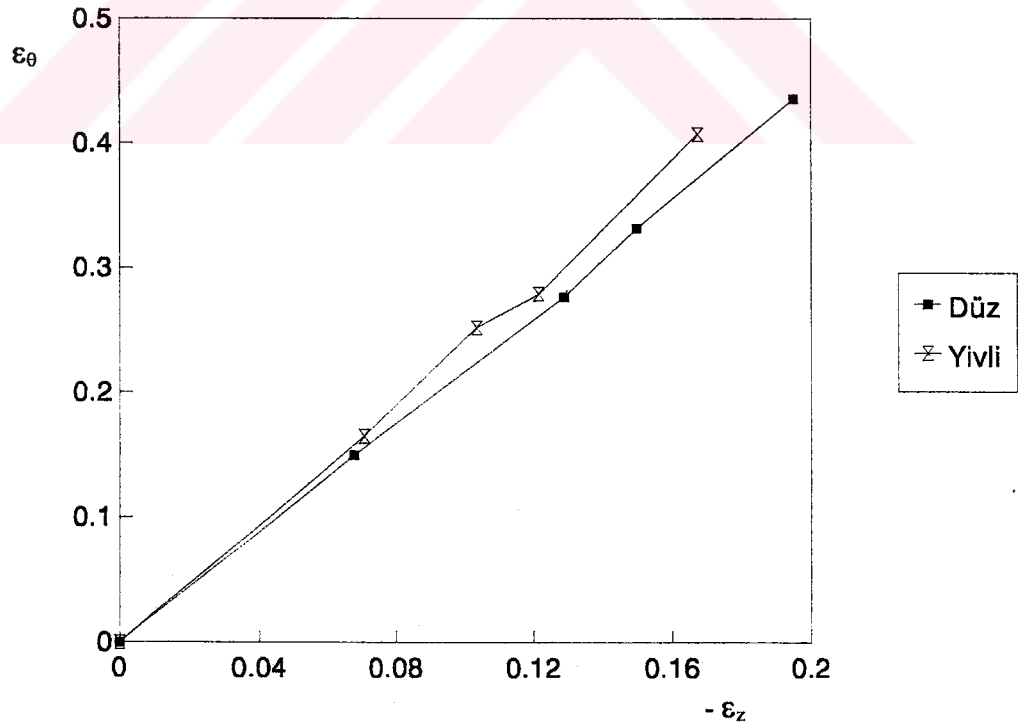
Şekil 5.121 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



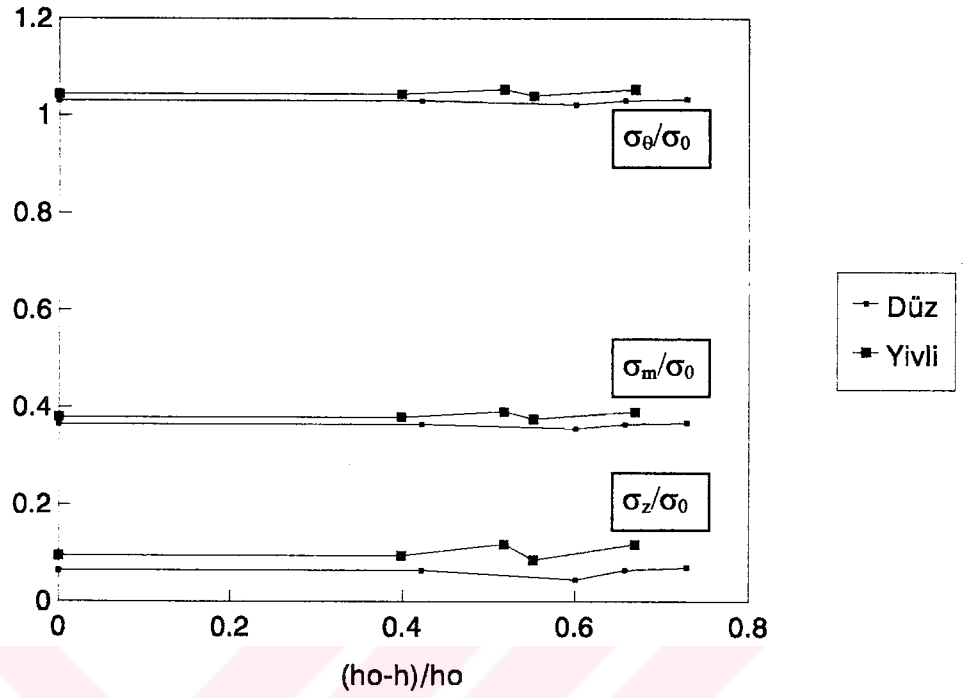
Şekil 5.122 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



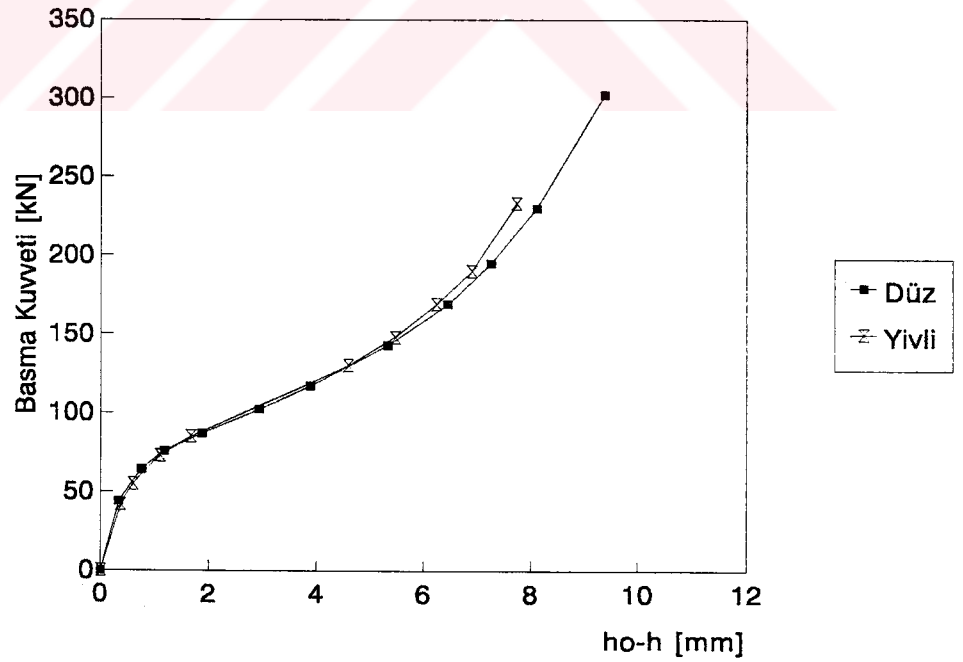
Şekil 5.123 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



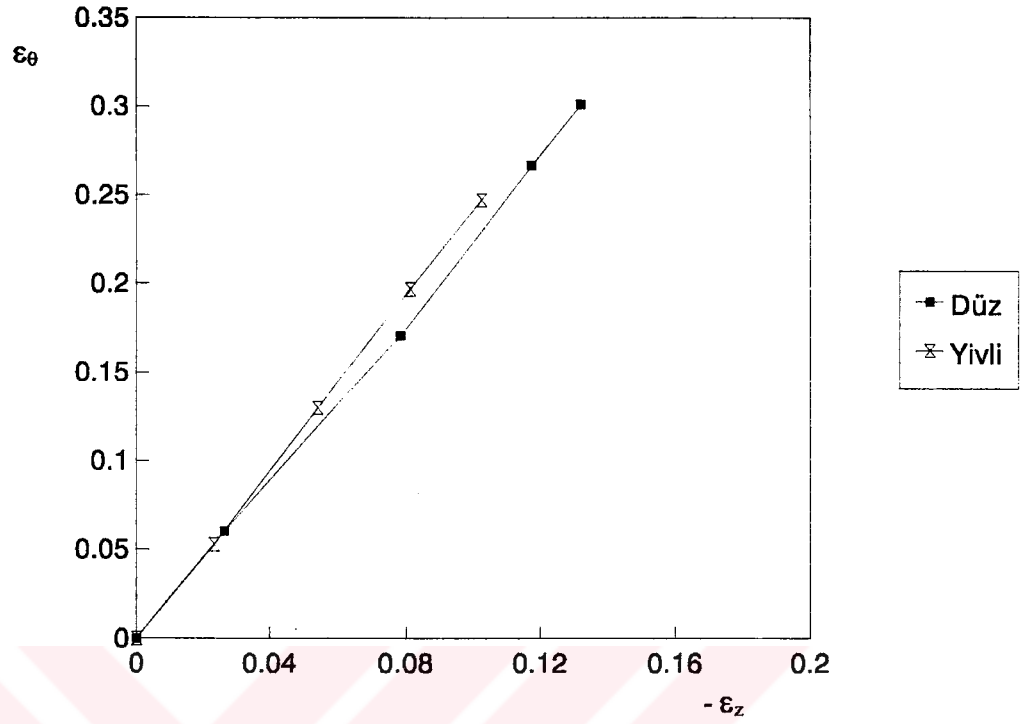
Şekil 5.124 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



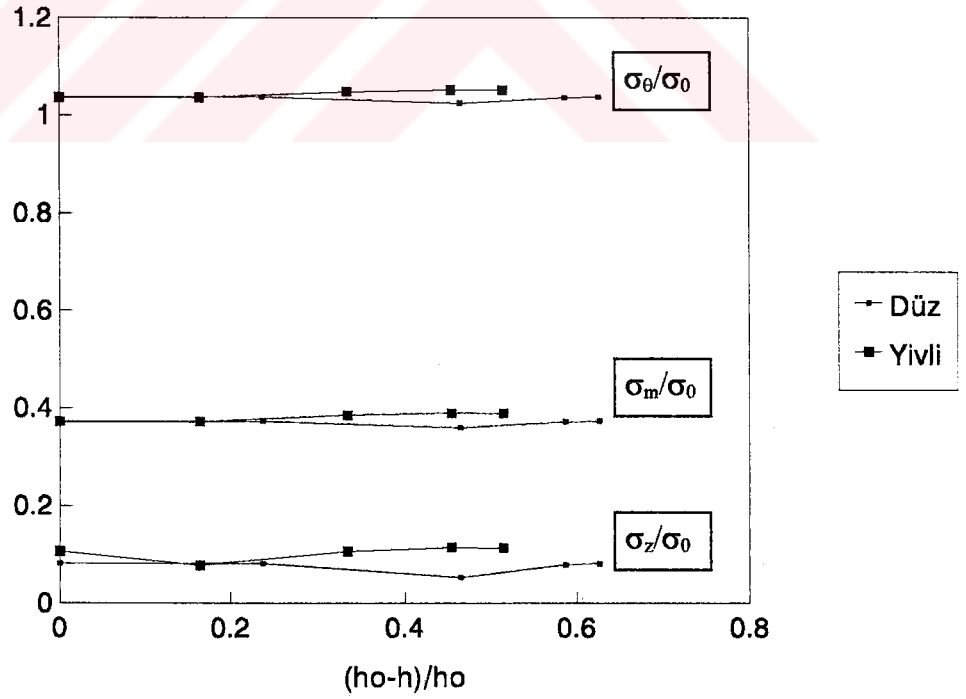
Şekil 5.125 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



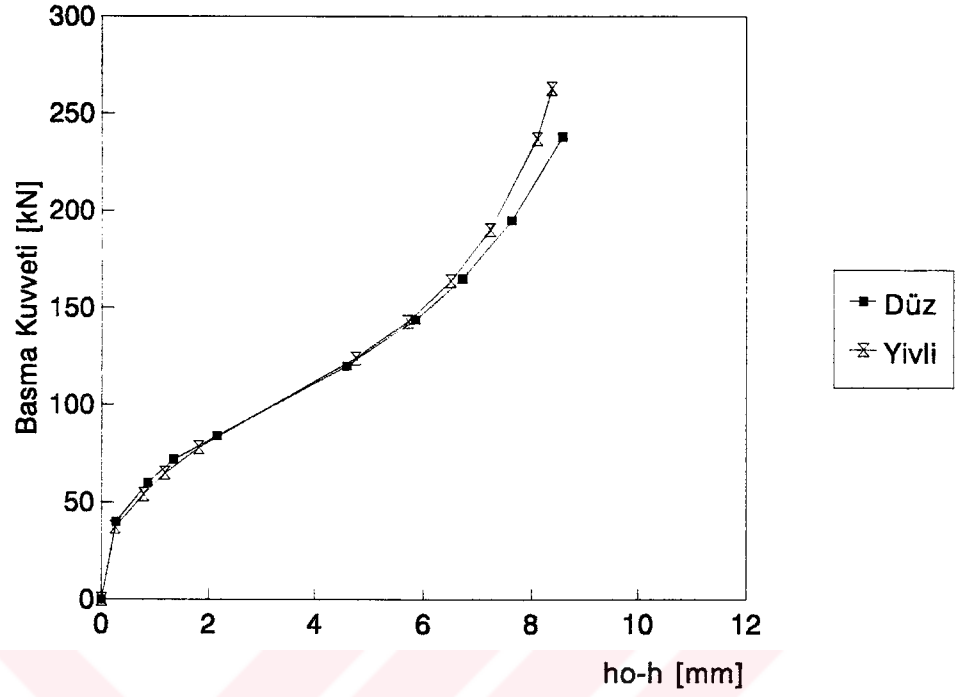
Şekil 5.126 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



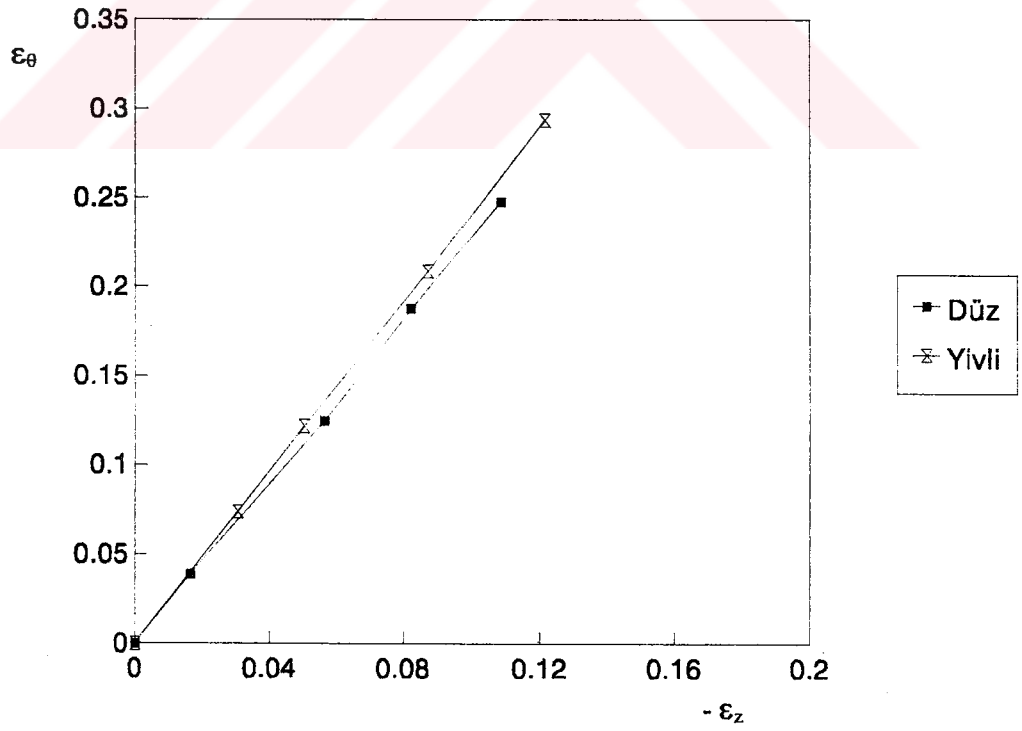
Şekil 5.127 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



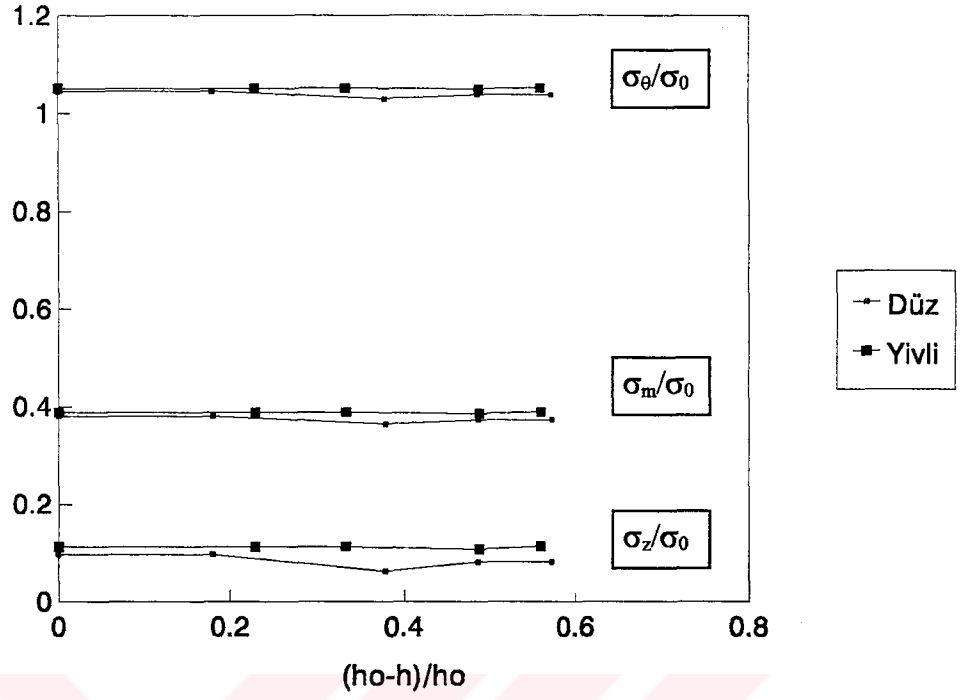
Şekil 5.128 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



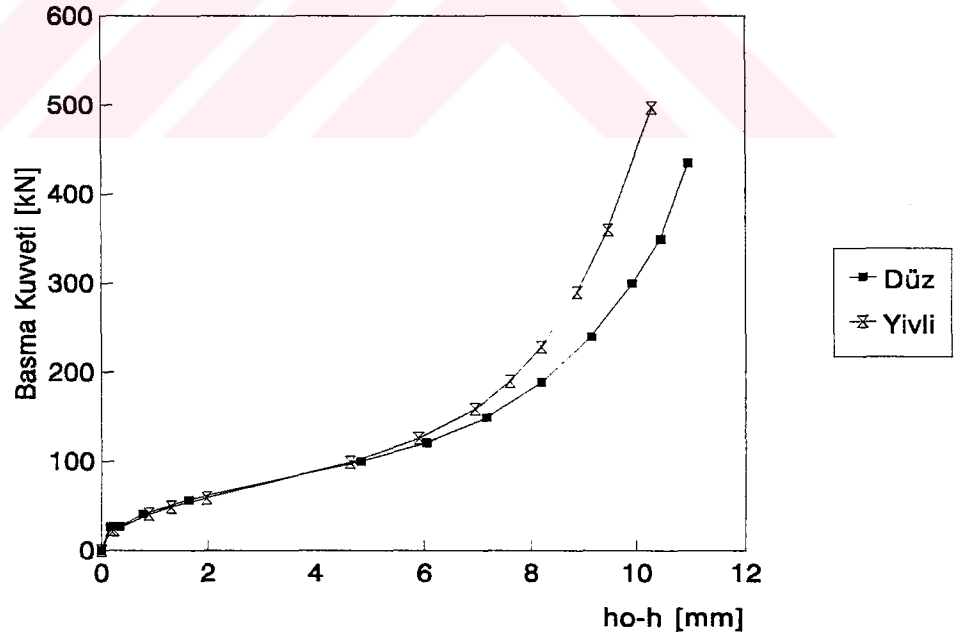
Şekil 5.129 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



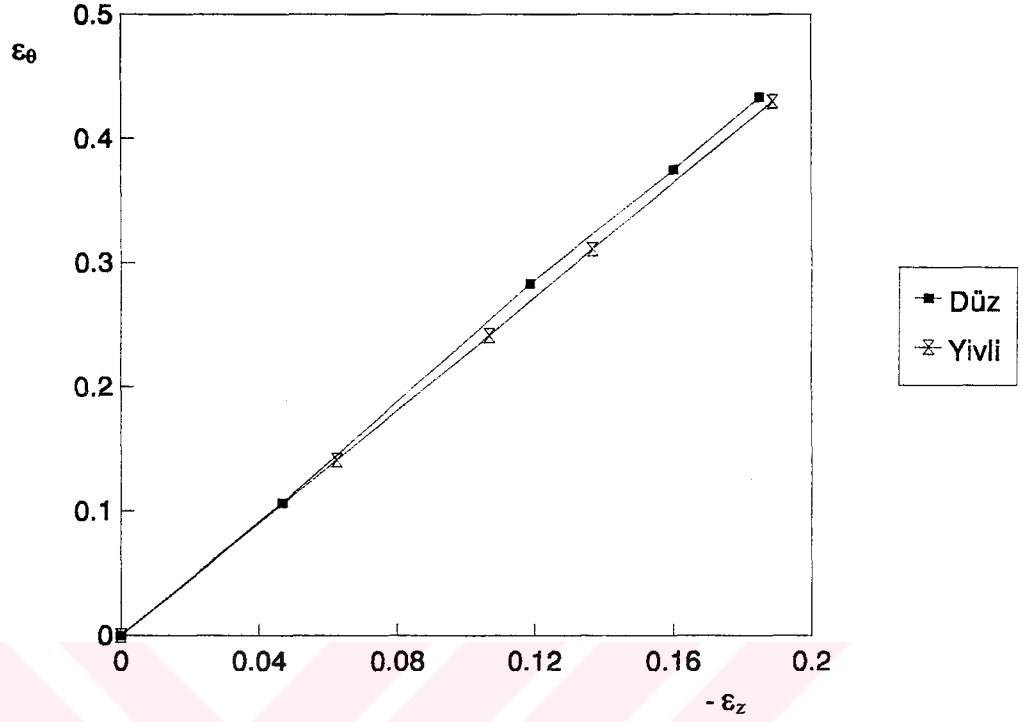
Şekil 5.130 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



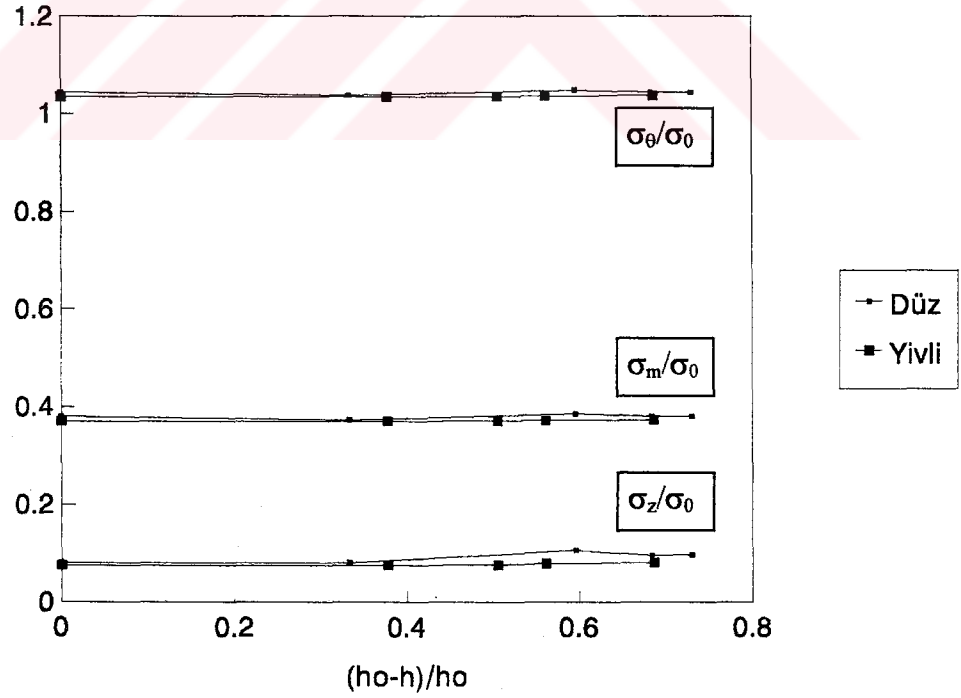
Şekil 5.131 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.



Şekil 5.132 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi.



Şekil 5.133 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi.



Şekil 5.134 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi.

Tablo 5.14 Halkalı dolu silindir basma deneyi kopma birim şekil değiştirme ve kopma gerilme elemanları efektif gerilme oranları sonuçları.

Malzeme	Isıl işlem durumu	Yağlama	ε_z kopma	ε_θ kopma	ε kopma	σ_θ/σ_0 kopma	σ_z/σ_0 kopma	σ_m/σ_0 kopma
AISI 1040	Sıcak h. durumda	Düz	-0.11	0.26	0.219	1.05	0.10	0.38
		Yivli	-0.10	0.22	0.244	1.06	0.14	0.40
	Normalize edilmiş	Düz	-0.09	0.22	0.272	1.06	0.12	0.39
		Yivli	-0.09	0.24	0.220	1.03	0.06	0.36
	Küreleş-tirilmiş	Düz	-0.13	0.31	0.313	1.06	0.13	0.40
		Yivli	-0.11	0.25	0.254	1.04	0.10	0.38
AISI 1050	Sıcak h. durumda	Düz	-0.11	0.26	0.258	1.05	0.10	0.38
		Yivli	-0.09	0.21	0.208	1.04	0.09	0.38
	Normalize edilmiş	Düz	-0.10	0.22	0.220	1.03	0.07	0.37
		Yivli	-0.10	0.22	0.220	1.04	0.08	0.37
	Küreleş-tirilmiş	Düz	-0.17	0.38	0.376	1.03	0.06	0.36
		Yivli	-0.10	0.25	0.244	1.05	0.12	0.39
AISI 4140	Sıcak h. durumda	Düz	-0.19	0.42	0.422	1.04	0.07	0.37
		Yivli	-0.19	0.40	0.402	1.01	0.02	0.34
	Normalize edilmiş	Düz	-0.11	0.27	0.266	1.05	0.11	0.39
		Yivli	-0.11	0.26	0.262	1.05	0.10	0.38
	Küreleş-tirilmiş	Düz	-0.19	0.44	0.438	1.03	0.07	0.37
		Yivli	-0.18	0.41	0.408	1.05	0.12	0.39
AISI 5140	Sıcak h. durumda	Düz	-0.13	0.30	0.297	1.04	0.08	0.37
		Yivli	-0.10	0.25	0.242	1.05	0.11	0.39
	Normalize edilmiş	Düz	-0.11	0.25	0.251	1.04	0.08	0.37
		Yivli	-0.12	0.29	0.292	1.05	0.11	0.39
	Küreleş-tirilmiş	Düz	-0.18	0.43	0.434	1.04	0.10	0.38
		Yivli	-0.19	0.43	0.432	1.04	0.08	0.37

Halkalı dolu silindir basma deneyinde basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi eğrileri, yivli ve düz basma takımları koşulları karşılaştırıldığında, genellikle düz basma takımı koşulları ile aynı şekil değiştirme miktarı için yivli basma takımı koşullarında daha fazla kuvvet uygulanması gerektiğini göstermektedir. Mamafih sürtünme koşullarının basma kuvvetine çok büyük bir etkisi olduğu söylenemez. Aynı bir malzeme için basma eğrileri sürtünme koşullarına bağlı olarak fazla bir değişiklik göstermemekte hatta bazen çakişmaktadır. Dolu silindir ve halkalı dolu silindir basma deneylerinden elde edilen basma kuvvetinin yükseklik azalması ile değişimi eğrileri kıyaslanırsa, görünümünün benzer fakat halkalı dolu silindirlerde kuvvet değerlerinin daha küçük olduğu görülmektedir. Dolu silindir ve halkalı dolu silindir basma kuvvetleri oranlarından düz basma takımı koşullarında % 2.6 en küçük değişim, % 46 en büyük değişim, yivli basma takımı koşullarında % 11.7 en küçük değişim, % 27 en büyük değişim hesaplanmıştır.

Halkalı dolu silindir basma deneylerinde hasar anındaki yükseklik azalması da dolu silindirlere kıyasla daha küçüktür. Bu değer halkalı dolu silindirlerde % 46-73 arasında iken dolu silindirler için % 54-78 dir.

Çevresel - eksenel birim şekil değiştirme eğrilerinden, dolu silindir ve halkalı dolu silindir basma deneylerinde elde edilen eğrilerin benzeşmediği, halkalı dolu silindirlerde çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisinin doğrusal olduğu görülmektedir. Bu doğruların eğimi -2 mertebesinde dir. Bu sonuç, halkalı dolu silindirlerin basma deneyinin üniform basma halinden (eğimi -1/2) uzak olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla halkalı dolu silindir basma deneyinin dolu silindir basma deneyine kıyasla malzemeyi daha zorlayıcı olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca eksenel doğrultudaki birim şekil değiştirmenin çevresel birim şekil değiştirmeye kıyasla çok küçük olduğuna da dikkat edilmelidir. Bu sonuç Sowerby ile uyumludur [21].

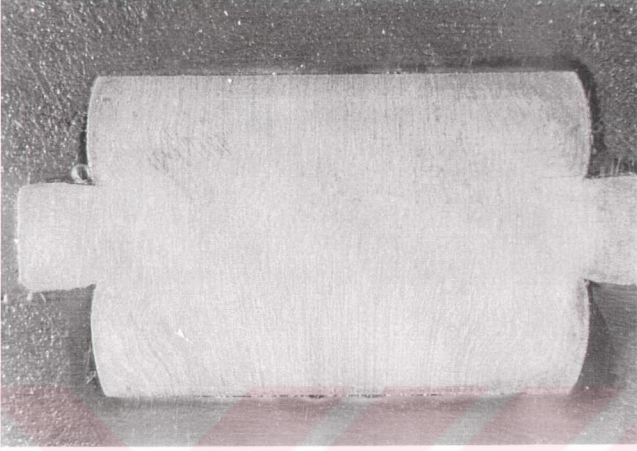
Çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkilerini gösteren grafikler, birim şekil değiştirme eğrisinin izlediği yolların sürtünme koşullarından bağımsız olduğunu göstermektedir. Halkalı dolu silindir basma deneyinin sürtünmeye hassas olmadığı söylenebilir. Yivli ve düz basma takımlarıyla elde edilen eğriler benzeştikleri gibi birbirine çok yakındırlar, hatta bazen çakışmaktadırlar. Farklı çelikler için elde edilen çevresel - eksenel birim şekil değiştirme eğrilerini ayırtetmek dahi zor hatta doğruların çakışması nedeniyle bazen imkansızdır. Dolayısıyla yalnızca çevresel - eksenel birim şekil değişiminin bilinmesi çeliklerin dövülebilirliklerini belirleyebilmek açısından yeterli değildir.

Gerilme elemanları efektif gerilme oranları deney boyunca sabit kalmaktadır. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir : çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkisi doğrusaldır (eğim sabit), dolayısıyla bu eğimin fonksiyonu olan gerilme elemanları da sabit kalmaktadır. Gözlemlenen bir başka husus da gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının daima pozitif olmalarıdır. Dolu silindir basma deneyinde ise bu oran negatif de olabilmektedir. Ayrıca halkalı basma deneyinde σ_θ / σ_0 değeri σ_z / σ_0 değerine kıyasla çok küçük olup σ_z / σ_0 ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Halkalı dolu silindir basma deneylerinde σ_m / σ_0 oranı da daima pozitifdir ve dolu silindir

basma deneyine kıyasla çok büyüktür. Bridgman büyük σ_m / σ_0 değerlerinin hasar oluşumunu kolaylaştırdığını belirtmektedir [63]. Sonuç olarak halkalı dolu silindirlerde halkasızlara kıyasla hasar daha erken (daha küçük şekil değişimi) oluşmaktadır.

Tablo 5.14 deki değerlerden, kopma anındaki hidrostatik gerilme değerlerinin aynı kabul edilebilecek yakınlıkta olduğu sonucuna varılabilir. σ_m / σ_0 oranının çelikten çeliğe fazla değişmemesi nedeniyle bu değer çelikleri ayırtetmekte hassas bir kriter olamaz. Şekil değiştirmenin her bir anında hidrostatik gerilme değerlerinin sabit ve birbirine yakın değerlerde olması nedeniyle kopma anındaki birim şekil değiştirme değerleri ile dövülebilirliğin saptanması mümkün olabilir. Bu kabulle, en büyük şekil değiştirmenin olduğu çevresel birim şekil değiştirmelerinden malzemelerin dövülebilirliği saptanabilir. Fakat AISI 1040 ve 1050 çevresel birim şekil değiştirme değerleri aynı kabul edilebilecek yakınlıkta olmakta, aynı durum AISI 4140 ve 5140 çelikleri arasında da görülmektedir.

Halkalı dolu silindir basma deneylerinde malzeme akışı incelenmiş ve Şekil 5.135 de farklı şekil değiştirme oranlarında makro fotoğrafları verilmiştir. Buna göre, şekil değişimi homojen değildir. Özellikle basma takımlarının altında şekil değişiminin doğal olarak küçük olduğu görülmektedir. Yükseklik azalması ilerledikçe giderek uzayan liflerin hareketini halka engellemektedir. Bu nedenle ilk önce halkanın alt ve üst bölgelerinde lifler uzayarak yaklaşmaktadır. Daha sonra halka ekvator kesitinde lifler uzadıkları ve yakınlaştıkları, halkada çevresel birim şekil değişimine en fazla etkiyi bu durumun yaptığı açıktır. Beklenildiği gibi halka fiçilaşmayı engellemiştir. Fakat fiçılaşan alt ve üst bölgelerin etkisiyle halkadaki şekil değişimi homojen değildir ve birleştiği kısımdaki yuvarlatmanın distorsiyona uğradığı hatta küçük bir çatlak olduğu görülmektedir.

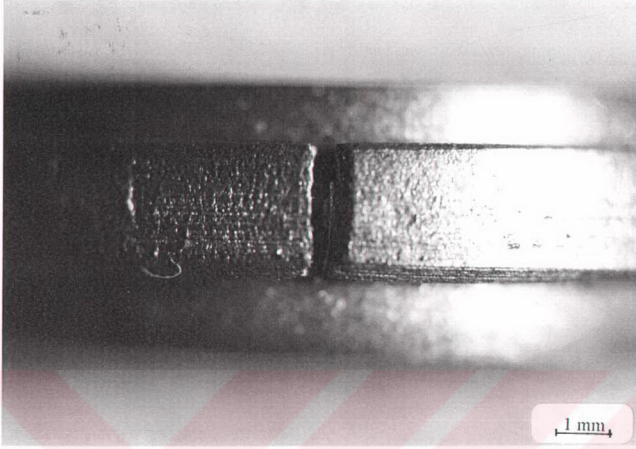


(a)

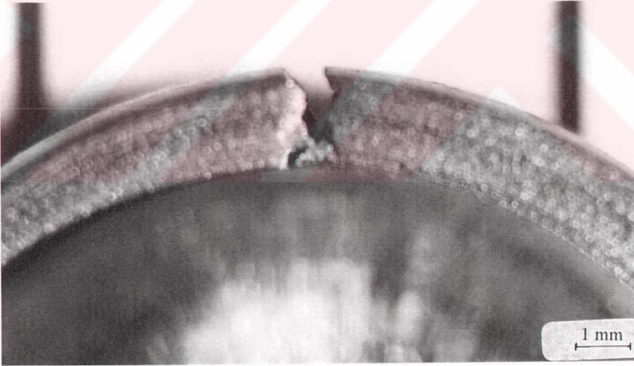


(b)

Şekil 5.135 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde akma çizgileri. (a) %34 şekil değiştirmiş. (b) %73 şekil değiştirmiş.



(a)



(b)

Şekil 5.136 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin halkalı dolu silindir basma deneyinde oluşan çatlak görüntüleri (düz basma takımı). (x 10): (a) radyal yönde. (b) eksenel yönde.

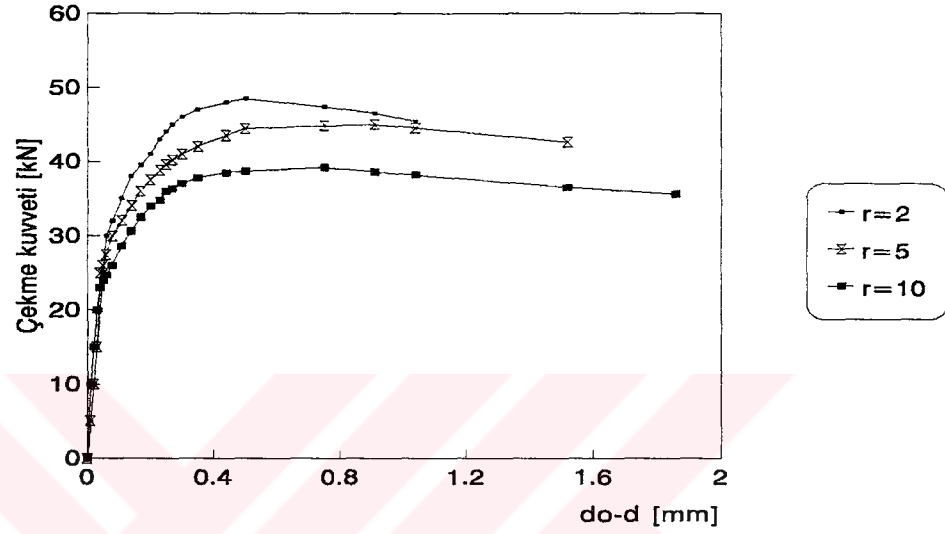
Halkalı dolu silindir basma deney örneklerinde meydana gelen çatlaklar Şekil 5.136 da görülmekte, yırtılma halka yan yüzeyinde ve halkanın tüm yüksekliği boyunca meydana gelmektedir.

5.2.4.3 Sonuç

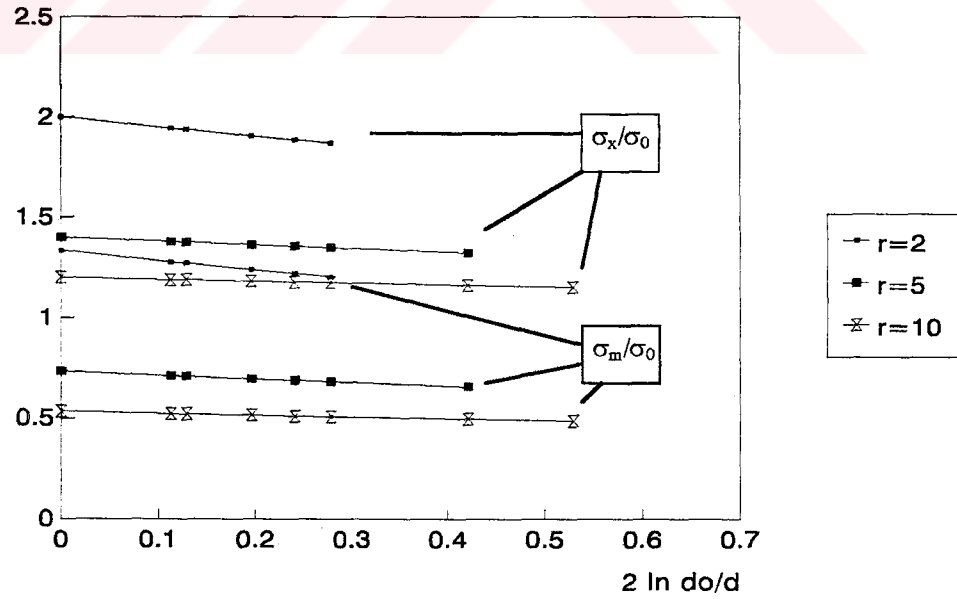
Dolu silindir ve halkalı dolu silindir basma deneyleri vasıtasıyla basma kuvveti ile çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerin yükseklik azalması ile değişimi, basma sırasındaki çevresel ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin birbirleriyle olan ilişkisi, son olarak da gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi farklı çelikler ve sürtünme koşulları için elde edilmiş, hasarı oluşturan karakteristik parametreler saptanmıştır. Dolu silindirler için elde edilen sonuçlar halkalı dolu silindirler için elde edilenlerden tamamıyla farklıdır. Dolayısıyla bu iki ayrı tip deneyin birbirini tamamlar mahiyette oldukları söylenebilir.

5.2.5 Çentikli Çekme Deneyi

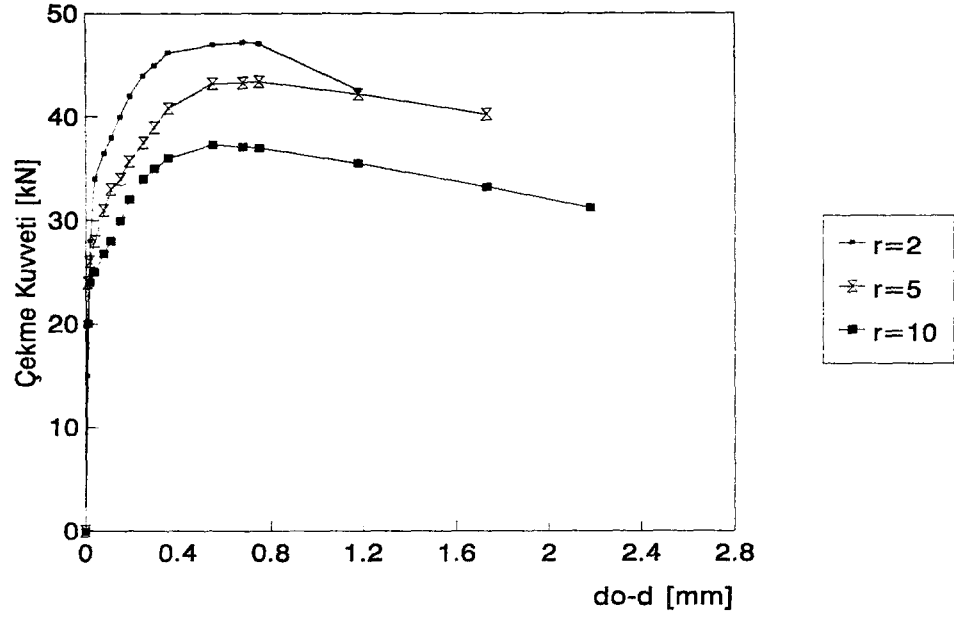
Çentikli çekme deneylerinde çentik yarıçapı değiştirilerek σ_m değeri değiştirilmekte ve böylece σ_m in hasar oluşumuna etkisi incelenebilmektedir. Şekil 5.137 - 5.160' da çentikli çekme deneyleri sonucunda elde edilen diyagramlar verilmiştir.



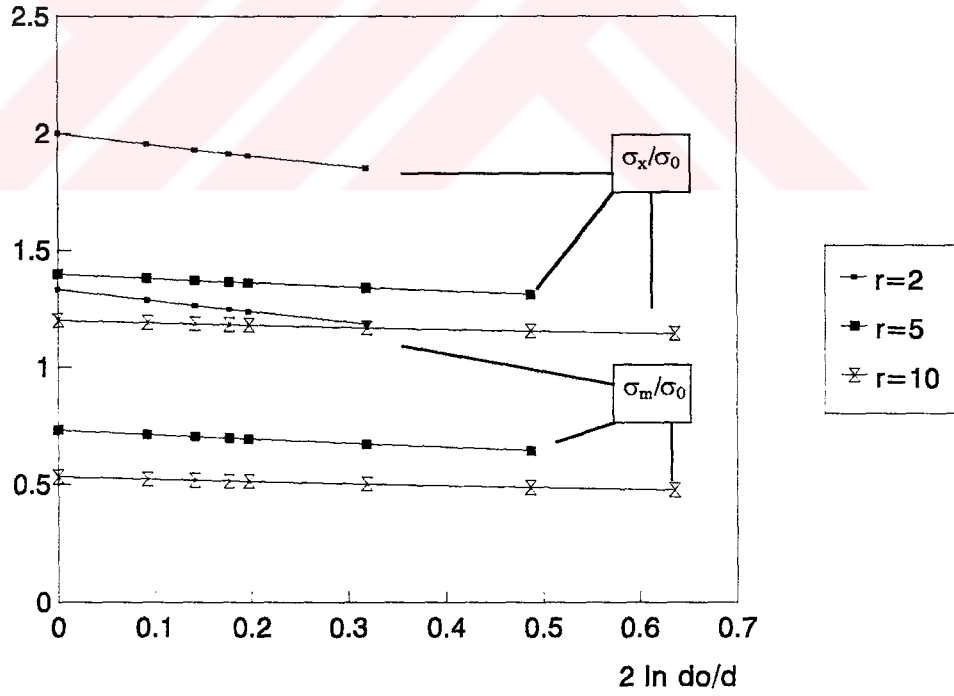
Şekil 5.137 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



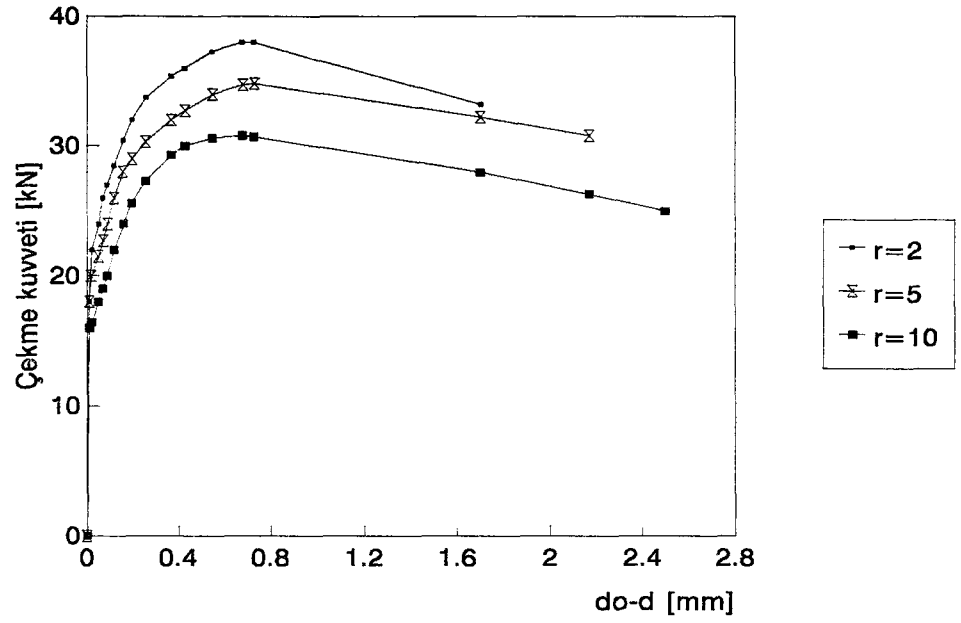
Şekil 5.138 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneylerinden eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.



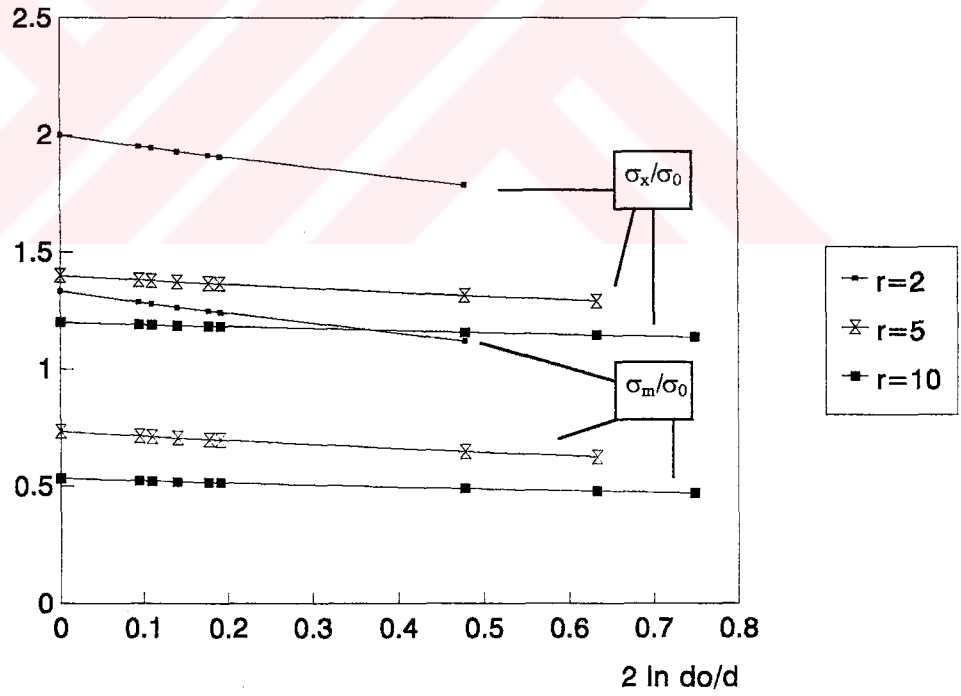
Şekil 5.139 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



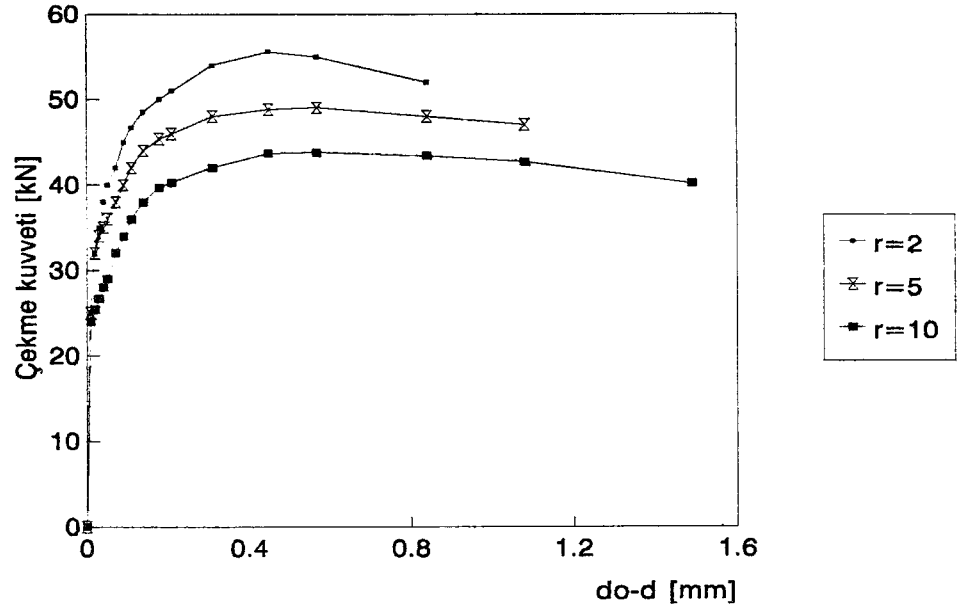
Şekil 5.140 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde aksenal ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.



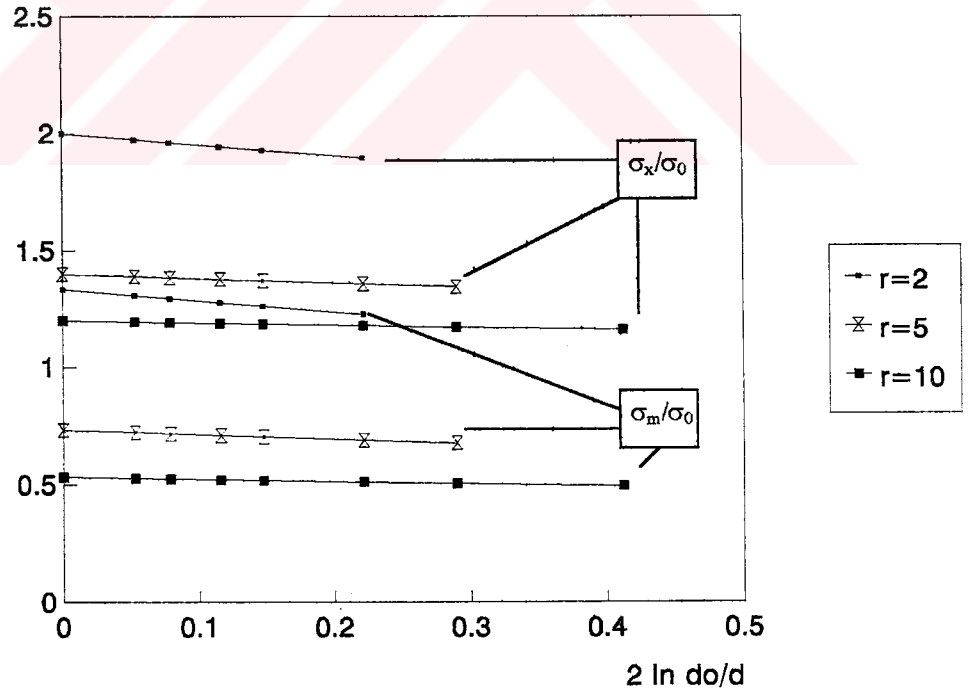
Şekil 5.141 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



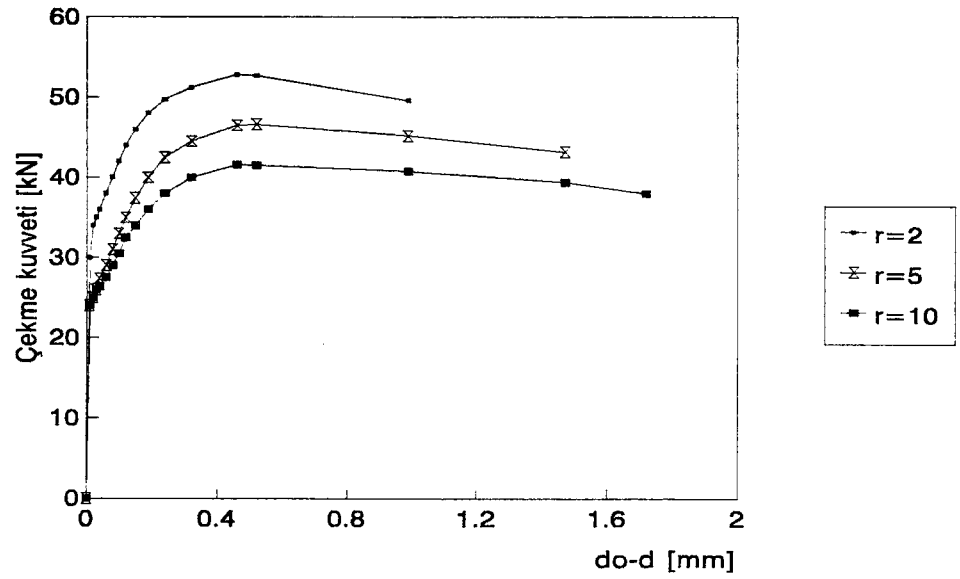
Şekil 5.142 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.



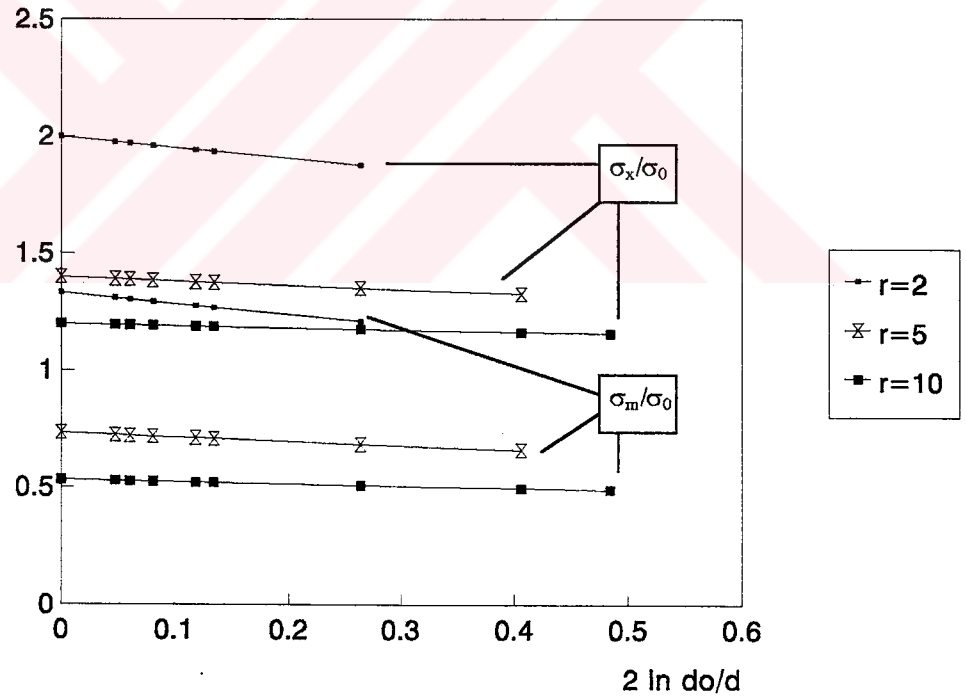
Şekil 5.143 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



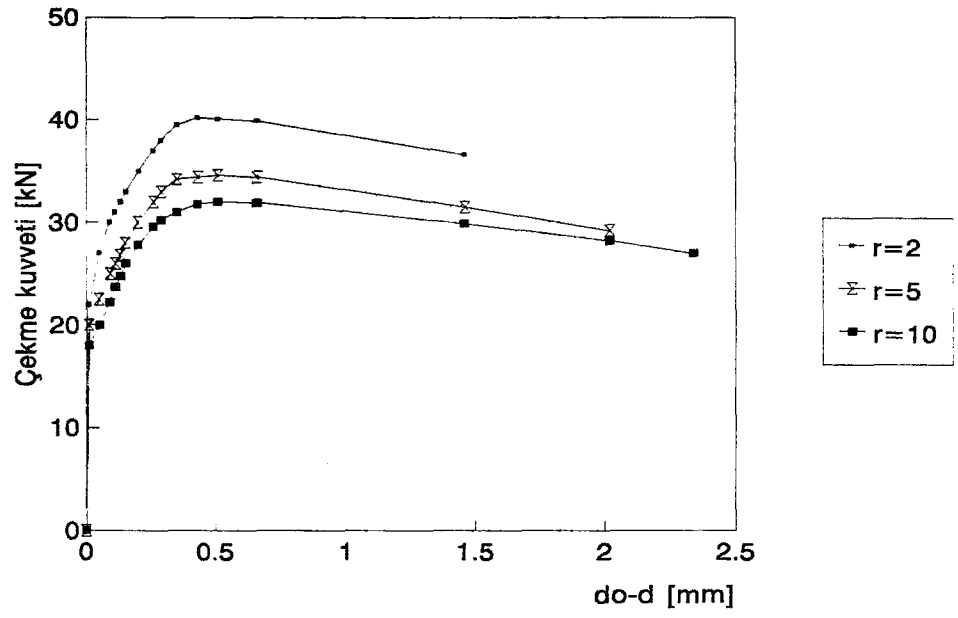
Şekil 5.144 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.



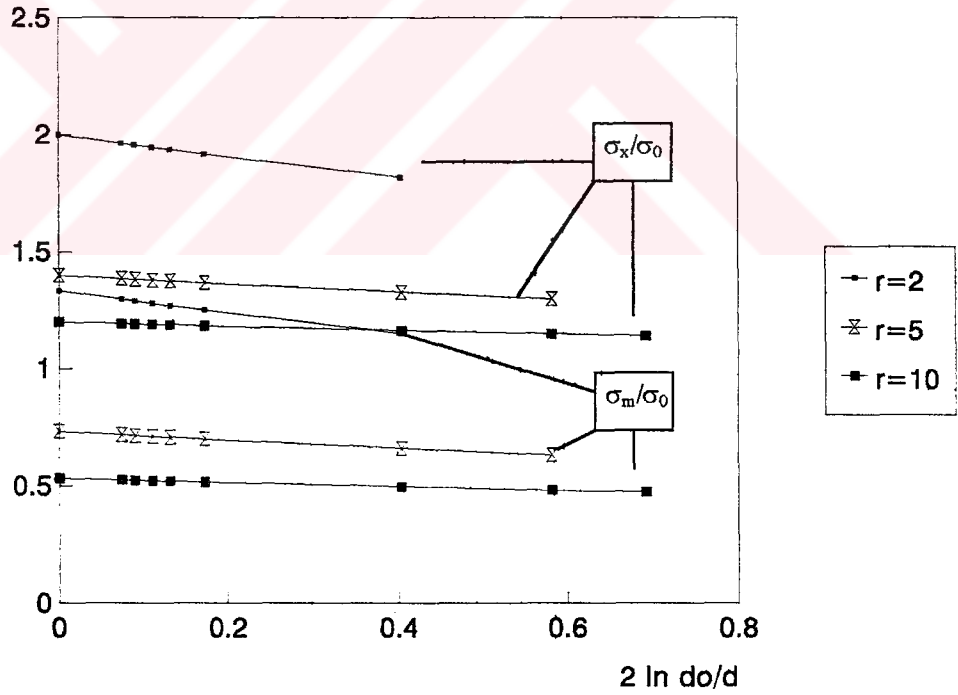
Şekil 5.145 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



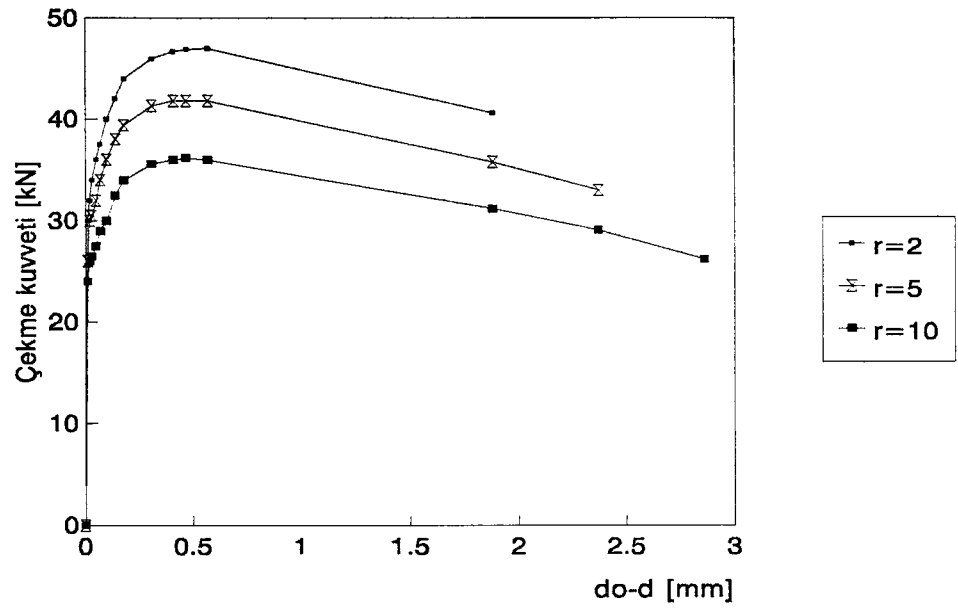
Şekil 5.146 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.



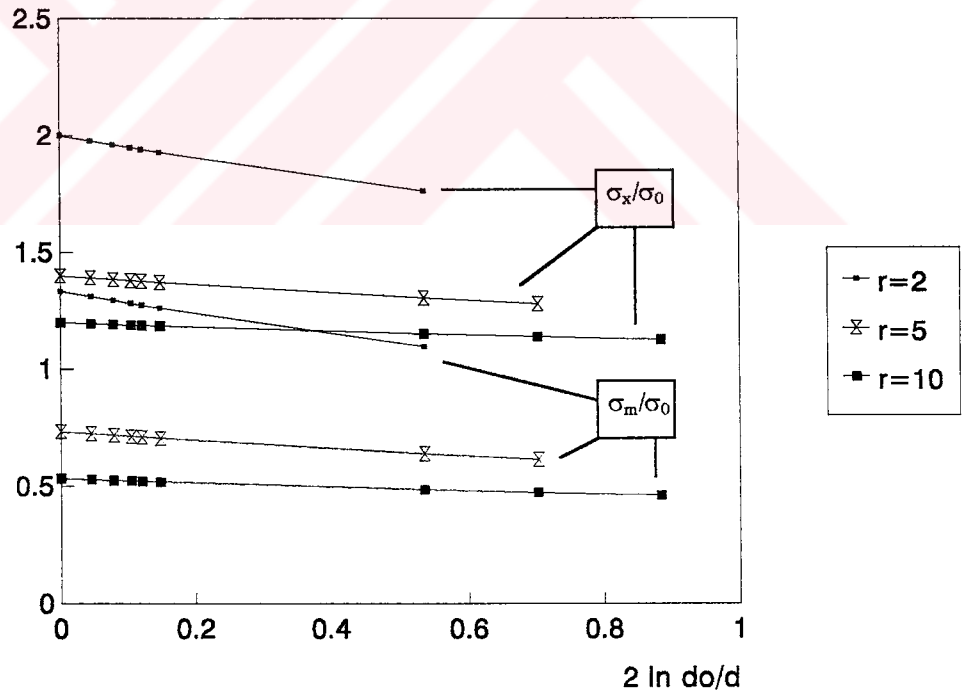
Şekil 5.147 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



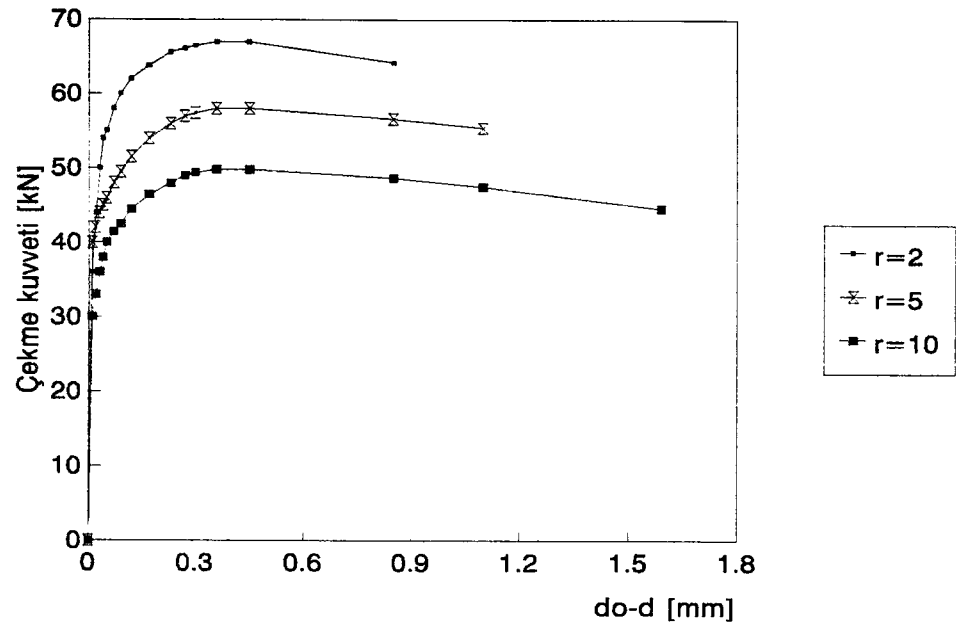
Şekil 5.148 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.



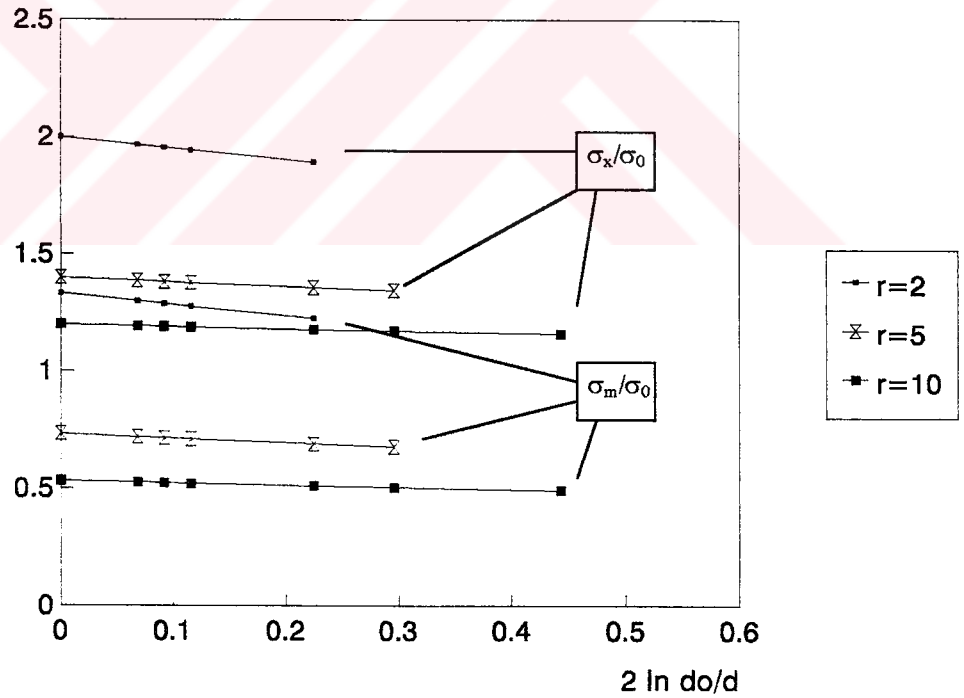
Şekil 5.149 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



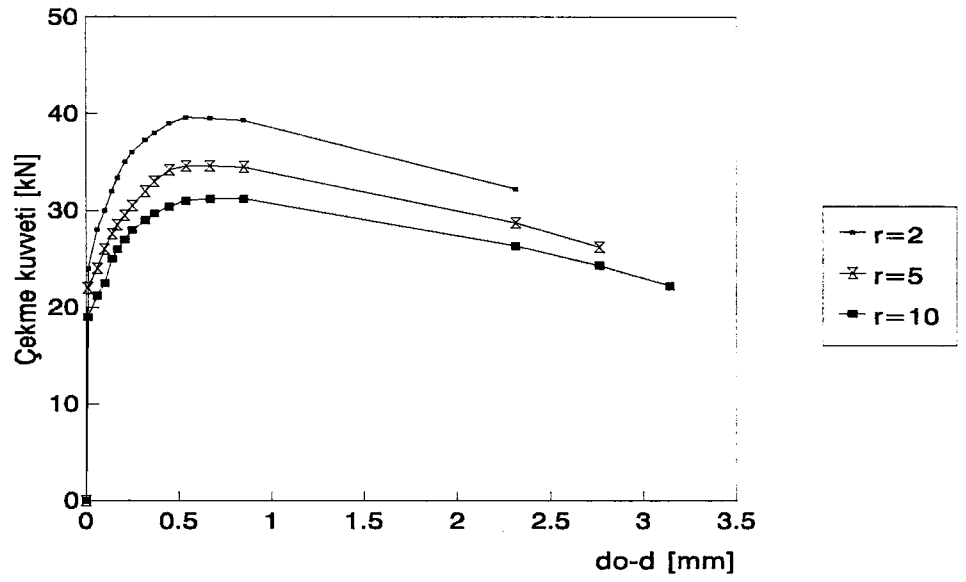
Şekil 5.150 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.



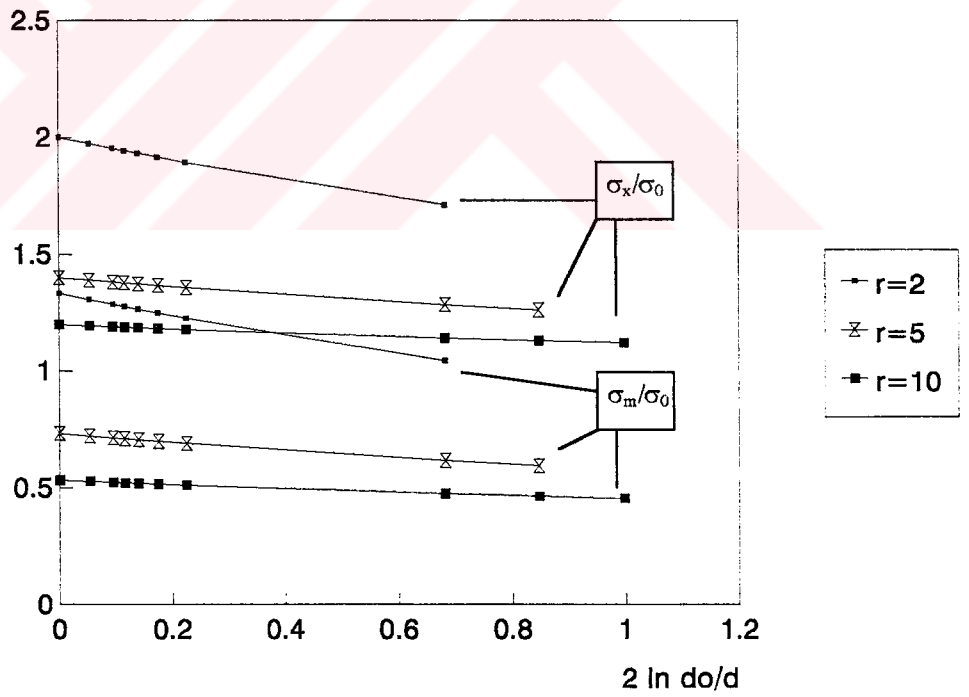
Şekil 5.151 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



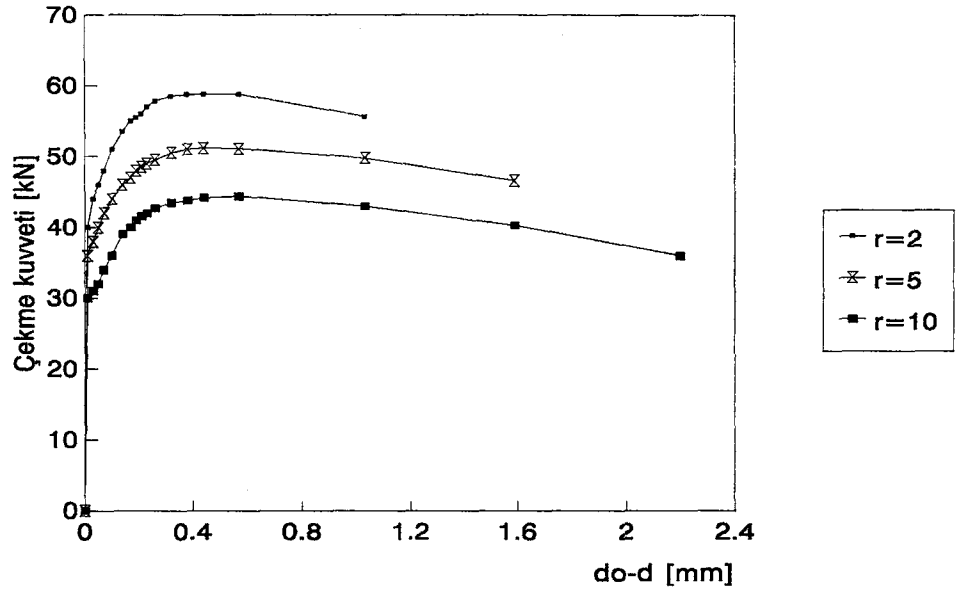
Şekil 5.152 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.



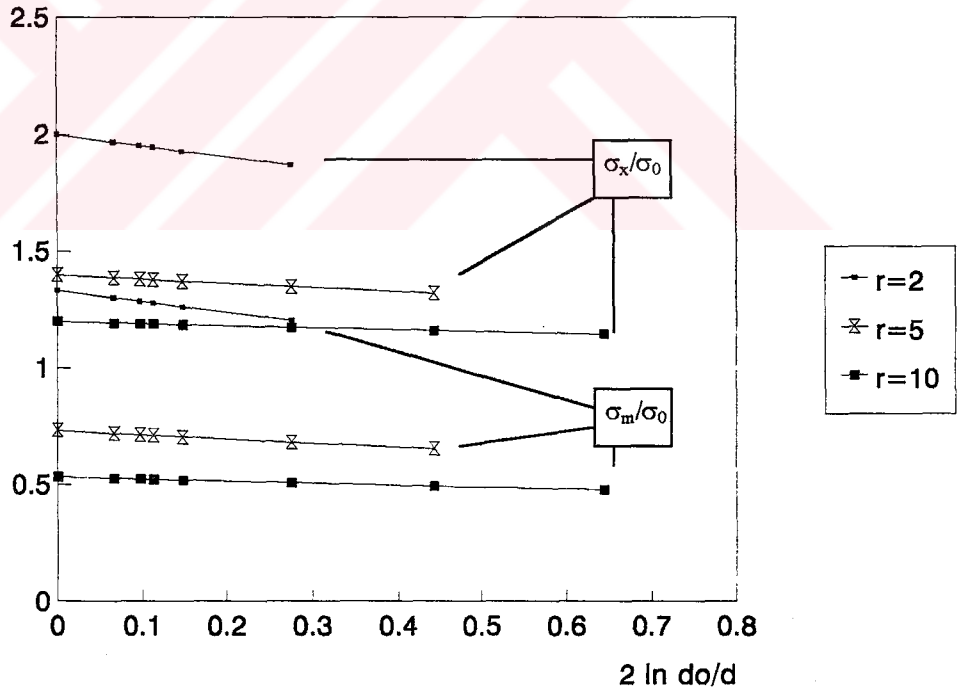
Şekil 5.153 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



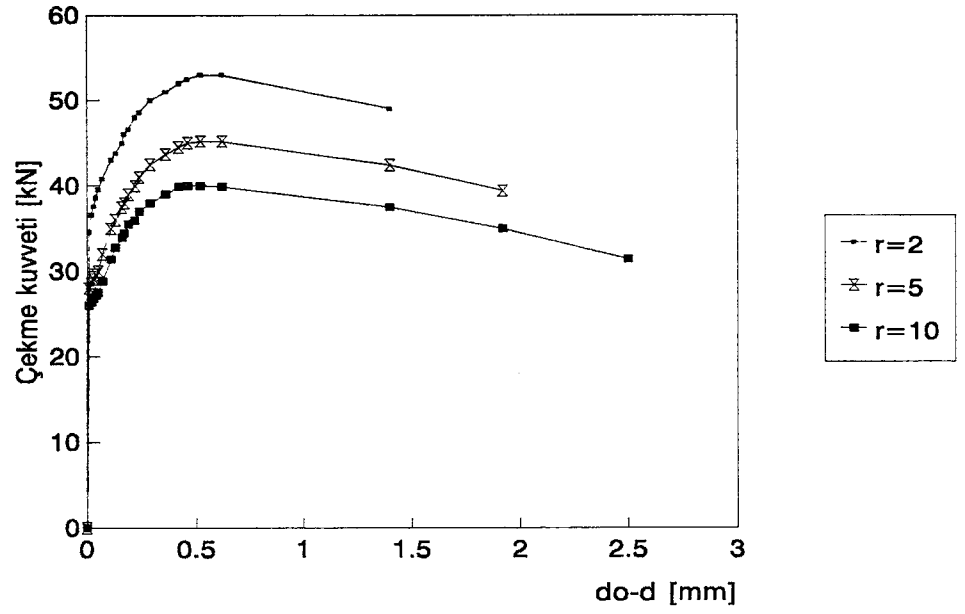
Şekil 5.154 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.



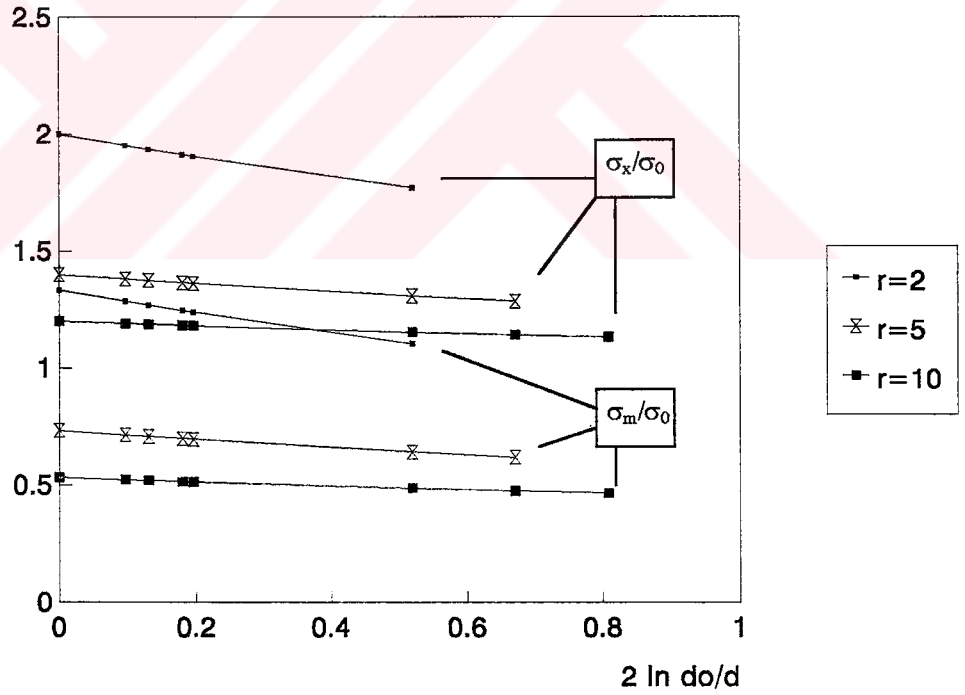
Şekil 5.155 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



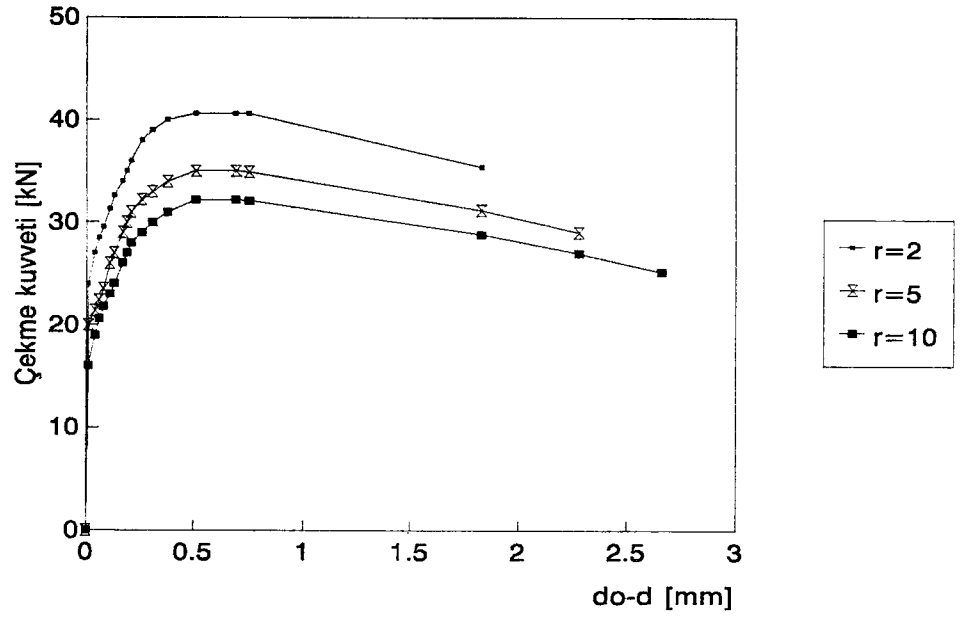
Şekil 5.156 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde aksenal ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.



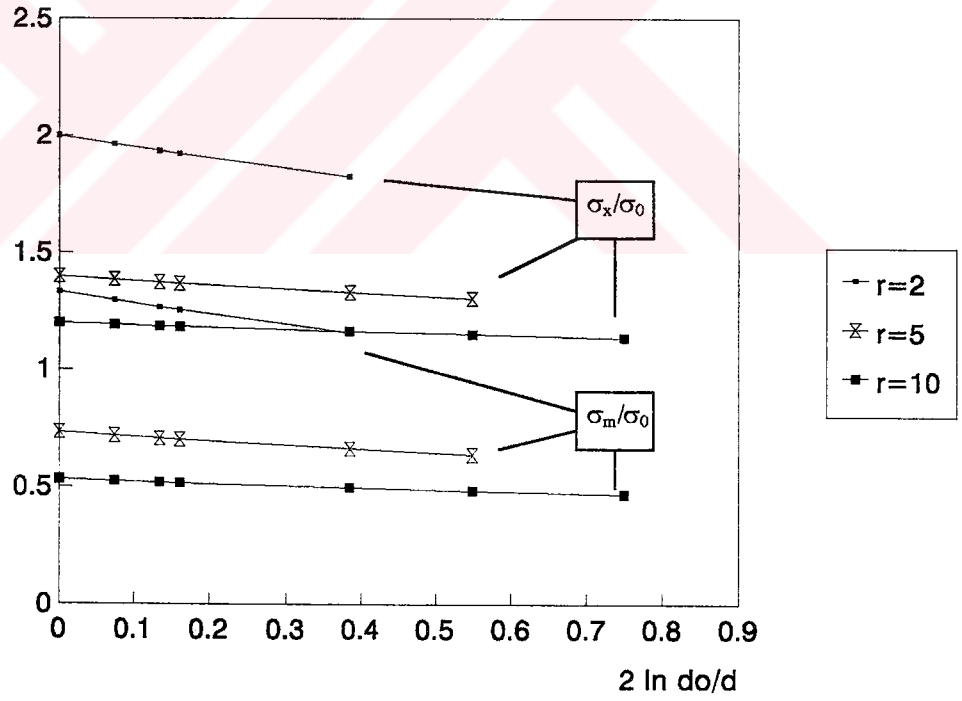
Şekil 5.157 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



Şekil 5.158 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde aksenal ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.



Şekil 5.159 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneyi eğrileri.



Şekil 5.160 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliğinin çentikli çekme deneylerinde eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin değişimi.

Tablo 5.15 Çentikli çekme deneyi sonuçları

Malzeme	Isıl işlem	Çentik yarıçapı	ϵ_{kopma}	$(\sigma_m/\sigma_0)_{kopma}$	$(\sigma_x/\sigma_0)_{kopma}$
AISI 1040	Sıcak haddelenmiş durumda	2	0.278	1.203	1.87
		5	0.421	0.657	1.324
		10	0.529	0.486	1.153
	Normalize edilmiş	2	0.319	1.186	1.853
		5	0.487	0.647	1.314
		10	0.636	0.479	1.146
	Küreleştirilmiş	2	0.478	1.121	1.788
		5	0.633	0.625	1.292
		10	0.749	0.471	1.138
AISI 1050	Sıcak haddelenmiş durumda	2	0.222	1.228	1.895
		5	0.29	0.679	1.346
		10	0.412	0.496	1.163
	Normalize edilmiş	2	0.264	1.210	1.876
		5	0.406	0.660	1.327
		10	0.484	0.490	1.157
	Küreleştirilmiş	2	0.403	1.151	1.818
		5	0.582	0.632	1.299
		10	0.692	0.475	1.142
AISI 4140	Sıcak haddelenmiş durumda	2	0.536	1.098	1.765
		5	0.703	0.615	1.282
		10	0.885	0.462	1.129
	Normalize edilmiş	2	0.225	1.227	1.894
		5	0.296	0.679	1.345
		10	0.443	0.494	1.160
	Küreleştirilmiş	2	0.681	1.045	1.711
		5	0.846	0.595	1.262
		10	0.997	0.455	1.122
AISI 5140	Sıcak haddelenmiş durumda	2	0.276	1.205	1.871
		5	0.443	0.654	1.321
		10	0.643	0.478	1.145
	Normalize edilmiş	2	0.385	1.159	1.825
		5	0.549	0.637	1.304
		10	0.749	0.471	1.138
	Küreleştirilmiş	2	0.519	1.105	1.771
		5	0.671	0.619	1.286
		10	0.808	0.467	1.134

Çentikli çekme deneyi sırasında çekme kuvvetinin değişimini veren eğrilerden ve tablo 5.15 ten çentik geometrisinin deney sonuçlarına etkili olduğu açıkça görülmektedir. Çentik yarıçapı küçüldükçe kopma anındaki kuvvetin arttığı buna

karşılık radyal deplasmanın küçüldüğü gözlenmektedir. Dolayısıyla çekme kuvvetinin değişimini veren eğrilerin kuvvet hakkında bilgilenmemizi sağlarken dövülebilirliği karakterize edemediklerini söyleyebiliriz.

Bu deneylerden elde edilen eksenel ve ortalama gerilme değerlerinin deney sırasındaki değişimi basmadaki sonuçlardan farklıdır ve şekil değişimi ilerledikçe gerilme değerleri lineer olarak düşmektedir. Ayrıca σ_m / σ_0 oranı çentikli çekmede çentik yarıçapı büyüdükçe azalmasına rağmen belirli mertebede pozitif bir değerken dolu silindir basma deneyinde negatiftir. Dolayısıyla çentikli çekme deneyi basmaya kıyasla malzemeyi daha zorlayıcı bir deneydir. σ_x / σ_0 oranı da daima pozitiftir ve σ_m / σ_0 gibi çentik yarıçapı büyüdükçe azalmaktadır. Metalurjik durumun çentikli çekme deneylerinde ϵ_{kopma} değerini çok etkiledikleri tablo 5.15 te görülmektedir. Örneğin 10 mm çentik yarıçapı için AISI 1040 çeliğinde ϵ_{kopma} sıcak haddelenmiş durumda 0.529, normalize edilmiş durumda 0.636 ve küreleştirilmiş durumda 0.749 değerindedir. Aynı husus diğer çentik yarıçapları için ve malzemeler için de geçerlidir. Benzer şekilde aynı çentik yarıçapı için ve ısıtım durumu için ϵ_{kopma} değeri bazı malzemelerin ayırdedilmesini sağlayabilir. Örneğin 2 mm çentik yarıçapı için sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliği için ϵ_{kopma} 0.278, AISI 4140 çeliği için 0.536 değerindedir. Bu örneklerin sayısını tablo 5.15 e bakarak çoğaltmak mümkündür. Sonuç olarak, σ_m / σ_0 oranının sünekliğe olan önemli etkisi göz önüne alınarak, çentikli çekme deneyinin çeliklerin ayırdedilebilmesini ve dövülebilirliklerini saptamak açısından uygun olduğu söylenebilir.

5.3 Sonuç

Deneyisel çalışmalardan varılan sonuçlar aşağıda verilmiştir. Dolu silindir ve halkalı dolu silindir basma deneyleri vasıtasıyla, çeşitli çeliklerin farklı ısıtım durumlarında ve farklı sürtünme koşullarında, çevresel - eksenel birim şekil değiştirme ilişkileri ve gerilme elemanları efektif gerilme oranlarının yükseklik azalması ile değişimi gibi mekanik karakteristikleri elde edilmiştir.

Yine aynı deneylerden hasar anındaki şekil değıştirme ve ortalama gerilme değeri saptanmıştır. Ortalama gerilmede önemli bir değışimin elde edilebildiği bu iki tıp basma deneyi birbirini tamamlar mahiyettedir.

Çentikli çekme deneyleri vasıtasıyla ise, çentik yarıçapı değıştirilerek, yüksek pozitif gerilme halleri elde edilebilmiştir. Böylece bu deneylerle dolu silindir ve halkalı dolu silindir basma deneyleriyle elde edilen bilgiler tamamlanmıştır.



BÖLÜM 6

İRDELEME

Bu araştırmada yapılan deneysel çalışmalar farklı çeliklerin değişik ısıtma işlem durumlarında ve sürtünme koşullarında mekanik karakteristiklerinin elde edilmesini sağlamışlardır. Burma, dolu silindir ve halkalı dolu silindir basma ve nihayet çentikli çekme deneyleriyle elde edilen bu mekanik karakteristikler dövülebilirliğin kantitatif olarak saptanması bakımından önemlidir. Zira çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar malzemede hasar oluşumuna yol açan kritik değerlerin saptanmasını sağlamaktadırlar.

6.1 Burma deneyi

Bir malzemenin dövülebilirliği burma deneyi vasıtasıyla kopmaya yol açan devir sayısı veya kopmada eşdeğer (efektif) şekil değiştirme saptanarak belirlenebilir. Bu kriterden hareketle çelikleri tablo 6.1 de görüldüğü gibi dövülebilirliklerine göre sıralayabiliriz.

Tablo 6.1 Burma deneyinde kopmaya yol açan devir sayısı değerlerinden dövülebilirlik sıralaması.

Sıralama	Kopmaya yol açan devir sayısı	Çelik
1	5.267	Küreleştirilmiş AISI 4140
2	5.175	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140
3	5.043	Küreleştirilmiş AISI 5140
4	4.129	Normalize edilmiş AISI 5140
5	3.863	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140
6	3.703	Küreleştirilmiş AISI 1040
7	3.317	Küreleştirilmiş AISI 1050
8	3.154	Normalize edilmiş AISI 1040
9	3.051	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040
10	3.039	Normalize edilmiş AISI 1050
11	3.033	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050
12	2.069	Normalize edilmiş AISI 4140

Tablo 6.1 e göre, çelikler küreleştirilmiş durumda en iyi dövülebilirliği, daha sonra normalize edilmiş durumda, en az dövülebilirliği sıcak haddelenmiş durumda göstermiştir. AISI 4140 çeliği sıcak haddelenmiş durumda tav çukurunda bekletilmesi nedeniyle küreleşmiş mikroyapıya sahip olduğu için dövülebilirliği iyidir. Perlit içersindeki lameller karbonların küreleşmesi nedeniyle şekil değiştirme daha kolay gerçekleşmektedir. Normalizasyon ısı işlemiyle malzemelerin tane boyutları küçülmekte ve daha homojen tane yapısı meydana gelmektedir. Bu nedenle dövülebilirlik normalize edilmiş durumlarda sıcak haddelenmiş durumlara kıyasla daha iyi sonuçlanmıştır. Çünkü ince taneli içyapı dövülebilirliği iyileştirmektedir [27]. Bununla beraber, çeliklerde karbon miktarının artışı nedeniyle dövülebilirlik azalmaktadır. Bu durum AISI 1050 ve 1040 çeliklerinde etkisini göstermiştir. Çeliğin bileşimindeki Cr ve Mo elementleri dövülebilirliği artırmaktadır. Her ikisinin birlikte bulunduğu AISI 4140 çeliği en iyi dövülebilirliği göstermiştir. En az dövülebilirliği gösteren normalize edilmiş AISI 4140 çeliği bileşimindeki Cr elementi nedeniyle soğuma sırasında havadaki rutubetten dahi su alarak sertleşebilme özelliğine sahiptir. Bu durum en ince taneli içyapı olmasına karşılık lameller arası mesafenin çok daha kısılmasına neden olmuştur. Bu da malzemeyi sertleştirmekte, dayanımını yükseltmekte ve sünekliği azaltmaktadır.

Burmada kopmaya yol açan devir sayısı kopma bölgesindeki gerilme ve şekil değişimi halleri için hiçbir bilgi vermeyen bir kriterdir. Bu nedenle dövülebilirliğin tanımlanması için başka deneylere de başvurulması gereği duyulmaktadır.

6.2 Basma Deneyleri

Dövülebilirlik, çeşitli araştırmacılar tarafından, basma deneyinde çatlak görülene kadar meydana gelen yükseklik azalmasına bağlı olarak tanımlanmaktadır [12,26]. Bu araştırmacılara göre çatlak oluştuğu andaki yükseklik azalması ne kadar büyükse malzemenin dövülebilirliği o kadar iyidir. Bu kriterden hareketle, deney malzemeleri, dövülebilirliklerine göre, dolu silindir ve halkalı dolu silindir basma deneyleri sonuçları göz önüne alınarak tablo 6.2 ve tablo 6.3 de sıralanmıştır.

Tablo 6.2 Dolu silindir basma deneyinde hasar anında yükseklik azalması değerlerinden dövülebilirlik sıralaması.

Sürtünme koşulları	Sıralama	$[(h_0-h)/h_0] \times 100$	Malzeme
Kuru	1	74	Küreleştirilmiş AISI 5140
	2	74	Küreleştirilmiş AISI 1040
	3	73	Normalize edilmiş AISI 5140
	4	73	Normalize edilmiş AISI 1050
	5	72	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050
	6	72	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140
	7	71	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140
	8	70	Küreleştirilmiş AISI 1050
	9	70	Küreleştirilmiş AISI 4140
	10	69	Normalize edilmiş AISI 4140
	11	65	Normalize edilmiş AISI 1040
	12	61	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040
Yivli	1	65	Küreleştirilmiş AISI 4140
	2	62	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140
	3	62	Normalize edilmiş AISI 5140
	4	62	Küreleştirilmiş AISI 5140
	5	61	Normalize edilmiş AISI 4140
	6	61	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140
	7	58	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040
	8	58	Küreleştirilmiş AISI 1040
	9	58	Normalize edilmiş AISI 1040
	10	57	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050
	11	56	Normalize edilmiş AISI 1050
	12	54	Küreleştirilmiş AISI 1050

Sürtünme koşulları	Sıralama	$[(h_0-h)/h_0] \times 100$	Malzeme
Teflon	1	78	Küreleştirilmiş AISI 5140
	2	78	Küreleştirilmiş AISI 4140
	3	77	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140
	4	76	Normalize edilmiş AISI 5140
	5	76	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140
	6	75	Küreleştirilmiş AISI 1040
	7	74	Normalize edilmiş AISI 1040
	8	74	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040
	9	73	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050
	10	71	Normalize edilmiş AISI 1050
	11	71	Küreleştirilmiş AISI 1050
	12	64	Normalize edilmiş AISI 4140
SAE 50	1	75	Küreleştirilmiş AISI 1050
	2	75	Küreleştirilmiş AISI 4140
	3	75	Küreleştirilmiş AISI 5140
	4	74	Normalize edilmiş AISI 1040
	5	74	Küreleştirilmiş AISI 1040
	6	74	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140
	7	73	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050
	8	72	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140
	9	69	Normalize edilmiş AISI 5140
	10	67	Normalize edilmiş AISI 4140
	11	67	Normalize edilmiş AISI 1050
	12	62	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040

Tablo 6.3 Halkalı dolu silindir basma deneyinde hasar anında yükseklik azalması değerlerinden dövülebilirlik sıralaması.

Sürtünme koşulları	Sıralama	$[(h_0-h)/h_0] \times 100$	Malzeme
Düz	1	73	Küreleştirilmiş AISI 4140
	2	73	Küreleştirilmiş AISI 5140
	3	72	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140
	4	69	Küreleştirilmiş AISI 1050
	5	63	Küreleştirilmiş AISI 1040
	6	63	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140
	7	59	Normalize edilmiş AISI 4140
	8	58	Normalize edilmiş AISI 1040
	9	57	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050
	10	57	Normalize edilmiş AISI 5140
	11	54	Normalize edilmiş AISI 1050
	12	54	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040
Yıvli	1	69	Küreleştirilmiş AISI 5140
	2	67	Küreleştirilmiş AISI 4140
	3	67	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140
	4	56	Normalize edilmiş AISI 5140
	5	53	Normalize edilmiş AISI 4140
	6	52	Küreleştirilmiş AISI 1040
	7	52	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140
	8	51	Küreleştirilmiş AISI 1050
	9	51	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040
	10	48	Normalize edilmiş AISI 1050
	11	47	Normalize edilmiş AISI 1040
	12	46	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050

Bu iki tablodan elde edilen sonuçlar arasında çeliğin bileşimindeki elementlerin, daha sonra ısıtılma işlem durumunun etkisini gösteren bir uyum vardır.

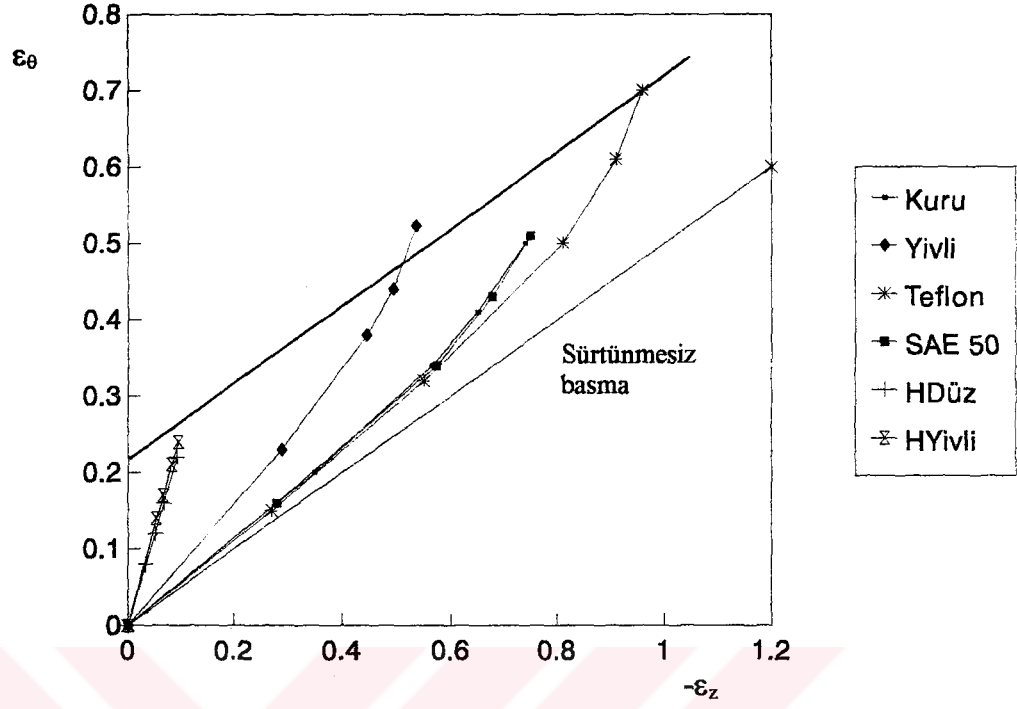
Bu iki tabloya göre çelikler küreleştirilmiş durumda en iyi, daha sonra normalize edilmiş durumda ve en az ise normalize edilmiş koşullara çok yakın değerlerde sıcak haddelenmiş durumda dövülebilirlik özelliği göstermektedir.

Her iki tip basma deneyi sonuçları ile burma deneyi sonuçları çeliğin bileşimindeki elementlerin ve ısıtılma işlem durumlarının dövülebilirliğe etkilerini göstermesi açısından bir uyum içindedir.

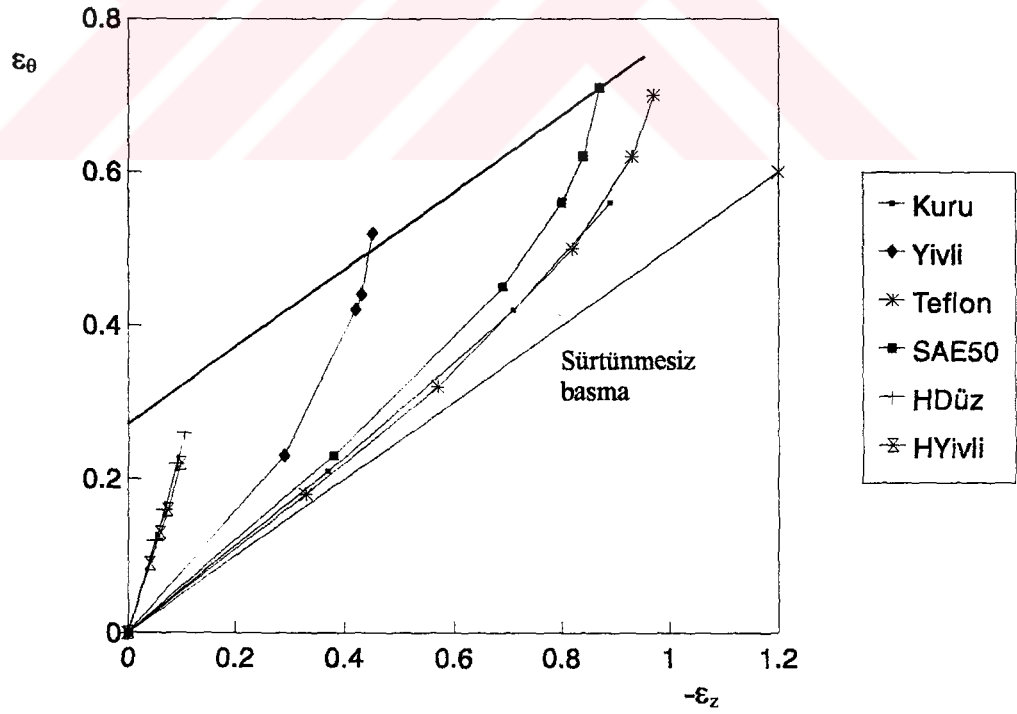
Mamafih, karbon içerikleri yakın olan ve iç yapıları da çok büyük farklılıklar göstermeyen çeliklerin dövülebilirlik açısından sınıflandırılmasında hasara yol açan yükseklik azalmasını esas almak fazla anlamlı olmayabilir.

Kuhn ise çevresel birim şekil değiştirmenin aksel birim şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimini veren $[\epsilon_0 = f(\epsilon_z)]$ şekillendirme sınır diyagramlarının çizilmesini önermektedir[10]. Kuhn'a göre hasar anında ϵ_0 ve ϵ_z değerleri sürtünmesiz (üniform) basma doğrusuna paralel yani eğimi 1/2 olan bir şekillendirme sınır doğrusu belirlerler; bu doğrunun ötesi hasar bölgesidir. Bu doğrunun düşey eksenle kesiştiği noktanın yatay eksene olan uzaklığı dövülebilirliğin bir göstergesi (endisi) olarak alınabilir.

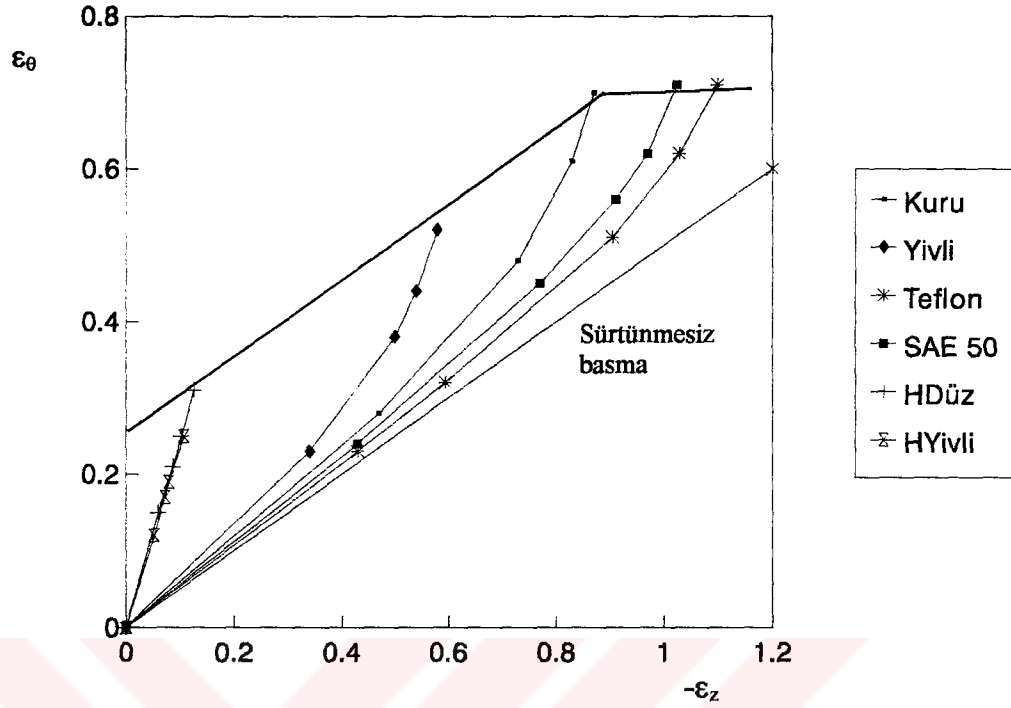
Çalışmada ele aldığımız tüm çeliklerin şekillendirme sınır diyagramları Şekil 6.1-6.12 de verilmiştir.



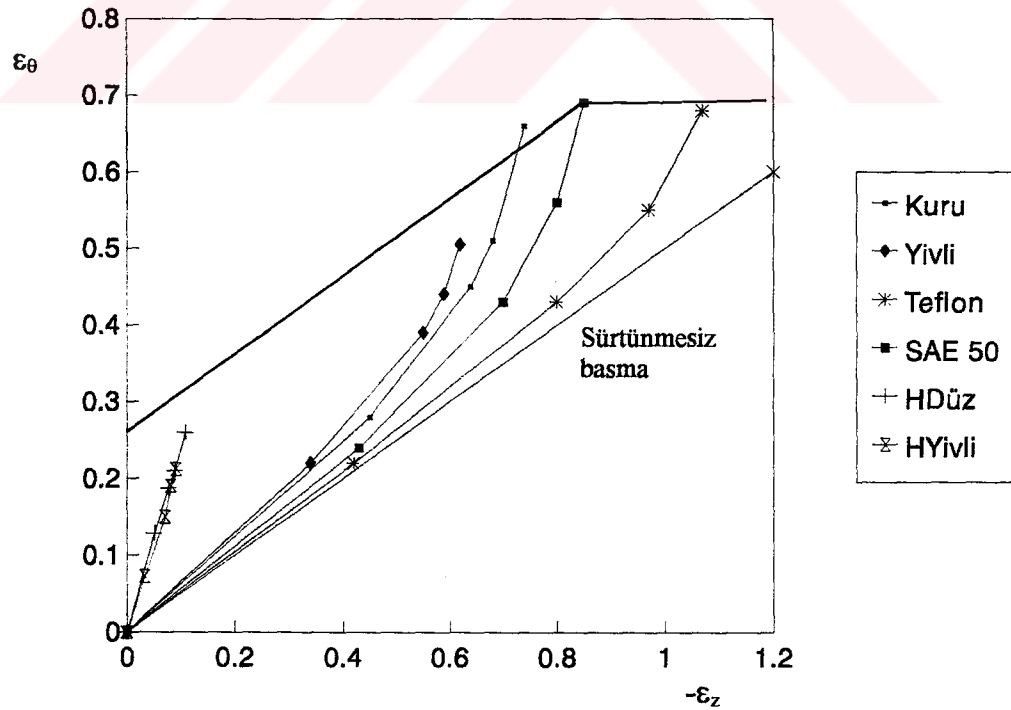
Şekil 6.1 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.



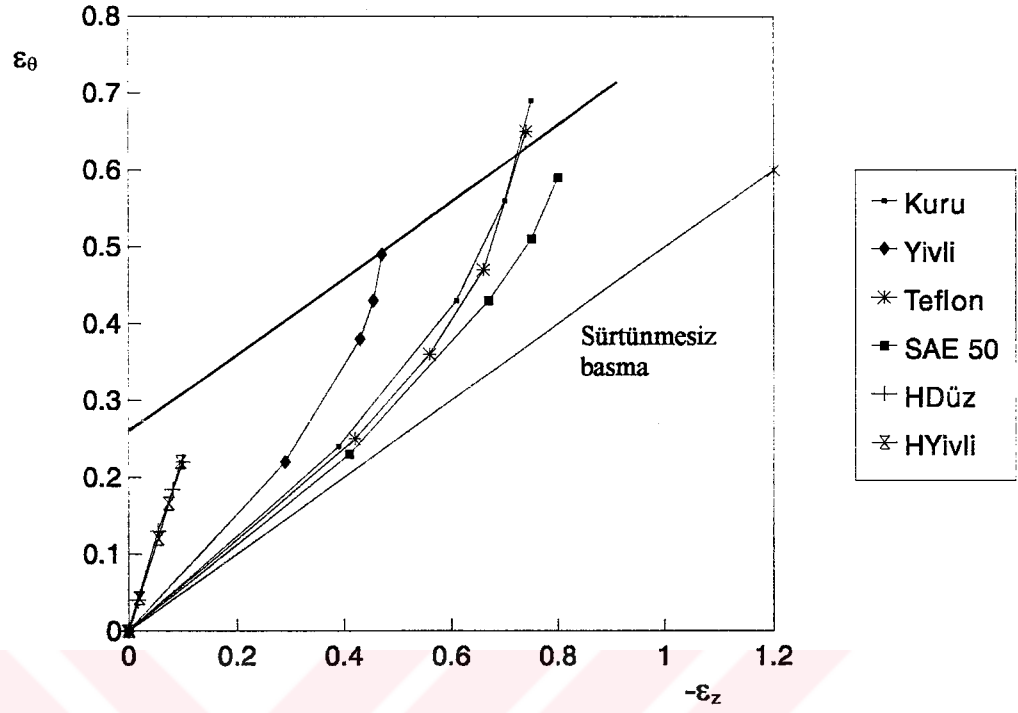
Şekil 6.2 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.



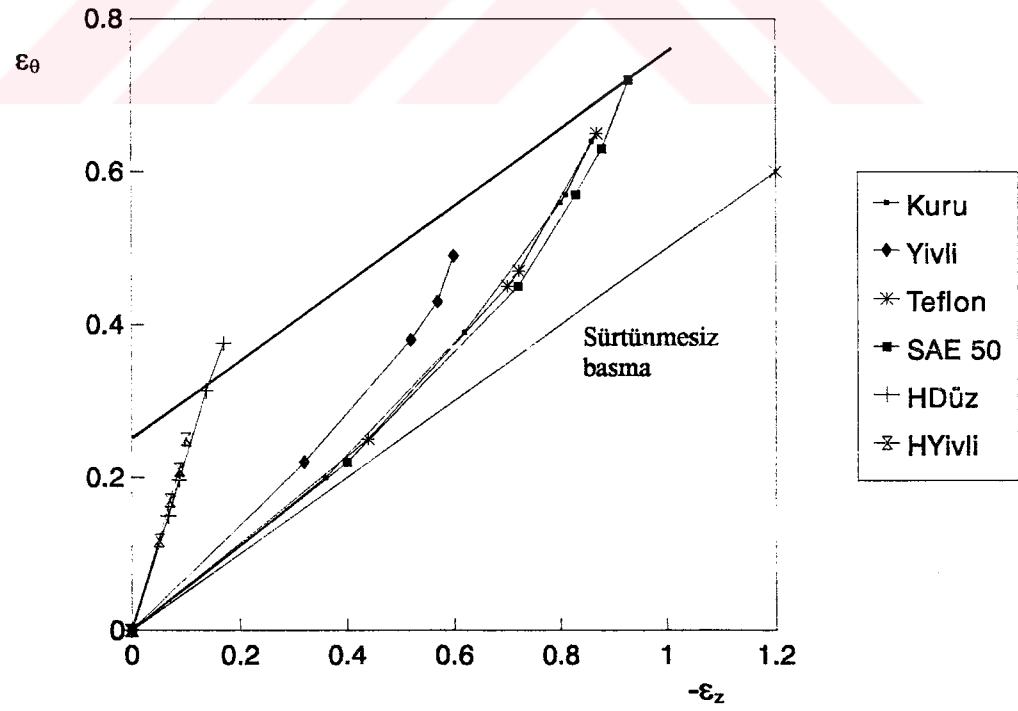
Şekil 6.3 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.



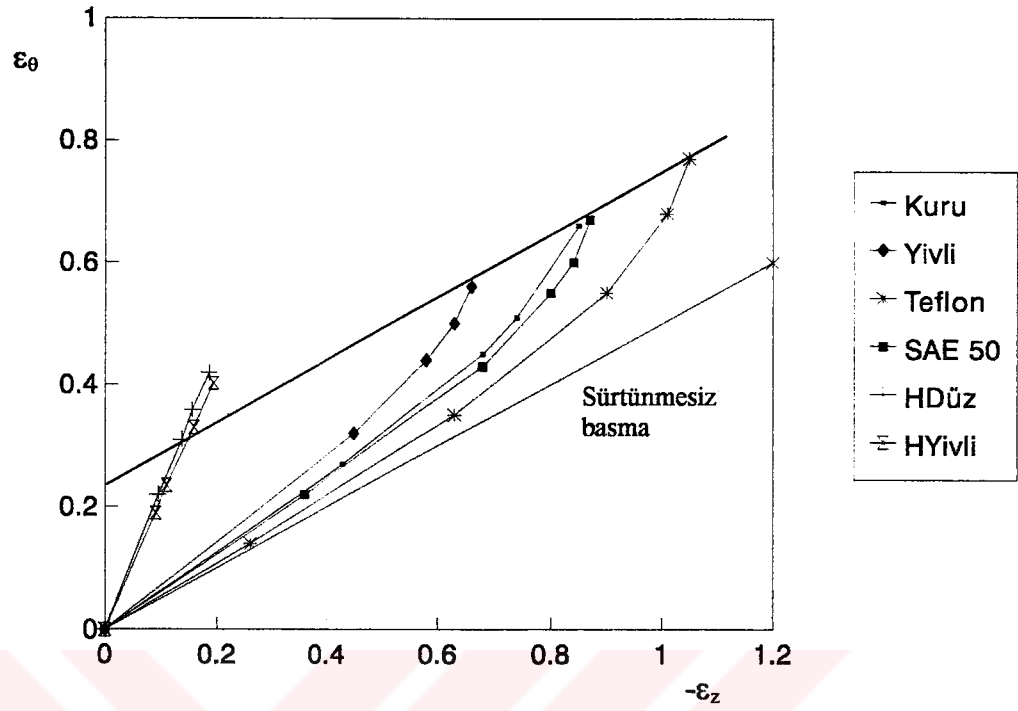
Şekil 6.4 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.



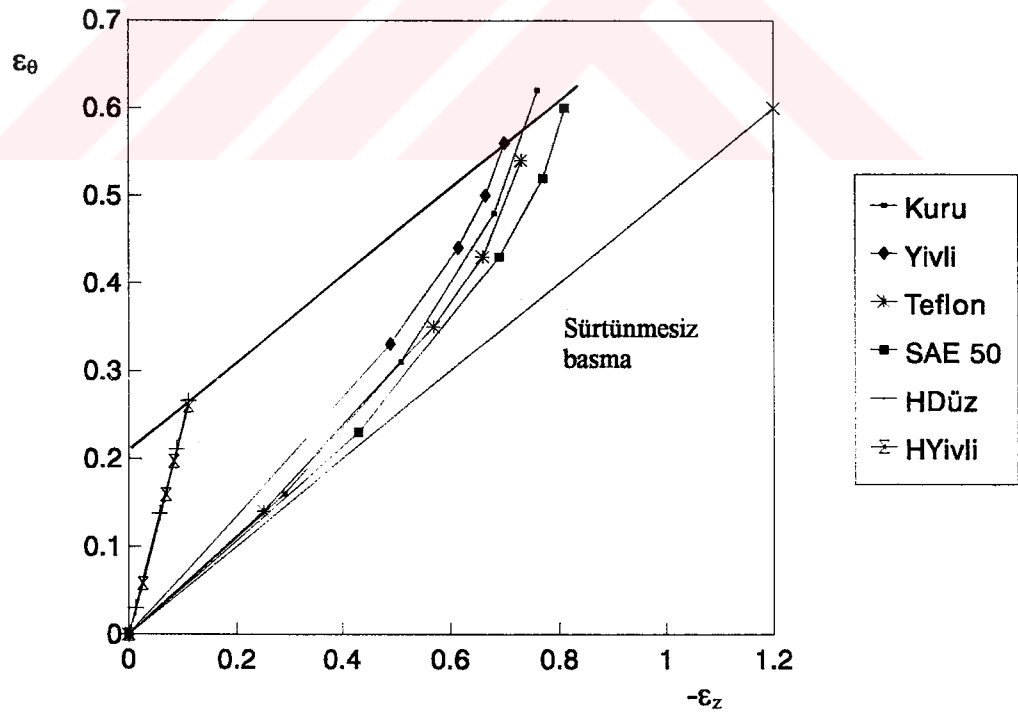
Şekil 6.5 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.



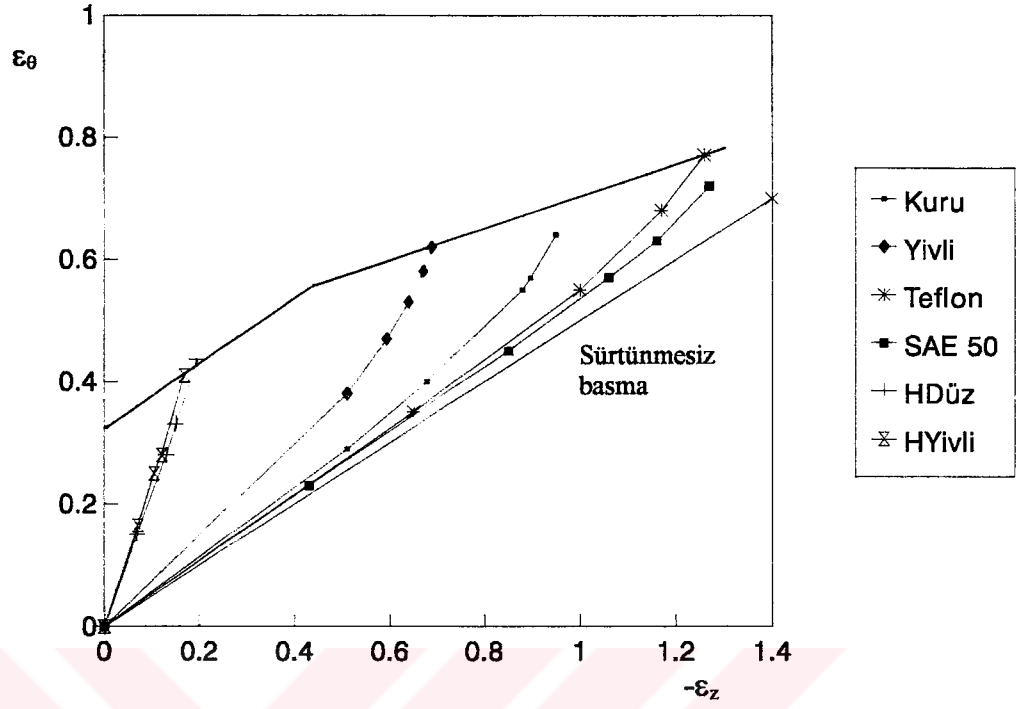
Şekil 6.6 Küreleştirilmiş AISI 1050 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.



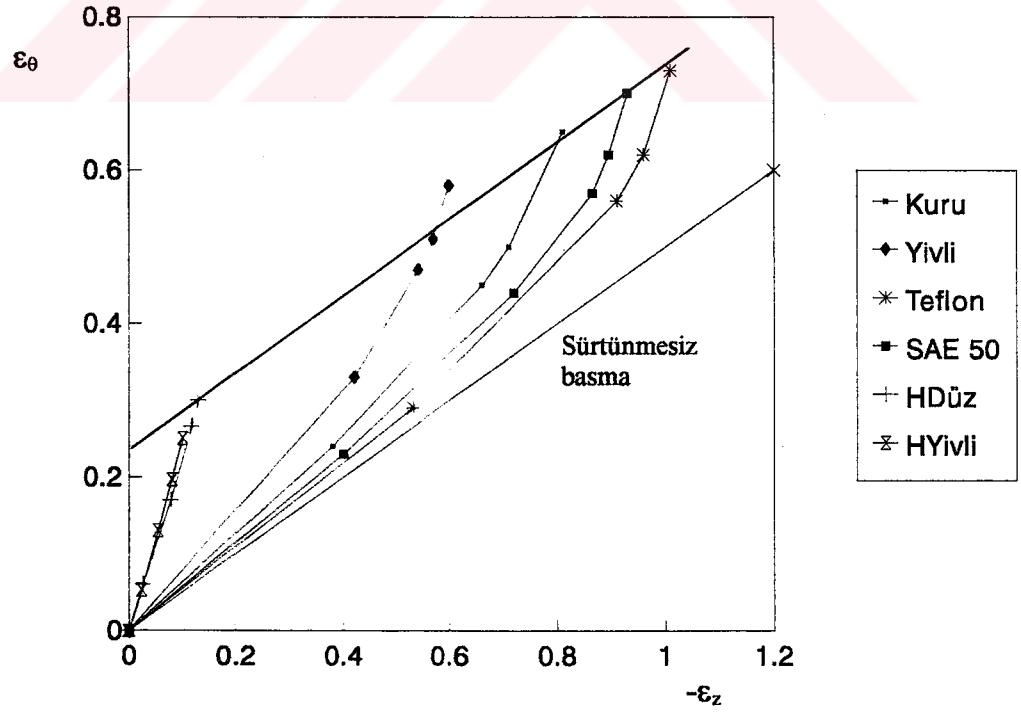
Şekil 6.7 Sıcak haddelenmiş surumda AISI 4140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.



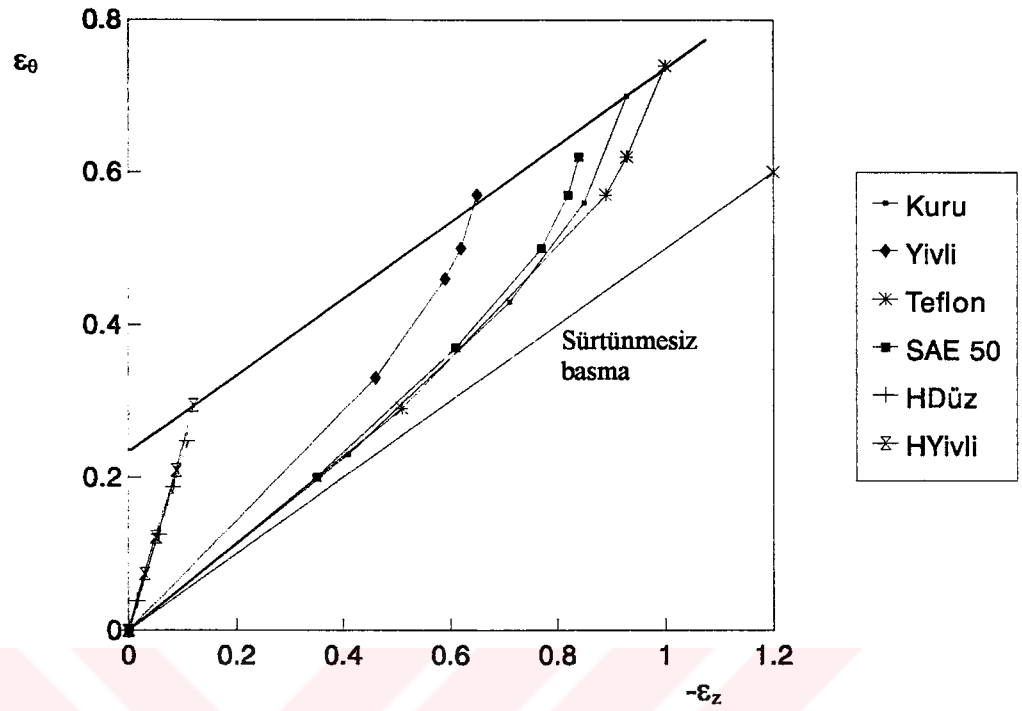
Şekil 6.8 Normalize edilmiş AISI 4140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.



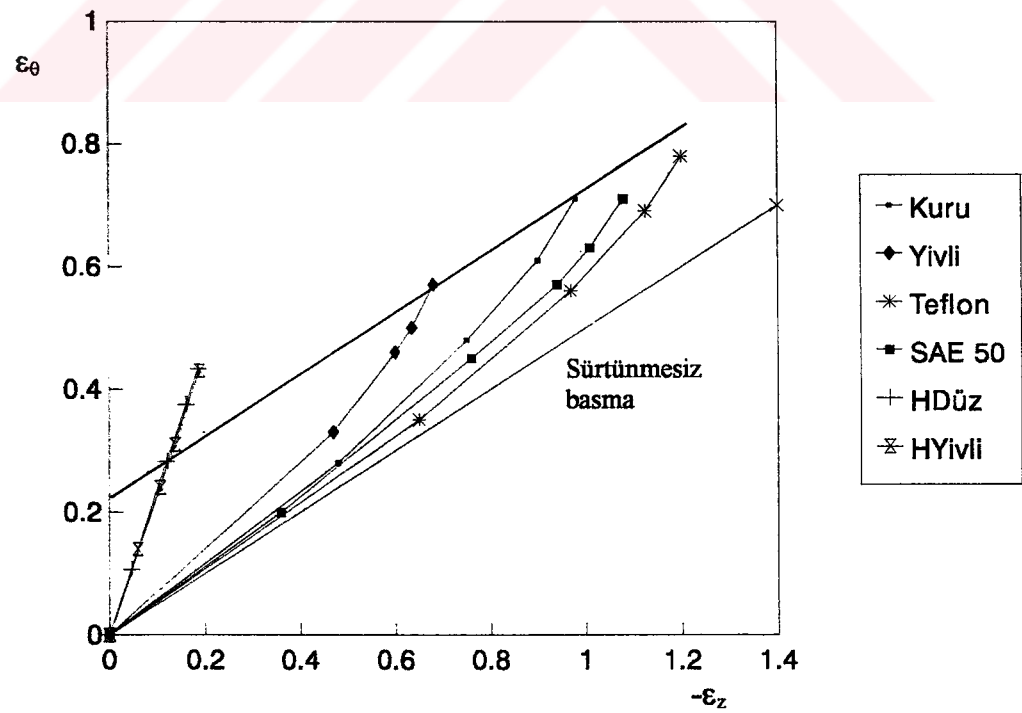
Şekil 6.9 Küreleştirilmiş AISI 4140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.



Şekil 6.10 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.



Şekil 6.11 Normalized AISI 5140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı.



Şekil 6.12 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliği şekillendirme sınır diyagramı .

Diyagramlardan elde edilen şekillendirme sınır doğruları her durum için sürtünmesiz basma doğrusuna benzememektedir. Aynı şekilde şekillendirme sınır doğruları her durum için Kivivuorinin çalışmalarında elde ettiği gibi de değildir [14]. Fakat Sowerby'nin çalışmalarında elde ettiği şekillendirme sınır diyagramı sonuçları ile genel bir benzerlik sağlamaktadır [21,58].

Kuhn'a göre şekil değişimi türü ne olursa olsun (basma, haddeme ve eğme) hasar anındaki ϵ_0 ve ϵ_z değerlerinin belirledikleri nokta sürtünmesiz basmaya paralel bir doğru üzerinde bulunurlar [10]. Bu teorinin her koşulda geçerli olmadığı çalışmamızda kanıtlanmış bulunmaktadır.

Çalışmada ele alınan tüm çelikler Kuhn dövülebilirlik endisine göre tablo 6.4 de sıralanmıştır.

Tablo 6.4 Kuhn dövülebilirlik endisine göre dövülebilirlik sıralaması.

Sıralama	Dövülebilirlik endisi	Malzeme
1	0.325	Küreleştirilmiş AISI 4140
2	0.27	Normalize edilmiş AISI 1040
3	0.26	Küreleştirilmiş AISI 1050
4	0.26	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050
5	0.26	Normalize edilmiş AISI 1050
6	0.255	Küreleştirilmiş AISI 1040
7	0.24	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 4140
8	0.235	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140
9	0.235	Normalize edilmiş AISI 5140
10	0.225	Küreleştirilmiş AISI 5140
11	0.22	Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040
12	0.21	Normalize edilmiş AISI 4140

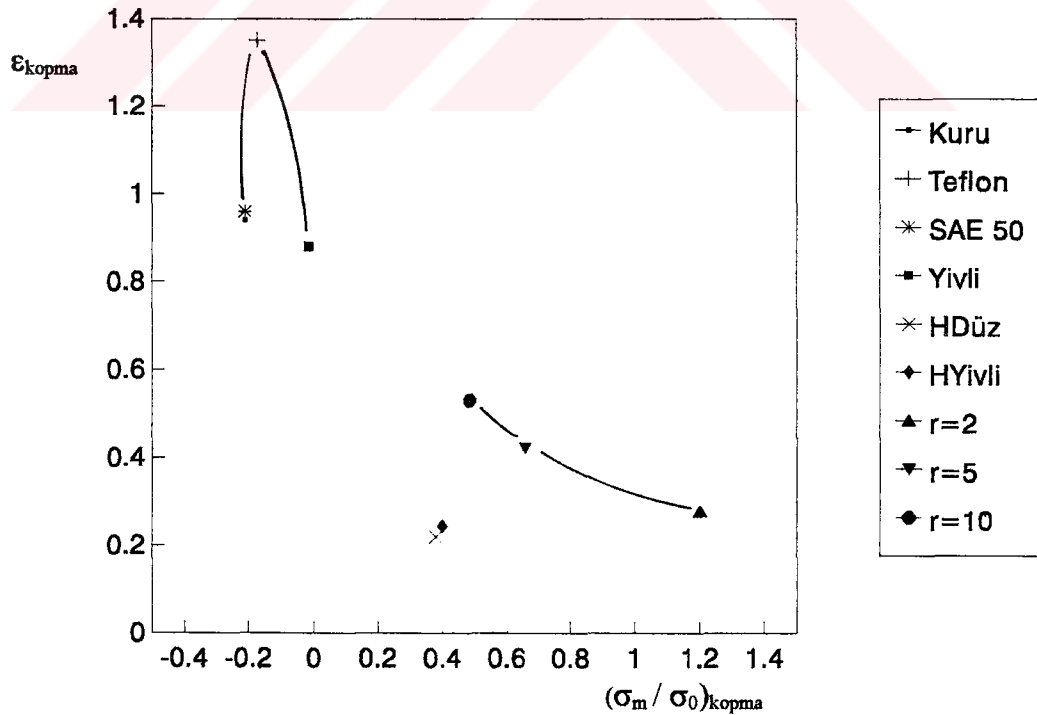
Tablo 6.4 deki sonuçlara göre, dövülebilirlik endisinin çok hassas tespit edilememesi nedeniyle, dövülebilirliğin saptanması şüphe ile de karşılanabilir.

Sonuç olarak, basma deneyleriyle elde edilen hasar anındaki yükseklik azalması ve dövülebilirlik endisi değerleri dövülebilirliğin saptanmasında çok anlamlı kriterler değildir.

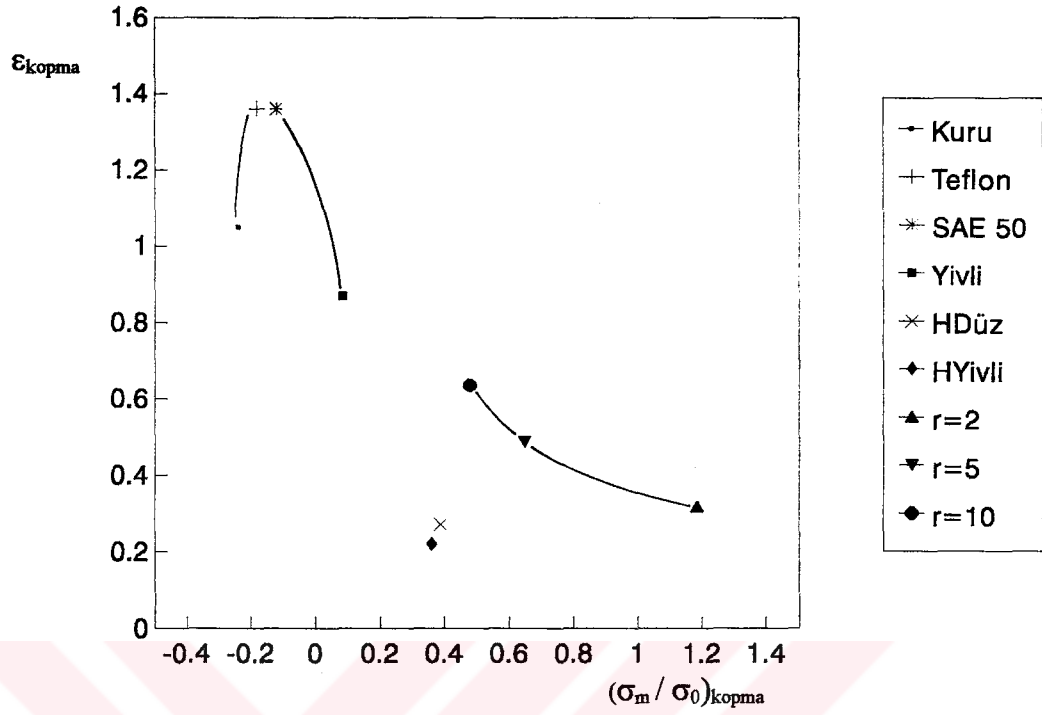
6.3 Dövülebilirlik Eğrileri

Çevresel birim şekil değiştirmenin aksel birim şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimini veren $\epsilon_\theta = f(\epsilon_z)$ eğrileri ortalama gerilmenin etkisini dolaylı olarak içermelerine karşın, kopma anında efektif birim şekil değiştirmenin (ϵ_{kopma}), σ_m / σ_0 oranı ile değişim eğrisi çizilecek olsa, ortalama gerilmenin etkisinin doğrudan görülebilmesi nedeniyle, bu eğrilerin $\epsilon_\theta = f(\epsilon_z)$ eğrilerine kıyasla büyük avantaj sağlayacakları açıktır.

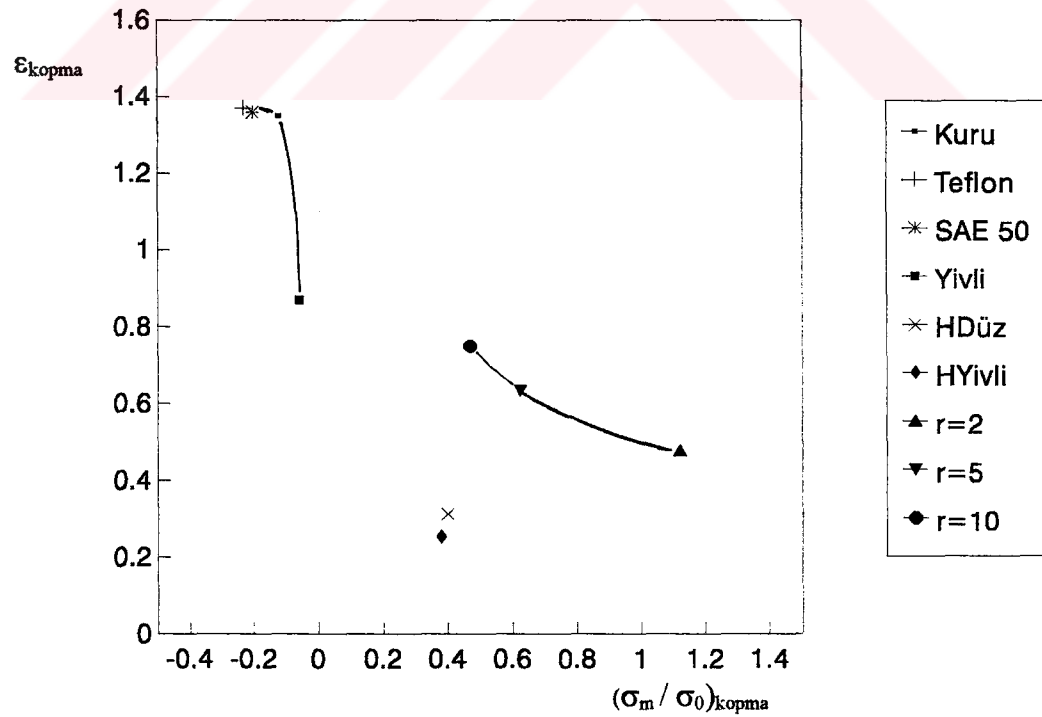
Şekil 6.13 - 6.24 de, çalışmada ele aldığımız tüm çeliklerin dövülebilirlik eğrileri verilmiştir.



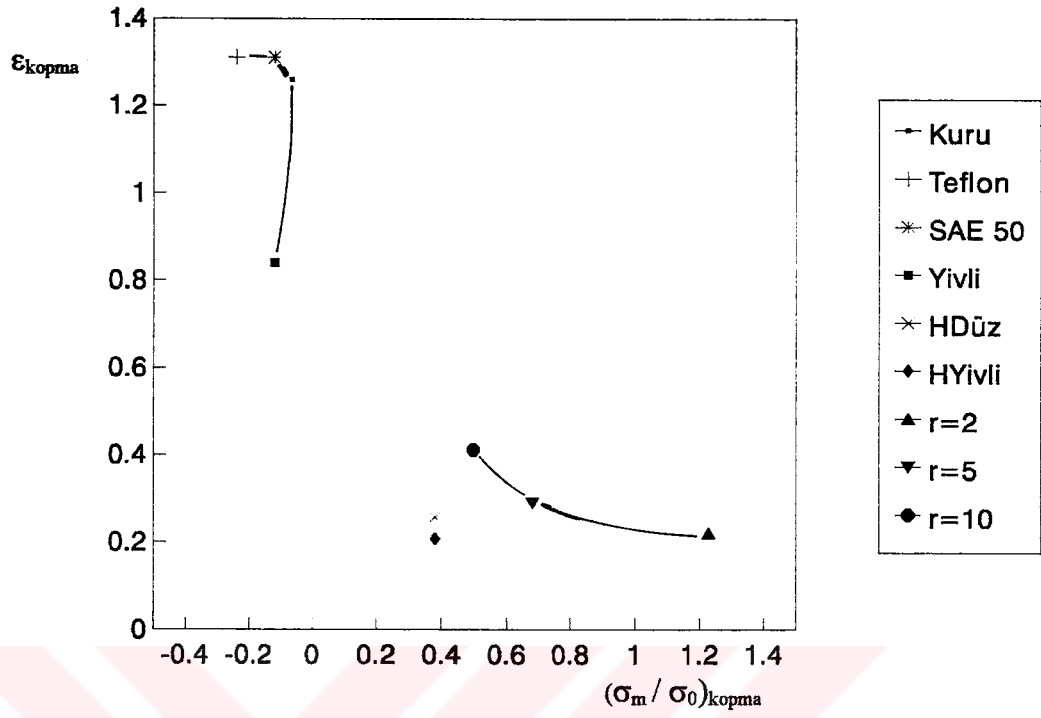
Şekil 6.13 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1040 çeliği dövülebilirlik eğrisi.



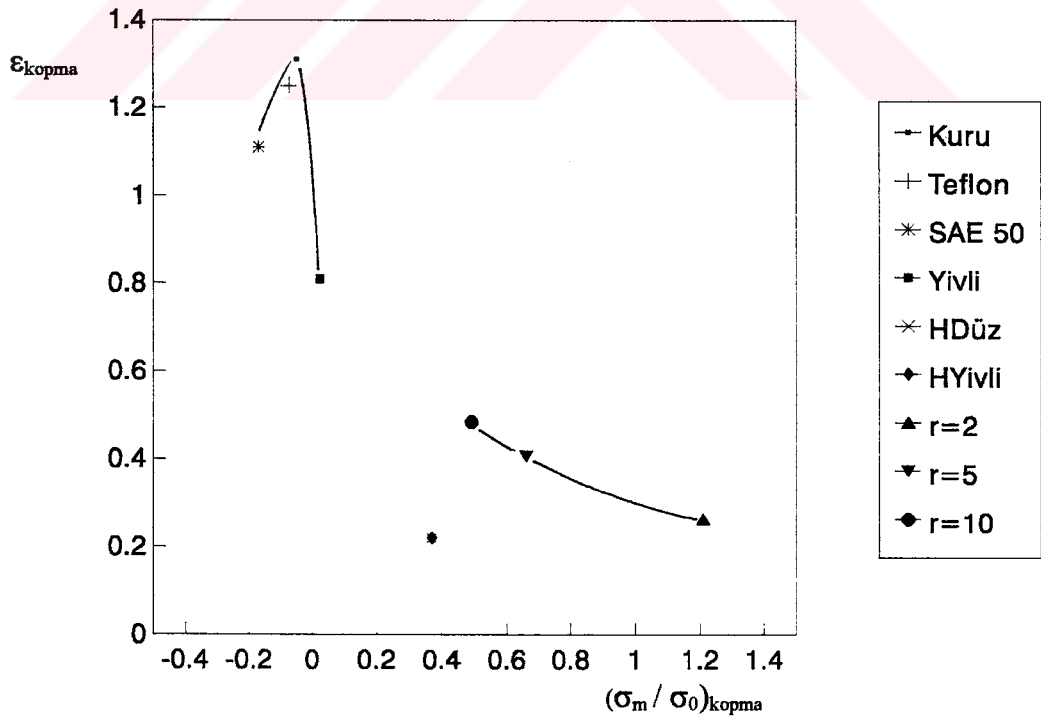
Şekil 6.14 Normalize edilmiş AISI 1040 çeliği dövülebilirlik eğrisi.



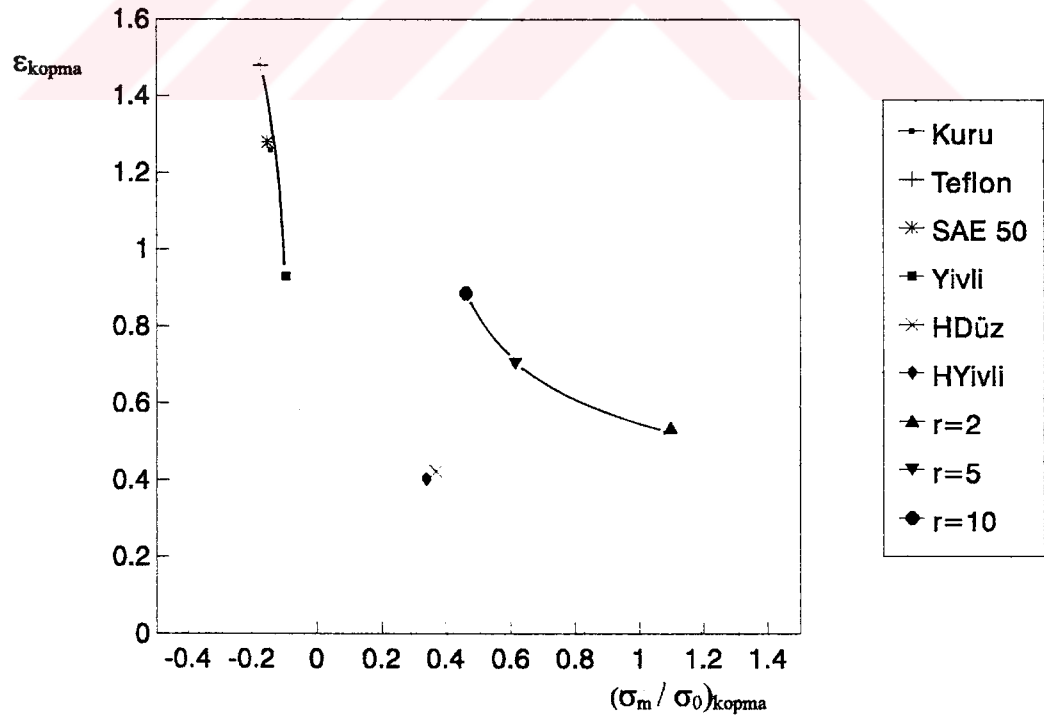
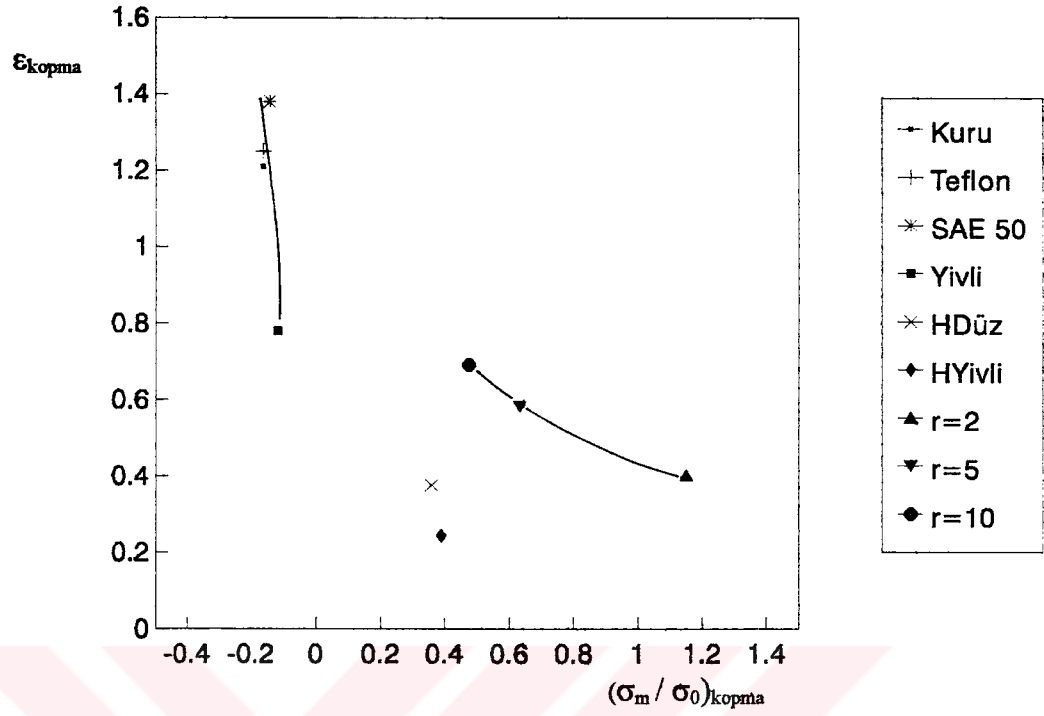
Şekil 6.15 Küreleştirilmiş AISI 1040 çeliği dövülebilirlik eğrisi.

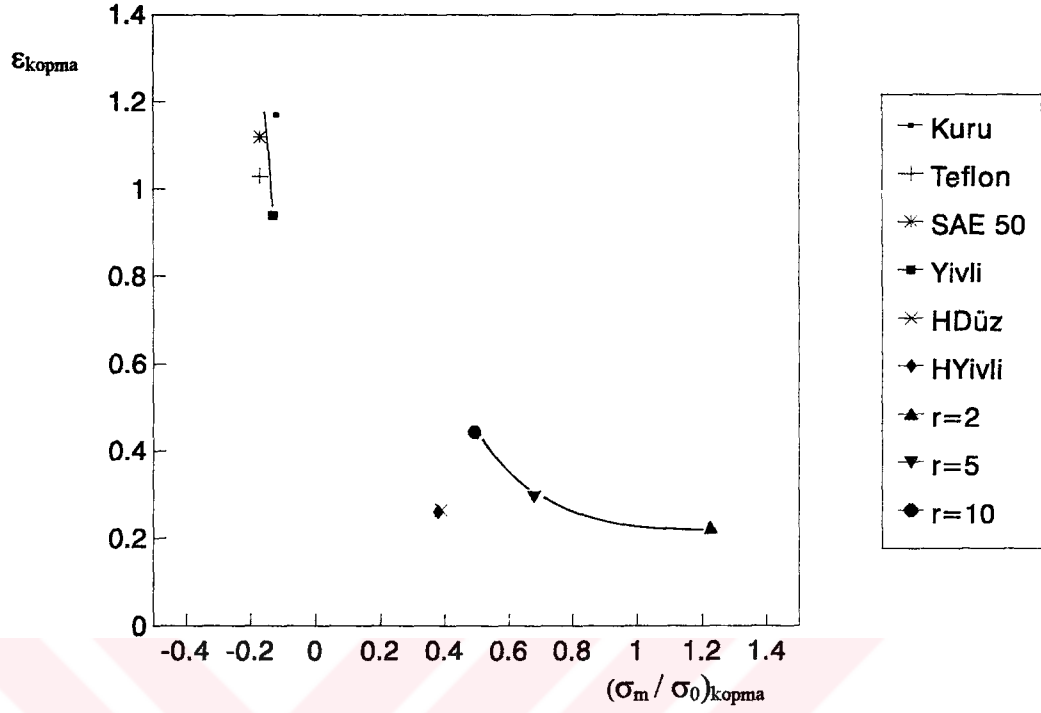


Şekil 6.16 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 1050 çeliği dövülebilirlik eğrisi.

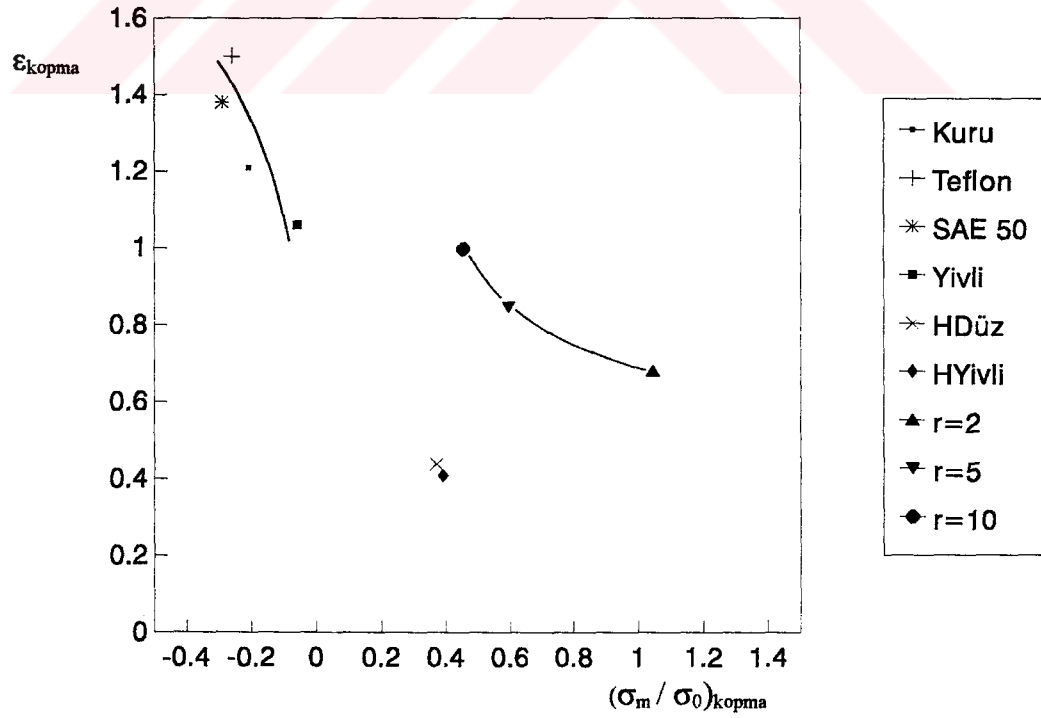


Şekil 6.17 Normalize edilmiş AISI 1050 çeliği dövülebilirlik eğrisi.

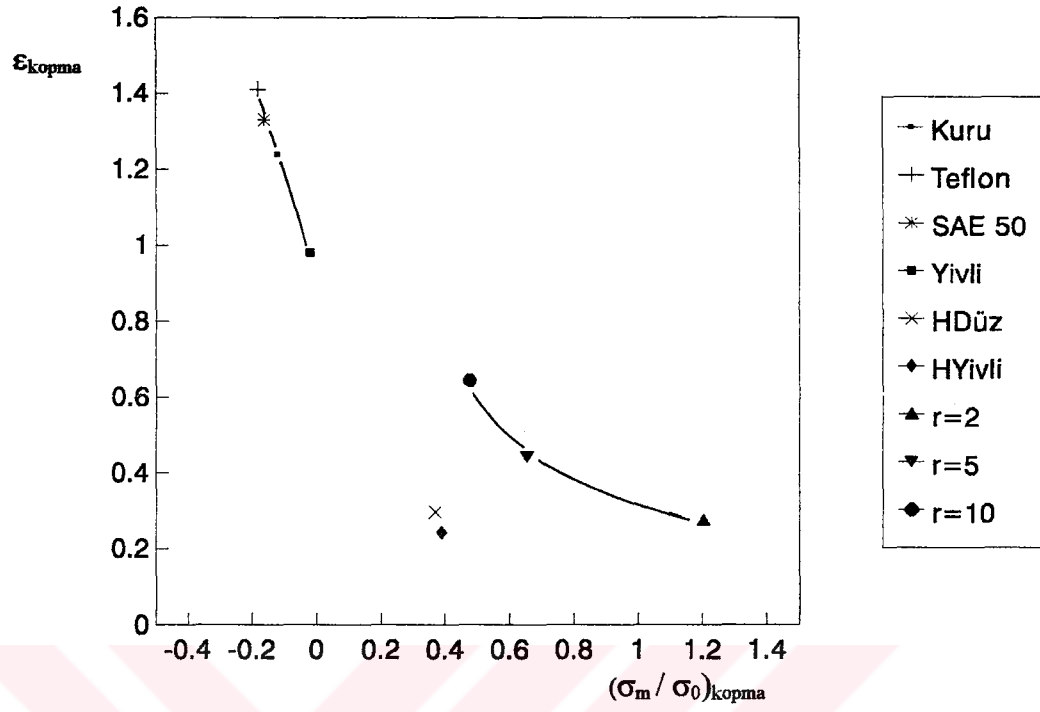




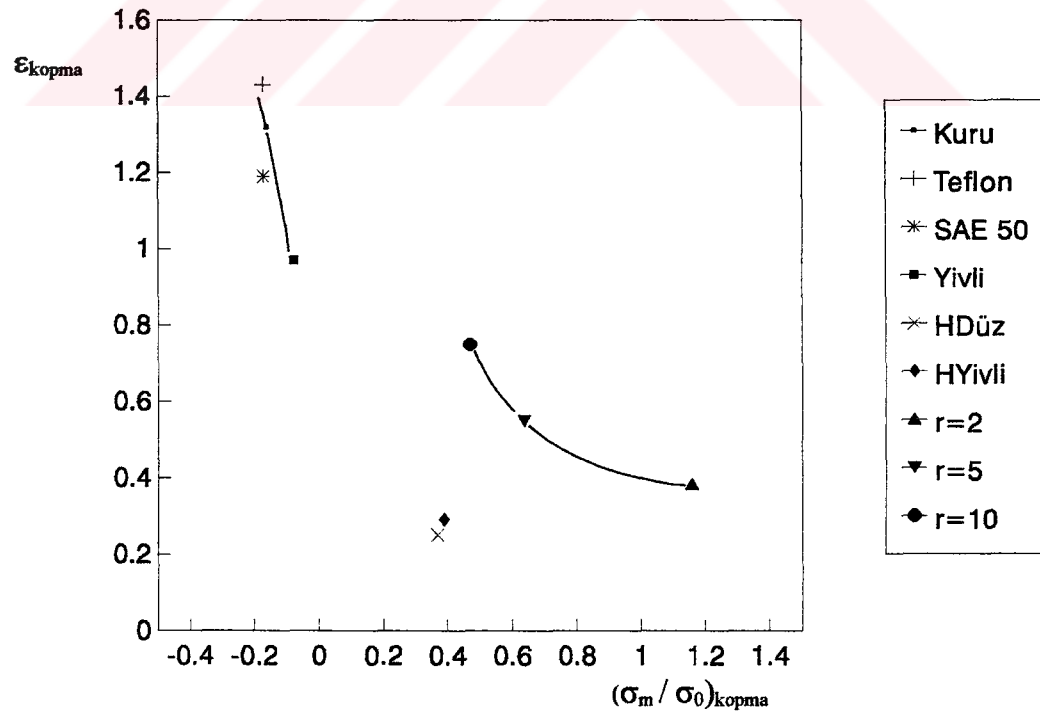
Şekil 6.20 Normalized AISI 4140 steel formability curve.



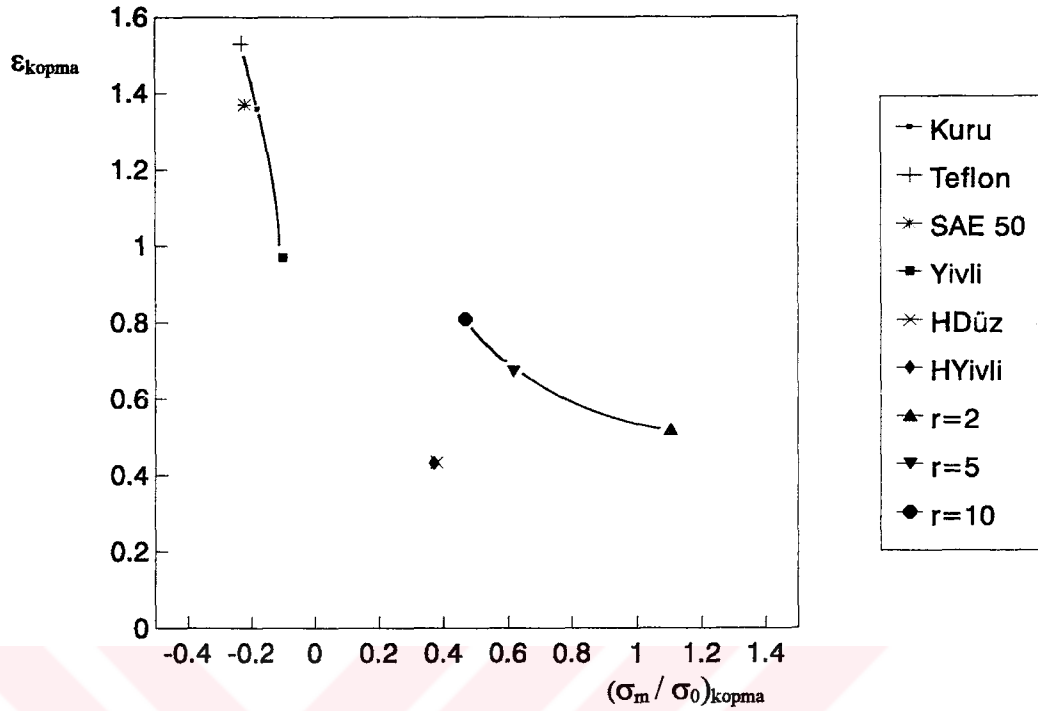
Şekil 6.21 Normalized AISI 4140 steel formability curve.



Şekil 6.22 Sıcak haddelenmiş durumda AISI 5140 çeliği dövülebilirlik eğrisi.



Şekil 6.23 Normalize edilmiş AISI 5140 çeliği dövülebilirlik eğrisi.



Şekil 6.24 Küreleştirilmiş AISI 5140 çeliği dövülebilirlik eğrisi.

Dövülebilirlik eğrisi diyagramlarında 3 ayrı tip deney (basma, halkalı, çentikli çekme) için elde edilen eğriler birbirine benzer olmayıp her 3 deneydeki malzeme davranışı çok belirgin biçimde farklıdır.

Dövülebilirlik eğrilerinden, halkalı dolu silindir basma deneylerinde kopma birim şekil değiştirmenin ve σ_m / σ_0 oranının sürtünme koşullarından çok az etkilendikleri ya da hiç etkilenmedikleri, dolu silindir basma deneylerinde kopma birim şekil değiştirmenin sürtünme koşullarından çok fazla etkilendiği ve σ_m / σ_0 oranının çok daha az etkilendiği görülür.

Dolu silindir basma deneyleri sonuçlarından görülebileceği gibi, bu deneylerde $(\sigma_m / \sigma_0)_{kopma}$ değerleri çoğunlukla negatif olup en büyük değer ise ancak 0.083 olarak normalize edilmiş AISI 1040 çeliğinde yivli basma takımlarıyla elde edilmiştir. Yine bu deneylerde ϵ_{kopma} değeri 0.78 (küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinde yivli basma takımlarıyla) ile 1.53 (küreleştirilmiş AISI 1050 çeliğinde teflon yağlama) arasındadır. Buna karşılık, çentikli çekme deneylerinde, ϵ_{kopma} değerleri dolu silindir

basma deneylerine kıyasla genellikle çok daha küçük, $(\sigma_m / \sigma_0)_{kopma}$ değerleri ise daha büyüktür.

Halkalı dolu silindir basma deneylerine gelince, bu deneylerde ε_{kopma} değerleri dolu silindir basma deneylerine kıyasla daima daha küçük, çentikli çekme deneylerine kıyasla ise genellikle daha küçük olup $(\sigma_m / \sigma_0)_{kopma}$ ise dolu silindir basma deneylerinden büyük, çentikli çekme deneylerinden küçüktür.

Dövülebilirlik eğrileri, her cins çelik için, üç bölge oluşturmaktadırlar : dolu silindirlerle elde edilen eğriler yüzeysel hasarın (yüzey çatlaklarının) oluşmaya başladıkları bölgeyi sınırlarlar ; çentikli çekme deneyleriyle elde edilen eğriler iç çatlak oluşumuyla başlayan hasar bölgesini belirlerler ; halkalı silindirlerle elde edilen eğrilerin ise yüzeysel hasarın oluşmasında alt sınırı belirledikleri söylenebilir. Halkalı dolu silindirlerle elde edilen dövülebilirlik eğrilerinin altındaki bölgede kesinlikle hiçbir hasar oluşumu yoktur. Dolayısıyla dolu silindir basma deneyleriyle diğer iki tip deney arasında hasar oluşumu görülebilecek bir ara bölge olduğu söylenebilir. Bu bakımdan çentikli çekme, dolu silindir basma ve halkalı silindir basma deneylerinin dövülebilirliğin öngörülmesi için uygun bir inceleme aracı oldukları ileri sürülebilir. Zaten, elde edilen dövülebilirlik eğrileri de ele alınan çeliklerin dövülebilirliklerinin kıyaslanmasına olanak vermişlerdir (Şekil 6.25).

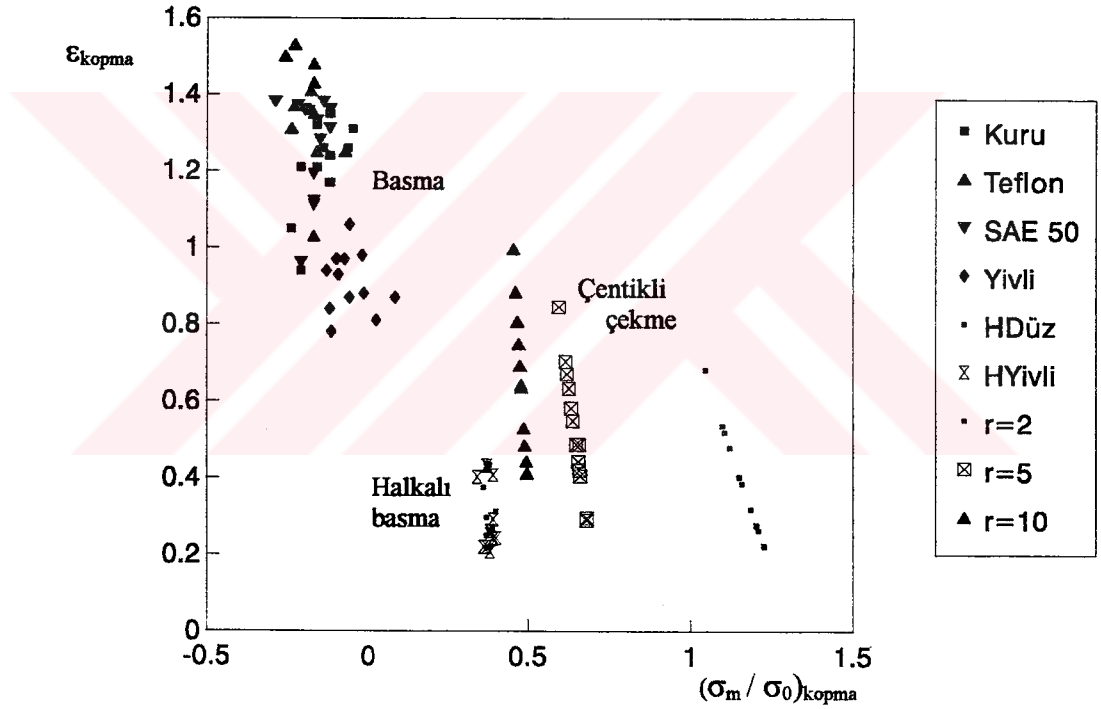
Şekil 6.25' e göre, en fazla birim şekil değiştirme ve en az σ_m / σ_0 oranı sonuçları veren dolu silindir basma deneylerinde sürtünme katsayısının arttığı koşullarda dövülebilirlik azalır. Fakat halkalı dolu silindir deneylerinin sürtünme koşullarından etkilenmediği kabul edilebilir.

Çentikli çekme deneyleri sonuçlarından çentik yarıçapının dövülebilirlik değerlerine etkisi açıkça görülür ve birim şekil değiştirme ile σ_m / σ_0 oranı değerleri arasında uyumlu bir değişim vardır.

Halkalı dolu silindir basma deneylerinde σ_m / σ_0 oranı değişimi sabit kabul edilebilecek durumdadır. Bu deneylerden elde edilen kopma birim şekil değiştirme

değerlerinin birbirine yakın olması dövülebilirliğin karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Dolu silindir basma deneylerinde σ_m / σ_0 oranı değişimi sürtünmenin artışıyla az miktarlarda artmaktadır. Kopma birim şekil değiştirme değerleri dolu silindir basma deneylerinde halkalı dolu silindir basma deneylerine kıyasla daha geniş bir aralıkta değişim göstermiştir. Çentikli çekme deneyleri sonuçları arasında her çentik yarıçapı için düzgün bir değişim görülür. Bu nedenle, çentikli çekme deneylerinde kopma birim şekil değiştirme değerlerinin dövülebilirliğin saptanmasında faydalı olacağı kabul edilebilir.

Şekil 6.25 de çalışmada ele alınan çeliklerin dövülebilirlikleri kıyaslanmıştır.



Şekil 6.25 Her tip malzeme ve ısıtma işlem durumu için basma, halkalı basma ve çentikli çekme deneyleri kopma değerlerini gösteren dövülebilirlik diyagramı.

Tablo 6.5 de çalışmada incelenen çeliklerin basma, halkalı basma ve çentikli çekme deneyleri sonuçlarına göre dövülebilirlik sıralamaları birarada verilmiştir.

Tablo 6.5 Çalışmada incelenen çeliklerin basma, halkalı basma ve çentikli çekme deneyleri dövülebilirlik sıralaması.

Malzeme	Isıl işle durumu	Dolu silindir basma	Halkalı dolu silindir basma	Çentikli çekme
AISI 1040	Sıcak had. durumda	9	11	8
	Normalize edilmiş	8	9	7
	Küreleştirilmiş	7	5	4
AISI 1050	Sıcak had. durumda	10	10	12
	Normalize edilmiş	11	12	10
	Küreleştirilmiş	6	4	5
AISI 4140	Sıcak had. durumda	3	3	2
	Normalize edilmiş	12	8	11
	Küreleştirilmiş	2	2	1
AISI 5140	Sıcak had. durumda	5	6	9
	Normalize edilmiş	4	7	6
	Küreleştirilmiş	1	1	3

Tablo 6.5 ten her çelik için ve her tip deneyde küreleştirilmiş durumda dövülebilirliğin en iyi olduğu görülmektedir. Sonuç olarak küreleştirmenin dövülebilirliği iyileştirdiği açıktır. Mamafih, küreleştirme sırasında ısıl işlem parametreleriyle oynayarak dövülebilirliğin küreleştirme parametrelerine bağlılığı da incelenmelidir. Belirli küreleştirme koşullarından sonra artık dövülebilirliğin iyileşmediği gibi bir sonuç elde etme olasılığı da göz önüne alındığı takdirde, bu tür bir araştırmanın endüstride gereksiz deneme-yanılmalarla zaman kaybını önleyeceği ortadadır.

Tablo 6.5 teki sonuçlar, dövülebilirlik eğrileriyle yalnız farklı çeliklerin değil aynı bir çeliğin farklı ısıl işlem (dolayısıyla farklı iç yapı) koşullarındaki dövülebilirliklerinin dahi tartışmasız olarak saptanabileceğini göstermektedir. Bu eğriler ayrıca σ_m / σ_0 oranının da dövülebilirliğe önemli etkisi olduğunu açıkça göstermektedir. Diğer taraftan dövülebilirlik eğrileri vasıtasıyla metalurjik parametrelerin ve özellikle ısıl işlemin dövülebilirliğe etkisi incelenebilecektir.

Sonuç olarak dolu silindir, halkalı silindir ve çentikli çekme deneyleriyle metallerin dövülebilirliklerinin saptanabileceğini söylemek doğru olacaktır.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 SONUÇLAR

Sertlik, dövülebilirliğin ancak yerel bir ölçüsü olabilir. Dolayısıyla, sertlik deneyi bir kuruluşa malzeme girişi sırasında kontrol amacıyla uygulanabilirse de dövülebilirliğin saptanması için uygun değildir.

Basit çekme deneyi, plastik dengesizliğin (büzülmenin) erkence başlayarak malzemenin daha büyük şekil değiştirmelerde nasıl davranacağını göstermemesi nedeniyle dövülebilirliği saptamada yeterli değildir. Bununla beraber, % kesit daralması değerleri dövülebilirlik hakkında genel bir bilgi verir.

Burma deneyinde dövülebilirliğin ölçüsü olarak kopmaya kadar olan burma sayısı ve kopmada efektif şekil değiştirme alınır. Burmada hidrostatik gerilme çok küçük ve dolayısıyla kopmada birim şekil değiştirme basit çekmeye göre çok büyüktür (4-5 kat). Bu nedenle burma özellikle dövülebilirliği iyi malzemelerin sınıflandırılmasına uygun bir deneydir. Fakat standartlaştırılmış olmaması sakıncalı bir yönüdür.

Basma deneyleri, endüstriyel koşullara uygunluğu nedeniyle dövülebilirliğin saptanmasında faydalıdır. Sürtünme koşullarından çok fazla etkilenmesi basma deneyinin sakıncasıdır. İşlem değişkenlerinin dövülebilirliğe etkilerinin incelenmesinde özellikle sabit sürtünme koşullarında gerçekleştirilebildiği takdirde basma dövülebilirliğin saptanması için çok uygun bir deneydir.

Halkalı basma deneyleri, basma deneylerinde dövülebilirliğin saptanmasını sınırlandıran sürtünme koşullarının etkisini en aza indirmesi nedeniyle üstünlük arz etmektedir.

Çentikli çekme deneyleri, kopmanın meydana geldiği bölgede gerilme ve şekil değiştirme değerlerini belirler. Hidrostatik gerilmenin kopma anındaki şekil değiştirme miktarı ile değişimini veren diyagram vasıtasıyla dövülebilirlik özelliği öngörülebilir. Sünek kırılmanın incelenmesine uygun olmaları ve çentik yarıçapının hidrostatik gerilme ile kırılmaya etkisinin incelenmesi bu deneylerin avantajlı yönleridir. Yüksek şekil değiştirme miktarlarına ulaşamaması ise bu deneyin sakıncasını oluşturmaktadır. Çentikli çekme deneyleri basma ve halkalı basma deneylerinden elde edilen bilgileri tamamlar.

Metallerin dövülebilirliklerinin saptanması amacıyla uygulanacak bir deney tanımlayabilmek için üç farklı şekil değişimi halinin birarada ele alınmaları gerekmektedir. Bu haller şunlardır : silindirlerin basılması, halkalı silindirlerin basılması, çentikli çekme.

Çalışmada yapılan deneysel incelemelerde, çeşitli çelikler ve bu çeliklerin ısı işlemleri vasıtasıyla elde edilen farklı iç yapıları için söz konusu deneyler uygulanmış ve malzemeler dövülebilirliklerine göre sınıflandırılmışlardır. Bu amaçla ϵ_{kopma} nın $(\sigma_m / \sigma_0)_{kopma}$ ile değişimini veren dövülebilirlik eğrileri kullanılmıştır. Bu eğriler dövme, yığma, ekstrüzyon, çekme gibi pek çok endüstriyel şekillendirme işlemi için de belirleyicidirler. Çalışmada ele alınmış olan çelikler için elde edilen dövülebilirlik sınıflandırılması, dövülebilirlikle zorlama türü arasındaki sıkı ilişkiyi açıkça göstermektedir. Dolayısıyla çentikli çekme ve basma deneylerinin dövülebilirliğin saptanması için ideal uygulamalar olduklarını kesin olarak söyleyebiliriz.

7.2 ÖNERİLER

Halkalı basma deney örneklerindeki halkanın boyutlarındaki değişimin şekil değiştirme süresince sabit kalabilmesi için araştırmalar yapılmalıdır.

Dövülebilirlik deneyleri sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmelidir.

Burma deneylerinin dövülebilirliğin saptanması amacıyla standartlaştırılmasına çalışılmalıdır.



KAYNAKLAR

- [1] DAVIDENKOV, N.N., SPIRIDONOVA, N. I., Mechanical Methods of Testing. Analysis of the State of Stress in the Neck of a Tension Test Speciment, Proccessing of ASTM, Vol. 46, pp. 1147-1158, (1946)
- [2] BLAIN, P., La Forgeabilite, Revue de Metallurgie, Vol. 10, pp. 881-890 Octobre, (1965)
- [3] COCKCROFT, M.G., LATHAM, D.J., Ductility and the Workability of Metals, Journal of The Institute of Metals, pp. 33-39, (1968)
- [4] THOMASON, P.F., The Use of Pure Aluminium as an Analogue for the History of Plastic Flow in Studies of Ductile, International Journal of Mechanical Science, Vol. 10, pp. 501-518, (1968)
- [5] MOROZUMI, F., HIRASAKA, M., Evaluation of Forgeability of Steels by Notch Comprasson Method, Journal of the Society of Materials Science, Vol. 19, pp. 255-260, (1970)
- [6] KULKARNI, K.M., KALPAKJIAN, S., A Study of Barreling as on Example of Free Deformation in Plastic Working, Journal of Engineering for Industry, pp. 743-754, August (1969)
- [7] KOBAYASHI, S., Deformation Characteristics and Ductilite Fracture of 1040 Steel in Simple Upsetting of Solid Cylinders and Rings, Journal of Engineering for Industry, pp. 391-399, May (1970)
- [8] MIYAGAWA, M., SHINAHARA, M., ASAO, H., Compression Test of Cylinders with Longitudinal Notches for Comparison of Cold Upset-Forgeability, Journal of the Japanese Society of Technical Plasticity Vol. 12, pp. 183-189, (1971)
- [9] KUHN, H.A., LEE, P.W., Strain Instability and Fracture at the Surface of Upset Cylinders, Metallurjical Transactions, pp. 3197-3202, (1971)
- [10] KUHN, H.A., LEE, P.W., ERTURK, T., A Fracture Criterion for Cold Forming, Journal of Engineering Materials and Technology, ASME, pp. 213-218 October (1973)
- [11] FUJITA, M., FUKUDA, T., HAGITA, H., OKAMOTO, T., Effect of the Surface Defects in Steel Wire on Cold Forgeability, Wire Journal, pp. 47-54, August (1977)

- [12] RAVASSARD, P., Forge a Froid : Test de Forgeabilite, CETIM Informations pp. 62-65, Fevrier (1977)
- [13] KUHN, H.A., Workability Testing and Analysis for Bulk Forming Processes, Formability Topics - Metallics Materials, ASTM STP 647, Editions ASTM, pp. 206-219, (1978)
- [14] KIVIVUORI, S., SULONEN, M., Formability Limits and Fracturing Modes of Uniaxial Compression Specimens, Annals of the CIRP, Vol. 27, pp. 141-145, (1978)
- [15] BEREMIN, F.M., Influence de la Triaxialite des Contraintes sur la Rupture par Dechirement Ductile et la Rupture Fragile par Clivage d'un Acier Doux, Journal de Mecanique Appliquee, Vol. 4, pp. 327-342, (1980)
- [16] TOZAWA, Y., KOJIMA, M., KATO, N., Research on Testing Conditions of Cold Upsetability Test, Journal of the Japanese Society of Technical Plasticity, Vol. 22, pp. 197-201, (1981)
- [17] GELIN, J.C., OUDIN, J., RAVALARD, Y., Plastic Flow, Instability and Ductile Fracture in Upsetting of Solid Cylinders, Annals of the CIRP, Vol. 30, pp. 193-197, (1981)
- [18] CHANDRASEKARAN, N., BROWNRIGG, A., DUNCAN, J.L., EMBURY, J.D., SOWERBY, R., The Assesment of The Free Surface Strains and Stresses During The Upsetting of Circular Cylinders, Scripta Metallurgica, pp. 697-701, (1982)
- [19] ULVAN, E., KOURSARIS, A., Metal Formability in Bulk Deformation Processes, Journal of Metals, pp. 20-26, December (1983)
- [20] GELIN, J.C., OUDIN, J., RAVALARD, Y., Influence de Quelques Parametres Metallurgiques sur la Rupture Ductile des Aciers a bas et Moyen Carbone, MES Revue de Metallurgie, pp. 169-179, Avril (1984)
- [21] SOWERBY, R., CHANDRASEKARAN, N., The Cold Upsetting and Free Surface Ductile of Some Commercial Steels, Journal of Applied Metalworking, Vol. 3, pp. 257-263, July (1984)
- [22] DARVAS, Z., The Forming Limits and the Fracture Mode in Cold Upsetting, Materials Science and Engineering, pp. 101-110, (1985)
- [23] KIVIVUORI, S., Assessing cold forgeability by the upsetting test, Scandinavian Journal of Metallurgy, pp. 98-102, (1987)
- [24] SPITTEL, M., SPITTEL, T., Assesment of the Cold Formability of Steels by the Torsion Test, Metall. Werkstofftech., pp. 86-100, (1989)

- [25] MORITOKI, H., Free Surface Ductility in Upsetting, *Introduction Journal of Plasticity*, pp. 507-523, Avril (1993)
- [26] ÇAPAN, L., *Metallere Plastik Şekil Verme*, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, (1990)
- [27] KAYALI, E.S., ENSARİ, C., *Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları*, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul, (1991)
- [28] DeGARMO, E.P., BLACK, J.T., KOHSER, R.A., *Materials and Processes in Manufacturing*, Macmillan, USA, (1988)
- [29] HIGGINS, R.A., *Engineering Metallurgy 2*, Hodder and Stoughton Ltd., Hong Kong, (1986)
- [30] ÇAPAN, L., *Dövme Teknolojisi*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, İstanbul, (1987)
- [31] KHARE, A.K., *Open-Die Forging*, *Metals Handbook*, 9. Ed., Vol.14, pp. 61-74, (1988)
- [32] LINDBERG, R.A., *Processes and Materials of Manufacture*, Allyn and Bacon, Boston. (1990)
- [33] SCHEY, J.A., *Introduction to Manufacturing Processes*, McGraw-Hill, Singapore, (1987)
- [34] DIETER, G.E., *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, Singapore, (1988)
- [35] LANGE, K., *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, U.S.A., (1985)
- [36] SHAH, S., *Isothermal and Hot-Die Forging*, *Metals Handbook*, 9. Ed., Vol.14, p 150-157, (1988)
- [37] JAMES, W.B., McDERMOTT, M.J., POWELL, R.A., *Powder Forging*, *Metals Handbook*, 9. Ed., Vol.14, pp. 188-211, (1988).
- [38] AMSTEAD, B.H., OSTWALD, P.F., BEGEMAN, M.L., *Manufacturing Processes*, John Wiley & Sons, Canada, (1987)
- [39] ÇAPAN, L., *Dövme Teknolojisi 2*, Seç Kitap Dağıtım, İstanbul, (1988)
- [40] SEMIATIN, S.L., *Introduction to Forming and Forging Processes*, *Metals Handbook*, 9. Ed., Vol.14, pp 15-21, (1988)
- [41] KAYALI, E.S., ÇİMENOĞLU, H., *Hasar Analizi Seminer Notları*, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 18-22 Haziran (1990)

- [42] **KALPAKJIAN, S.**, Manufacturing Processes for Engineering Materials, Addison-Wesley, (1984)
- [43] **SHERIF, D. E.W.**, Processes and Design Manufacturing, Prentice-Hall Inc., (1989)
- [44] **ALTAN, T.**, Forging Equipment, Materials and Practices, Metals and Ceramics Information Center, (1973)
- [45] **DIETER, G.E.**, Introduction, Metals Handbook, Vol.14, p 363-372, (1988)
- [46] **LESLIE, W.C.**, The Physical Metallurgy of Steels, McGraw- Hill, (1982)
- [47] **SEMIATIN, S.L., LAHOTI, G.D., JONAS, J.J.**, Application of the Torsion Test to Determine Workability, Metals Handbook, 9. Ed., Vol.8, pp. 154-184, (1985)
- [48] **ERTÜRK, T.**, Kütle Deformasyon ve Levha Biçimlendirme İşlemlerinde Deformasyonun Sınırları ve Biçimlendirebilme Analizi, 3. Ulusal Metalurji Kongresi, sh. 659-682, 5-7 Aralık (1979)
- [49] **DIETER, G.E.**, Mechanical Behavior of Materials Under Tension, Metals Handbook, 9. Ed., Vol.8, pp. 20-27, (1985)
- [50] **GILLIS, P.P., GROSS, T.S.**, Effect of Strain Rate on Flow Properties, Metals Handbook, 9. Ed., Vol.8, pp. 38-46, (1985)
- [51] **WHITTENBERGER, J.D., NATHAL, M.V.**, Elevated/Low Temperature Tension Testing, Metals Handbook, 9. Ed., Vol.8, pp. 34-37, (1985)
- [52] **KUHN, H.A.**, Forming Limit Criteria - Bulk Deformation Processes, Advances in Deformation Processing, 21.st Sagamore Army Materials Research Conference, pp. 159-186, (1975)
- [53] **KUDO, H., AOI, K.**, Effect of Compression Test upon Fracturing of a Medium Carbon Steel - A Study on Cold Forgeability Test (Part 2), Journal of Japan Soc. Tech. Plasticity, pp. 17-27, (1967)
- [54] **SAMANTA, S.K.**, On the Limit of Plastic Deformation in Compression of Circular Cylinders, Int. Journal of Fracture, pp. 301-313, (1975)
- [55] **LEE, P.W., KUHN, H.A.**, Fracture in Cold Upset Forging - A Criterion and Model, Metallurgical Transactions, pp. 969-974, April (1973)
- [56] **BANERJEE, J.K.**, Barreling of Solid Cylinders Under Axial Compression, Journal of Engineering Materials and Technology, ASME, pp. 138-144, April (1985)

- [57] DIETER, G.E., Workability Tests, Metals Handbook, 9. Ed., Vol. 14, pp.373-387, (1988)
- [58] SOWERBY, R., O'REILLY, I., CHANDRASEKARAN, N., DUNG, N.L., Materials Testing for Cold Forging, Journal of Engineering Materials and Technology, pp. 101-106, January (1984)
- [59] JENNER, A., DODD, B., Cold Upsetting and Free Surface Ductility, Journal of Mechanical Working Technology, pp. 31-43, May (1981)
- [60] Stahlschlüssel, (1983).
- [61] KARADENİZ, E., ÖZGİRĞİN, M.C., FINDIK, F., OĞUR, A., Ötektoid Altı Çeliklerin Küreselleştirme Isıl İşleminin Çeşitli Yöntemler ile İncelenmesi, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, pp. 172-177, 12-14 Nisan (1995)
- [62] Metals Handbook, 8. Ed., Vol. 7, pp. 4, (1972)
- [63] BRIDGMAN, P.W., Studies in Large Plastic Flow and Fracture, Mc Graw-Hill (1952).

ÖZGEÇMİŞ

Erdal KARADENİZ, Kandıra 1964 doğumludur. Lise öğrenimini Adapazarı Endüstri Meslek Lisesi Elektrik bölümünde 1980 yılında, lisans öğrenimini İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Şubat 1986 döneminde, yüksek lisansını Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim dalında Şubat 1990 döneminde tamamlamıştır. 1987 yılında İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. Halen, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde aynı göreve devam etmektedir.

Erdal KARADENİZ, evli ve iki çocuk babasıdır.

