T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SICAKLIK VE ÇEKME HIZININ AA 5754-O SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE ETKİLERİ

HAKAN PEKEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Bu tez 04/03/2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI (Danışman)	Doç. Dr. Haydar LİVATYALI (Üye)	Yrd. Doç. Dr. Behçet DAĞHAN (Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SICAKLIK VE ÇEKME HIZININ AA 5754-O SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE ETKİLERİ

Hakan PEKEL
Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
İkinci Danışman: Yrd. Doç. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK
2008, 81 Sayfa

Jüri: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Doç. Dr. Haydar LİVATYALI
Yrd. Doç. Dr. Behçet DAĞHAN

Bu çalışmada alüminyum magnezyum (Al-Mg) alaşımlarından 5754-0 malzemesinin, -60-250 ^{o}C sıcaklık ve 5-500 mm/dak çekme hızı aralığında, tek eksenli çekme deneyleri yapılarak mekanik davranışları incelenmiştir. Belirlenen şartlarda malzemenin akma mukavemeti, maksimum çekme mukavemeti, pekleşme üsteli (n), deformasyon hızı hassasiyeti (m), mukavemet katsayısı (K), toplam uzama ve kesit daralmasındaki değişiklikler tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada Al-Mg alaşımlarının şekillendirilmesi sırasında ortaya çıkan yüzey hatası olarak nitelendirilen Lüder bantlarının hangi şartlarda giderileceği araştırılmıştır. Sonuç olarak artan sıcaklıkla birlikte toplam uzamanın arttığı, pekleşmenin azaldığı ve aynı zamanda artan sıcaklık ve hızla beraber Lüder bantlarının ortadan kalktığı görülmüştür. Oda sıcaklığının altında yapılan deneylerde ise toplam uzama ve pekleşme üstelinde artış tespit edilmiştir. Belirtilen çalışma aralığında en uygun şekillendirilebilirliğin yüksek sıcaklık ve düşük hızlarda elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: 5754 Al-Mg alaşımı, Şekillendirilebilme, Çekme deneyi

ABSTRACT

Master Thesis

EFFECTS OF TEMPERATURE AND TENSILE VELOCITY ON SHEET METAL FORMABILITY OF AA 5754-O

Hakan PEKEL

Selçuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Second Supervisor: Assist. Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK
2008, 81 Pages

Jury: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Assoc. Prof. Dr. Haydar LİVATYALI
Assist. Prof. Dr. Behçet DAĞHAN

In this study, uniaxial tensile deformation behavior of 5754-O type aluminum-magnesium alloy (Al-Mg) sheet were investigated by uniaxial tensile test in the temperature range of -60-250 ^{o}C and in the tensile speed range of 5-500 mm/min. The yield strength, maximum tensile strength, strain hardening exponent (n), strain rate exponent (m), strength coefficient (K), total elongation and reduction of area of the material were determined at various temperatures and deformation speeds. In addition, the elimination of Luder's band formation (Stretcher marks or line) which is formed during formability of the alloys was investigated. As a result, the total elongation was found to increase with increasing temperature and to decrease with increasing tensile velocity and Luder's band elimination was observed with increasing temperatures and tensile velocities. The test results under room temperature indicated that an increase in total elongation and strain hardening exponent were determined. Under the described test conditions, optimum formability condition was obtained at high temperature and low tensile velocity.

Key Words: Aluminyum-magnesium alloy 5754, Formability, Tensile test

ÖNSÖZ

Bu çalışma; TÜBİTAK tarafından desteklenen, 106M058 nolu ve "Sıcaklık ve Deformasyon Hızının Şekillendirilebilmeye Etkisinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi" başlıklı araştırma projesi kapsamında yapılmıştır. Yakıt sarfiyatını azaltmak için otomotiv gövde veya karoser malzemesi olarak hafif malzemeler araştırılmaktadır. Bu amaçla AA 5754-O alaşımından hazırlanmış numuneler farklı sıcaklık ve hızlarda test edilerek, malzemenin mekanik özelliklerinin ve uygun şekillendirme şartlarının tespiti yapılmıştır.

Dünyada son yıllarda hafif malzemelerin kullanımının arttırılması yönünde yapılan çalışmalara hız verilmiştir. Hafif malzemeler içerisinde yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve korozyona karşı dayanıklılığı sebebiyle alüminyum-magnezyum alaşımları en çok ilgi gören malzemeler olmuşlardır. Bu malzemenin oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirliği düşük karbonlu çeliğe göre oldukça düşük olup, yüzeyde Lüder banda benzer bozukluklarla karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada bu malzemenin ılık şekillendirme şartlarındaki performansı değerlendirilmiş ve yüzey kalitesinin arttırılması sağlanmıştır.

TÜBİTAK projesi kapsamında çalışmama layık görerek vesile olan ve bu çalışmanın hazırlanmasında katkılarından dolayı danışmanım Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI'ya, proje asistanı olarak birlikte çalıştığım ve akademik çalışmalarımın yönlendirilmesinde büyük katkıları olan ikinci danışmanım Yrd. Doç. Fahrettin ÖZTÜRK'e ve bu çalışmada emeği geçen meslektaşlarımdan İlyas KACAR'a, Serkan TOROS'a ve Muhammed Hakan BAŞ'a teşekkür ederim. TÜBİTAK MAG 1001 projesinin bir bölümü kapsamında yapılan bu tez çalışmasına desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca her konuda bana destek olan ve sabırlarını hiç kaybetmeyen ve beni bu çalışmamda teşvik eden annem Semahat, ablam Hacer ve kardeşlerim Ali ve Abdullah'a en içten şükranlarımı sunarım. Gelinen noktayı daha ilerilere layıkıyla taşıyabilme dilekleriyle…

Mak. Müh.
Hakan PEKEL
Niğde, 2008

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
ÖNSÖZ ..... **iv**
SİMGELER ..... **vi**
1 GİRİŞ **1**
2 KAYNAK ARAŞTIRMASI **3**
2.1 Sacların Şekillendirilebilirliğini Etkileyen Özellikler 3
2.1.1 Uzama 3
2.1.2 Akma uzaması 4
2.1.3 Anizotropi 5
2.1.4 Tane büyüklüğü 8
2.1.5 Artık gerilmeler 9
2.1.6 Geri esneme 9
2.2 Sacların şekillendirilebilirliğini etkileyen işlem parametreleri 10
2.2.1 Deformasyon hızı 10
2.2.2 Sıcaklık 12
2.2.3 Sürtünme ve yağlama 14
2.2.4 Sac baskı kuvveti 17
3 MALZEME VE YÖNTEM **18**
3.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması 18
3.2 Çekme Deneyi 19
4 DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA **28**
5 SONUÇ VE ÖNERİLER **42**
6 KİŞİSEL ELEŞTİRİLER **44**
KAYNAKLAR **45**
7 EKLER **47**
EK-1 Deneylerde kullanılan AA 5754-O malzemesine ait spektrometre analiz raporu 47
EK-2 Gerilme uzama diyagramları 48
EK-3 Hesaplama tablosu 61
EK-4 Anizotropiyi incelemek için yaptırılan deneyler 63
EK-5 Deformasyon hız hassasiyeti grafikleri 66

SİMGELER

Simge	Adı	Birimi
A_0	Numunenin orijinal kesit alanı	mm^2
A_i	F_i yükünün tatbik edildiği numunenin herhangi bir noktasındaki kesiti.	mm^2
A_k	Numunenin kopma bölgesi alanı	mm^2
$C = K$	Mukavemet katsayısı	MPa
E	Elastisite modülü	GPa
e_a	Elastik birim deformasyon (şekil değiştirme)	mm / mm
F_i	Herhangi bir i noktasındaki çekme yükü	N
K_g	Geri esneme faktörü	-
$l_o = L_0$	Numunenin başlangıçtaki uzunluğu	mm
l	Numunenin belirli bir uzama sonrasındaki uzunluğu	mm
L_k	Numunenin kopma sonrası uzunluğu	mm
m	Deformasyon hızı hassasiyeti	-
n	Pekleşme üsteli	-
P	İki yüzey arasındaki basınç	MPa
t_o	Numunenin başlangıçtaki kalınlığı	mm
t	Numunenin belirli bir uzama sonrasındaki kalınlığı	mm
V_0	Orijinal numune hacmi	mm^3
V_i	Deformasyonun herhangi bir anındaki numune hacmi	mm^3
w_o	Numunenin başlangıçtaki genişliği	mm
w	Numunenin belirli bir uzama sonrasındaki genişliği	mm
ε_m	Mühendislik birim deformasyon (şekil değiştirme)	mm / mm
ε_g	Gerçek birim deformasyon (şekil değiştirme)	mm / mm
$\dot{\varepsilon}$	Deformasyon oranı	s^{-1}
μ	Sürtünme katsayısı	-
σ_{Ak}	Malzemenin akma gerilmesi	MPa
σ_m	Mühendislik gerilmesi	MPa
σ_g	Gerçek gerilme	MPa
$\sigma_{\max}$	Maksimum çekme dayanımı	MPa
τ	Sürtünme gerilmesi	MPa
V	Çekme hızı	mm / dk

1 GİRİŞ

Son yıllarda dünyada enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bunlardan birisi de otomobillerin ağırlığını düşürerek yakıt sarfiyatını azaltmaktır. Özellikle otomobil ağırlığının büyük bir kısmını teşkil eden kaportalarda 1920'li yıllardan bu yana temel malzeme kabul edilen yumuşak çeliklerden farklı malzemeler denenmektedir. Hafiflik ve korozyona karşı dayanıklılık özelliğinden dolayı alüminyum alaşımları en çok ilgi gören malzemeler olmuşlardır. Otomotiv üreticileri de taşıt gövde imalatında daha fazla alüminyum kullanma yönünde çalışmalarını hızlandırmışlardır (Aluminum 1998).

Sac metal şekillendirme işlemleri endüstride özellikle otomobil, uçak, lokomotif, inşaat, tarım araçları, ofis mobilyaları ve bilgisayar sektörlerinde sıkça kullanılmaktadır. Bu şekillendirme işleminin başarısı malzeme özelliklerine, parça geometrisine ve iş parçası ve kalıp arasındaki yağlamaya bağlıdır.

Her ne kadar alüminyum ve alaşımları çok yaygın bir kullanım alanına sahip olsa da otomobil endüstrisindeki kullanım alanları istenilen seviyenin çok altındadır. Halen otomobil dış aksamındaki temel malzeme düşük karbonlu çeliktir (Hecker ve Ghosh 1976). Alüminyum alaşımları içerisinde de özellikle, alüminyum-magnezyum (Al-Mg) alaşımlarına (5000 serisi alaşımlar) ilgi büyük olmuştur. Bu alaşımlar çok iyi mukavemet ve şekillendirilebilme kabiliyeti yanında göreceli olarak düşük maliyetlidirler (Gatenby ve Court 1997).

Al-Mg alaşımları genelde %0,5-%5 oranında Mg içerirler. Magnezyumun hafifliğinden dolayı bu alaşım saf alüminyum malzemeden daha hafiftir. Düşük karbonlu çelikle karşılaştırıldığında, oda sıcaklığındaki şekillendirilebilme kabiliyeti oldukça düşüktür. Diğer çok önemli bir problem ise, şekil verme sırasında ortaya çıkan ve çeliklerde görülen, Lüder bantlarına banda benzer şekilde yüzeyde ortaya çıkan paralel çizgilerdir. Bu durum bu malzemelerin otomobil dış kaporta malzemesi olarak kullanımını güçleştirmektedir. Bu problem ilk defa Porttevin ve LeChatelier (1923) tarafından tespit edilmiştir ve PLC olarak adlandırılmaktadır. PLC, malzeme üzerinde paralel çizgiler oluşmasına sebep olmaktadır (Phillips 1953). Buna sebep ise malzemenin negatif deformasyon oranından dolayı meydana gelen dinamik

deformasyon yaşlanması (dynamic strain aging; DSA) dir. DSA malzeme içerisinde çözülebilen (solute) atomların dislokasyon ile ilişkilerinden dolayı meydana gelmektedir ve sıcaklık ile deformasyon hızlarına bağlı bir faktördür (Beukel 1975, McCormick 1986).Magnezyum atomlarının tane sınırı bölgelerinde yığılmasından dolayı, tane sınırları deformasyonun transferini güçleştirir. PLC daha çok düşük oda sıcaklığında ve düşük deformasyon hızlarında meydana gelmektedir. Doğal olarak PLC'den dolayı yüzeyde oluşan çizgiler istenmeyen çizgilerdir. Hatta bu çizgiler boyamadan sonra bile gözükmektedir. Malzemenin otomobilin dış aksamında kullanılması istenirse bu problemin çözülmesi gerekmektedir.

Son yıllarda uygun şekillendirme, sıcaklık ve deformasyon hızlarının tespiti konusunda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Naka ve Yoshida (1999) deformasyon hızı ve sıcaklığın ince tane boyutlu Al-Mg (5083-O) alaşımını farklı deformasyon hızı ve kalıp sıcaklığında derin çekme işlemine tabi tutmuşlardır. Sınır çekme oranının (Limiting Drawing Ratio; LDR) artan kalıp sıcaklığı ile birlikte arttığı ve artan deformasyon hızıyla birlikte azaldığını göstermişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda yüzeyde ortaya çıkan PLC'nin kaybolduğu gözlemlenmiştir (Naka ve Yoshida 1999, Picu ve ark. 2005). Naka ve ark. (2001) ince taneli 5083-O Al-Mg alaşımı için şekillendirilebilme limit diyagramını (FLD) farklı sıcaklık ve deformasyon hızları için tespit etmişler, şekillendirilebilirliğin azalan deformasyon hızına bağlı olarak 423-573 K arasındaki sıcaklıklar için arttığını görmüşlerdir. Bolt ve ark. (2001) ılık sıcaklıklarda (250-350^{o}C) farklı alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilme kabiliyetinin arttığını tespit etmişlerdir. Özetlenen çalışmalardaki olumlu sonuçlar bu alanda detaylı ve kapsamlı çalışmalara devam edilmesini gerekli kılmaktadır. Şu anda elde edilen sonuçlarda seri imalata yönelik yöntemler sistem optimizasyonu henüz belirlenmemiştir. Bu alanda literatürde ciddi bir boşluk bulunmaktadır.

Bu çalışma AA 5754-O alaşımının şekillendirilebilme kabiliyetinin belirlenmesi için ön deneyleri kapsamaktadır. Malzemenin karakteristik özelliklerinden olan akma mukavemeti, çekme mukaveti, pekleşme üsteli; n ve mukavemet katsayısı; K ile, süneklik ölçütü olarak ifade edilen toplam yüzde uzaması ve kesit daralmasının, çekme hızı ve sıcaklığa bağlı olarak değişimleri detaylı olarak incelenmiştir

2 KAYNAK ARAŞTIRMASI

Hangi imalat yöntemi olursa olsun sac metallerin şekillendirilebilirliği hakkında karar verebilmek için malzeme özelliklerinin ve işlem parametrelerinin incelenmesi gerekir. Bu nedenle kaynak araştırması iki bölüm altında incelenmiştir.

2.1 Sacların Şekillendirilebilirliğini Etkileyen Özellikler

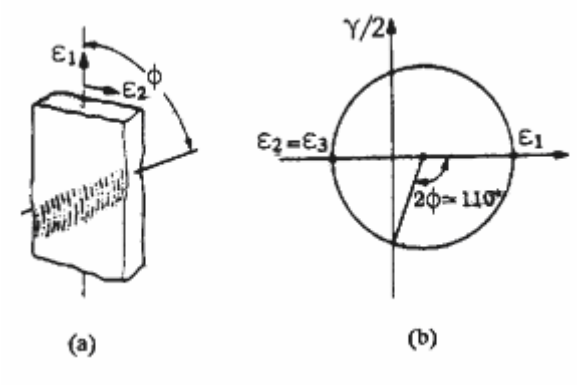
Çapan'a (2003) göre malzemelerin, toplam uzama, akma uzaması, anizotropi, tane büyüklüğü, artık gerilmeler ve geri yaylanma özelliklerinin birçok şekil verme işleminde şekillendirilebilme kabiliyetine önemli etkileri vardır. Bu etkiler aşağıda detaylıca incelenecektir.

2.1.1 Uzama

Çekme deneyinde, deney parçası, en büyük yüke kadar düzgün (uniform) olarak şekil değiştirir. Çekme kuvvetinin en büyük değerini almasıyla yerel kesit daralması (büzülme) başladığı için uzama da düzgün olmaktan çıkar. Sacların şekillendirilmesinde malzemenin düzgün uzama yüzdesinin yüksek olması istenir. Gerçek gerilme–gerçek birim deformasyon (şekil değiştirme) davranışı 2.1 denklemi ile gösterilebilen bir malzemenin çekme deneyinde maksimum yükte $\varepsilon = n$ olduğundan plastik şekil verecek bir sacın pekleşme üstelinin yüksek olması faydalıdır.

$$\sigma = K\varepsilon^{n} \; ve \; n = \frac{\log \sigma_{g}}{\log \varepsilon} \tag{2.1}$$

Sacların çekme deneyinde, büzülme çekme doğrultusu ile ϕ açısı yaparak oluşur. İzotrop bir malzeme için, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{\varepsilon_1}{2}$ ve Poisson oranının plastik alanda 0,5 olduğu göz önüne alınarak Mohr çemberinden ϕ açısı yaklaşık 55^0 bulunur. Bu durum Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Sacların çekme deneyinde büzülmesi (Tekkaya 2001)

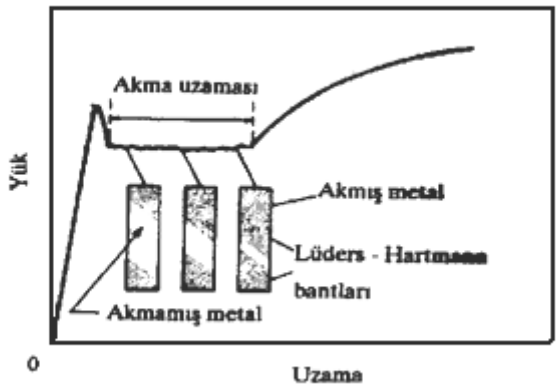
Çekme deneyinde kopma uzaması düzgün uzama ile büzülme uzamasının toplamıdır. Düzgün uzamaya malzemenin pekleşme üsteli *n*, büzülme uzamasına ise şekil değiştirme hızı hassasiyeti *m* etki eder. Yüksek *m* değeri kırılmadan önce oluşan büzülme uzamasının büyük olmasına yol açar. Dolayısıyla *n* ve *m* değeri büyüdükçe toplam uzama da artar.

2.1.2 Akma uzaması

Belirgin akma gösteren malzemelerde, gerilme üst akma sınırından alt akma sınırına düştükten sonra, alt akma sınırı boyunca gerilmenin yeniden yükselmeye başlamasına kadar oluşan uzamaya akma uzaması denir.

Üst akma sınırında, gerilme yığılması olan bir noktada, malzemede plastik şekil değişimine uğramış bir bant oluşur. Gözle görülebilen bu bandın oluşmasıyla birlikte gerilme alt akma sınırına düşer ve akma uzaması boyunca bu bant deney çubuğu üzerinde yayılır. Çoğunlukla, çeşitli noktalarda gerilme yığılması olduğu için oluşan bant sayısı da birden çoktur. Genel olarak çekme doğrultusu ile yaklaşık 45º açı yapan bu bantlara Lüder-Hartmann bantları denir (Şekil 2.2)

Lüder-Hartmann bantları ürünün yüzey görünümü bozdukları için malzemenin belirgin akma göstermesi önlenmeli veya akma uzaması küçültülmelidir. Bu amaçla sac soğuk haddelenerek kalınlığı çok az (%0,5…1,5) düşürülür. Bu işleme temper haddelemesi denir. Temper haddesinden sonra saclar şekil değişimi yaşlanmasına uğramadan imalata alınmalıdır. Aksi halde, depolamada belirli bir süre aşılırsa belirgin akma ve dolayısıyla Lüder-Hartmann bantları yeniden görülür.



Şekil 2.2 Akma uzaması ve Lüder-Hartmann bantları (Tekkaya 2001)

2.1.3 Anizotropi

Genellikle haddeleme ile üretilen sac metaller, ya tercih edilen kristalografik yönlenme ya da anizotropi olarak bilinen mekanik liflenmeler nedeni ile yön ile değişen mekanik özelliklere sahip olmaktadırlar. Özelliklerin doğrultuya bağlı olması anizotropi olarak adlandırılmaktadır. Anizotropi sacların şekillendirilmesinde önemli olan bir faktördür. Tercihli yönlendirmenin yol açtığı kristalografik anizotropi ve bantlı (veya lifli) yapının oluşturduğu anizotropi olmak üzere iki tip anizotropi vardır. Anizotropi hem sac düzleminde hem de kalınlık doğrultusunda olabilmektedir. Anizotropi eğilebilirliği ve derin çekilebilirliği etkileyen önemli bir faktördür.

Soğuk haddelenmiş saclarda inklüzyon, kalıntı ve boşlukların haddeleme doğrultusunda uzaması ve sıralanmasıyla oluşan bantlı yapı malzemede anizotropinin oluşmasını sağlamaktadır. Bantlı bir içyapı, haddeleme doğrultusuna dik doğrultuda çok sık tekrarlanan süreksizliklerden dolayı anizotroptur ve bu doğrultuda süneklik düşük olmaktadır. Dolayısıyla eğmede haddeleme yönü çok önemlidir. Eğme kıvrımı sacın haddeleme yönüne dik olmalıdır aksi takdirde eğme sırasında sac çatlayabilmektedir. Bu nedenle eğilecek bir sac ilk aşamada levha veya rulodan kesilirken bu husus kesinlikle unutulmamalıdır. Bir parçada birbirine dik iki eğme

kıvrımı olması halinde kıvrımların haddeleme doğrultusu arasındaki açının olmasına çalışılmalıdır.

Plastik anizotropi malzemenin incelmeye karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Çekme deneyinde enine doğrultuda gerçek birim deformasyon ε_w, kalınlık doğrultusunda gerçek birim deformasyonda ε_t ile gösterilirse denklem 2.2;

$$R = \varepsilon_w / \varepsilon_t \tag{2.2}$$

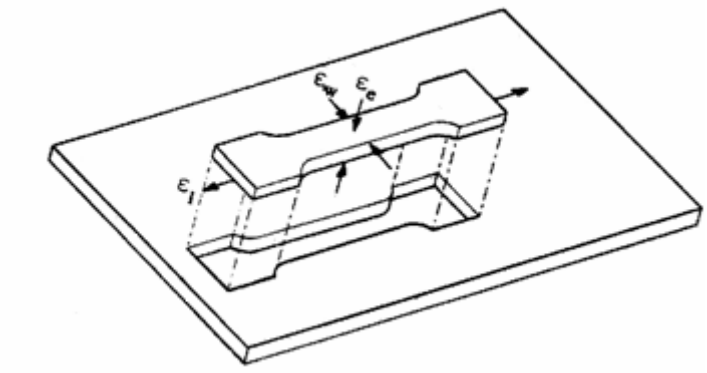
Dikey (enine doğrultu) anizotropi parametresi olarak alınmaktadır (Şekil 2.3).

R değeri ayrıca; çekme deneyinden önce ve sonra deney parçasının eni w_0 ve w, kalınlığı ise *t* ve *t0* ile gösterilirse, $\varepsilon_w = \ln(w/w_0)$, $\varepsilon_0 = \ln(t/t_0)$ olduğundan dolayı;

$$R = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(t/t_0)} \tag{2.3}$$

olarak verilir. Anizotropi parametresinin deneysel olarak saptanmasında, küçük olmaları nedeniyle *t* değerlerinin ölçülmesinde hata yapılabileceği için, yukarıdaki ifadesi, hacim sabitliğinden;

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \qquad \text{veya} \qquad \varepsilon_w + \varepsilon_l + \varepsilon_t = 0 \tag{2.4}$$



Şekil 2.3 Dikey anizotropi parametresi: $R = \varepsilon_W / \varepsilon_t$ (Tekkaya 2001)

verilirse ve $t/t_0 = w_0 l_0 / wl$ alınarak;

$$\varepsilon_1 = (\varepsilon_W + \varepsilon_l)$$
$$\ln(t/t_0) = [\ln(w/w_0) + \ln(l/l_0)] \tag{2.5}$$

buradan;

$$R = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(w_0/w) + \ln(l_0/l)} = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(w_0 \cdot l_0 / w \cdot l)} \tag{2.6}$$

şeklinde hesaplanır. Böylece çekme deneyi parçasının kalınlığı yerine eni ve uzunluğu ölçülerek *R'* nin daha sağlıklı olarak saptanması sağlanmış olur.

Bir plaka sacdan farklı doğrultularda alınan çekme örnekleriyle yapılan deneylerde değişik *R* değerleri bulunabilmektedir. Böyle bir sacda düzlemsel anizotropi olduğu söylenir. Bir sacda dikey anizotropi parametresi için bir ortalama değer tarif edilir. Ortalama dikey anizotropi parametresi;

$$R = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \tag{2.7}$$

olarak hesaplanır. Burada R_o, R_{45}, R_{90} değerleri sırasıyla sacda hadde yönü, hadde yönüne 45^o ve hadde yönüne 90^o'deki numunelerden beklenen *R* değeridir. Eğer hadde yönünde ve hadde yönüne 90^o'deki numunelerden *R* değerleri tespit edilirse bu durumda ortalama değeri;

$$R = \frac{R_0 + R_{90}}{2} \tag{2.8}$$

halini alır. Derin çekme işlemlerinde özellikle zor işlemlerde malzemenin yüksek *R* değerli olması *(R>1)* istenir. *R* değeri büyüdükçe malzemenin derin çekilebilirliği artar. Malzeme izotropik olursa *R*=1 olur. Çünkü hacim;

$$V = (\Sigma_V / \Sigma_N) = -(\Sigma_Z / \Sigma_N) \tag{2.9}$$

hiç değişmez. Boy ve kalınlıkta kayıp oranı aynıdır. Anizotropik malzemelerde $R>1$ olması istenir. t'nin değişimi çok küçük olduğundan $R>1$ olur. R değerinin sac düzleminde değişimini yansıtan ΔR değeri ise;

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{4} \tag{2.10}$$

olarak hesaplanır. Yine aynı şekilde hadde yönüne 45^o numunelerle çalışılmadığı için ve R değeri tespit edilemediği için söz konusu formül;

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90}}{2} \tag{2.11}$$

olarak hesaplanır. ΔR'nin sıfıra yakın olması tercih nedenidir. Silindirik kap çekme işleminde sabit bir zımba çapı için başarılı bir şekilde çekilebilecek en büyük taslak çapı artan R değeri ile belirgin bir artış göstermektedir. Yukarıdan da anlaşılabileceği gibi R ve ΔR bir malzeme özelliğidir. Sacın cinsine ve üretimleri sırasında gördüğü işlemlere bağlıdır.

Özetle;

- $R = 1$ ise malzeme izotroptur.
- $R \neq 1$ ise ve aynı zamanda bir plaka sacdan farklı doğrultularda alınan çekme deneyi örnekleriyle yapılan deneylerde elde edilen R değerleri farklılık göstermiyorsa malzemede normal izotropi bulunduğu söylenir.
- $R \neq 1$ ise ve aynı zamanda sac düzleminde doğrultuya bağlı olarak değişiyorsa malzemede düzlemsel anizotropi vardır.

2.1.4 Tane büyüklüğü

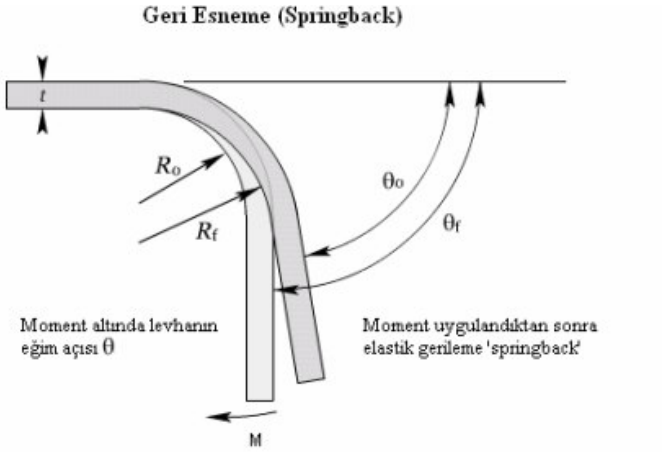
Saclarda tane büyüklüğü malzemenin mekanik özelliklerine ve ürünün yüzey görünümüne etkileri bakımından önem taşır. Genel olarak plastik şekil verilecek saclarda ASTM standardına göre tane büyüklüğünün 7'ye karşılık gelen ortalama tane alanının yaklaşık 2 μm^2 veya malzemenin daha ince taneli olması tercih edilir.

2.1.5 Artık gerilmeler

Sacların şekillendirilmesi sırasında düzgün olamayan şekil değişimi nedeniyle üründe artık gerilmeler doğar. Dengeleri bozulduğunda artık gerilmeler parçanın çarpılmasına yol açar. Yüzeydeki çekme artık gerilmeleri ise, giderilemedikleri takdirde gerilmeli korozyon çatlamasına sebep olabilirler.

2.1.6 Geri esneme

Uygulan kuvvet parçada bir eğme kuvveti oluşturuyorsa bu kuvvet kaldırıldığı takdirde parça bir miktar elastik şekil değiştirir ve sonuçta eğme açısı küçülür, eğme yarıçapı ise büyür (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Eğilen sacda meydana gelen geri esnemenin şematik olarak gösterimi (www.steeluniversity.org)

Tarafsız (nötr) eksenin bükülen kısımdaki *B* uzunluğu geri esnemeden önce ve sonra aynı olduğuna göre

$$B = \left(R_0 + \frac{e}{2} \right) \alpha_0 = \left(Rf + \frac{e}{2} \right) \alpha f$$

ve buradan da $K_g = \dfrac{\alpha f}{\alpha_0}$ olmak üzere

$$K_g = \frac{(2R_0 / e) + 1}{(2Rf / e) + 1}$$

bulunur. K_g, geri esneme faktörü olarak adlandırılır. K_g = 1 geri esnemenin olmadığını, K_g = 0 ise kalıcı şekil değişimi olmadığını gösterir.

Malzemede oluşan geri esnemenin giderilmesi için uygulan yöntemlerden biri sacı gereğinden fazla eğmek diğeri de zımba burnu ile bastırarak bu alanda yüksek basma gerilmeleri oluşturmaktadır.

2.2 Sacların şekillendirilebilirliğini etkileyen işlem parametreleri

Genel olarak sac şekillendirme işlemlerinde etkili olabilecek parametreler ve etkili faktörler Tablo 2.1'deki kadar bir çok değişkene bağlıdır (Mieler ve ark. 2003). Bu parametrelerden en önemlileri olarak; deformasyon hızı, şekillendirme sırasındaki sıcaklık, sürtünme-yağlama ve sac baskı kuvveti sıralanabilir. Bu işlem parametreleri aşağıda detaylıca incelenecektir.

Tablo 2.1 Sac şekillendirmede parametreler ve etkili faktörler (Mieler ve ark. 2003)

Parametreler	**Etkili Faktörler**
Alt kalıp	Köşe radyüslerinin değeri, Yüzey sürtünme katsayısı, Sıcaklık
Üst kalıp	İniş hızı, Yüzey sürtünme katsayısı, Sıcaklık, İşlem süresi
Sac baskısı	Baskı kuvveti
Malzeme	Malzeme cinsi, Kalınlık, Akma mukavemeti, Sıcaklık
Yağlayıcı	Viskozite, Kayma modülü, Yoğunluk, v.s.
Diğer parametreler	Sabitler, Kalıp geometrisindeki dikkate alınacak diğer ölçü değerleri, v.s.

2.2.1 Deformasyon hızı

Deformasyon (Şekil değiştirme) hızının malzemenin akma ve çekme mukavetine tesiri sıcaklık yükseldikçe artar. Yani yüksek deformasyon hızlarına çıkıldıkça malzemedeki deformasyon sertleşmesi sebebiyle daha büyük gerilme değerleri oluşmaktadır. Bunun yanında, yüksek sıcaklıklarda yapılan çekme deneylerinde çekme hızının etkisi çok daha fazla olur. Akma sınırı da çekme

dayanımı gibi artan şekil değiştirme hızına bağlı olarak yükselir. Pekleşme üsteli *n* ise deformasyon hızı yükseldikçe küçülür.

Deformasyon hızının artması, malzemenin mukavetinin artmasına sebep olur. Deformasyon hızının belirtilmesi önemli olup, deney sonuçlarının iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için de gereklidir. Deformasyon hızı malzeme dayanımlarını farklı oranlarda etkileyebilir.

Deformasyon hızının mukavemete etkisi, sabit sıcaklık ve birim deformasyon miktarı için genel olarak

$$\sigma = C\,\dot{\varepsilon}^{\,m} \quad \text{ve} \quad m = \frac{\log \sigma}{\log \dot{\varepsilon}} \tag{2.12}$$

bağıntısı ile ifade edilir. Sıcaklığın yükselmesi m değerinin de artmasına yol açar. Soğuk şekil vermede $m < 0{,}05$, sıcak şekil vermede $m = 0{,}05...0{,}4$, süper plastik malzemeler (belirli bir deformasyona erişildiğinde tane boyutunda herhangi bir değişme olmayan malzemeler) için ise $m = 0{,}3...0{,}85$ dir. Süperplastik terimi, bazı malzemelerin hasara uğramadan büyük miktarda düzgün olarak uzayabilme kabiliyetini belirtmek için kullanılır. Ayrıca deformasyon hızının sünekliğe etkisi, her malzemenin sıcaklığa da bağlı olmak üzere farklı davranış göstermesi nedeniyle kolay incelenemediği gibi, bu hususta genel sonuçlar da verilememektedir. Fakat çoğunlukla deformasyon hızı arttıkça sünekliğin azaldığı da söylenebilir.

Chang ve ark. (2007) magnezyum alaşımlı sac AZ31'in sıcak derin çekmesinde şekillendirme hızının etkisini incelemişler ve T=200 ^{o}C sıcaklık 0,002-2 s^{-1} arası deformasyon hızında analiz edip AZ31 magnezyum alaşımlı sacın şekillenebilirliğinin şekillendirme hızının düşmesiyle önemli ölçüde arttığını göstermişlerdir.

Li ve Gosh (2004) Al 5182 + Mn, Al 5754 ve Al 6111-T4 alüminyum sac alaşımlara şekillendirme sırasında şekillendirme hızının etkisini incelemişlerdir ve tek eksenli gerilmedeki toplam uzamanın şekillendirme hızının artmasıyla azaldığını göstermişlerdir.

Niu ve ark. (2007) şekillendirme hızının AZ61 magnezyum alaşımının şekillendirmesine etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneyde 0,7 mm/s ve 1 mm/s şekillendirme hızında sınır çekme oranı (limit drawing ratio, LDR) incelenmiş ve LDR'nin şekillendirme hızının artmasıyla azaldığını göstermişler. Şekillendirme hızı yüksek tutulduğunda kalıp kenar radyüsü yakınında yırtılma meydana geldiğini tespit etmişler ve 573 K'ne kadar yaptıkları deneylerde maksimum gerilme değerinin şekillendirme hızının artışıyla arttığını göstermişlerdir.

2.2.2 Sıcaklık

Sıcaklık, süneklikle beraber tokluğu arttırırken, elastiklik modülü, akma sınırı ve çekme dayanımını ise düşürür. Pekleşme üsteli de sıcaklıktan etkilenen bir malzeme özelliğidir. Sıcaklığın yükselmesi pekleşme üstelinin düşmesine yol açar. Genel olarak sıcaklık arttıkça malzemenin mukavemeti azalır, sünekliği ise artar. Düşük sıcaklıkla beraber de malzemenin mukavemeti ve kırılganlığı artar.

Li ve Gosh (2004) otomotiv endüstrisinde kullanılan üç alaşım Al 5754, Al 5182 ve Al 6111-T4'ün çekilmesine sıcaklığın etkisini 250-350 ^{o}C aralığında incelemişlerdir. Yapılan deneylerde her üç alaşımın şekillenebilirliğinin sıcaklıkla arttığı fakat deformasyon ile sertleşen alaşımlar Al 5754 ve Al 5182 + Mn'nin çökelme ile sertleşen alaşım Al 6111-T4'ten daha fazla arttığını, hatta çökelme davranışı olmadan 6111 alaşımının şekillenebilirliğinin gelişmediğini belirtmişlerdir.

Kalıp sıcaklığının zımba sıcaklığından biraz daha yüksek olmasının şekillenebilirliği olumlu etkilediğini görmüşlerdir ve mevcut alaşımlar ve şekillendirme şartları için, en uygun parça derinliğinin kalıp sıcaklığının zımba sıcaklığından 50 ^{o}C daha fazla olması durumunda elde edildiğini göstermişlerdir.

Kırılmaların başladığı bölgelerin kalıp ve zımba sıcaklıklarıyla ilgisi araştırılmış ve kalıp sıcaklığı zımba sıcaklığından yüksek ayarlandığında kırılmaların dikdörtgensel kabın üst kenarında başladığını, kalıp sıcaklığı zımba sıcaklığından düşük ayarlandığında kırılmaların genellikle kabın alt kenarında meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca kalıp sıcaklığı zımba sıcaklığına eşit ayarlandığında kırılma başlangıcının kabın alt veya üst kenarında meydana gelebildiğini fakat genellikle kabın alt kenarında meydana geldiğini göstermişlerdir.

Akma gerilmelerinin ve uzamalarının zımba sıcaklığı ve kalıp sıcaklığıyla ilgisini Al 5754 ve Al 5182 için incelemişlerdir. Buna göre belirli kalıp sıcaklığı için, zımba sıcaklığının artmasıyla üst şekillendirme akma gerilmesinin düştüğünü ve uzamanın arttığını ve belirli zımba sıcaklığı için akma gerilmesinin kalıp sıcaklığının artmasıyla düştüğünü ve uzamanın arttığını belirlemişlerdir.

Yapılan başka bir deneyde ise *n* değerinin sabit birim deformasyonunda sıcaklığın artmasıyla düştüğünü göstermişlerdir. Ayrıca çökelme sertleşmesine maruz kalmış alaşım 6111-T4'ün deformasyon ile sertleşen iki 5XXX alaşımdan daha yüksek deformasyon sertleşmesi kabiliyeti göstermiştir. Bununla birlikte 5182 + Mn alaşımı için *n* değerinin 5754'ten daha yüksek olduğunu belirmişlerdir. Sıcaklığın *m* değerine etkisinin araştırılmasında *m* değerinin sıcaklığın artmasıyla iki 5XXX alaşım için önemli derecede arttığını göstermişlerdir.

Bolt ve ark. (2001) 1054-H4, 5754-O ve 6016-T4 serisi alüminyum alaşımların sıcak derin çekmesinde sıcaklığın etkisini oda sıcaklığından 250 ^{o}C'ye incelemişlerdir. Yapılan deneylerde sıcaklığın dikdörtgensel kutu şekilli parçada elde edilebilir maksimum ürün yüksekliğini arttırdığını belirlemişlerdir.

175 ^{o}C kalıp sıcaklığı için yapılan deneyde maksimum yükseklik artışının 6016 T-4'de % 30, 5754-O'da ise yalnızca % 11 olduğunu ve çekilen ürün için gerekli sıcaklığın 6016-T4'de 5754'ten daha düşük olduğunu göstermişlerdir.

Takuda ve ark. (2002) alüminyum alaşımının sıcak şartlarda derin çekilmesinde sıcaklığın etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneyde kalıp radyüsü 7,5 mm iken oda sıcaklığında derin çekmede LDR'nin 2,4'e ulaşıp kopma meydana geldiği ve kopmanın zımba köşesi etrafında meydana geldiğini, sıcaklık 250 ^{o}C olduğunda ise LDR 2,8'e ulaştığında kopma meydana geldiğini fakat kopmanın sıcaklıktan dolayı kalıp köşesi etrafında meydana geldiğini göstermişlerdir. Ayrıca 250 ^{o}C'de LDR 2,68 olarak herhangi bir kopma meydana gelmeden başarıyla çekmişlerdir. Yapılan başka bir deneyde oda sıcaklığında kalıp profil radyüsüne bağlı şekillendirme limitlerini belirlemişler ve hesaplamalarla karşılaştırıp doğrulamışlardır. Deney sonuçlarına göre oda sıcaklığında derin çekmede, şekillendirme limitine bağlı kopma zımba köşesi etrafında meydana gelmiş ve LDR

kalıp profil radyüsünden bağımsız olarak 2,1 civarında olmuştur. 250 ^{o}C'de yapılan sıcak derin çekmede ise, şekillendirme limitine bağlı kopma kalıp köşesi etrafında meydana gelmiştir ve kalıp radyüsünün 10 mm'lik değeri için LDR 2,8'e ulaşmıştır. Isıtma sıcaklığının LDR'ye etkisini araştırmışlar ve kalıp radyüsünün 7,5 mm değeri için ısıtmanın 100 ^{o}C'deki etkisinin küçük olduğunu göstermişlerdir. Bunun sebebinin de 100 ^{o}C'deki akış gerilmesinin hemen hemen oda sıcaklığındakine eşit olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca ısıtma sıcaklığı 200 ^{o}C'ye kadar etkinin hızla arttığı ve 200-250 ^{o}C arasında biraz azalmakla beraber LDR'yi arttırdığını fakat 300 ^{o}C'nin üzerinde alüminyum parçada yapısal değişimler sebebiyle metalürjik problemlerin çıktığını belirtmişlerdir. Düzgün sıcaklık şartları altında sıcaklığın etkisini görmek için yapılan deneyde parça sıcaklığı, zımba dahil takımlar ve atmosfer tamamen aynı iken, derin çekme sırasında herhangi bir sıcaklık değişimi olmadan yapılan hesaplamalar sonucunda LDR'nin sıcaklığın düzgün sıcaklık şartları altında artmasıyla hızla düştüğünü göstermişlerdir.

2.2.3 Sürtünme ve yağlama

İki yüzeyin sürtünme durumu; Coulomb modeli ile sürtünmeye bağlı kayma gerilmesi olarak ifade edilir ya da akış gerilmesi ile ilişkilendirilerek arayüzdeki kayma gerilmesi, normal gerilme ve sürtünme katsayısı cinsinden yazılabilmektedir. Sürtünme katsayısı tahmini için deneyler yapmak gerekmektedir.

Coulomb sürtünme modeli; yüzey üzerindeki normal gerilmeler üstel bir dağılım sergilemekte, buna karşılık talaş akışı sırasında talaş yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri yapışma bölgesinde sabit ve kayma bölgesinde ise sabit bir sürtünme katsayısıyla orantılı azalma eğilimi göstermektedir (Kurt ve Eker 2005). Plastik şekillendirmede meydana gelen sürtünme gerilmeleri *Coulomb* modeli ile ifade edilmekte olup denklem 2.13'te verilmiştir.

$$\tau = \mu F_s \tag{2.13}$$

F_s'nin aşırı artması halinde; malzeme, kesmedeki akma gerilmesinden fazla bir kayma gerilmesi taşıyamaz. Sürtünme gerilmesi için en üst değer, kesmedeki akma gerilmesidir. Bu sınırdan sonra malzeme akmaya başlar. Plastik şekil

değiştirmede elde edilen sürtünme katsayıları elastik şekil değiştirme durumlarına göre çok farklıdır. Yağlama, sürtünme kuvvetlerini önemli ölçüde azaltacağından erken hasarı önlemekte ve derin çekme oranını artırmaktadır. Ayrıca iş parçasının sadece sac baskısı ve şekillendirme kalıpları ile temas eden yüzeyleri yağlanmalıdır. Zımbanın taban bölgesinde malzeme ile zımba yüzeyi arasında sürtünme kuvvetinin oluşması, derin çekme kabiliyetini arttırdığından, zımbanın tabanı ile temas eden yüzeyinin yağlanması şekillendirme işlemine olumsuz etki edecektir. Soğuk şekillendirme işlemlerinde ise sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle malzeme sıcaklığı yükselerek gevreklik oluşturulabilmektedir. Bu nedenle işlemi devamlı oda sıcaklığında tutabilecek soğutma önlemleri almak gerekmektedir (Yang 1999, Meiler ve ark. 2003).

Yağlama; sürtünme ve onun sonucu oluşan aşınma etkilerini en aza indirmek amacıyla kullanılan, bu nedenle de sac metal şekillendirmede etkili olan bir parametredir. Yağlayıcı, temas halinde birbirlerini fazla aşındıran iki yüzey arasında aşınmanın etkisini en aza indirmek, bununla beraber takımların kullanım sürelerini arttırmak ve daha kaliteli son ürün elde etmek için kullanılmaktadır (Yang 1999, Kataokaa ve ark. 2003). Şekillendirme işleminde yüzeyler arasındaki aşınmayı önlemesine ilaveten yağlayıcının üzerine gelen yükü aktarabilmesi de beklenmektedir. Bu davranışları gösterebilmesi için de yağlayıcının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, işleme uygun seçilmesi önemlidir.

Rao ve Wei (2001) yağlamanın şekillendirme üzerine etkisini incelemişlerdir ve çeşitli yağlayıcılar için yağlamada iyi bir yayılım olmasını sağlamak için gereken yağlayıcı miktarını ölçüp, en az yağlayıcı miktarının borik asit kullanımında elde edildiğini göstermişlerdir. PTFE ile de hemen hemen borik aside yakın miktar kullanmışlardır. Oleik asit ve MoS_2'de ise borik asit ve PTFE'nin 3 misli daha fazla kullanmışlardır, grafitli yağ'da ise 10 misli kullanmışlardır.

Yaptıkları bir incelemede çeşitli yağlayıcıların AA1100 alaşımda kullanılmasıyla gereken derin çekme kuvvetlerini elde etmişler ve değişken yağlama şartlarında MoS_2'nin yağlayıcılığının PTFE, grafit yağ karışımı, oleik asit ve borik asitten daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca borik asidin kuru film yağlamasının, PTFE veya grafit yağ karışımıyla benzer olup MoS_2'den daha iyi

olduğunu belirlemişlerdir. Bu duruma dayanarak borik asidin kuru film yağlayıcılığının AA1100 alaşımının soğuk şekillendirilmesine oldukça elverişli olduğunu belirtmişlerdir. AA5052 ve AA6111 alaşımlarının da AA1100 alaşıma benzer eğilimler gösterdiğini ve yine bu alaşımların soğuk şekillendirilmesinde borik asidin kuru film yağlayıcılığının en uygun yöntem olduğu belirtilmiştir. Farklı yağlayıcıların çekme derinliğine etkisini incelemişler ve bütün yağlayıcılarda, yağlayıcı kullanılmamış duruma göre çekme derinliğinde artış elde etmişler ve ilaveten borik asit filmiyle çekme derinliğinin diğer katı ve sıvı yağlayıcılardan (MoS_2, grafit yağ karışımı ve PTFE) yüksek veya onlara yakın olduğunu belirlemişlerdir.Borik asit filmlerin düşük toksikliği ve suda çözünebilirliği göz önüne alınıp, şekillendirilmiş parçanın üst temizlemesinin diğer yağlayıcılara göre basit ve güvenilir olduğunu belirtmişlerdir (Rao 2001).

Lovell ve ark. (2006) sac metal şekillendirmede çevre dostu yağlayıcıların kullanımını incelemişlerdir ve çevre dostu yağlayıcıların niçin kullanılması gerektiğini açıklamışlardır.

- Sac metal parçaların uygun şekillenebilirliği ve yüzey kalitesi kuru şartlar altında nadiren elde edilir.
- Sac metal şekillendirmede hemen hemen bütün yağlayıcılar petrol veya gres bazlıdır. Her ikisi de önemli miktarda sanayi artığı oluşturur.
- Şekillendirme yağları çoğunlukla kullanılması ve imha edilmesi sırasında sağlık riski taşır.
- Şekillendirme yağlarının kullanımıyla maliyet kat kat artar.

Yaptıkları incelemede kullanılan çevre dostu yağın kanola yağı, borik asit ve katkı maddesinden (% 5 su) meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu yağın doğal, çevre dostu ve şimdiye kadar aşınma deneylerinde mükemmel yağlama gösterdiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları bir deneyde sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimini tespit etmişlerdir. Bütün yağlama şartlarında bu değişimin benzer eğilim gösterdiğini belirtmişler. Sürtünme katsayısı başlangıçta büyük olup kayma mesafesi 5 mm değerine yaklaştıkça hızla normal düzeye yaklaştığını belirtmişlerdir.

Ozturk ve Lee (2005) farklı sürtünme katsayılarıyla yapılan gerdirme deneyi simülasyonlarında deformasyon dağılımını incelemişlerdir. Deformasyon

dağılımlarının erkek kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünmenin azalmasıyla birim deformasyonun daha homojen bir dağılım oluşturduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmayla boyun vermenin geciktiğini, yüksek sürtünme değerlerinde deformasyonun belli bir bölgede yoğunlaştığını ve deformasyonun sürtünmenin azalmasıyla birlikte üst kısımlara doğru yer değiştirdiğini göstermişlerdir.

2.2.4 Sac baskı kuvveti

Li ve Gosh (2004) otomotiv endüstrisinde kullanılan üç alaşım Al 5754, Al 5182+Mn, Al6111-T4'ün çekilmesinde parça tutucu basıncının, dolaylı olarak kuvvetinin etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneyde BHP (BlankHolder Pressure)'nin parça derinliğine etkisini incelemişler ve parça derinliğinin genellikle BHP'nin artmasıyla düştüğünü ve artan BHP'nin kalıp boşluğuna sac metalin çekilmesini zorlaştırdığını göstermişlerdir. Yine akma gerilmesi ve uzama üzerine Al 5754 ve Al 5182+Mn alaşımlarında BHP'nin etkisini ölçmek için yapılan başka bir deneyde bu alaşımlar için üst şekillendirme akma gerilmesinin BHP'nin artmasıyla arttığını ve üst şekillendirme uzamasının BHP'nin artmasıyla düştüğünü göstermişlerdir. Ayrıca kalıbın alt yüzeyindeki şekil değiştirme seviyesinin BHP'nin artmasıyla arttığını belirtmişlerdir.

Chang ve ark. (2007) magnezyum alaşımlı sac AZ31'in sıcak derin çekmesine BHF'nin etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneyde BHF çok düşük olduğunda kırışma, çok yüksek olduğunda ise yırtılma meydana geldiğini göstermişlerdir ve bu sonucu yaptıkları simülasyonla da doğru şekilde tahmin etmişlerdir. Yapılan başka bir deneyde değişken sac baskı kuvveti (variable blankholder force, VBHF) teknolojisi kullanarak şekillendirilebilme limit diyagramı oluşturmuşlar ve bu teknolojiyle LDR'nin 3,5'e ulaşabildiğini göstermişlerdir. BHF ve VBHF uygulamalarının karşılaştırılmasında ise VBHF kullanımıyla BHF'ye göre en düşük duvar incelme oranının %15,21'den %12,35'e düşürülebildiği, ayrıca kısmi incelmenin sadece zımba köşeleri etrafında değil silindir duvarının diğer bölgeleri boyunca da azaltıldığını göstermişlerdir.Niu ve ark. (2007) magnezyum alaşımlarının derin çekmesine BHF'nin etkisini incelemişlerdir. BHF'nin eksik olduğunda buruşma, yüksek olduğunda ise yan duvarlarda kopma meydana geldiğini göstermişlerdir.

3 MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde sacların şekillendirilebilirliğini etkileyen özelliklerden toplam uzama, akma uzaması ve anizotropinin şekillendirilebilme kabiliyetine etkileri ile işlem parametrelerinden deformasyon hızı ve sıcaklığın etkileri araştırılmıştır.

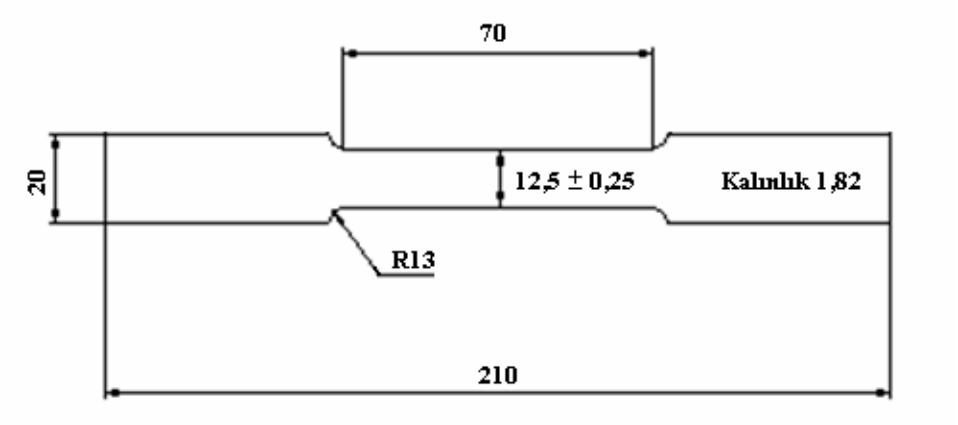
3.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Literatürde AA 5754, Al 5754, Al-Mg 5754 veya Al-3%Mg kodlarıyla adlandırılan alüminyum-magnezyum alaşımı malzeme kullanılmıştır. Esasen malzemenin herhangi bir yaşlandırma işlemine tabi tutulmadığını belirtmek için de O simgesi kullanılarak bu malzeme 5754-O kodu ile tam olarak belirlenebilir. Çekme deneylerinde kullanılan malzmenin spektrometre analizi yapılmış olup, analiz raporu EK-1'de ve sonuçları Tablo 3.1'de verilmiştir.

2x1 m boyutlarındaki alüminyum malzemeler, Şekil 3.1'deki ASTM E8 standart teknik resmine göre su jeti tezgahında kesilmiştir. Anizotropinin etkisini görmek için farklı yönlerde deney numuneleri hazırlanmıştır. Kimyasal yapının değişmemesi veya ITAB (ısı tesiri altındsaki bölge) oluşmaması için su jeti ile kesme tercih edilmiştir. 70 mm boyutlarındaki orta kısım üniform uzunluk olarak adlandırılır. Bu kısmın belirtilen toleranslarda işlenmesi ve yüzeylerin birbirlerine paralel olması sağlanmıştır.

Tablo 3.1 AA 5754 malzemesindeki elementlerin ortalama % oranları

Element	**% Ağırlık**	**Element**	**% Ağırlık**	**Element**	**% Ağırlık**
Al	96	Si	0,112	Sn	0,0027
Mg	3,17	V	0,0098	Cr	0,0023
Mn	0,51	Cu	0,0096	Zr	0,0015
Fe	0,163	Ti	0,009	Diğer	<0,001



Şekil 3.1 Çekme deneyi numunesi ölçüleri, mm (ASTM E8)

3.2 Çekme Deneyi

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan deney, çekme deneyidir. Bir malzemenin çekme dayanımı veya çekme mukavemeti, maksimum yükün ($F_{\max}$) numunenin orijinal kesit alanına (A_0) oranıdır. Yani;

$$\text{Çekme dayanımı, } (\sigma_{\max}) = \frac{F_{\max}}{A_0} \tag{3.1}$$

Akma gerilmesi; belirli bir şekilde akma gösteren malzemlerden akma gerilmesi, akma yükünün (F_{Ak}) numunenin orijinal kesit alanına bölünmesi ile bulunur.

$$\text{Akma dayanımı, } (\sigma_{Ak}) = \frac{F_{Ak}}{A_0} \tag{3.2}$$

Bariz bir şekilde akma göstermeyen malzemelerin akma gerilmesi, çekme diyagramı üzerinden, %0,01'den % 0,2'ye kadar kalıcı bir deformasyon bırakabilen yükün, numunenin orijinal kesit alanına bölünmesi ile bulunur.

$$\text{Akma dayanımı, } (\sigma_{Ak}) = \frac{P(\varepsilon_m = \%0{,}01)}{A_0} \text{ veya}$$

$$(\sigma_{Ak}) = \frac{P(\varepsilon_m = \%0{,}2)}{A_0} \text{ dır.} \tag{3.3}$$

Elastik limitin ölçülmesindeki zorluklardan dolayı akma gerilmesi veya akma sınırı plastik deformasyonun başlangıcı olarak ifade edilir.

% Uzama; numunenin uzama miktarının orijinal uzunluğa oranının yüzde olarak ifadesidir.

$$\%\text{ Uzama, } (\%\varepsilon_m) = \frac{\Delta L}{L_0} x100 = \frac{L_k - L_0}{L_0} x100 \tag{3.4}$$

% Uzama, çekme deneyi sırasında numunenin boyun vermesi sebebiyle deformasyonun homojen olmamasından etkilenir ve bundan dolayı da % uzama, numunenin ölçü uzunluğuna bağlı olarak değişir.

Maksimum yüklemeye kadar numunenin boyunun uzaması homojendir. Bu noktadan sonra boyun teşekkülü başlar ve bundan sonraki deformasyon numunenin uzunluğu boyunca homojen değildir. Dolayısıyla malzemenin homojen % uzama miktarı, çekme diyagramında maksimum gerilmenin hesaplandığı noktaya karşıt olan % uzama miktarıdır.

% Kesit daralması; numunenin koptuktan sonraki kesit alanındaki küçülmenin, başlangıçtaki orijinal kesit alanına oranının % olarak ifadesidir.

$$\%\text{ Kesit Daralması, } (\%r) = \frac{\Delta A}{A_0} x100 = \frac{A_0 - A_k}{A_0} x100 \tag{3.5}$$

% Uzama ve % kesit daralması malzemenin sünekliği hakkında genel bir fikir elde edilmesini sağlar. % uzama ve % kesit daralması yüksek olması malzemelerin deformasyon kabiliyetinin iyi olduğunu gösterir.

Çekme diyagramındaki elastik eğime elastisite modülü veya Young modülü (E) denir. Çekme diyagramında elastisite modülünün hesaplandığı elastik bölgede Hook Kanunu ($\sigma = E\varepsilon_m$) geçerlidir. Elastisite modülü malzemelerin rijitlik (stiffness) ölçümüdür. Elastisite modülü ne kadar büyük olursa, elastik birim deformasyon da o kadar küçüktür. Elastiklik modülü teorik olarak atomlar arasındaki bağ kuvvetlerinden hesaplanır. Çekme diyagramından malzemenin elastik modülü, elastik doğrunun eğiminden hesaplanır. Metalik malzemelerin elastisite modüllerine alaşım elementlerinin, ısıl ve mekanik işlemlerin etkisi nispeten azdır, fakat sıcaklığın etkisi büyüktür. Malzemenin sıcaklığı arttıkça elastisite modülü azalır.

Rezilyans; bir malzemenin elastik olarak şekil değiştirdiğinde absorbe ettiği enerjiyi, şekil değişimi yapan kuvvetin kaldırılması ile geri vermesi özelliği olarak tanımlanır. Rezilyans, rezilyans modülü ile ölçülür. Rezilyans modülü, çekme eğrisinin elastik sınırına kadar olan kısmın altında kalan alandır.

$$\text{Rezilyans Modülü, } (U_R) = \frac{\sigma_{Ak}.\varepsilon_{Ak}}{2} = \frac{\sigma_{Ak}^{\ 2}}{2E} \tag{3.6}$$

Yukarıdaki bağıntıdan da anlaşıldığı gibi, yüksek akma gerilmesi ve düşük elastisite modülüne sahip malzemeler (örneğin; yay çelikleri) yüksek rezilyans modülüne sahiptirler.

Tokluk; bir malzemenin plastik deformasyon sırasında enerji absorbe etmesi özelliğine tokluk denilmektedir. Çekme eğrisi altında kalan çekme işini verir ve malzeme tokluğunun bir ölçüsüdür.

$$\text{Tokluk} = \int_0^{e_k} \sigma_m . d\varepsilon_m \tag{3.7}$$

Bir yay çeliği ve bir yapı çeliği karşılaştırıldığında, yüksek karbonlu yay çeliğinin akma ve çekme mukavemetinin orta karbonlu olan yapı çeliğinin değerlerinden yüksek olduğu görülür. Fakat yapı çeliğinin toplam % uzama miktarı daha fazla yani, sünekliği daha iyidir. Yapı çeliğinin çekme diyagramı altındaki alan

daha büyük olduğundan daha tok bir malzeme olduğu görülür. Buna göre tokluk, mukavemet ve sünekliğin her ikisini de içine alan bir özelliktir.

Gerçek gerilme – gerçek birim deformasyon; çekme deneyi sırasında, deney parçasının kesiti sürekli olarak azalır. Mühendislik gerilmenin hesabında, F çekme kuvveti deney başlangıcındaki A_0 kesitine bölündüğü için, deney parçasına etki eden gerçek gerilmenin mühendislik gerilmesinden farklı olduğu aşikârdır. Gerçek gerilme, hesaplandığı andaki çekme kuvvetinin, o andaki parça kesitine bölünmesi ile bulunur. Yani;

$$\text{Gerçek gerilme, } (\sigma_g) = \frac{F_i}{A_i} \tag{3.8}$$

Çekme deneyi sırasında, deney parçasındaki şekil değişimi de homojen değildir. Mühendislik % birim deformasyon ($\%\varepsilon_m$), deney parçasının boyundaki değişimin (Δl) orijinal boya bölünmesi ile elde edilir. Gerçek birim deformasyon(% uzama) ise her an için uzayan boya göre hesap edilir. Dolayısıyla gerçek şekil değişiminin, mühendislik şekil değişiminden farklı olduğu aşikârdır. Örneğin, herhangi bir çekme deneyinde, birbirini takip eden farklı durumlardaki mühendislik uzama oranlarını (ε_m) şöyle hesaplarız:

0 ile 1 noktaları arasında : $\varepsilon_{m0-1} = l_1 - l_0 / l_0$ (3.9)

1 ile 2 noktaları arasında : $\varepsilon_{m1-2} = l_2 - l_1 / l_1$ (3.10)

0 ile 2 noktaları arasında : $\varepsilon_{m0-2} = l_2 - l_0 / l_0$ (3.11)

Yukarıdaki denklemlerden $\varepsilon_{m0-1} + \varepsilon_{m1-2} \neq \varepsilon_{m0-2}$ olduğu görülür. Buradan, çekme deneyi sırasında çeşitli noktalarda hesaplanan mühendislik uzama oranlarının miktarlarının toplamının, toplam mühendislik birim deformasyon miktarını vermediğini görürüz. Bundan dolayı, gerçek birim deformasyon şöyle hesaplanır:

$$\text{Gerçek birim deformasyon, } (\varepsilon) = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \left[\ln l\right]_{l_0}^{l_i} = \ln \frac{l_i}{l_0} \tag{3.12}$$

Gerçek birim deformasyon formülü ile, çekme deneyi sırasında çeşitli noktalarda hesaplanan şekil değişimi miktarlarının toplamı, toplam gerçek birim deformasyon miktarına eşittir. Örneğin;

$$\text{0 ile 1 noktaları arasında : } \varepsilon_{0-1} = \ln \frac{l_1}{l_0} \tag{3.13}$$

$$\text{1 ile 2 noktaları arasında : } \varepsilon_{1-2} = \ln \frac{l_2}{l_1} \tag{3.14}$$

$$\text{0 ile 2 noktaları arasında : } \varepsilon_{0-2} = \ln l \frac{l_2}{l_0} \tag{3.15}$$

Yukarıdaki denklemlerden; $\varepsilon_{0-1} + \varepsilon_{1-2} = \varepsilon_{0-2}$ olduğu görülür. Gerçek birim deformasyon, doğal veya logaritmik şekil değişimi olarak da isimlendirilir. Gerçek gerilme-uzama diyagramı ile mühendislik gerilme-birim deformasyon diyagramı arsındaki ilişki şu şekilde tarif edilebilir:

Çekme deneyi sırasında, metalin kristal yapısı bozulur ve atom boyutu mertebesinde bazı boşluklar meydana gelir. Bu boşluklar malzemenin hacminin artmasına sebep olur. Fakat hacimdeki bu artış çok küçüktür, deformasyonun çok fazla olduğu durumlarda bile, orijinal hacmin yaklaşık 0,1 ile % 0,01'i kadardır. Bundan dolayı çekme deneyi sırasında da hacmin sabit kaldığı kabul edilebilir. Buna göre deformasyonun homojen olması halinde;

$$V_i = V_0 \text{ ve } V_i = A_i l_i = A_0 l_0 \tag{3.16}$$

yazılabilir. Buradan;

$$V_0 = V_i = A_0 l_0 = A_i l_i \text{ veya } \frac{l_i}{l_0} = \frac{A_0}{A_i} \tag{3.17}$$

denklemi elde edilir. Mühendislik uzama ε_m ile gösterildiğine göre

$$\varepsilon_m = \frac{l}{l_0} = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{l_i}{l_0} - 1 \text{ ve } \frac{l_i}{l_0} = 1 + \varepsilon_m \text{ dir.} \tag{3.18}$$

gerçek uzama ε_g ile gösterildiğine göre;

$$\varepsilon_g = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0} \tag{3.19}$$

dir. Denklem 3.18, 3. 19'da yerine konulursa;

$$\varepsilon_g = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_m) \tag{3.20}$$

denklemi elde edilir.

Gerçek gerilme ile mühendislik gerilme arasındaki denklemde, "deformasyon sırasında malzeme hacmi sabit kalır", kabulünden faydalanarak şöyle çıkarılabilir.

$$V_0 = V_i = A_0 l_0 = A_i l_i \text{ veya } A_i = \frac{A_0 l_i}{l_0} \tag{3.21}$$

dir. Denklem 3.21, denklem 3.8'de yerine konulursa;

$$\sigma_g = \frac{F_i}{A_i} = \frac{F_i}{A_0} . \frac{l_i}{l_0} = \sigma_m . \frac{l_i}{l_0} \tag{3.22}$$

yazılabilir. Sonuç olarak

$$\sigma_g = \sigma_m (1 + \varepsilon_m) \tag{3.23}$$

elde edilir. Küçük ε_m değerleri, yani elastik şekil değişimi için;

$$\ln(1+\varepsilon_m) \cong \varepsilon_m \tag{3.24}$$

alınabileceğinden $\varepsilon \cong \varepsilon_m$ kabul edilebilir. ε_m'nin büyük değerleri için, ε ve ε_m arasındaki fark hızla artar. Çekme deneyinde ε ve ε_m değerlerinin kıyaslanması Tablo 3.2'de verilmiştir.

Alüminyum, bakır veya benzeri "sünek" bir metalin tipik mühendislik çekme diyagramında, ε_m başlangıçta σ_m ile doğrusal olarak artar. Bu bölgede şekil değişimi elastiktir, yani yükün boşaltılması ile parça başlangıçtaki boyutlarını alır.

Tablo 3.2 Çekme deneyinde ε ve ε_m değerlerinin kıyaslanması

ε_m	0,01	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
ε	0,01	0,049	0,095	0,18	0,4	0,69	1,1	1,8	2,4

Doğrunun (Hooke doğrusu) eğimi E ile gösterilir ve elastiklik modülü (Young modülü) adını alır. Doğru boyunca $\sigma_m = E\varepsilon_m$ bağıntısı geçerlidir (Hooke kanunu).

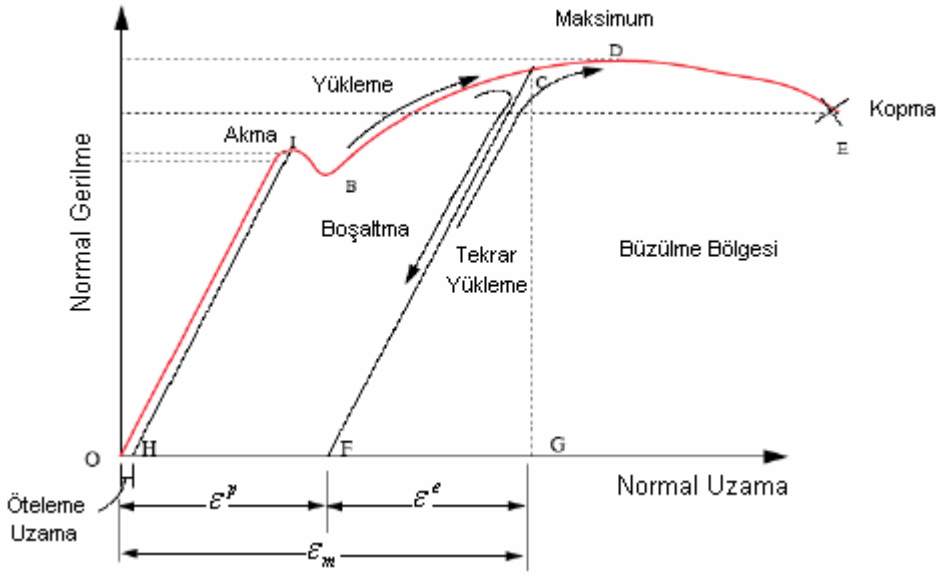
Çekme deneyinde parça uzarken kesit yüzeyi de azalır. Deney çubuğunun eksenine dik doğrultudaki birim şekil değiştirme (en veya kalınlık doğrultusu) ile eksenel (boyuna) doğrultudaki birim şekil değiştirme arasındaki oranın mutlak değerine Poisson oranı denir ve v ile gösterilir. Örneğin tungsten için 0,27, alüminyum ve alaşımları için 0,31…0,34, alaşımsız çelik için 0,33 değerindedir.

Elastiklik sınırı, çekme yükü kaldırıldığı zaman malzemede kalıcı (plastik) şekil değişiminin görülmediği en büyük gerilmedir. Çekme diyagramında doğrunun eğiminin değiştiği nokta elastik sınır olarak kabul edilir ve bu noktadan sonra Hooke

kanunu geçersizdir. Bunun sebebi ε_m ve σ_m değerlerinin doğrusal (lineer) olarak artmamasından ileri gelir.

Elastik sınırı aşıldığında ise plastik şekil değişimi başlar. Bundan sonra bir noktadaki birim şekil değiştirme ε_m, ε^e elastik bileşenle ε^p plastik bileşenin toplamından ibarettir ve dolayısıyla yük boşaltıldıktan sonra çekme deneyi çubuğunun ε^p kadar bir kalıcı birim şekil değiştirmeye uğradığı görülür. Bu durum Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

Çekme deneyi sırasında çekme kuvvetinin etki ettiği kesit sürekli olarak azalmaktadır. Eğer kesit azalması olmasa çekme gerilmesi plastik alanda pekleşmeye bağlı olarak sürekli bir şekilde artacaktı. Buna karşılık eğer pekleşme olmasa, kesit küçülmesi nedeniyle çekme gerilmesinin düşmesi gerekecekti. Çekme kuvvetinin maksimum olduğu noktaya kadar pekleşme nedeniyle gerilmedeki artış, kesit küçülmesi nedeniyle gerilmedeki düşüşten fazladır. Çekme diyagramları incelenirse, plastik bölgede pekleşme derecesinin sürekli olarak küçüldüğü görülür. Pekleşme üstelinin küçülmesi ise, pekleşme nedeniyle gerilmenin yükseltilmesi gereğini azaltır. Sonuçta çekme kuvvetinin maksimum olduğu noktada $d\sigma / d\varepsilon = \sigma$ elde



Şekil 3.2 Sünek bir metal için gerilme-birim deformasyon diyagramı (www.scienceboddies.org)

edilir. Şekil değişiminin daha da artması plastik dengesizliğe yol açar, deney numunesi büzülmeye başlar ve bu bölgede yoğunlaşan deformasyon sonunda parça kopar. Bununla beraber tüm çekme deneyi boyunca ve dolayısıyla çekme kuvvetinin gerilmenin maksimum olmasından sonra da pekleşme devam ettiği için, gerçek çekme diyagramı mühendislik çekme diyagramı gibi bir maksimumdan geçmez ve gerçek gerilme kopma anına kadar artar.

Çekme deneyinde m değerinin büzülmeye önemli bir etkisi vardır. Deneysel gözlemler, yüksek m değerleri için malzemenin hasara uğramadan önce büyük miktarda uzadığını yani yüksek m değerlerinin büzülmeyi geciktirdiğini göstermiştir (Çapan 2003). Büzülme başlamak üzere iken, bu bölgede mukavemet geri kalan kısma kıyasla pekleşme nedeniyle daha yüksektir. Ayrıca büzülme bölgesinde uzamanın daha hızlı olması nedeniyle deformasyon hızı da deney çubuğunun geri kalan kısmına kıyasla daha büyüktür. Bu da büzülme bölgesinin mukavemetini arttıran bir faktördür. Büzülme bölgesindeki malzeme mukavemetindeki artışın büzülme oluşumunu zorlaştıracağı açıktır. Sonuç olarak yüksek m değerinin büzülme oluşumunun geciktireceği ve kopmadan önceki toplam uzama miktarını arttıracağı anlaşılır.

Bridgman, 2500 atmosfere kadar hidrostatik basınç altında yaptığı çekme deneylerinde hidrostatik basıncın akma sınırına etkisinin çok yüksek basınçlara çıkılmadıkça ihmal edilebilir mertebede olduğunu görmüştür (Çapan 2003). Hidrostatik basıncın en büyük etkisi malzemenin sünekliğini arttırması ve dolayısıyla kopmadan önce çok daha büyük şekil değişimleri elde edilebilmesini sağlamasıdır. Hidrostatik basıncın büzülme başlangıcına kadar oluşan düzgün uzama ile maksimum yüke ise etkisi yoktur. Hidrostatik basınç etkisinde kalmış olan metallerde, mekanik özelliklerin değişime uğramadığı deneysel olarak saptanmıştır.

Birçok metal ve alaşımların nükleer uygulamalarda kullanılması bakımından radyasyonun da malzeme özelliklerine etkisi incelenmiştir. Yüksek radyasyona maruz bırakılan çelik ve diğer metallerin mekanik özelliklerinde görülen tipik değişimler malzemeye sıcaklığa ve radyasyon seviyesine bağlı olarak akma sınırı, çekme dayanımı ve sertliğin yükselmesi, sünekliğin ve tokluğun azalmasıdır.

4 DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Sıcaklığın ve çekme hızının şekillendirmedeki etkisini belirlemek için -60, -30, 25, 0, 100, 175 ve 250 ^{0}C olmak üzere 7 sıcaklık değeri ve 5, 25, 125, ve 500 mm/dak olmak üzere 4 deformasyon hızında üçer tekrarlı deneyler yapılmıştır Ayrıca anizotropi durumunu kabaca görmek için de 0^o, 45^o ve 90^o'lik hadde yönlerinde alınan numunelerle 25 mm/dak çekme hızında ve oda sıcaklığında 9 adet çekme deneyi yapılmıştır.

Deneyler Şekil 4.1'de görülen Shimadzu AGS100kN çekme deney cihazında yapılmıştır. Cihaz bir video ekstensometre ve bir de fırın ile beraber çalışmaktadır. Şekil 4.2 ve 4.3'te de deney cihazı ve numune bağlantı şekli gösterilmiştir.

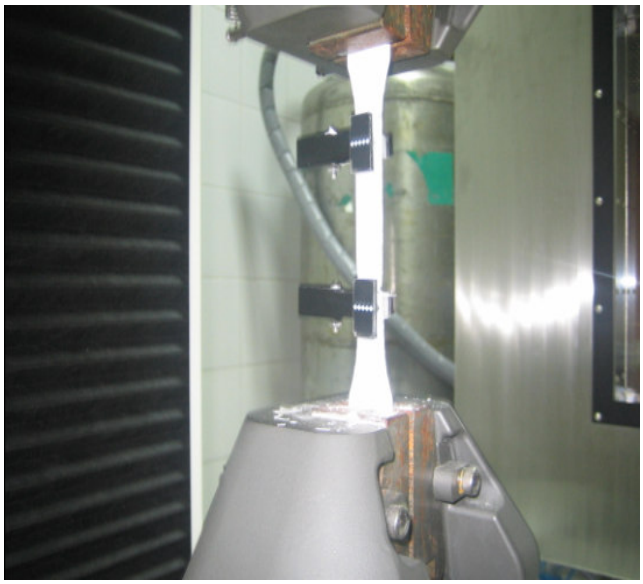
Malzemede oluşan uzamayı temassız ölçebilmek için video ekstensometre cihazı kullanılmaktadır. Bu cihaz iki kamera ve bir yazılımdan oluşmaktadır. Öncelikle cihazın kalibrasyon cetveli ile kalibrasyonu yapılır. Her bir kamera için cetvel üzerinde kalibrasyon çizgilerden her hangi ikisine odaklama yapılır. Aradaki mesafe mm olarak girilir ve programa kaydedilir. Böylece kameralar iki çizgi arasındaki mesafeyi daha önce odaklandıkları çizgiyi baz alarak ölçebilirler. Her iki çizgi de birbirlerine ters yönde hareket ettiğinden, cihaz bu yer değiştirme miktarını



Şekil 4.1 Çekme deney cihazının genel görünümü



Şekil 4.2 Çekme deney cihazı



Şekil 4.3 Çekme deney numunesinin bağlantı şekli

ilk mesafeden çıkartarak bilgisayara aktarır.

Deneylerde kullanılan fırın -180 ile 320 ^{0}C sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklara çıkabilmek için fırında bir ısıtıcı fan, düşük sıcaklıklara inebilmek için ise sıvı azot ile çalışan bir soğutma sistemi vardır. Deneylerin yapılacağı sıcaklık önceden set edilir ve rejime girinceye kadar beklenir.

Kullanılan deney cihazı 50 milisaniye aralıklarla programa veri transferi yapmaktadır. Cihaz o anki kuvveti *N* cinsinden, stroğu (iki çene arası mesafe) mm cinsinden ve ilk boya göre uzamayı mm cinsinden olmak üzere 3 veri sütunu aktarır. Bu veriler export yapılarak .txt uzantılı dosya olarak kaydedilir, oradan MS Excel programına kopyalanarak veriler üzerinde işlem yapılabilir hale getirilir. Şekil 4.4'te bir deneye ait örnek veriler görülmektedir.

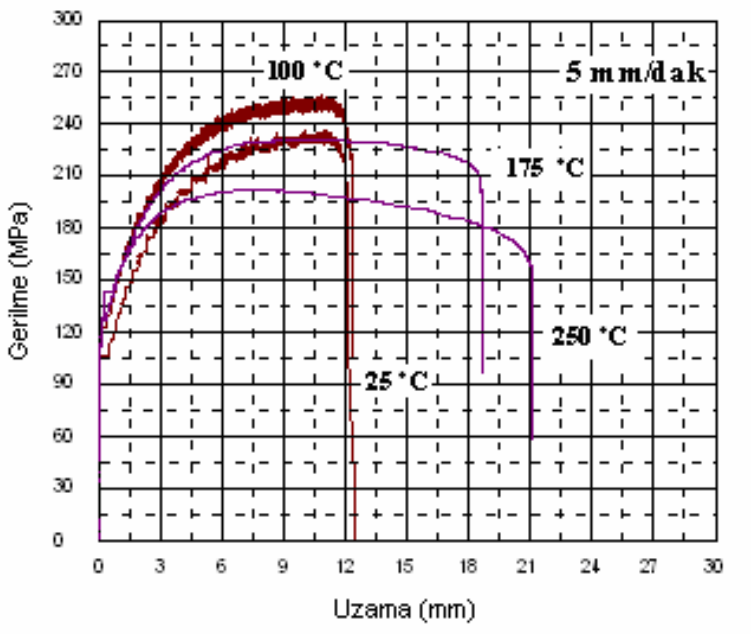
Yapılan deneylerden 5 mm/dak çekme hızında ve oda sıcaklığının üzerinde deneye tabi tututlan bir numunenin mühendislik gerilme-uzama diyagramı örnek olarak Şekil 4.5'te, diğer deneylere ait grafikler ise EK-2'de verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen veriler düzenlenerek malzemeye ait karakteristik değerlerden

elastisite modülü akma ve çekme mukavemetleri, üniform ve toplam uzama, Pekleşme üsteli ve mukavemet katsayısı hesaplanarak EK-3'teki hesaplama tablosunda verilmiştir.

1- 1

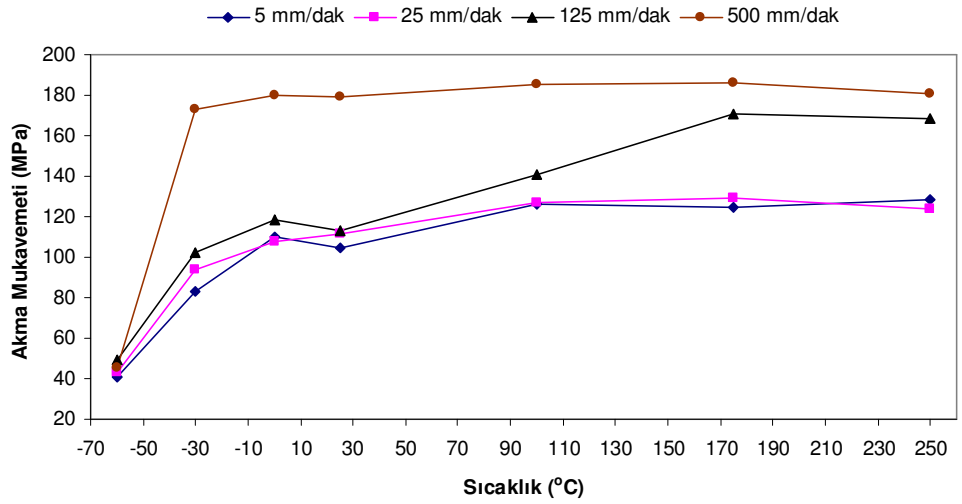
Zaman	Kuwet	Strok	Uzama
s	N	mm	mm
0,00	-8,40625	0	0
0,05	-8,46875	0,001	0,0125
0,10	-8,3125	0,006	0,015625
0,15	-7,125	0,009	0,01875
0,20	1	0,014	0,009375
0,25	14,625	0,018	0,009375
0,30	25,71875	0,023	0,009375
0,35	31,65625	0,027	0,003125
0,40	33,6875	0,031	0,003125
0,45	33,5625	0,035	0,00625
0,50	33,4375	0,039	0,009375
0,55	33,53125	0,043	0,0125
0,60	33,4375	0,048	0,015625
0,65	33,1875	0,052	0,015625
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Şekil 4.4 Cihazın transfer ettiği verilerden bir bölüm



Şekil 4.5 Örnek gerilme uzama diyagramı

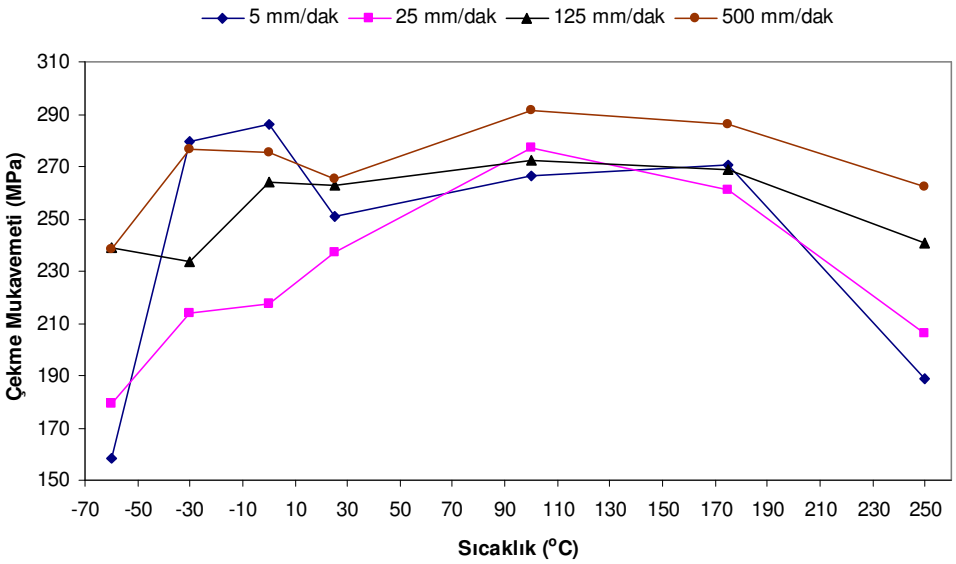
Sıcaklık ve çekme hızına bağlı olarak malzeme özelliklerinin değerlendirilebilmesi için grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerden birincisi akma mukavemetinin değişimi grafiğidir ve Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde hem sıcaklığın artması hem de çekme hızının artması ile akma mukavemetinin arttığı görülmektedir. Ayrıca 125 mm/dak hızda akma mukavemeti 0ºC'ye kadar hızla artarken 30ºC'den sonra da belirgin bir artış görülmektedir. Buna karşın diğer çekme hızlarındaki değişmeler belirli bir sıcaklığın üstünde hemen hemen değişmemektedir. Örneğin 500 mm/dak eğrisi -30ºC den sonra 5 ve 25 mm/dak eğrileri de 30ºC'den sonra pek az değişmektedir



Şekil 4.6 Akma mukavemetinin sıcaklık ve deformasyon hızına bağlı olarak değişimi

İşlem parametrelerine göre çekme mukavemeti de Şekil 4.7'de görüldüğü gibi önemli ölçüde değişmektedir. -60ºC'den 100ºC'ye kadar çekme mukaveti sıcaklığa bağlı olarak artarken, 100ºC'nin üstündeki sıcaklıklarda düşmektedir. Aynı zamanda çekme mukavemeti çekme hızına bağlı olarak artma eğilimindedir.

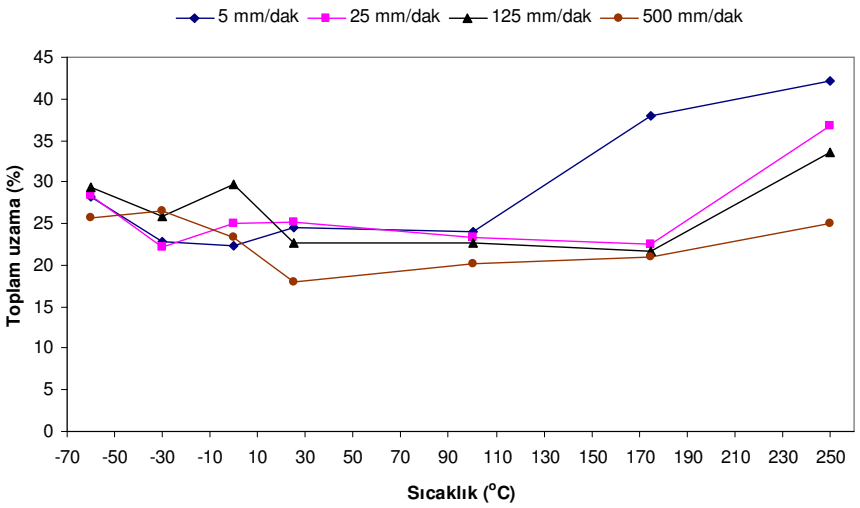
Malzemedeki deformasyonun bir sonucu olarak meydana gelen toplam uzamanın (kopma uzaması) sıcaklık ve deformasyon hızına bağlı değişimi Şekil 4.8'de verilmişitir. Çekme hızının artmasıyla toplam yüzde uzama değerleri düşmektedir. 5 mm/dak hızda oda sıcaklığı ile 100ºC arasında yüzde uzama değerleri düşerken bu sıcaklıktan sonra belirgin olarak artmaktadır. Diğer çekme hızlarında ise



Şekil 4.7 Çekme mukavemetinin sıcaklık ve deformasyon hızına bağlı olarak değişimi

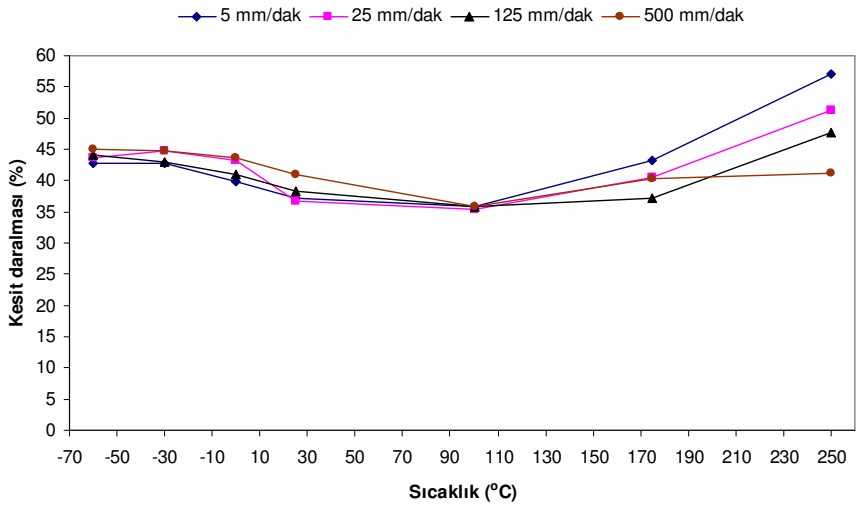
aynı trend elde edilirken değişme noktası 175ºC olmaktadır. Oda sıcaklığının altındaki değerlerde değişimler belirgin değildir.

Malzemenin sünekliği hakkında genel bir fikir elde edilmesini sağlayan bir diğer ölçüt de kesit daralması olduğu için çekme hızı ve sıcaklıkla bu ölçütün değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir. 100ºC'nin altındaki sıcaklıklarda kesit daralması



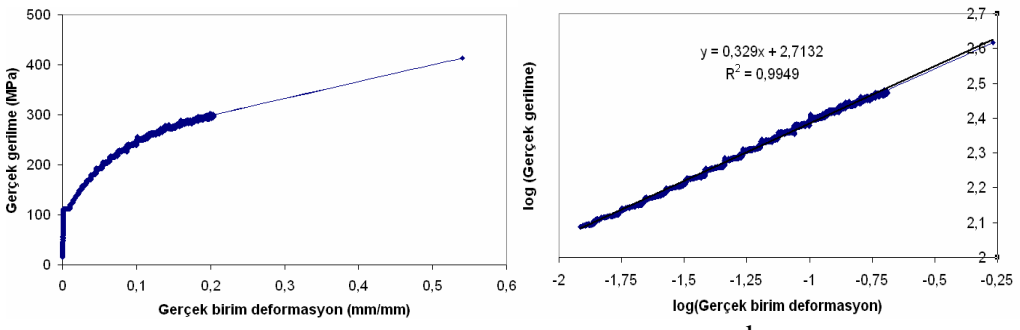
Şekil 4.8 Toplam uzamanın sıcaklık ve deformasyon hızına bağlı olarak değişimi

azalırken bu sıcaklığın üstünde hem de daha belirgin bir artış olmaktadır. Çekme hızı arttıkça kesit daralması genel olarak düşmektedir. 500 mm/dak hız için 175ºC sıcaklıklardan sonra istisnai bir durum olarak kesit daralmasının hemen hemen değişmediği görülmektedir.



Şekil 4.9 Kesit daralmasının sıcaklık ve deformasyon hızına bağlı olarak değişimi

Denklem 2.1'de verilen Ludwick, Holloman veya "power law eqution" olarak da bilinen denklemde pekleşme üsteli; *n* ve mukavemet katsayısı *K*'nın elde edilmesi için önce Şekil 4.10'daki gibi gerçek gerilme ve birim deformasyon eğrisi, çizilir (Ludwick 1909). Sonra apsis ve ordinattaki değerlerin logaritması alınarak Şekil 4.10 b'deki değerler elde edilir. Bu değerlere bir doğru uydurulur. Bu doğru denkleminin; eğimi *n* değerini, sabitinin kologaritması da *K* değerini verir.

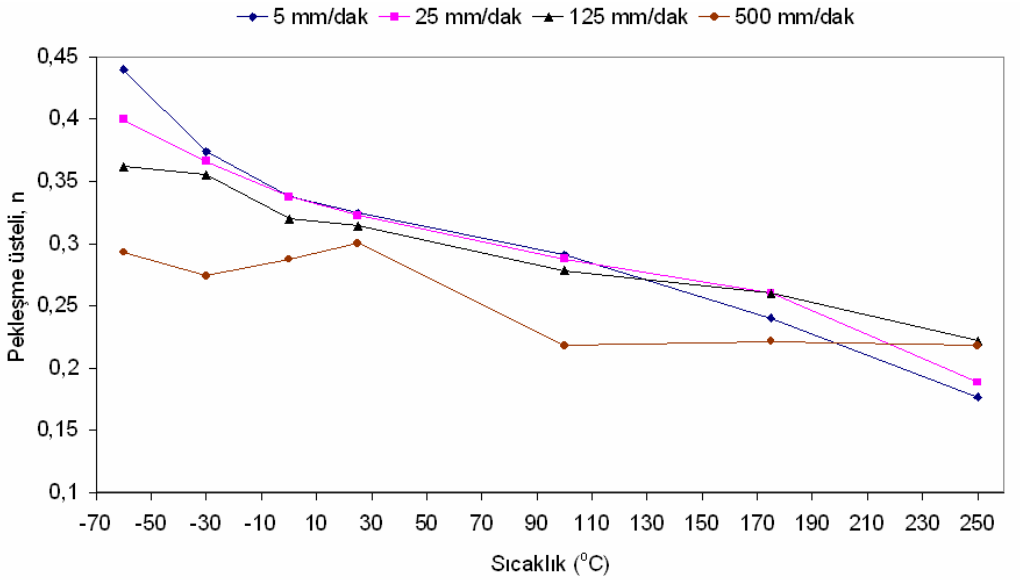


a b

Şekil 4.10 Pekleşme üsteli; *n* ve mukavemet katsayısı; *K*'nın elde edilmesi

Her bir deney için bu diyagramlar çizilerek, *n* ve *K* değerleri MS Excel programında hesaplanmıştır. Düşük hızlarda veya yüksek sıcaklıklarda akma gerilmesi uzamasının oluştuğu (yield point elongation, YPE) deneylerde plastik bölgenin başlangıç noktasının saptanması önemlidir. Bu işlem grafik üzerinden inceleme yapılarak tespit edilmiştir.

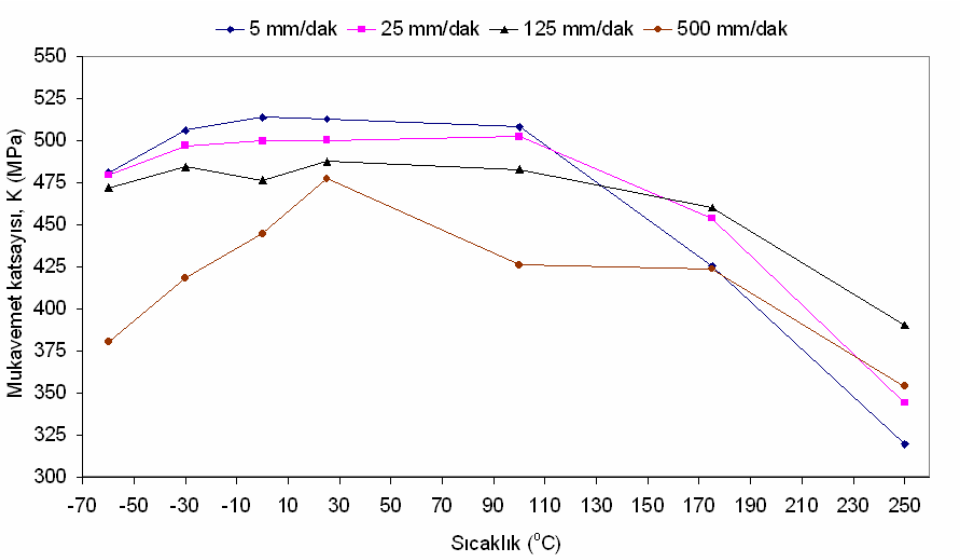
Metallerin plastik deformasyonu sırasında oluşan olayların açıklanmasında Pekleşme üsteli önemli bir malzeme karakteristiğidir. Bu karakteristiğin incelenen işleme parametrelerine göre değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir. Literatürde de genel olarak bilindiği gibi Pekleşme üsteli sıcaklık artışı ile ters ve deformasyon hızı ile de doğru orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 4.11 Pekleşme üstelinin sıcaklık ve çekme hızına bağlı olarak değişimi

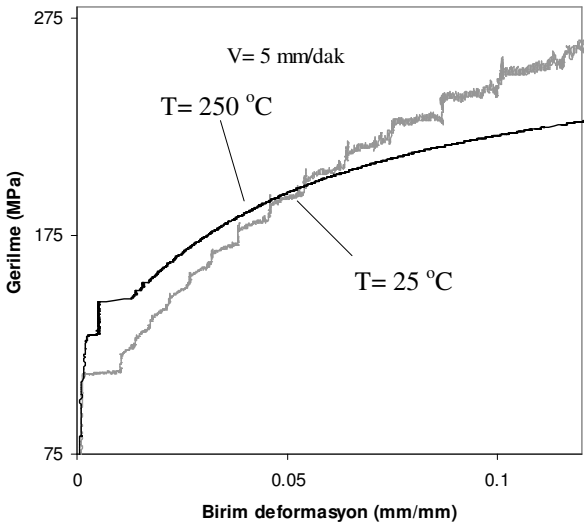
Mukavemet katsayısının değişimi için oda sıcaklığına kadar 500 mm/dak hariç küçük bir artış oda sıcaklığından sonra da daha belirgin bir düşüş kaydedilmiştir (Şekil 4.12). 500 mm/dak'lık deformasyon hızında mukavemet katsayısı *K* oda sıcaklığından düşük sıcaklıklarda belirgin bir artış göstermektedir.

Deneylerde çekme hızı ve sıcaklığın artmasıyla Lüder bant oluşumunun ortadan kalktığı görülmektedir. Özellikle Şekil 4.13'te T=25 ^{o}C eğrisinde şekillendirme sırasında oluşan Lüder bantları görülmektedir. T=250 ^{o}C'de ise Lüder



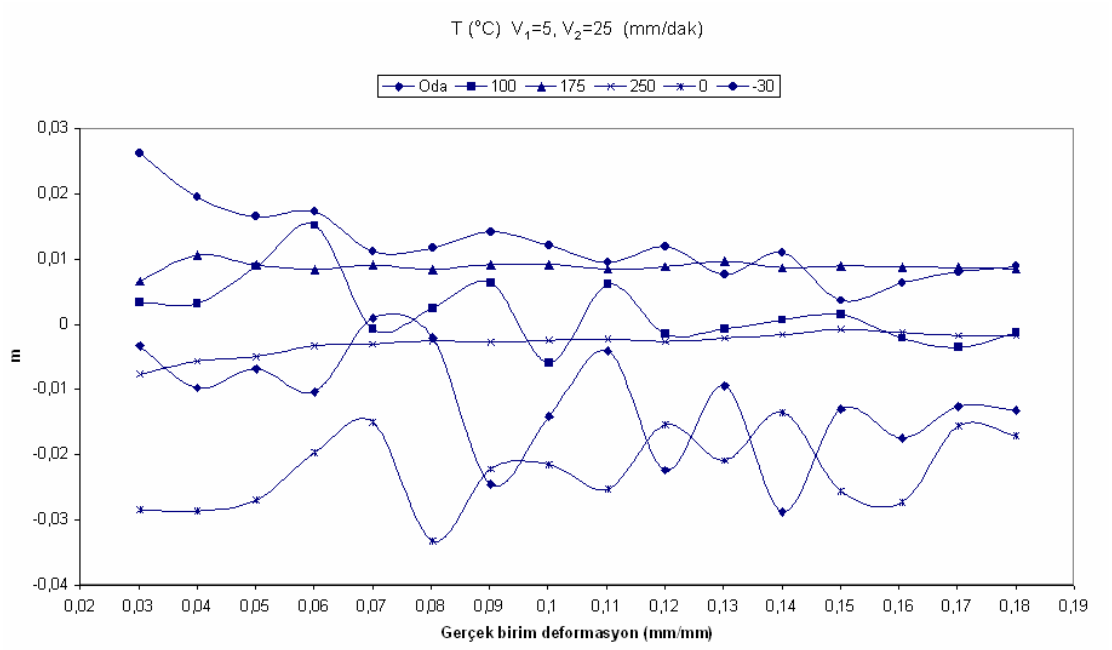
Şekil 4.12 Mukavemet katsayısının sıcaklık ve çekme hızına bağlı olarak değişimi

bantlarının kaybolduğu görülmektedir. Genel olarak düşük hızlar için 175 °C üzerine çıkıldığında ve 125 mm/dak'nın üzerindeki hızlarda da 100 °C'nin üzerine çıkıldığında bu bantların önemli ölçüde kaybolduğu görülmüştür.



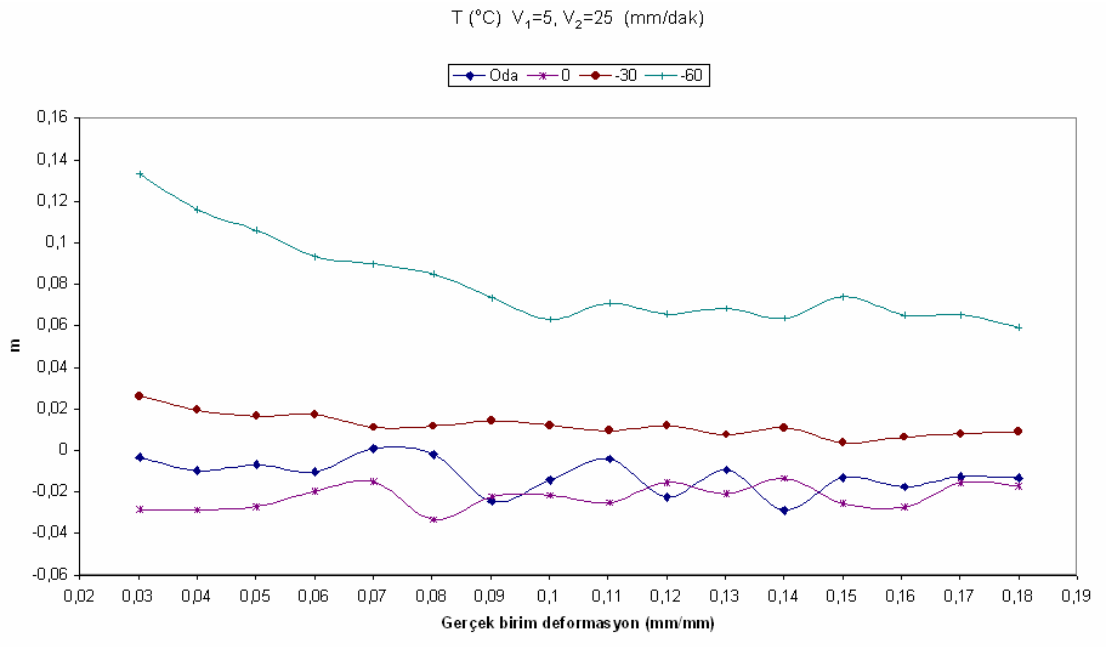
Şekil 4.13 Lüder bantı oluşumu

Şekillendirmede bir diğer önemli malzeme karakteristiği de deformasyon hız hassasiyeti (strain rate sensitivity or coefficent) olarak adlandırılan *m* değeridir. *m* değeri denklem 2.12'de gösterildiği gibi iki farklı deformasyon hızında gerçekleştirilen gerilme-birim şekil değiştirme diyagramının gerilme ve deformasyon hızlarının logaritmalarının oranı olarak hesaplanır. *m* sabit bir değer olmayıp birim deformasyon sonucu değişen bir değerdir. Şekil 4.14'te 5 ve 25 mm/dak hızlar için hesaplanan *m* değerinin birim deformasyona bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Burada *m*'in, 0 ve oda sıcaklığında negatif değer, 100 ve 175 ^{o}C sıcaklıklarda pozitif değer aldığı görülmektedir. -60 ^{o}C'de ise *m* değerinin keskin bir düşüş gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.15). Büyük şekil değişimlerinde ise m'in tekrar artışa geçtiği görülmektedir.



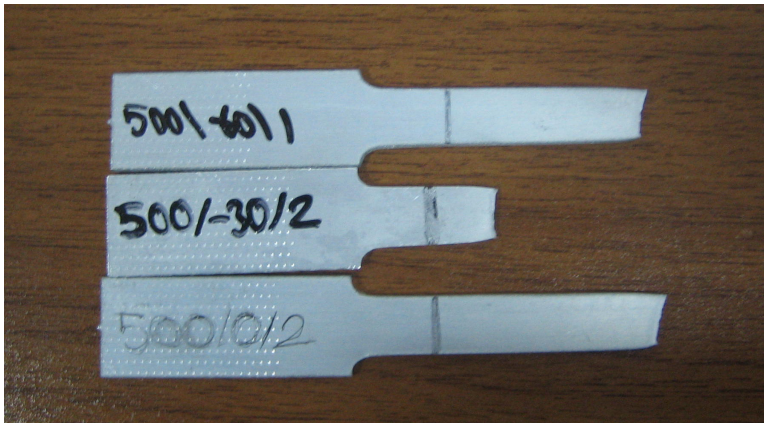
Şekil 4.14 *m* değerinin birim deformasyona bağlı olarak değişimi

Sonuç olarak m değeri yüksek deformasyonlarda artış göstermektedir. Genel olarak m sıfıra yakın veya negatif olduğu zaman süneklik düşüş göstermektedir. Soğuk sıcaklıklarda sünekliğin artmasındaki temel sebep ise m değerinde görülen artışla açıklanabilir (Picu 2005).



Şekil 4.15 m değerinin oda sıcaklığı ve altındaki sıcaklıklarda değişimi

Çekme deneyi sonunda, kopan kısmın şekli de malzemenin gevrek veya sünek olması durumuna göre değişiklik gösterir. Şekil 4.16'da düşük sıcaklıklarda Şekil 4.17'de de yüksek sıcaklıklarda yapılan deneylere ait örnek kırılma şekilleri verilmiştir. Normalde sünek özellik gösteren alüminyumun çekme doğrultusuna 45º lik bir açıda oluşması beklenirken, sıfırın altındaki sıcaklıkların yüksek hızlarında ve yüksek sıcaklıkların düşük hızlarında kırılmalar çekme doğrultusuna dik oluşmaktadır. Bu durum, malzeme içinde bulunan magnezyum atomlarının ilgili hızlarda ve sıcaklıklarda difüzyon zamanı bulamaması ile açıklanabilir.



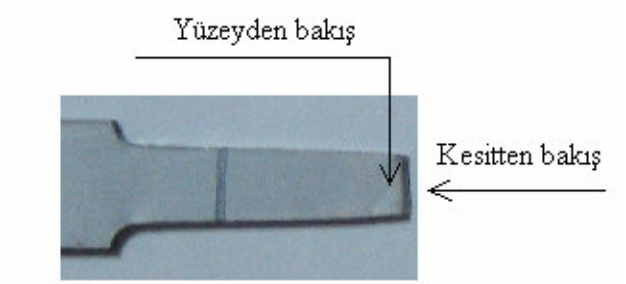
Şekil 4.16 0 ^{o}C'nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleşen kırılma şekilleri

Kırılan kesitlerin kesit ve yüzey görünüşleri de kırılmanın tipi hakkında kabaca bir fikir verir. Mikroyapı ince ve sık taneli ise kopmanın çekme gerilmeleri nedeniyle oluştuğu, aksine geniş taneli bir görüntü arzediyorsa da kopmanın kayma gerilmeleri ile oluştuğu yargısına varılır. Şekil 4.18'de çekme deneyinden sonra



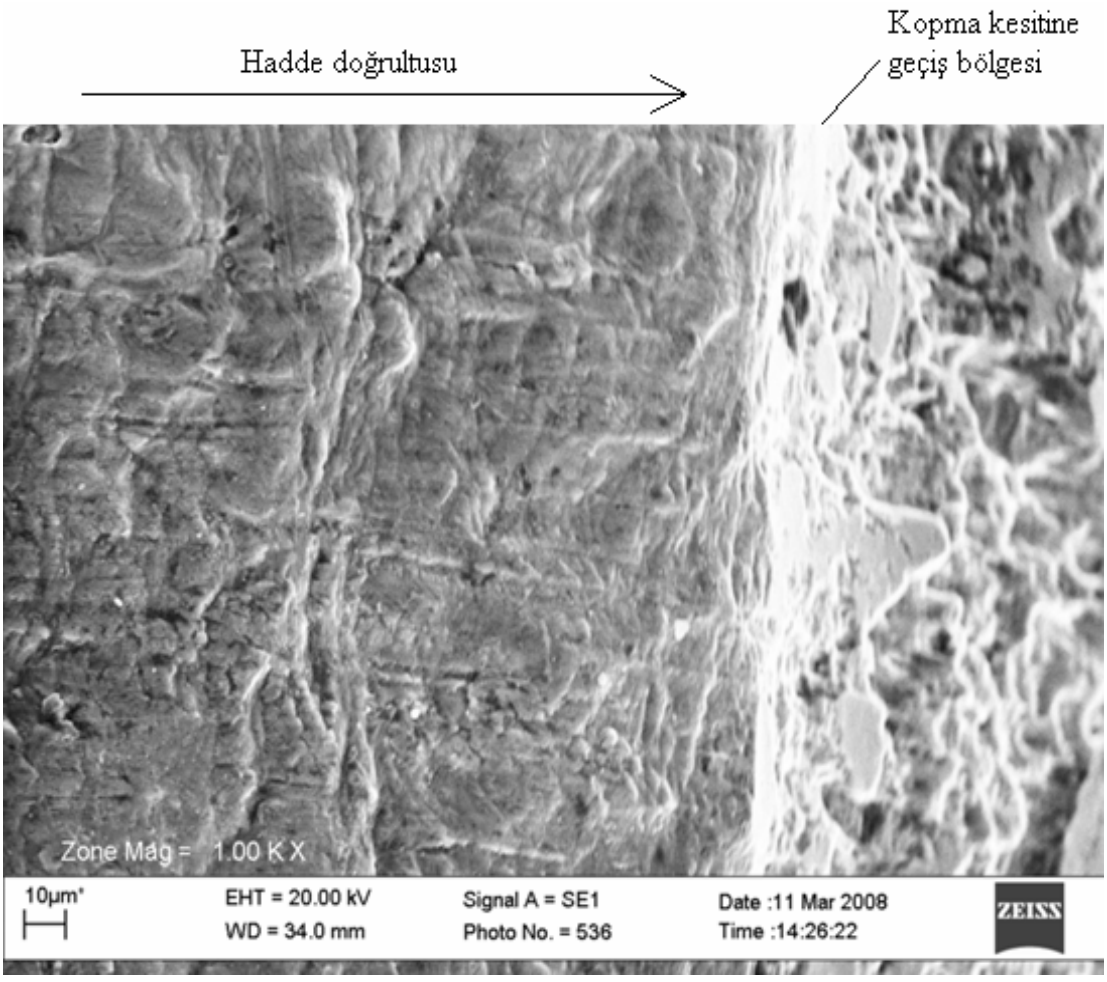
Şekil 4.17 Yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen kırılma şekilleri

mikroyapı değişikliğine bakılacak bölgeler gösterilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (scaning electron microscope; SEM) ile numunenin mikrofotoğrafları çekilerek malzemenin hangi gerilmeye maruz kaldığı belirlenmeye çalışılmıştır.

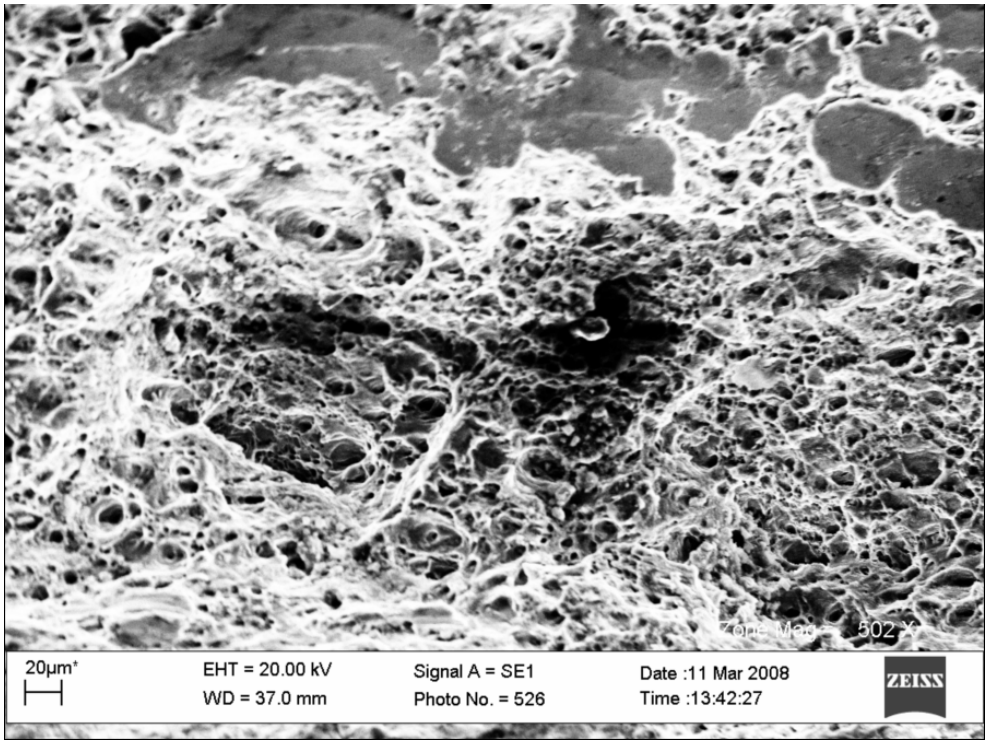


Şekil 4.18 Çekme deneyinden sonra mikroyapı değişikliğine bakılacak bölgeler

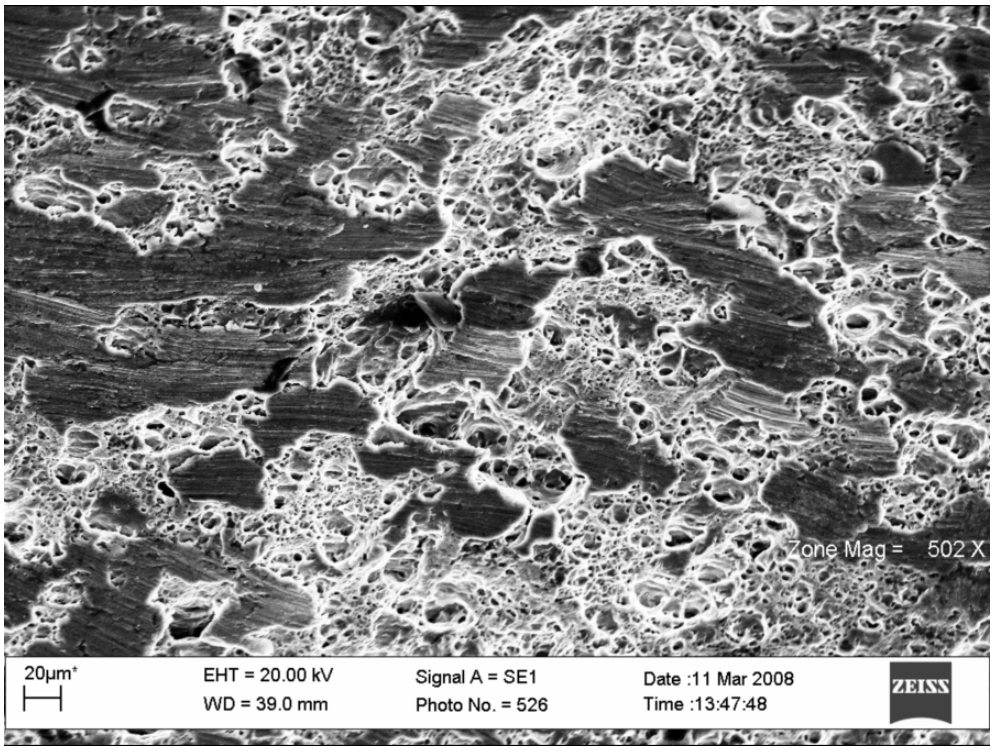
Şekil 4.19'da numunenin kopma bölgesindeki yüzey mikrofotoğrafı, Şekil 4.20'de çekme gerilmelerinin ve Şekil 4.21'de de kayma gerilmelerinin etkisiyle oluşan kopmaların kesit mikrofotoğrafları verilmiştir. Mikroyapıda tanelerin kayma gerilmelerinin etkisinde kalması malzemenin daha çok uzama olduğunun bir göstergesidir. Şekil 4.21'de gösterilen 5 mm/dak hız ve 250 ^{o}C sıcaklık koşullarında deneye tabi tutulan numunenin toplam uzamasına % 41,84; Şekil 4.20'de 500 mm/dak hız ve -60 ^{o}C sıcaklıktaki numunenin ise toplam uzmasının 22,72 olduğu görülmektedir (EK-3). Bu sonuç ve çekilen SEM mikrofotoğrafları yukarıda bahsedilen tespitleri destekler niteliktedir.



Şekil 4.19 Kopma bölgesine geçişte yüzey mikrofotoğrafı

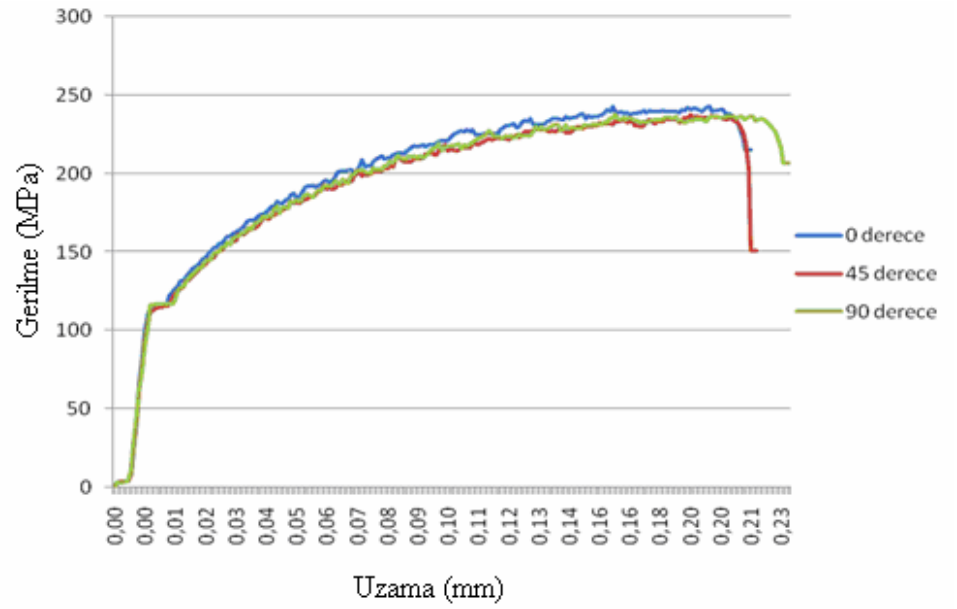


Şekil 4.20 Çekme gerilmelerinin etkisiyle oluşan kopmanın kesit yüzey mikrofotoğrafı (500 mm/dak, -60^{o}C)



Şekil 4.21 Kayma gerilmelerinin etkiiyle oluşan kopmanın kesit mikrofotoğrafı (5 mm/dak, 250^{o}C)

Bundan önce bahsedilen deneylerde numuneler hadde yönünde kesilmiştir. Ancak malzemenin anizotropik özelliklerinin de kabaca incelenmesi için 0^o, 45^o, 90^o yönlerinde 9 adet ilave numune daha hazırlanmıştır. Bu numuneler oda sıcaklığında ve 25 mm/dak çekme hızında çekme deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçlar EK-4'te verilmiştir. Şekil 4.22'de bu numunelere ait gerilme-birim deformasyon diyagramları görülmektedir.



Şekil 4.22 Üç farklı hadde yönü için gerilme-yüzde uzama grafiği

Hadde yönünde çekilmiş olan malzemenin dayanabileceği maksimum yükün, diğer yönlerde elde edilen sonuçlara kıyasla daha büyük olduğu görülmektedir. Ancak 45^o ve 90^o yönlerindeki numunelerin maksimum çekme dayanımları yaklaşık olarak birbirleri ile aynı iken uzama miktarları az da olsa farklılıklar göstermektedir. Sonuç olarak yapılan bu çalışma ile malzemelerin anizotropik özellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Sonlu elemanlar programların da malzeme verileri tanımlanırken anizotropi dikkate alınmalıdır. Anizotropi ile ilgili katsayıların tam olarak belirlenmesi için bütün şartlarda benzer deneyler yapılması gerekir.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, otomobil kaportalarında kullanılan AA 5754-O alüminyum magnezyum alaşımının şekillendirilebilme kabiliyetini belirlemek için farklı çekme hızlarında farklı sıcaklıklarda tek eksenli çekme deneyleri yapılmıştır.

Bu çalışmada incelenen malzemenin gösterdiği davranış sonucu ulaşılan sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Sıcaklığın ve/veya çekme hızının artması akma mukavemetini artırır.
- Çekme mukaveti sıcaklığa bağlı olarak artarken, 100ºC'nin üstündeki sıcaklıklarda düşmektedir. Ayrıca çekme mukavemeti çekme hızına bağlı olarak artma eğilimindedir.
- Çekme hıznın artmasıyla toplam yüzde uzama değerleri 100~175ºC arasında bir sıcaklığa kadar düşerken, daha yüksek sıcaklıklarda artmaktadır.
- 100ºC'nin altındaki sıcaklıklarda kesit daralması azalırken bu sıcaklığın üstünde hem de daha belirgin bir artış olmaktadır.
- Pekleşme üsteli sıcaklık artışı ile ters ve çekme hızı ile de doğru orantılı olarak değişmektedir.
- Mukavemet katsayısı *K*'nın değişimi için oda sıcaklığına kadar 500 mm/dak hariç küçük bir artış, oda sıcaklığından sonra da daha belirgin bir düşüş göstermektedir.
- Genel olarak düşük hızlar için 175^{o}C üzerine çıkıldığında ve 125 mm/dak'nın üzerindeki hızlarda da 100 ^{o}C'nin üzerine çıkıldığında Lüder bantlarının önemli ölçüde kaybolduğu görülmüştür.
- Mikroyapıda tanelerin kayma gerilmelerinin etkisinde kalması malzemenin daha çok uzama olduğunun bir göstergesidir.

- *m* değerinin sıfıra yakın veya negatif olması malzemede sünekliğin düştüğünün bir göstergesidir.

5000 serisi alaşımlarda oda sıcaklığında malzeme yüzeylerinde oluşan Lüder bantları (stretching lines) büyük problemler oluşturmaktadır. Bu nedenle özellikle otomotiv malzemeler görüntünün önemli olmadığı iç kısımlarda kullanılmaktadır. Bu durumun ortadan kaldırılması hem malzemenin kullanım alanını artıracaktır hem de firmalar için farklı malzeme kullanımını azaltacaktır. Yapılan deneylerden bu özelliklerin işlem parametreleri ile büyük oranda ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır.

Uygulamada bir alüminyum malzemenin kullanılacağı yere göre yeterli bir işlem şartlarının sağlanması ve şekillendirmenin ona göre yapılması gerekmektedir. Düşük çekme hızı ve yüksek sıcaklık değeri en uygun değerler olarak gözükmektedir. Yüksek sıcaklığa çıkarmak belli bir maliyet oluştururken, düşük şekillendirme hızı da seri üretim için ek bir maliyet getirecektir. Bu durumda şekillendirme durumu bakımından benzer ama düşük maliyetli işlem şartlarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bazı uygulamalarda uygun sonucu alabilmek için yüksek maliyet kaçınılmaz olabilmektedir.

Her ne kadar mühendislik hesaplamalarında tek eksenli çekme deneylerinden elde edilen veriler yaygın olarak kullanılıyor ise de, gerçek bir deformasyon durumunda malzeme farklı eksenlerde ve yönlerde çekme, basma gibi gerilmelere maruz kalabilmektedir. Bu nedenle gerçek deformasyon halini simüle edebilmek için zor da olsa çift eksenli (biaxial) deneyler ile daha doğru sonuçlar elde edilebilir.

Otomotiv kaportalarında kullanılabilecek nitelikteki diğer alüminyum alaşımları için de benzer deneyler yapılmalıdır. Ancak ısıl işlem uygulanabilen alaşımların deneylerden sonra sertlik değerleri ölçülmeli ve sertlik değerlerinin nasıl değiştiği de gözlemlenmelidir.

Bu çalışmanın bir sonraki aşamasında bu alaşımların sıcaklık ve deformasyon hızına bağlı olarak malzeme modelinin oluşturulması hedeflenmektedir. Bu konu yeterince çalışılmamıştır. Bunun dışında mikro yapı ile şekillendirilebilme arasındaki ilişkinin tespit edilmesine çalışılacaktır.

6 KİŞİSEL ELEŞTİRİLER

Bu tez 106M058 nolu TÜBİTAK araştırma projesinin bir bölümünü teşkil etmektedir. Yapılabilecek veya yapılmasının faydalı olacağı düşünülen çalışmalar ile tez daha kaliteli hale getirilebilir. Aşağıda bu kısma ait maddeler ile bu maddelerin tam gerçekleştirilememesinin sebebi ifade edilmiştir.

- Yer atomu olarak alaşım içerisinde yer alan Mg'un dislokasyonlar etkisi altındaki davranışının daha iyi açıklanması gerekebilirdi.
- İlgili işlem şartlarının her anı için gerçekleşen mekanizma tarif edilebilirdi.
- Kombinasyon sayısı arttırılarak çok sayıda grafik çizilebilir ve bu şekilde malzemenin davranışı birden çok parametreye bağlı olarak aynı anda değerlendirilebilirdi.
- Malzeme yüzeyinde meydana gelen Lüder bantlarının fotoğrafları çekilerek görselliğe daha fazla önem verilebilirdi.
- Taguchi gibi bir istatiksel deney yöntemi kullanılarak işlem parameterlerinin etki dereceleri tespit edilebilirdi.

Yukarıda sıralan maddelerden ilk ikisi için bir doktora çalışması kapsamına girebileceği düşünüldüğünden yüzeysel olarak inceleme yapılmıştır. Diğer maddeler ise süre ve imkanlar nispetinde gerçekleştirilmiştir.

Literatürde bu malzeme için özellikle oda sıcaklığının altında yapılan çalışmalara pek rastlanmamıştır. Yapılan çalışmanın ülkemiz açısından oldukça önemli olduğunu düşünüyoruz. Dünyada hafif malzemelere yönelim artarken ülkemizde yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır.

KAYNAKLAR

Aluminum Autodesign Review 1998. The Aluminum Society, Vol. 6, No. 3.

Beukel A. Van den 1975. Phys. Stat. Sol., A 30, 197.

Bolt J.P., Lamboo MP.A.N., Rozier M.C.J.P. 2001. Feasibility of Warm Drawing of Aluminium Products. Elsevier, Journal of Materials Processing Technology, Netherlands, pp. 118–121.

Chang Qun-Feng, Da-Yong Li, Peng Ying-Hong, Zeng Xiao-Qin Experimental and numerical study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47 (2007) 436-443

Çapan L. 2003. Metallere Plastik Şekil Verme. Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

Gatenby K. M. and Court S. A. 1997 Aluminum-Magnesium Alloys for Automotive Applications-Design Consideration and Material Selection. IBEC International Body Engineering Conference and Exposition, Advanced Body Concept & Development, pp. 143-147, September 30-Oct. 2, Stuttgart, Germany.

Hecker S. S. and Ghosh A. K., 1976 The forming of Sheet Metal, Scientific American, 235 (5), pp.100-108.

Kataokaa S., Murakawab M., Aizawac T., Iked H. 2004. Tribology of Dry Deep-Drawing of Various Metal Sheets with Use of Ceramics Tools Surface and Coatings Technology.177 –178, pp. 582–590.

Kurt A., Eker U. 2005. Kesici takım gerilmelerinin sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmesi. Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 20, No 4, 491–497.

Li D., Ghosh A. 2004. Biaxial Warm Forming Behaviour of Aluminium Sheet Alloys. Elsevier, Journal of Materials Processing Technology, pp. 281-293.

Lovell M., Higgs C.F., Deshmukh P., Mobley A. 2006. Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants. Journal of Materials Processing Technology, 177, pp. 87-90.

Ludwik P. 1909. Elemente der technologischen Mechanick, Springer-Verlag OHG, Berlin.

McCormick P. G. 1986. Negative Strain Rate Sensitivity and The Development of Localized Yielding. Ed. A. K. Sachdev and J. D. Emburys, Formability and Metallurgical Structure, The Metallurgical Society, Orlando, Florida, pp.227-244.

Meiler M., Pfestorf M., Geiger M., Merklein M. 2003. The Use of Dry Film Lubricants in Aluminium Sheet Metal Forming. Elsevier, Wear, Germany, pp.1455–1462.

Naka T. and Yoshida F. 1999. Deep Drawability of Type 5083 Aluminum-Magnesium Alloy Sheet Under Various Conditions of Temperature and Forming Speed. Journal of Materials Processing Technology, 89-90, pp.19-23.

Naka T., Torikai G., Hindo R. and Yoshida F., 2001. The Effects of Temperature any Forming Speed on the Forming Limit Diagram for Type 5083 Aluminum-

Magnesium Alloy Sheet. Journal of Materials Processing Technology, 113, pp. 648-653.

Niu J.G., Zhang X., Zhang Z.M., Li B.C. Influence on the microstructure and properties of AZ61 magnesium alloy at warm deformation, Journal of Materials Processing Technology, 187-188 (2007) 780-782

Ozturk F. and Lee D., 2005. Experimental and Numerical Analysis of Out-of-Plane Formability Test, J. Mater. Process. Tech, 170, 247-253.

Phillips V. A. 1953. Strecher-Strain Markings in Aluminum Alloys and Methods for Their Elimination. Sheet Metal Industries, pp. 977-982.

Picu R. C., Vincze G., Ozturk F., Gracio J. J., Barlat F. and Maniatty A. M. 2005. Strain Rate Sensitivity of the Commercial Aluminum Alloy AA5182-O. Materials Science and Engineering A.290, pp. 334-343.

Portevin A. and Chatelier A. L. 1923. Compt. Rend. Acad. Sci., 176, pp. 507-512.

Rao K. P., Wei J. J. 2001. Performance of a new dry lubricant in the forming of aluminum alloy sheets. Wear, 249, pp. 85-92.

Takuda H., Mori K., Masuda I., Abe Y., Matsuo M. Finite element simulation of warm deep drawing of aluminium alloy sheet when accounting for heat conduction, Journal of Materials Processing Technology, 120 (2002) 412-418

Tekkaya E. 2001. Sheet Steel Formability. American Iron and Steel Institute, Metal Forming Technology, Ders Notları, Bölüm1.

www.sciencebuddies.org/mentoring/project_ideas/MatlSci_StressStrainStrength_h006.shtml

www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=18&pageid=208127136

Yang T.S. 1999. Full Film Lubrication of Deep Drawing. Tribology International, 32, pp.89-96.

7 EKLER

EK-1 Deneylerde kullanılan AA 5754-O malzemesine ait spektrometre analiz raporu

Program: Al-01-F
Comment: Al-Global
Average (n=6)

07/11/2007 11:04:09 PM
119646/05
Elements: Concentration

Sample No:
Sample Id: 5754 O

Quality:

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.189	0.357	0.0061	0.031	2.92	0.0005	<0.0010	<0.0010

	Ti	Ag	B	Be	Bi	Ca	Cd	Co
	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.0046	<0.0001	0.0007	<0.0001	0.0026	0.0058	0.0010	<0.0010

	Li	Na	P	Pb	Sn	Sr	V	Zr
	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	<0.0002	0.0014	<0.0010	<0.0005	0.0019	<0.0001	0.0093	<0.0003

	Al	Bg
	%	%
$\bar{x}$	96.5	96.5

Program: Al-01-F
Comment: Al-Global
Single spark(s)

07/11/2007 11:03:35 PM
119646/05
Elements: Concentration

Sample No:
Sample Id: 5754 O

Quality:

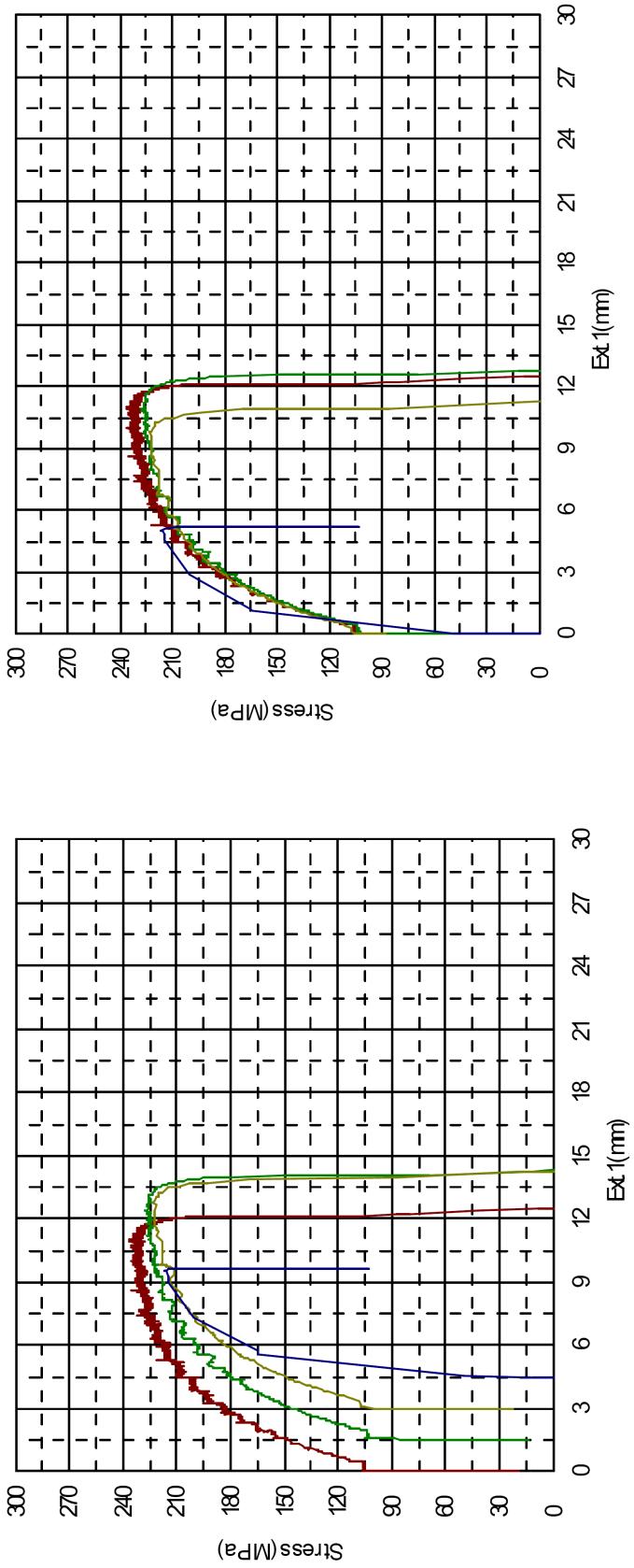
No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.180	0.333	0.0056	0.030	2.85	<0.0005	<0.0010	<0.0010
2	0.184	0.340	0.0058	0.030	2.86	<0.0005	<0.0010	<0.0010
3	0.175	0.320	0.0055	0.030	2.85	0.0005	<0.0010	<0.0010
4	0.194	0.370	0.0064	0.031	3.01	0.0005	<0.0010	<0.0010
5	0.206	0.403	0.0067	0.032	3.03	0.0006	<0.0010	<0.0010
6	0.194	0.374	0.0066	0.030	2.93	0.0006	<0.0010	<0.0010

No	Ti	Ag	B	Be	Bi	Ca	Cd	Co
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0054	<0.0001	0.0007	<0.0001	0.0025	0.0053	0.0008	<0.0010
2	0.0048	<0.0001	0.0007	<0.0001	0.0026	0.0055	0.0008	<0.0010
3	0.0043	<0.0001	0.0005	<0.0001	0.0025	0.0049	0.0008	<0.0010
4	0.0036	<0.0001	0.0006	<0.0001	0.0027	0.0061	0.0013	<0.0010
5	0.0042	<0.0001	0.0008	<0.0001	0.0024	0.0066	0.0013	<0.0010
6	0.0054	<0.0001	0.0010	<0.0001	0.0027	0.0063	0.0012	<0.0010

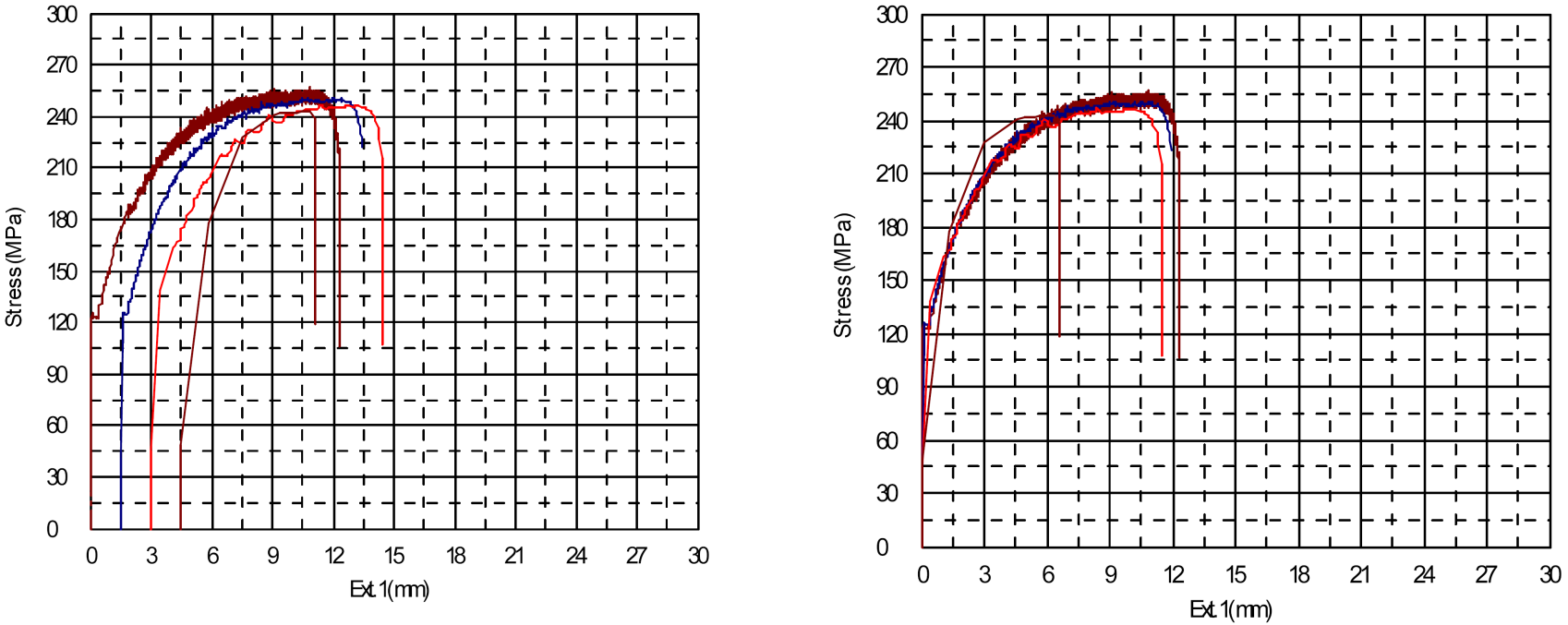
No	Li	Na	P	Pb	Sn	Sr	V	Zr
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	<0.0002	0.0007	<0.0010	<0.0005	0.0015	<0.0001	0.0091	<0.0003
2	<0.0002	0.0009	<0.0010	<0.0005	0.0021	<0.0001	0.0093	<0.0003
3	<0.0002	0.0007	<0.0010	<0.0005	0.0016	<0.0001	0.0096	<0.0003
4	<0.0002	0.0017	0.0012	<0.0005	0.0020	<0.0001	0.0092	<0.0003
5	<0.0002	0.0023	0.0013	<0.0005	0.0018	<0.0001	0.0091	<0.0003
6	<0.0002	0.0020	0.0015	<0.0005	0.0021	<0.0001	0.0093	<0.0003

No	Al	Bg
	%	%
1	96.6	96.6
2	96.6	96.6
3	96.6	96.6
4	96.4	96.4
5	96.3	96.3
6	96.4	96.4

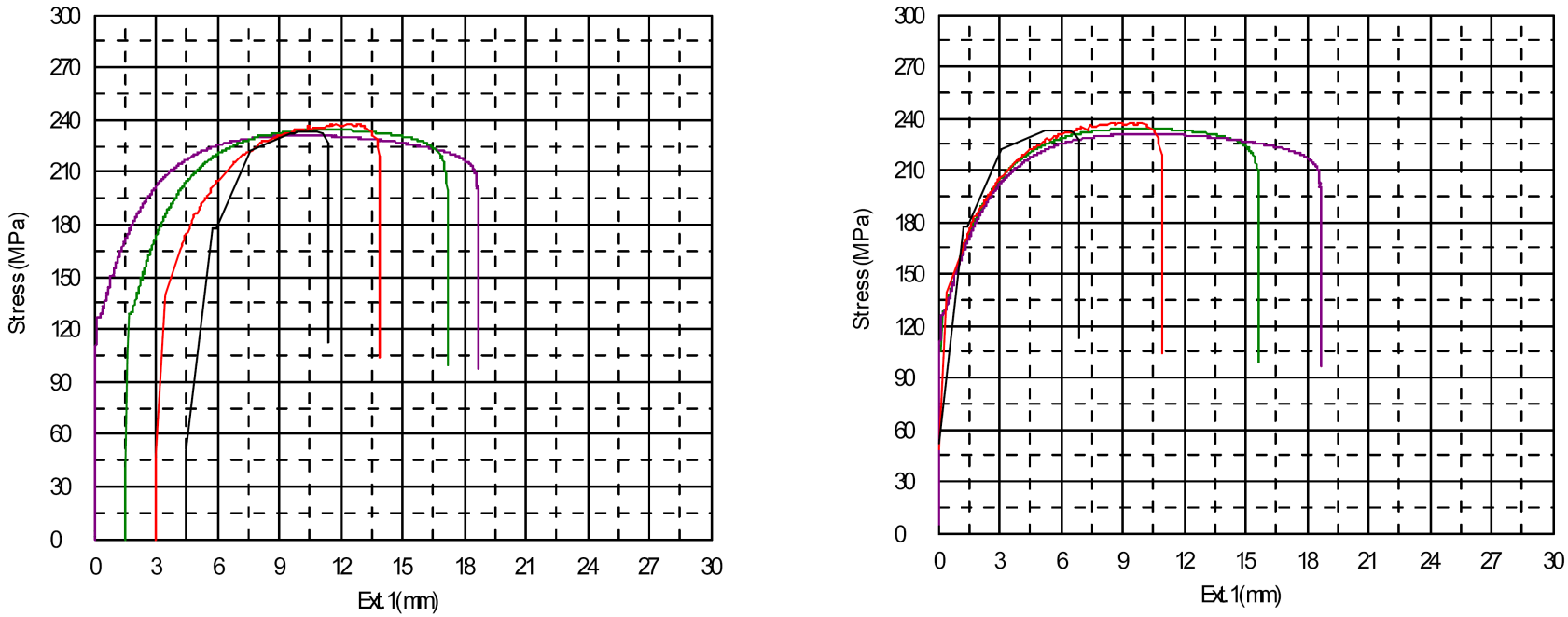
EK-2 Gerilme uzama diyagramları



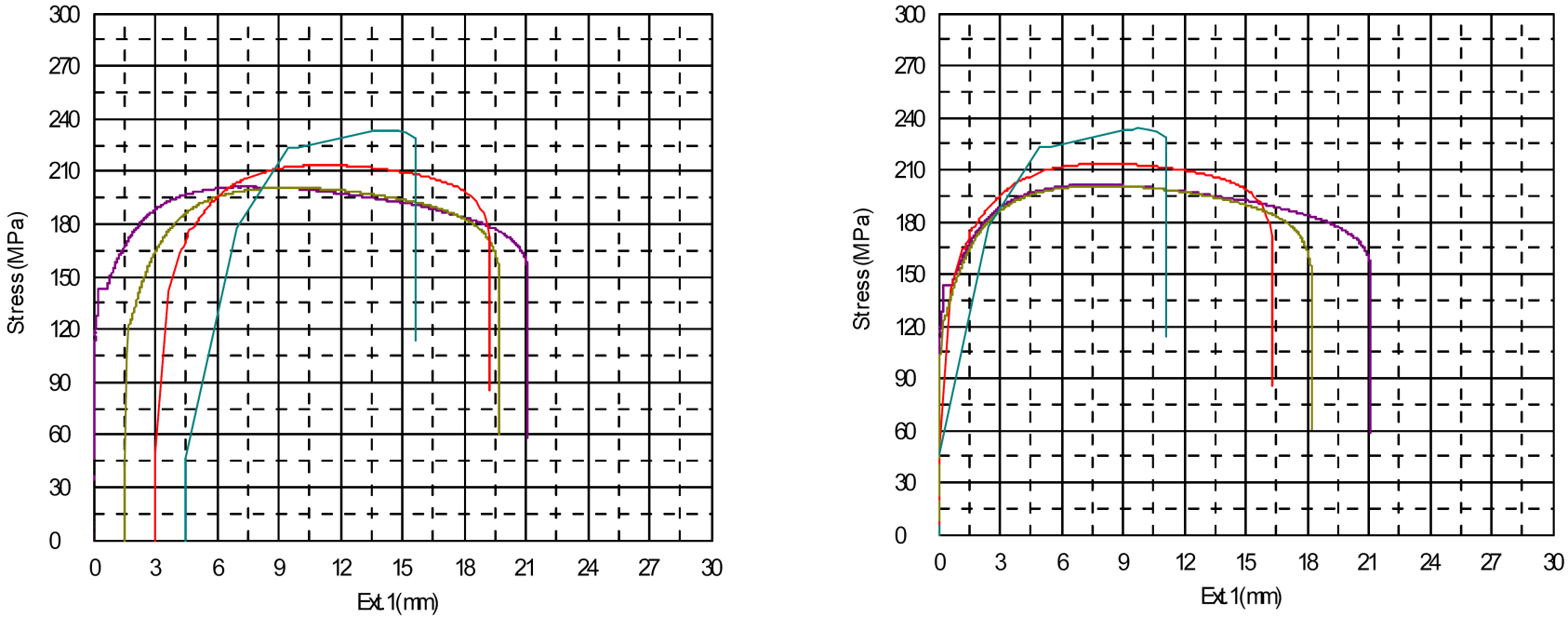
Şekil 7.1 Soldan sağa 5,25,125 ve 500 mm/dak çekme hızlarında (oda sıcaklığı)



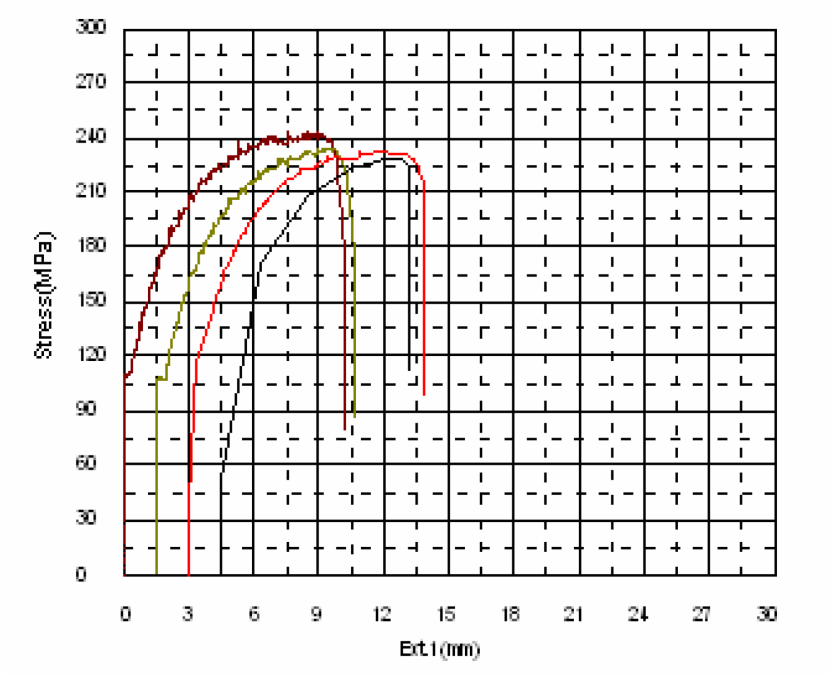
Şekil 7.2 Soldan sağa 5,25,125 ve 500 mm/dak çekme hızlarında (100 ^{o}C)

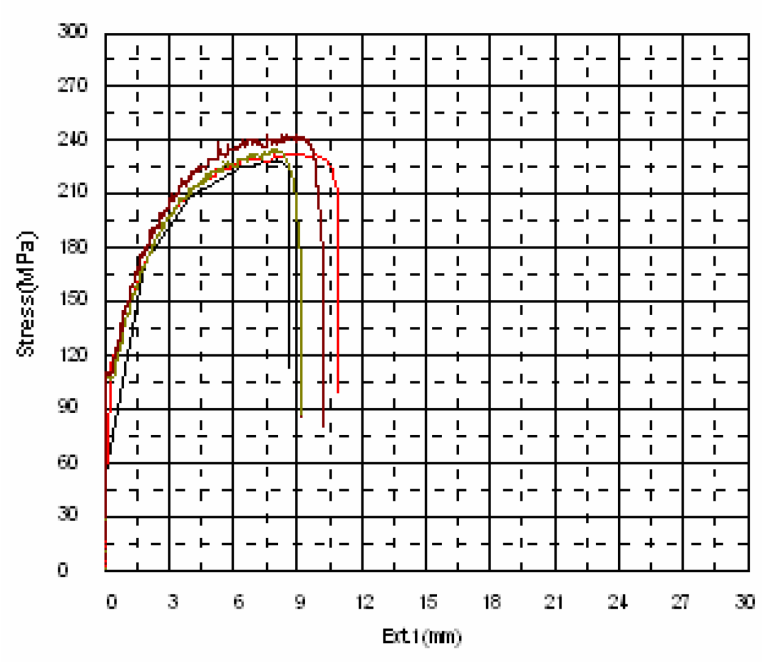


Şekil 7.3 Soldan sağa 5,25,125 ve 500 mm/dak çekme hızlarında (175 ^{o}C)

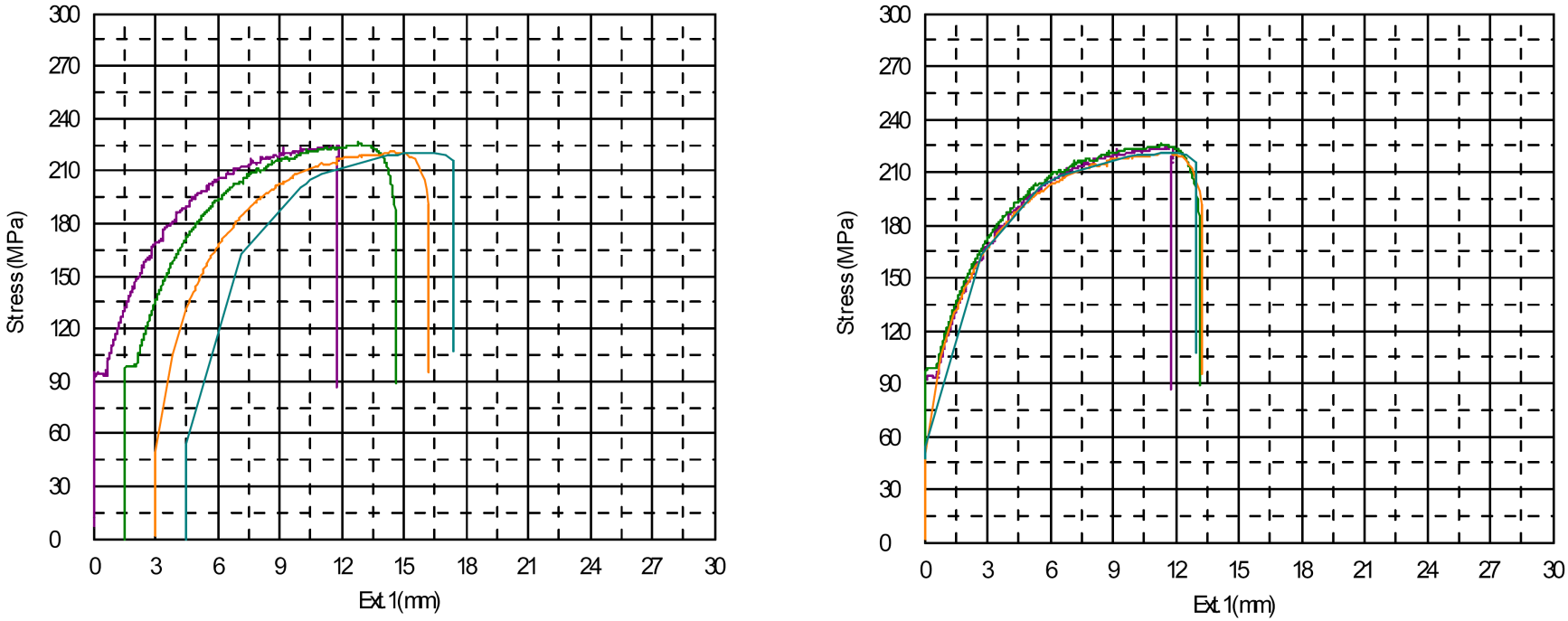


Şekil 7.4 Soldan sağa 5,25,125 ve 500 mm/dak çekme hızlarında (250 ^{o}C)

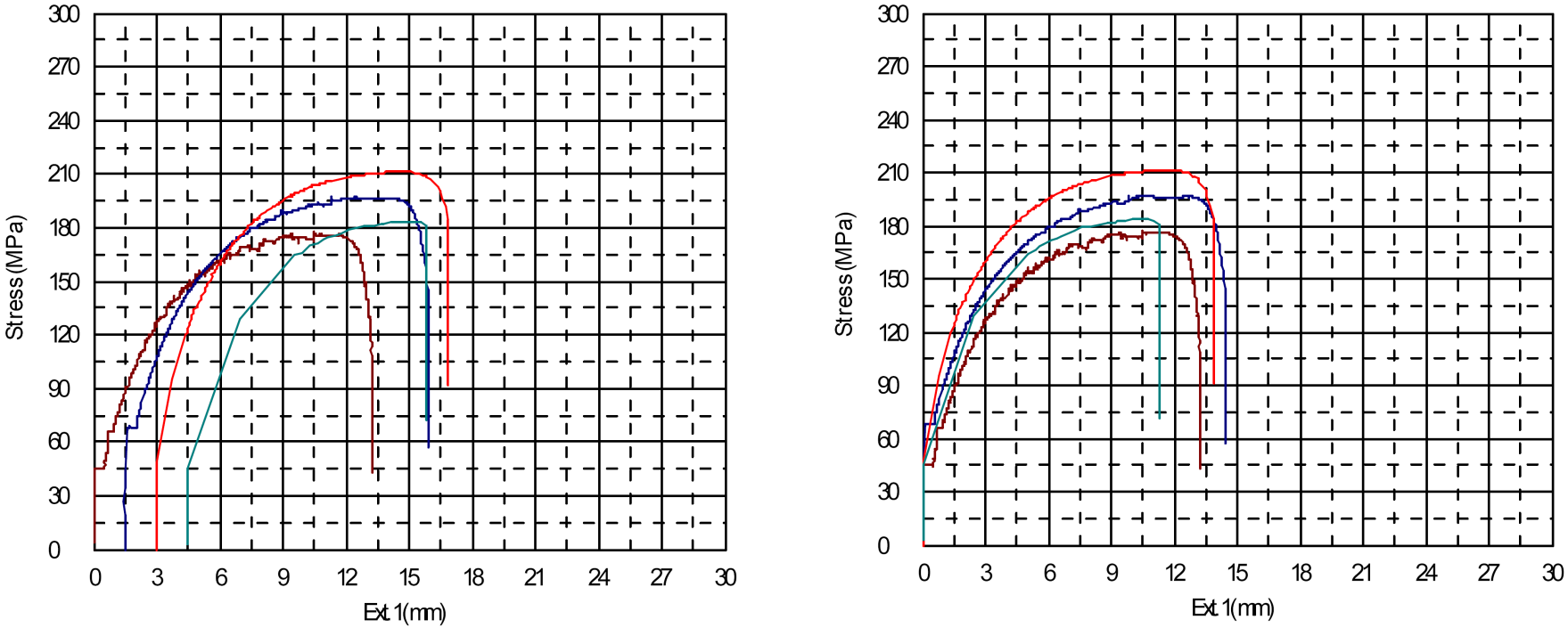




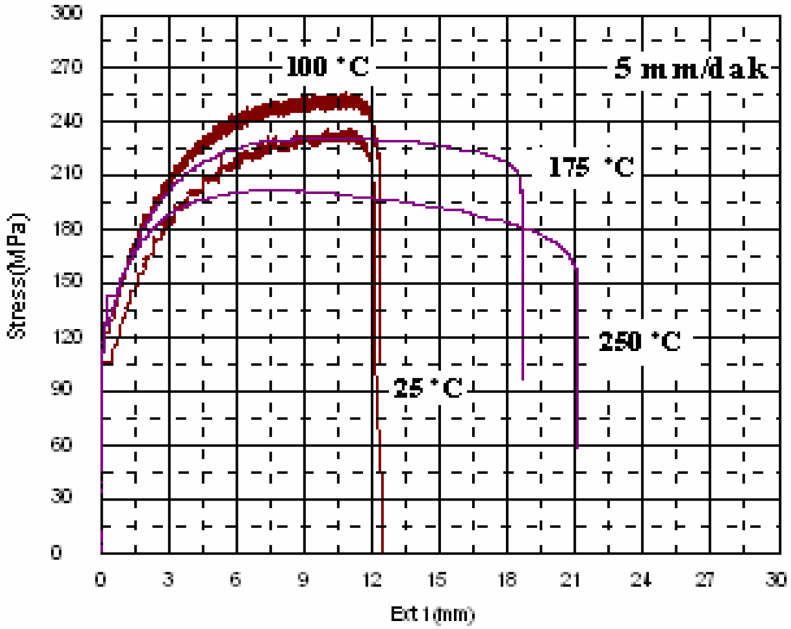
Şekil 7.5 Soldan sağa 5,25,125 ve 500 mm/dak çekme hızlarında (0 ^{o}C)



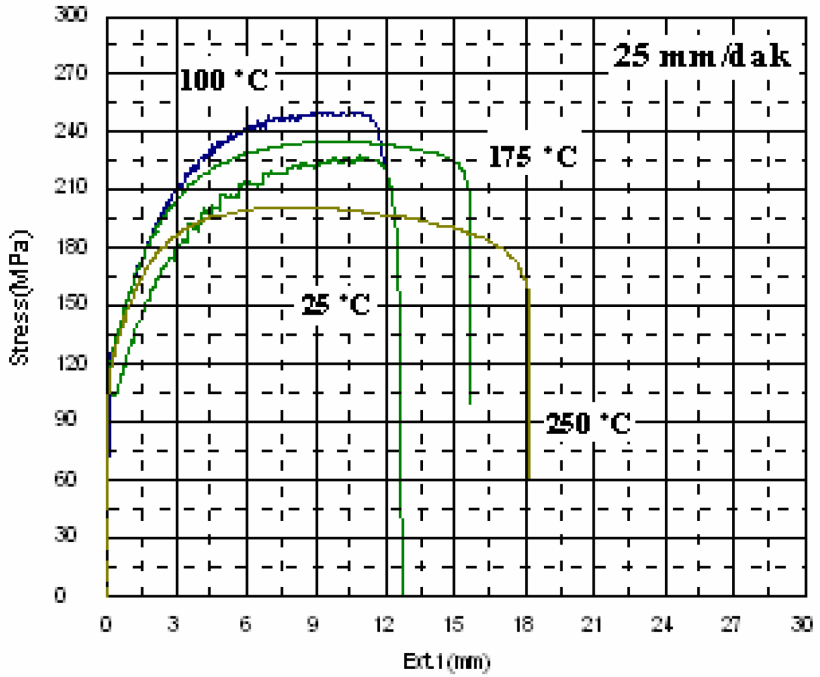
Şekil 7.6 Soldan sağa 5,25,125 ve 500 mm/dak çekme hızlarında (-30 ^{o}C)



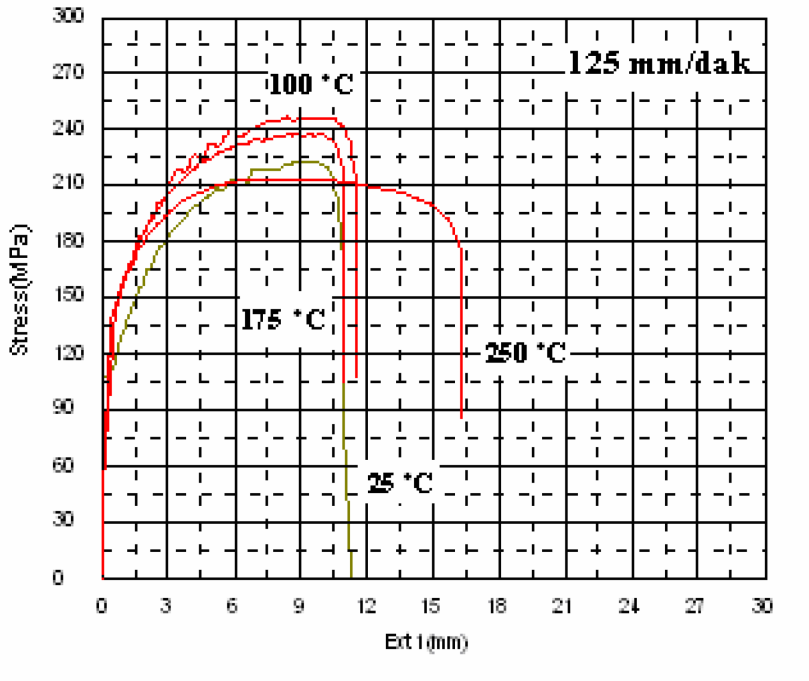
Şekil 7.7 Soldan sağa 5,25,125 ve 500 mm/dak çekme hızlarında (-60 ^{o}C)



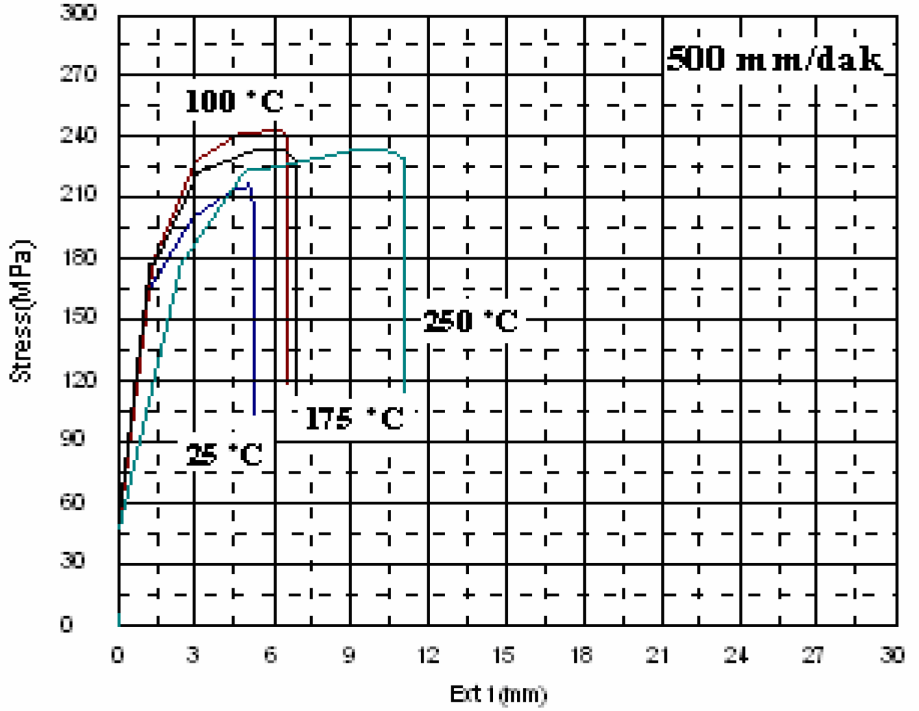
Şekil 7.8 Oda, 100, 175 ve 250 ^{o}C sıcaklıklarında (5 mm/dak)



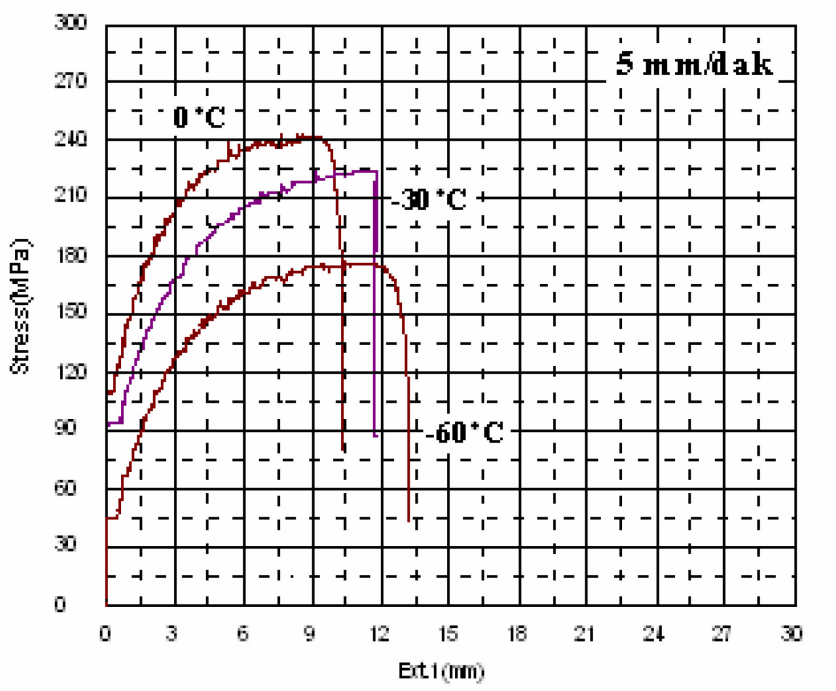
Şekil 7.9 Oda, 100, 175 ve 250 ^{o}C sıcaklıklarında (25 mm/dak)



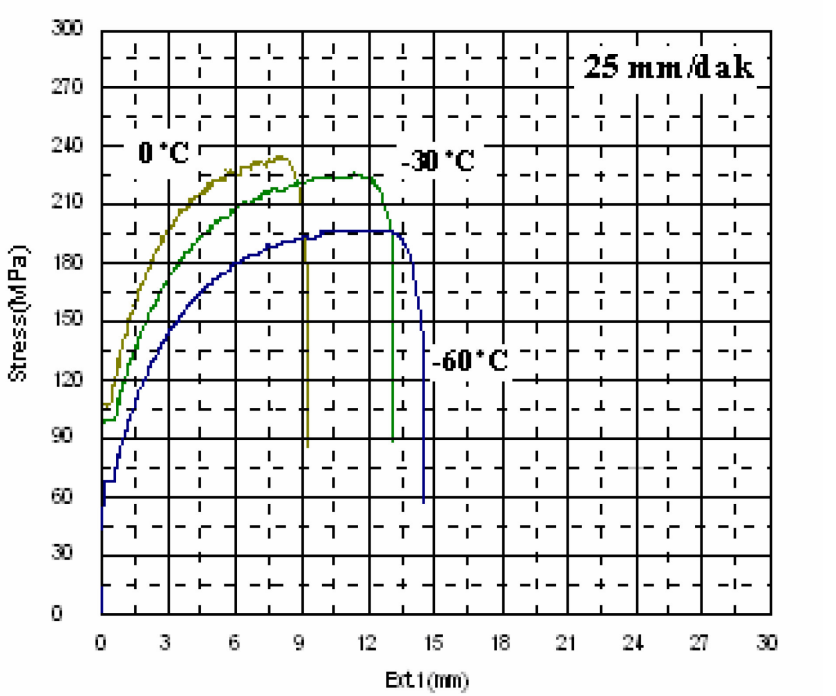
Şekil 7.10 Oda, 100, 175 ve 250 ^{o}C sıcaklıklarında (125 mm/dak)



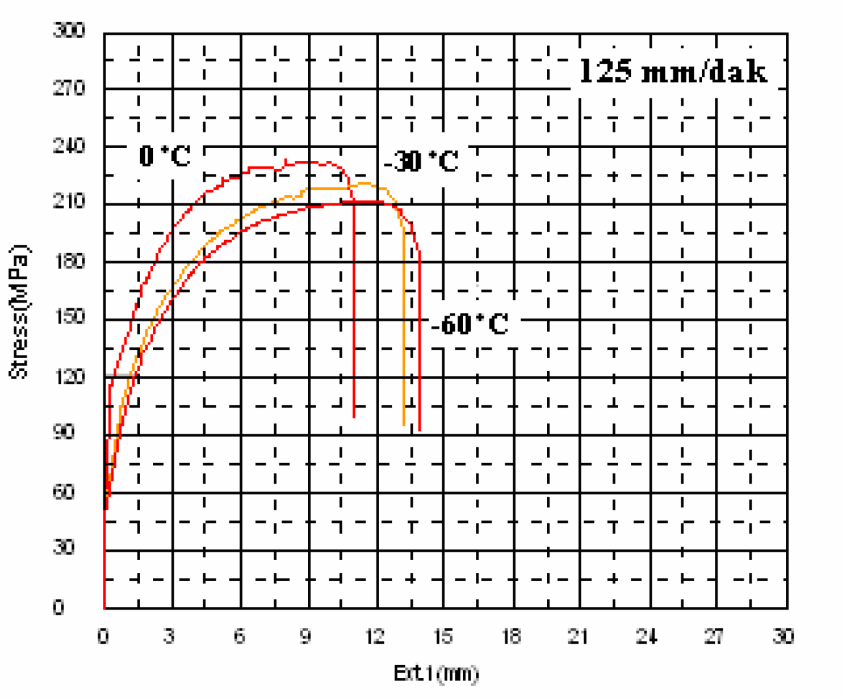
Şekil 7.11 Oda, 100, 175 ve 250 ^{o}C sıcaklıklarında (500 mm/dak)



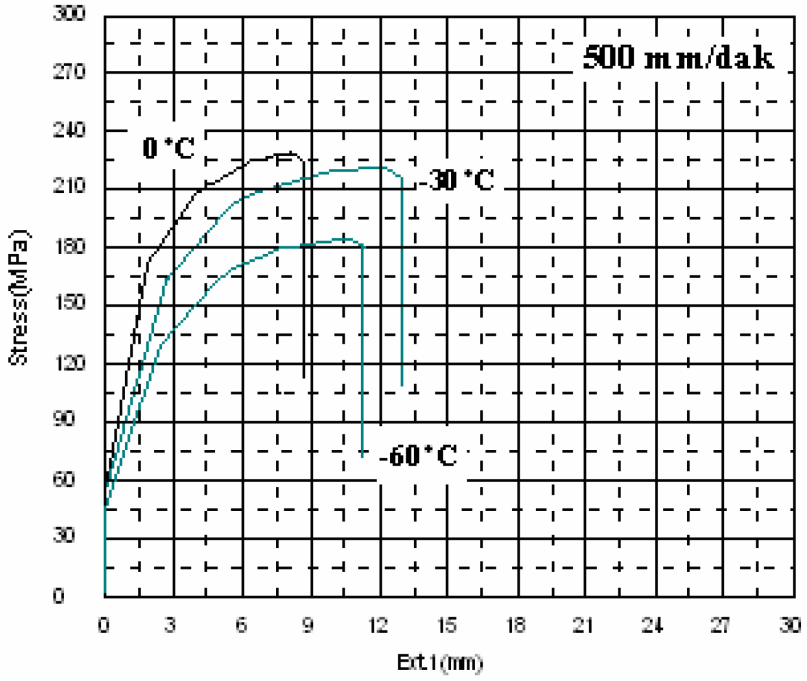
Şekil 7.12 Oda, 100, 175 ve 250 ^{o}C sıcaklıklarında (125 mm/dak)



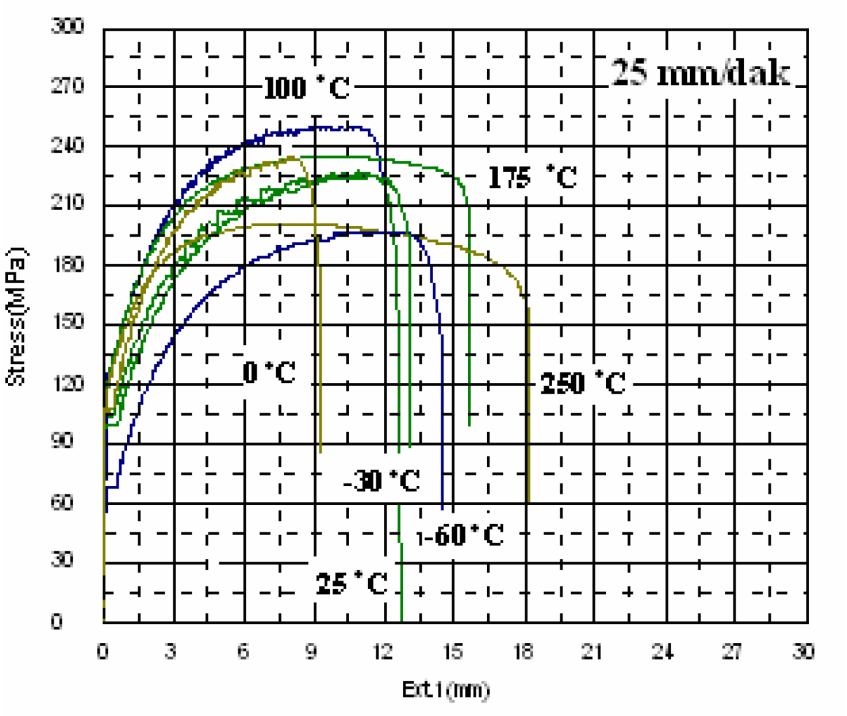
Şekil 7.13 0, -30 ve -60 ^{o}C sıcaklıklarında (25 mm/dak)



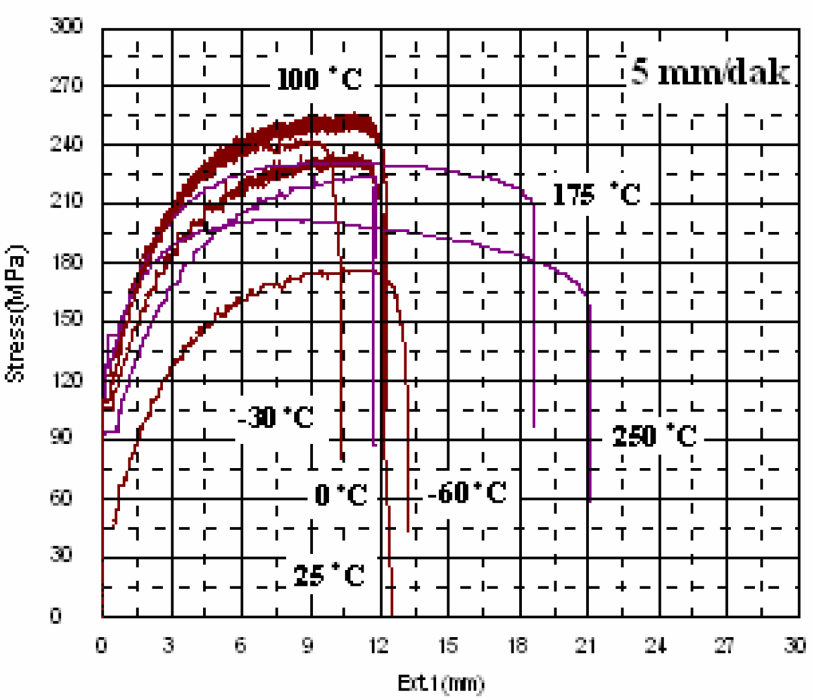
Şekil 7.14 0, -30 ve -60 ^{o}C sıcaklıklarında (125 mm/dak)



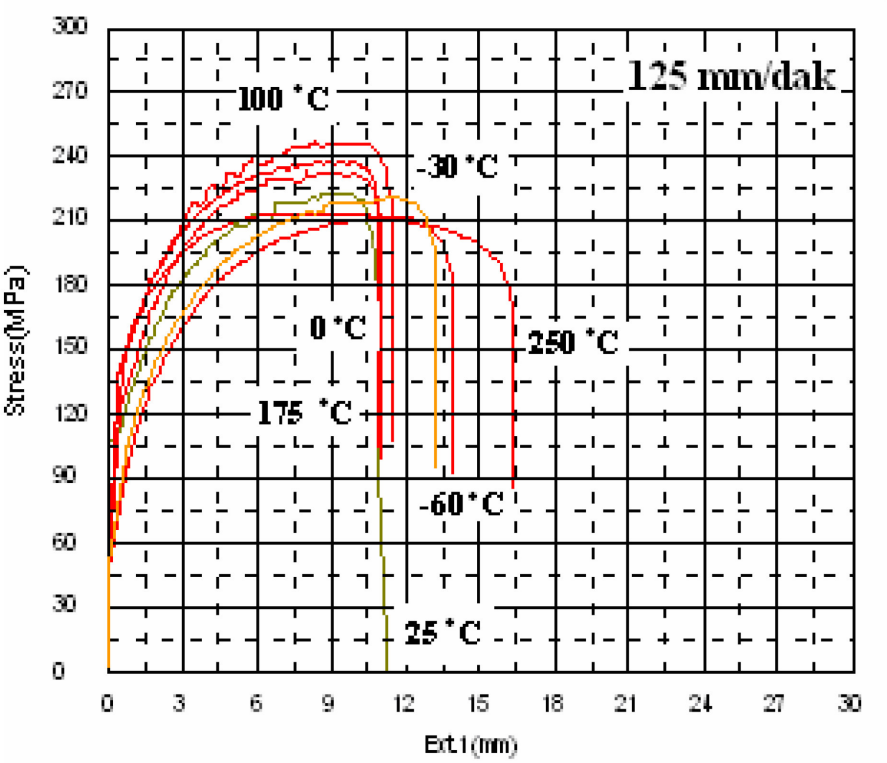
Şekil 7.15 0, -30 ve -60 ^{o}C sıcaklıklarında (500 mm/dak)



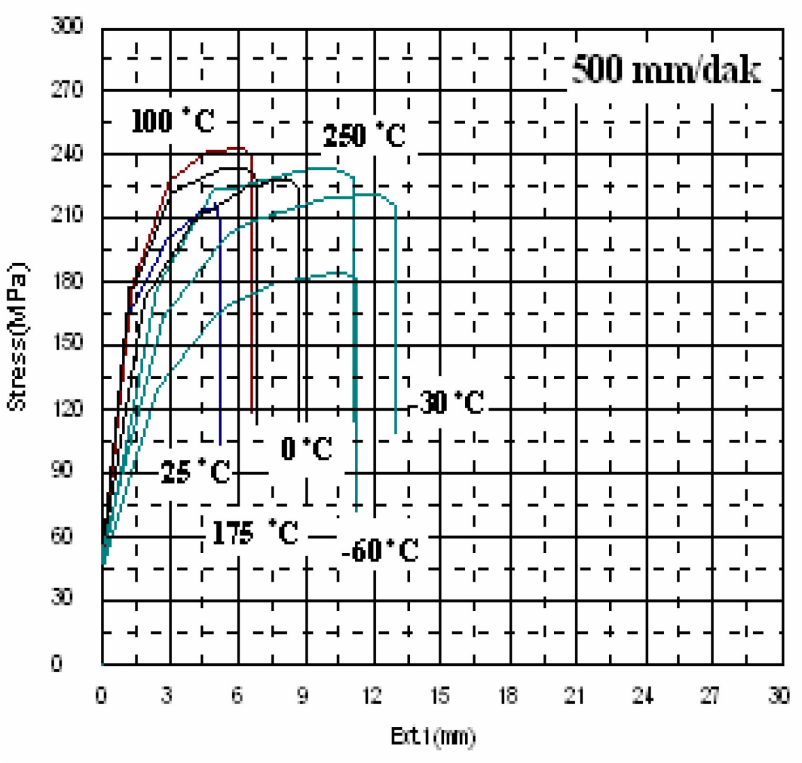
Şekil 7.16 Tüm sıcaklıklarda (25 mm/dak)



Şekil 7.17 Tüm sıcaklıklarda (5 mm/dak)



Şekil 7.18 Tüm sıcaklıklarda (125 mm/dak)



Şekil 7.19 Tüm sıcaklıklarda (500 mm/dak)

EK-3 Hesaplama tablosu

Yüksek hızlarda video ekstensometre cihazının verileri kaydedememesi ve soğuk deneylerde deney şartını sağlayacak miktarda azot gazının olmaması nedeniyle bazı veriler alınamamıştır. Her deney üç tekrarlı yapılmış ve "Numune No" bölümünde X/Y/Z biçiminde verilmiştir. X: Çekme hızı mm/dak, Y: Sıcaklık ^{o}C, Z: Sıra nodur.

Deney No	Numune No	L (mm)	ΔL (mm)	E (GPa)	σak (MPa)	σmak (MPa)	Üniform Uzama (%)	σkopma (MPa)	Toplam Uzama (%)	Kesit Daralması (%)	n	K
1	5/R/1	49,44	13,13	63,02	100,26	307,82	24,52	247,29	26,55	39,09	0,32	511,33
	5/R/2	49,75	12,18	61,36	111,35	302,64	22,09	254,11	24,48	35,18	0,33	516,65
	5/R/3	50,87	11,50	75,90	102,94	288,26	20,74	222,81	22,60	37,55	0,33	509,92
	Ort.	50,02	12,27	66,76	104,85	299,58	22,45	241,40	24,54	37,28	0,32	512,63
	St. Sapma	0,75	0,82	7,96	5,78	10,13	1,92	16,46	1,97	1,97	0,01	3,55
2	25/R/1	49,39	12,51	52,79	112,74	293,53	23,30	236,21	25,33	36,96	0,32	499,34
	25/R/2	50,30	12,52	51,10	110,03	291,56	23,17	237,75	24,89	36,67	0,33	500,61
	25/R/3	50,07	11,33	57,60	111,59	289,00	21,94	236,80	22,62	38,08	0,32	500,50
	Ort.	49,92	12,12	53,83	111,46	291,36	22,80	236,92	24,28	37,24	0,32	500,15
	St. Sapma	0,47	0,69	3,37	1,36	2,27	0,75	0,78	1,45	0,74	0,00	0,70
3	125/R/1	51,07	8,60		110,24	276,67	19,71	276,67	19,71	40,63	0,32	491,25
	125/R/2	49,32	10,72		105,26	280,43	19,92	246,84	21,73	38,43	0,31	486,97
	125/R/3	49,29	13,06		123,67	291,63	24,21	265,23	26,50	38,26	0,31	484,73
	Ort.	49,89	10,79		113,06	282,91	21,28	262,92	22,65	39,11	0,31	487,65
	St. Sapma	1,02	2,23		9,52	7,78	2,54	15,05	3,49	1,32	0,01	3,31
4	500/R/1	31,14	6,48		179,98	270,89	20,20	266,94	20,81	41,16	0,30	472,28
	500/R/2	29,84	5,18		179,22	265,82	16,97	255,30	17,36	40,90	0,30	466,23
	500/R/3	30,63	4,85		185,54	272,55	15,90	272,55	15,90	37,09	0,30	493,29
	Ort.	30,54	5,50		181,58	269,75	17,69	264,93	18,02	39,71	0,30	477,27
	St. Sapma	0,66	0,86		3,45	3,51	2,24	8,80	2,52	2,28	0,00	14,20
5	5/100/1	50,07	12,97	59,72	124,04	323,34	24,21	266,93	25,89	36,32	0,30	516,18
	5/100/2	49,68	12,33	64,44	126,33	314,58	22,79	265,33	24,82	35,90	0,29	505,36
	5/100/3	52,47	11,18	49,41	127,27	306,86	19,80	266,11	21,30	35,02	0,28	502,34
	Ort.	50,74	12,16	57,86	125,88	314,93	22,27	266,12	24,00	35,75	0,29	507,96
	St. Sapma	1,51	0,91	7,69	1,66	8,25	2,25	0,80	2,40	0,67	0,01	7,28
6	25/100/1	51,61	11,88	47,12	126,82	304,17	21,08	272,02	23,03	37,96	0,29	504,78
	25/100/2	51,02	11,91	42,23	127,22	305,65	21,35	276,04	23,34	34,80	0,29	500,50
	25/100/3	50,67	12,10	61,12	126,84	306,43	22,59	282,71	23,88	33,22	0,29	501,19
	Ort.	51,10	11,96	50,16	126,96	305,42	21,68	276,92	23,42	35,32	0,29	502,15
	St. Sapma	0,48	0,12	9,80	0,22	1,15	0,80	5,40	0,43	2,42	0,00	2,30
7	125/100/1	49,79	11,58		140,55	298,21	21,08	272,09	23,27	35,77	0,28	488,20
	125/100/2	50,39	11,48		140,84	297,62	21,11	265,74	22,78	35,03	0,28	480,84
	125/100/3	50,81	11,05		140,29	293,18	19,58	272,64	21,75	36,49	0,28	479,51
	Ort.	50,33	11,37		140,56	296,33	20,59	270,16	22,60	35,76	0,28	482,85
	St. Sapma	0,51	0,28		0,28	0,18	0,87	3,83	0,78	0,73	0,01	4,68
8	500/100/1	32,49	6,05		184,79	283,01	16,73	278,08	18,61	35,81	0,21	416,87
	500/100/2	31,66	6,54		184,40	294,15	20,65	292,23	20,66	36,41	0,22	426,19
	500/100/3	30,90	6,61		186,06	293,88	20,56	290,69	21,38	35,94	0,23	434,91
	Ort.	31,68	6,40		185,09	290,35	19,31	287,00	20,22	36,05	0,22	425,99
	St. Sapma	0,80	0,31		0,87	6,36	2,24	7,77	1,44	0,32	0,01	9,02
9	5/175/1	50,46	16,43	49,82	127,86	314,59	29,79	284,09	32,55	41,63	0,26	463,55
	5/175/2	50,28	19,23	52,84	121,45	289,58	33,58	257,48	38,25	45,76	0,23	397,10
	5/175/3	49,76	18,70	59,07	124,04	299,35	33,99	270,11	37,59	42,12	0,24	415,34
	Ort.	50,17	18,12	53,91	124,45	301,17	32,45	270,56	36,13	43,17	0,24	425,33
	St. Sapma	0,36	1,49	4,71	3,23	12,61	2,32	13,31	3,12	2,26	0,02	34,34
10	25/175/1	49,95	15,69	44,26	129,97	294,88	28,50	263,16	31,41	42,88	0,24	428,65
	25/175/2	50,52	11,62	42,55	127,59	277,07	20,22	249,22	23,00	41,41	0,26	436,11
	25/175/3	50,89	11,20	59,06	129,21	302,01	20,57	271,58	22,00	36,99	0,28	496,36
	Ort.	50,45	12,84	48,62	128,93	291,32	23,10	261,32	25,47	40,43	0,26	453,71
	St. Sapma	0,47	2,48	9,08	1,21	12,85	4,68	11,29	5,16	3,07	0,02	37,13
11	125/175/1	51,01	11,89		170,07	287,61	20,45	260,74	23,31	36,94	0,25	449,68
	125/175/2	50,62	10,91		170,56	285,52	19,64	267,52	21,56	37,42	0,25	446,89
	125/175/3	50,67	11,03		170,88	296,73	20,28	278,75	21,76		0,27	484,06
	Ort.	50,77	11,28		170,50	289,95	20,13	269,01	22,21	37,18	0,26	460,21
	St. Sapma	0,21	0,53		0,41	5,97	0,43	9,09	0,96	0,35	0,01	20,70
12	500/175/1	31,00	6,88		185,53	282,45	21,35	278,61	22,18	41,32	0,22	407,94
	500/175/2	30,96	6,45		186,05	291,37	19,74	286,47	20,82	40,65	0,22	424,91
	500/175/3	49,42	9,99		186,73	294,39	19,81	292,59	20,21	38,88	0,23	438,03
	Ort.	37,13	7,77		186,10	289,40	20,30	285,89	21,07	40,28	0,22	423,63
	St. Sapma	10,65	1,93		0,61	6,21	0,91	7,01	1,01	1,26	0,01	15,08

Deney No	Numune No	L (mm)	ΔL (mm)	E (GPa)	σak (MPa)	σmak (MPa)	Üniform Uzama (%)	σkopma (MPa)	Toplam Uzama (%)	Kesit Daralması (%)	n	K
13	5/250/1	50,93	21,55	53,42	129,96	255,92	32,57	191,06	42,31	57,67	0,18	336,36
	5/250/2	49,34	23,54	53,95	117,55	225,47	35,84	156,52	47,72	61,44	0,17	287,54
	5/250/3	50,48	21,13	56,75	127,69	251,73	31,50	219,57	41,85	51,90	0,18	334,58
	Ort.	50,25	22,07	54,71	125,07	244,37	33,30	189,05	43,96	57,01	0,18	319,49
	St. Sapma	0,82	1,29	1,79	6,61	16,50	2,26	31,57	3,26	4,80	0,01	27,69
14	25/250/1	51,09	19,04	46,07	123,25	246,32	30,77	204,96	37,27	51,41	0,19	331,74
	25/250/2	50,21	19,04	59,78	132,20	262,99	31,80	221,90	37,93	50,98	0,19	353,92
	25/250/3	51,79	18,22	42,68	124,11	246,38	28,09	207,39	35,18	52,86	0,19	346,58
	Ort.	51,03	18,77	49,51	126,52	251,90	30,22	211,42	36,80	51,75	0,19	344,08
	St. Sapma	0,79	0,47	9,05	4,94	9,61	1,92	9,16	1,43	0,99	0,00	11,30
15	125/250/1	50,06	12,88		175,76	282,87	22,59	252,85	25,72	41,23	0,24	431,22
	125/250/2	48,76	16,28		169,18	264,29	27,87	230,88	33,38	48,40	0,20	365,26
	125/250/3	50,00	16,83		167,91	263,46	28,36	238,77	33,66	46,87	0,22	374,28
	Ort.	49,61	15,33		170,95	270,20	26,27	240,84	30,92	45,50	0,22	390,25
	St. Sapma	0,73	2,14		4,21	10,97	3,20	11,13	4,51	3,78	0,02	35,76
16	500/250/13	49,98	8,29		183,39	268,57	13,11	263,38	16,59	42,71		343,95
	500/250/14	48,19	11,16		187,30	284,76	22,18	282,49	23,16	40,84	0,22	407,01
	500/250/15	50,10	5,74		170,84	264,78	10,92	260,58	11,45	39,80		310,96
	Ort.	49,42	8,40		180,51	272,70	15,40	268,82	17,07	41,12	0,22	353,97
	St. Sapma	1,07	2,71		8,60	10,61	5,97	11,92	5,87	1,48		48,80
17	5/-60/1	50,98	12,55	44,77	41,17	218,78	22,04	154,81	24,62	42,41	0,46	489,67
	5/-60/2	47,48	13,21	39,04	41,75	221,12	24,76	139,64	27,82	42,91	0,46	469,57
	5/-60/3	47,87	13,61	61,09	41,09	254,91	24,90	180,22	28,44		0,40	483,73
	Ort.	48,78	13,13	48,30	41,34	231,60	23,90	158,22	26,96	42,66	0,44	480,99
	St. Sapma	1,92	0,53	11,44	0,36	20,22	1,61	20,51	2,05	0,36	0,04	10,32
18	25/-60/1	47,59	13,04		43,47	244,91	24,33	180,20	27,40	46,22	0,41	485,62
	25/-60/2	49,20	14,41		43,68	249,40	26,11	188,89	29,29	43,82	0,41	477,86
	25/-60/3	48,97	14,00		43,20	257,93	25,54	178,74	28,58	43,56	0,38	474,35
	Ort.	48,59	13,81		43,45	250,74	25,33	182,61	28,42	44,53	0,40	479,28
	St. Sapma	0,87	0,70		0,24	6,62	0,91	5,48	0,96	1,46	0,02	5,77
19	125/-60/1	47,99	14,02		49,14	257,52	26,84	241,43	29,22	44,72	0,37	485,62
	125/-60/2	47,87	13,86		49,02	266,45	26,50	238,43	28,95	43,99	0,37	457,83
	125/-60/3	48,48	14,53		45,44	277,34	27,25	237,01	29,97	43,53	0,34	472,06
	Ort.	48,11	14,14		47,87	267,10	26,86	238,95	29,38	44,08	0,36	471,84
	St. Sapma	0,32	0,35		2,10	9,93	0,37	2,26	0,53	0,60	0,02	13,90
20	500/-60/1	47,89	13,78		48,06	256,54	27,90	253,23	28,76	46,77	0,29	394,37
	500/-60/2	49,74	11,303		42,97	224,87	22,17	223,45	22,72	43,06	0,30	366,02
	500/-60/3											
	Ort.	48,82	12,54		45,52	240,70	25,03	238,34	25,74	44,92	0,29	380,19
	St. Sapma	1,31	1,75		3,60	22,39	4,06	21,06	4,27	2,63	0,00	20,05
21	5/-30/1	47,54	10,616	62,66	83,28	273,49	21,92	268,77	22,33	42,15	0,38	514,16
	5/-30/2	47,65	12,516	60,65	83,11	283,47	26,25	280,64	26,27	43,97	0,37	497,39
	5/-30/3	48,11	9,6719	59,48	83,14	283,41	19,70	278,80	20,10	41,86	0,38	506,29
	Ort.	47,77	10,93	60,93	83,18	280,12	22,63	276,07	22,90	42,66	0,37	505,95
	St. Sapma	0,30	1,45	1,61	0,09	5,74	3,33	6,39	3,12	1,15	0,00	8,39
22	25/-30/1	49,16	11,066	56,73	97,37	277,46	22,99	225,76	22,51	41,92	0,36	499,00
	25/-30/2	49,14	15,272	29,12	94,26	280,72	27,14	215,69	31,08	44,92	0,36	485,85
	25/-30/3	47,68	10,359	28,67	89,12	262,14	21,22	199,90	21,73	44,80	0,38	505,82
	Ort.	48,66	12,23	38,17	93,58	273,44	23,78	213,78	25,10	43,88	0,37	496,89
	St. Sapma	0,85	2,66	16,07	4,16	9,92	3,04	13,03	5,19	1,70	0,01	10,15
23	125/-30/1	49,16	13,138		97,37	277,46	22,99	225,76	26,72	42,02	0,35	484,84
	125/-30/2	49,34	12,141		103,93	263,18	22,18	233,90	24,61	43,03	0,36	486,30
	125/-30/3	50,71	13,241		106,77	270,96	23,77	240,42	26,11	44,15	0,35	481,73
	Ort.	49,74	12,84		102,69	270,53	22,98	233,36	25,81	43,07	0,36	484,29
	St. Sapma	0,85	0,61		4,83	7,15	0,79	7,35	1,09	1,07	0,01	2,33
24	500/-30/1	48,05	13,447		174,24	281,56	27,06	279,84	27,99	45,01	0,27	416,49
	500/-30/2	51,41	12,928		171,64	275,89	24,41	273,26	25,15	44,46	0,28	419,86
	500/-30/3											
	Ort.	49,73	13,19		172,94	278,73	25,74	276,55	26,57	44,74	0,27	418,17
	St. Sapma	2,38	0,37		1,84	4,01	1,87	4,65	2,01	0,39	0,01	2,38
25	5/0/1	49,54	10,956	69,50	107,31	294,76	22,03	293,13	22,12	39,16	0,34	516,30
	5/0/2	49,58	13,566	83,66	109,82	300,42	25,02	205,41	27,36	37,61	0,33	505,24
	5/0/3	49,1	11,019	73,72	109,73	205,88	19,30	279,00	22,44	43,00	0,34	519,52
	Ort.	49,41	11,85	75,63	108,96	267,02	22,12	259,18	23,97	39,92	0,34	513,69
	St. Sapma	0,27	1,49	7,27	1,42	53,02	2,86	47,10	2,94	2,77	0,01	7,49
26	25/0/1	50,49	14,853	55,93	107,90	296,12	26,86	240,36	29,42	44,65	0,33	494,31
	25/0/2	49,81	12,597	49,76	107,26	285,47	23,07	219,34	25,29	41,20	0,34	500,03
	25/0/3	49,39	12,197	82,78	107,71	284,01	21,77	215,65	24,70	43,73	0,34	504,78
	Ort.	49,90	13,22	62,82	107,62	288,54	23,90	225,12	26,47	43,19	0,34	499,71
	St. Sapma	0,56	1,43	17,56	0,33	6,61	2,64	13,33	2,57	1,78	0,01	5,24
27	125/0/1	49,53	14,819		119,94	296,21	27,97	271,16	29,92	40,66	0,32	475,12
	125/0/2	49,45	14,538		117,33	292,17	27,29	256,55	29,40	41,41	0,32	477,53
	125/0/3											
	Ort.	49,49	14,68		118,63	294,19	27,63	263,85	29,66	41,03	0,32	476,32
	St. Sapma	0,06	0,20		1,84	2,86	0,48	10,33	0,37	0,53	0,00	1,71
28	500/0/1	50,04	11,509		179,71	276,76	22,10	274,30	23,00	43,21	0,29	444,02
	500/0/2	49,37	11,75		180,05	279,11	22,29	277,03	23,80	44,29	0,29	444,84
	500/0/3											
	Ort.	49,71	11,63		179,88	277,93	22,19	275,67	23,40	43,75	0,29	444,43
	St. Sapma	0,47	0,17		0,24	1,66	0,13	1,93	0,57	0,77	0,00	0,58

EK-4 Anizotropiyi incelemek için yaptırılan deneyler

Zwick / Roell **SAC MALZEME TEST RAPORU** **15.06.2007**

Parametreler / Parameter Table:

Rapor no	: 2- 45°	Yüzey tipi	:
Malzeme tarifi	: alüminyum	Kaplama ağırlığı (G/M²)	:
Parça no	:	Kaplama kalınlığı (µm)	:
Parça adı	: çekme çubuğu	Cup testi (mm)	:
Kalınlık (mm)	: 1,85	Bükme testi 180°	:
Ağırlık	: 1 kg	Sertlik (HRB/HRC)	:
Rulo/Paket	: RULO	Test standardı	:
İmalatçı	:	Testi yapan	: İSMAİL ATAY
Isıl işlem tarihi	:	Test tarihi	: 15.06.2007
Isıl işlem numarası	:	Rulo eni	:
İmalatcı etiket no	:	SONUÇ	: BİLGİ İÇİN
Yüzey finişi (µm)	:		

NOT : Alüminyum malzeme 45°

Spek değeri / Spec parameters

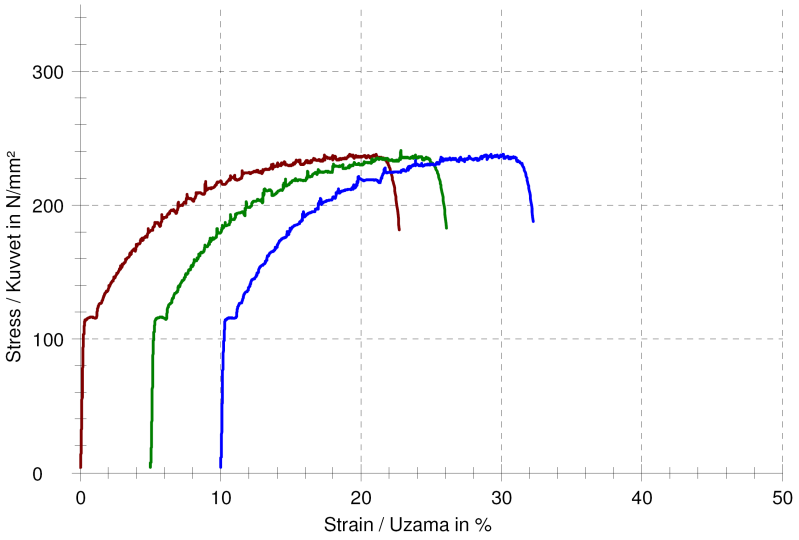
Akma Muk. (N/mm²)	:
Çekme Muk. (N/mm²)	:
Uzama % min	:
Kalınlık mm (+)	:
Yüzey finişi µm	:
Rulonun eni	:

Sonuçlar / Results:

Legends	Nr	S0 mm²	L0 mm	E kN/mm²	Rp 0,2 N/mm²	Re N/mm²	ReH N/mm²	ReL N/mm²	Rs/R %	Rm N/mm²	Ag %	A %	n	$\bar{r}_i$
	1	22,85	65,00	58,7	114,3	94,0	-	-	19,70	237,7	18,8	22,4	0,27	0,06
	2	22,85	65,00	63,6	115,0	96,6	-	-	18,26	240,6	17,4	20,8	0,27	0,11
	3	22,85	65,00	60,4	114,5	94,5	-	-	19,53	238,0	18,9	21,9	0,27	0,08

İstatistik / Statistics:

Series n = 3	S0 mm²	L0 mm	E kN/mm²	Rp 0,2 N/mm²	Re N/mm²	ReH N/mm²	ReL N/mm²	Rs/R %	Rm N/mm²	Ag %	A %	n	$\bar{r}_i$
$\bar{x}$	22,85	65,00	60,9	114,6	95,0	-	-	19,17	238,8	18,3	21,7	0,27	0,08
s	0,00	0,00	2,5	0,4	1,4	-	-	0,79	1,6	0,8	0,8	0,00	0,02
min.	22,85	65,00	58,7	114,3	94,0	-	-	18,26	237,7	17,4	20,8	0,27	0,06
max.	22,85	65,00	63,6	115,0	96,6	-	-	19,70	240,6	18,9	22,4	0,27	0,11
R	0,00	0,00	4,9	0,7	2,6	-	-	1,44	3,0	1,4	1,6	0,01	0,05



Zwick / Roell

SAC MALZEME TEST RAPORU

15.06.2007

Parametreler / Parameter Table:

Rapor no	: 3- 90°	Yüzey tipi	:
Malzeme tarifi	: alüminyum	Kaplama ağırlığı (G/M²)	:
Parça no	:	Kaplama kalınlığı (µm)	:
Parça adı	: çekme çubuğu	Cup testi (mm)	:
Kalınlık (mm)	: 1,85	Bükme testi 180°	:
Ağırlık	: 1 kg	Sertlik (HRB/HRC)	:
Rulo/Paket	: RULO	Test standardı	:
İmalatçı	:	Testi yapan	: İSMAİL ATAY
Isıl işlem tarihi	:	Test tarihi	: 15.06.2007
Isıl işlem numarası	:	Rulo eni	:
İmalatcı etiket no	:	SONUÇ	: BİLGİ İÇİN
Yüzey finişi (µm)	:		

NOT : Alüminyum malzeme 90°

Spek değeri / Spec parameters

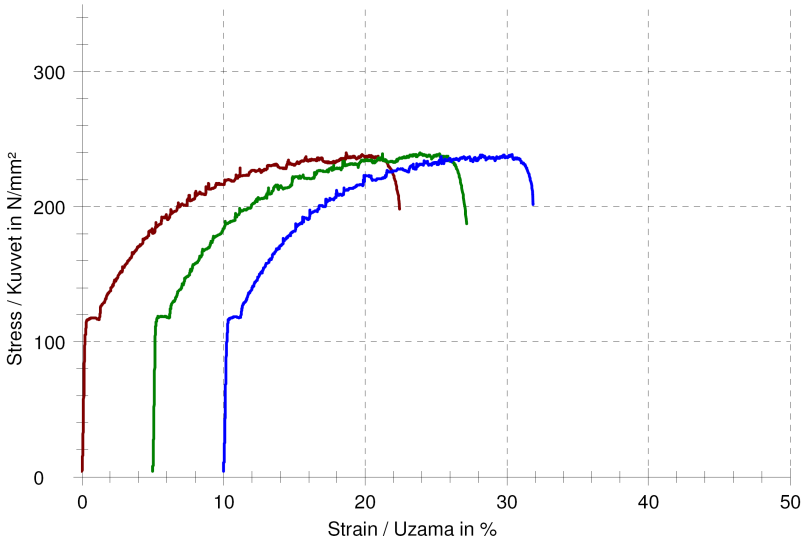
Akma Muk. (N/mm²)	:
Çekme Muk. (N/mm²)	:
Uzama % min	:
Kalınlık mm (+)	:
Yüzey finişi µm	:
Rulonun eni	:

Sonuçlar / Results:

Legends	Nr	S0 mm²	L0 mm	E kN/mm²	Rp 0,2 N/mm²	Re N/mm²	ReH N/mm²	ReL N/mm²	Rs/R %	Rm N/mm²	Ag %	A %	n	$\bar{r}_i$
	1	22,87	65,00	68,7	116,4	98,2	-	-	18,47	239,9	18,3	22,1	0,25	0,10
	2	22,85	65,00	68,7	118,4	109,5	118,9	142,0	18,24	239,8	18,5	21,9	0,26	0,05
	3	23,03	65,00	59,9	117,1	93,7	-	-	18,59	238,5	20,0	21,5	0,26	0,08

İstatistik / Statistics:

Series n = 3	S0 mm²	L0 mm	E kN/mm²	Rp 0,2 N/mm²	Re N/mm²	ReH N/mm²	ReL N/mm²	Rs/R %	Rm N/mm²	Ag %	A %	n	$\bar{r}_i$
$\bar{x}$	22,92	65,00	65,8	117,3	100,4	118,9	142,0	18,43	239,4	18,9	21,8	0,26	0,08
s	0,10	0,00	5,1	1,0	8,1	-	-	0,18	0,8	0,9	0,3	0,00	0,02
min.	22,85	65,00	59,9	116,4	93,7	118,9	142,0	18,24	238,5	18,3	21,5	0,25	0,05
max.	23,03	65,00	68,7	118,4	109,5	118,9	142,0	18,59	239,9	20,0	22,1	0,26	0,10
R	0,18	0,00	8,9	2,0	15,8	0,0	0,0	0,35	1,4	1,7	0,6	0,00	0,04



Zwick / Roell **SAC MALZEME TEST RAPORU** **15.06.2007**

Parametreler / Parameter Table:

Rapor no	: 1- 0°	Yüzey tipi	:
Malzeme tarifi	: alüminyum	Kaplama ağırlığı (G/M²)	:
Parça no	:	Kaplama kalınlığı (µm)	:
Parça adı	: çekme çubuğu	Cup testi (mm)	:
Kalınlık (mm)	: 1,85	Bükme testi 180°	:
Ağırlık	: 1 kg	Sertlik (HRB/HRC)	:
Rulo/Paket	: RULO	Test standardı	:
İmalatçı	:	Testi yapan	: İSMAİL ATAY
Isıl işlem tarihi	:	Test tarihi	: 15.06.2007
Isıl işlem numarası	:	Rulo eni	:
İmalatcı etiket no	:	SONUÇ	: BİLGİ İÇİN
Yüzey finişi (µm)	:		

NOT : Alüminyum malzeme 0°
İkinci numunede uzama alınmadı

Spek değeri / Spec parameters

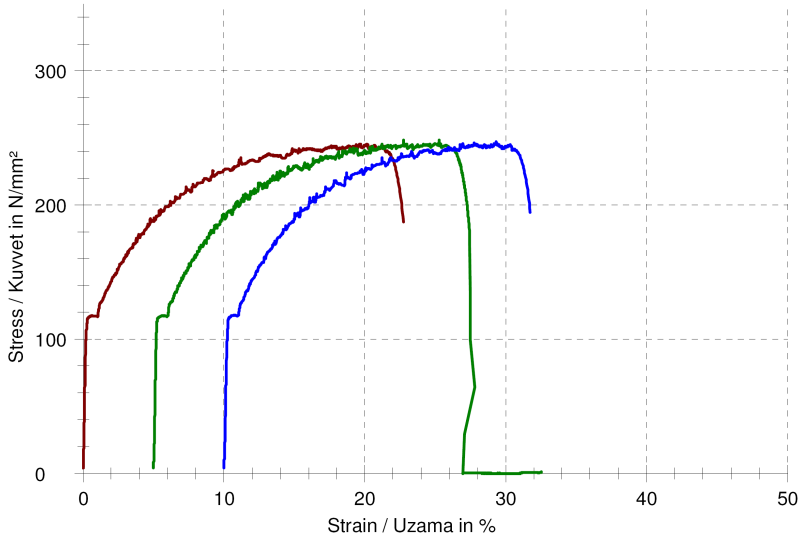
Akma Muk. (N/mm²)	:
Çekme Muk. (N/mm²)	:
Uzama % min	:
Kalınlık mm (+)	:
Yüzey finişi µm	:
Rulonun eni	:

Sonuçlar / Results:

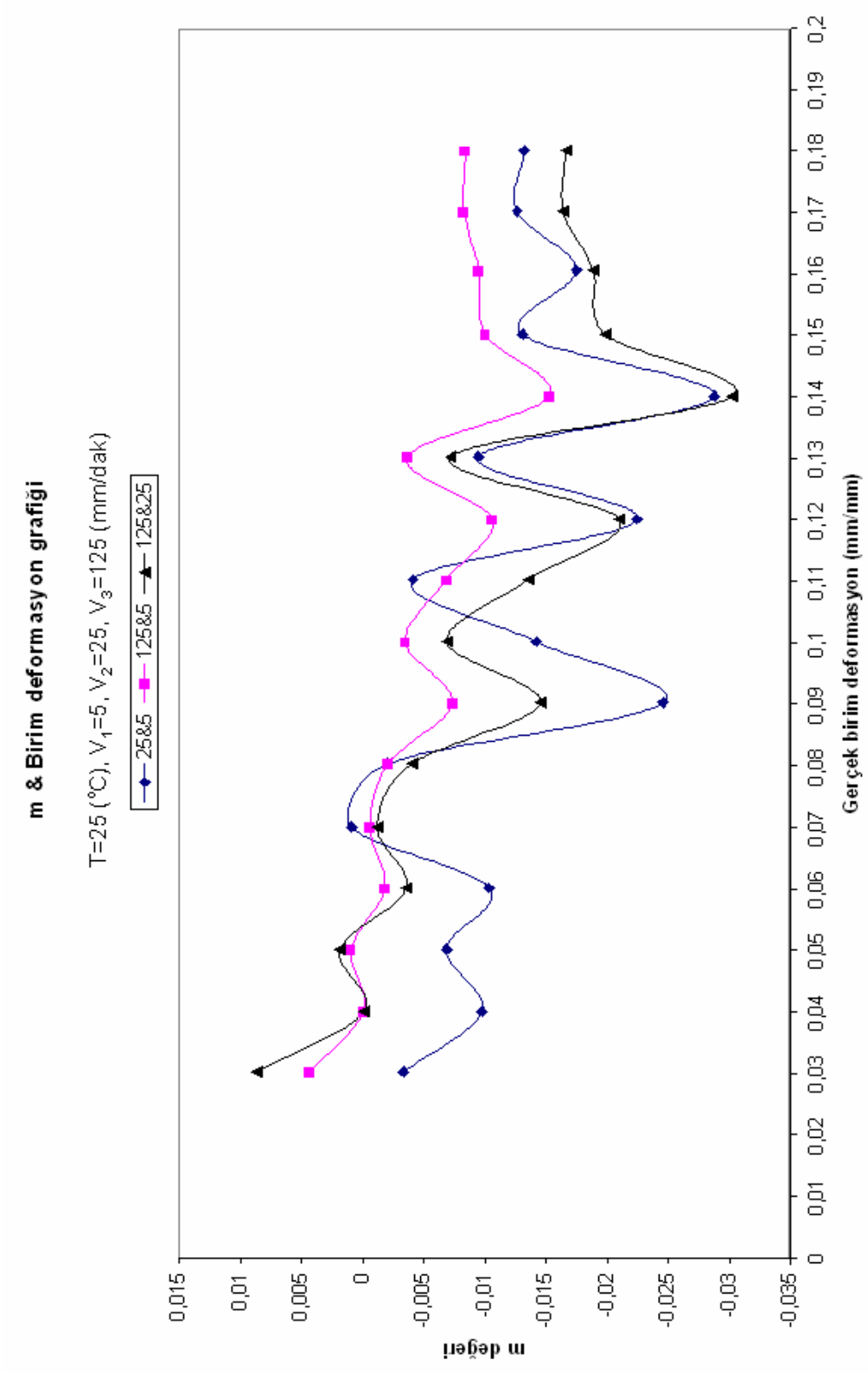
Legends	Nr	S0 mm²	L0 mm	E kN/mm²	Rp 0,2 N/mm²	Re N/mm²	ReH N/mm²	ReL N/mm²	Rs/R %	Rm N/mm²	Ag %	A %	n	$\bar{r}_i$
	1	23,00	65,00	62,8	116,5	99,3	-	-	18,48	245,6	19,2	22,4	0,25	0,10
	2	22,88	65,00	64,8	116,5	101,6	-	-	20,63	248,4	17,4	-	0,26	0,11
	3	22,94	65,00	56,4	116,5	93,3	-	-	16,41	246,9	18,9	21,4	0,25	0,10

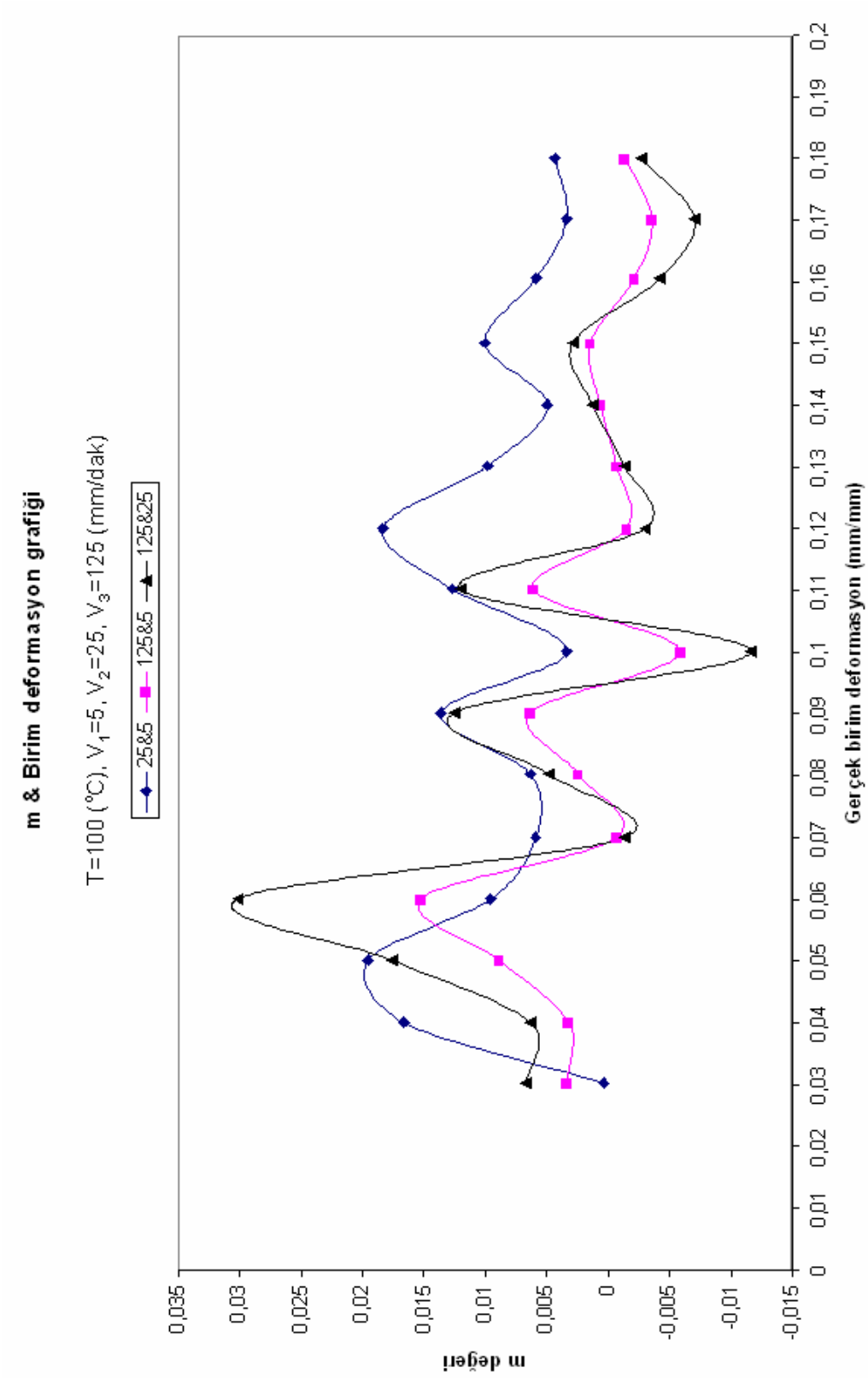
İstatistik / Statistics:

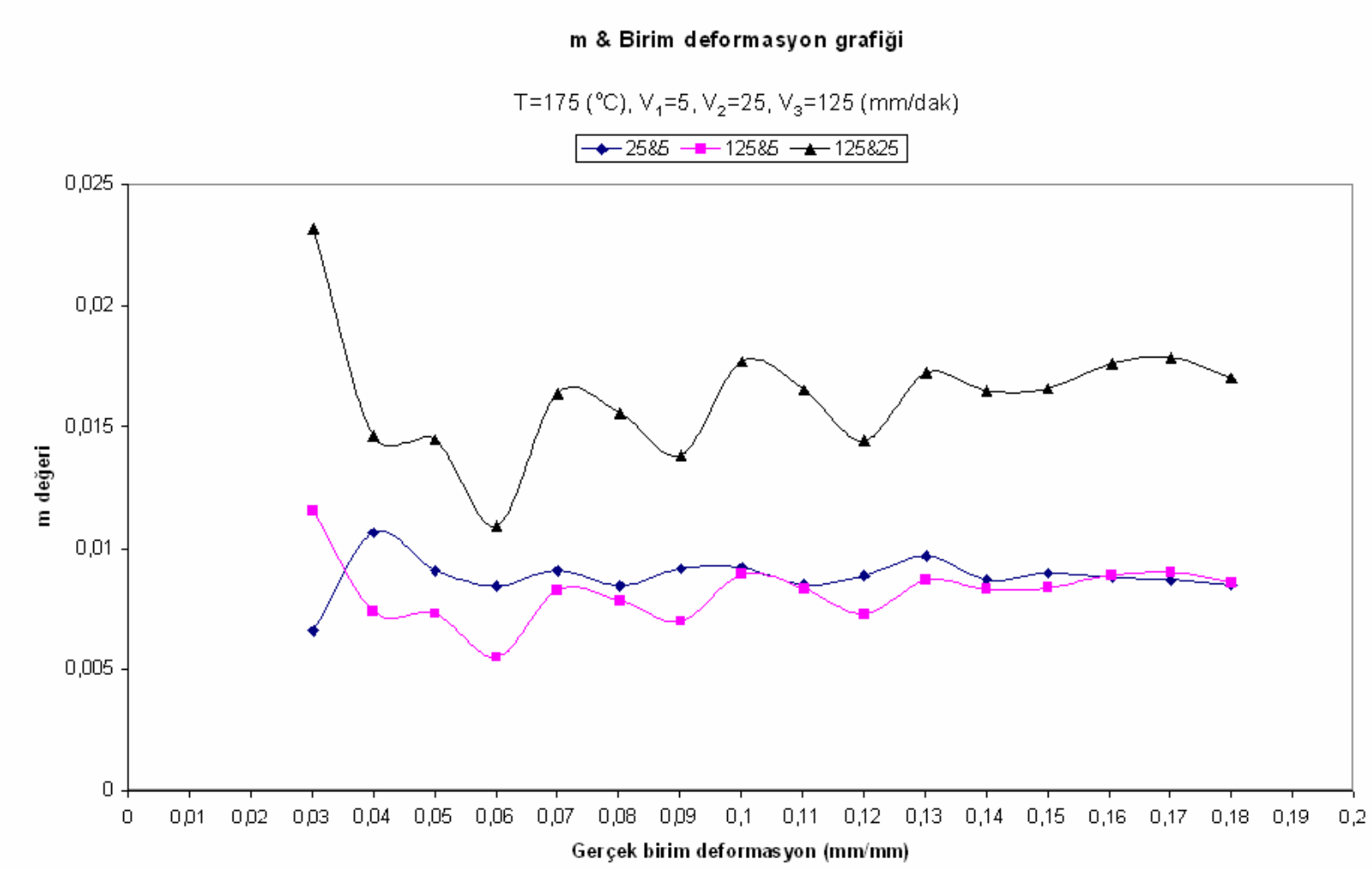
Series n = 3	S0 mm²	L0 mm	E kN/mm²	Rp 0,2 N/mm²	Re N/mm²	ReH N/mm²	ReL N/mm²	Rs/R %	Rm N/mm²	Ag %	A %	n	$\bar{r}_i$
$\bar{x}$	22,94	65,00	61,4	116,5	98,1	-	-	18,50	247,0	18,5	21,9	0,25	0,10
s	0,06	0,00	4,4	0,0	4,3	-	-	2,11	1,4	1,0	0,8	0,01	0,01
min.	22,88	65,00	56,4	116,5	93,3	-	-	16,41	245,6	17,4	21,4	0,25	0,10
max.	23,00	65,00	64,8	116,5	101,6	-	-	20,63	248,4	19,2	22,4	0,26	0,11
R	0,11	0,00	8,4	0,0	8,3	-	-	4,21	2,8	1,9	1,1	0,02	0,01

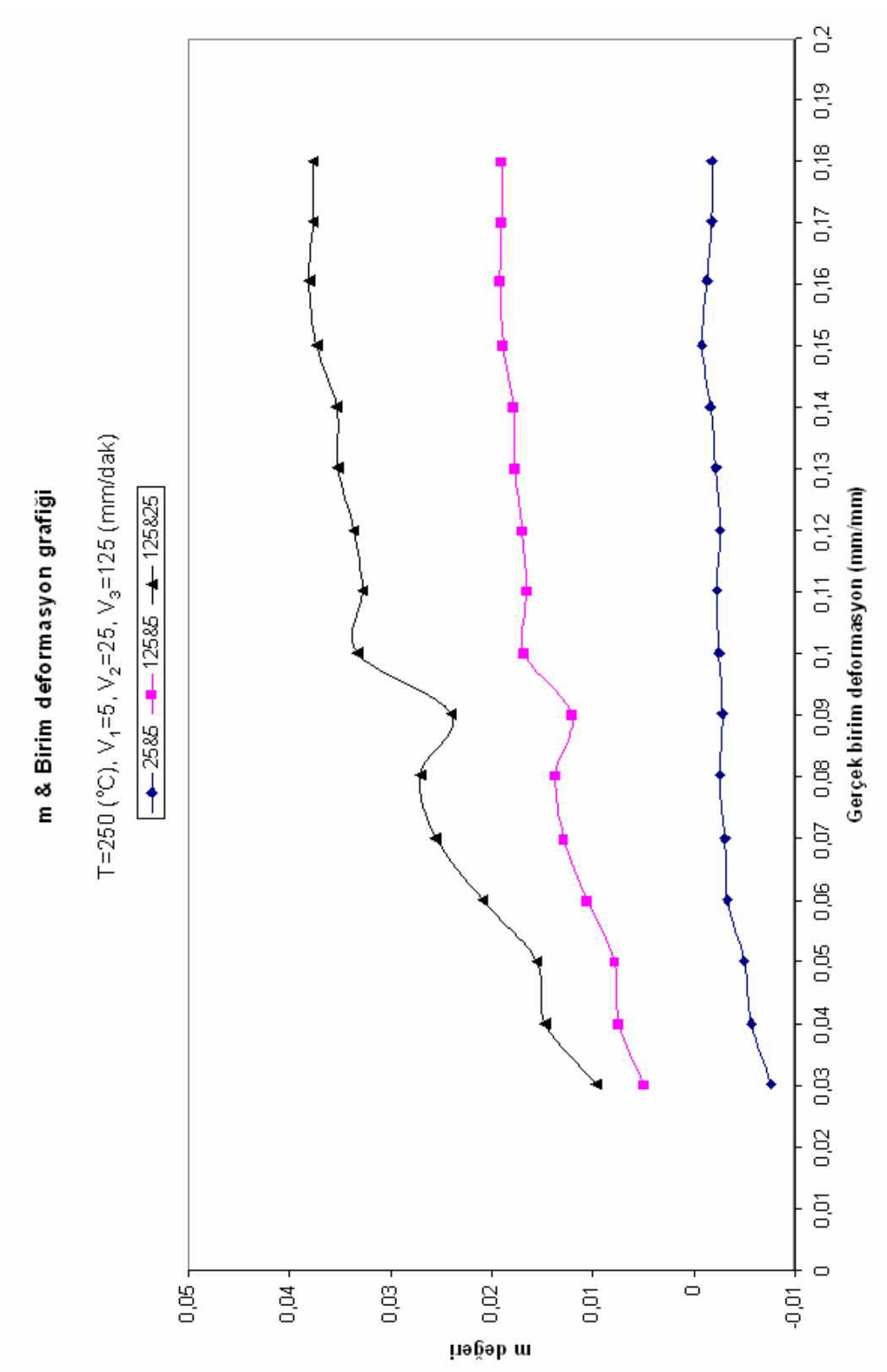


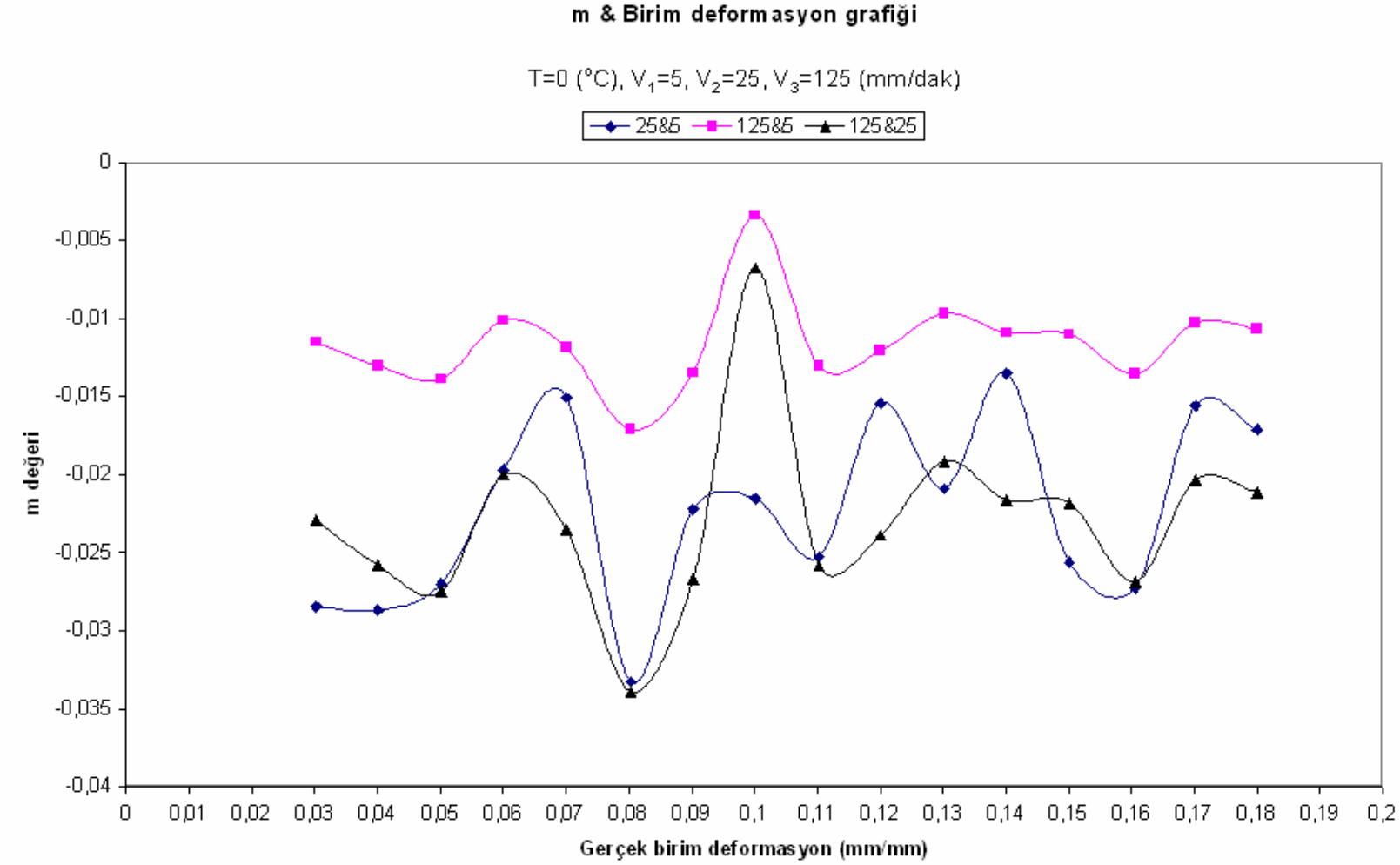
EK-5 Deformasyon hız hassasiyeti grafikleri

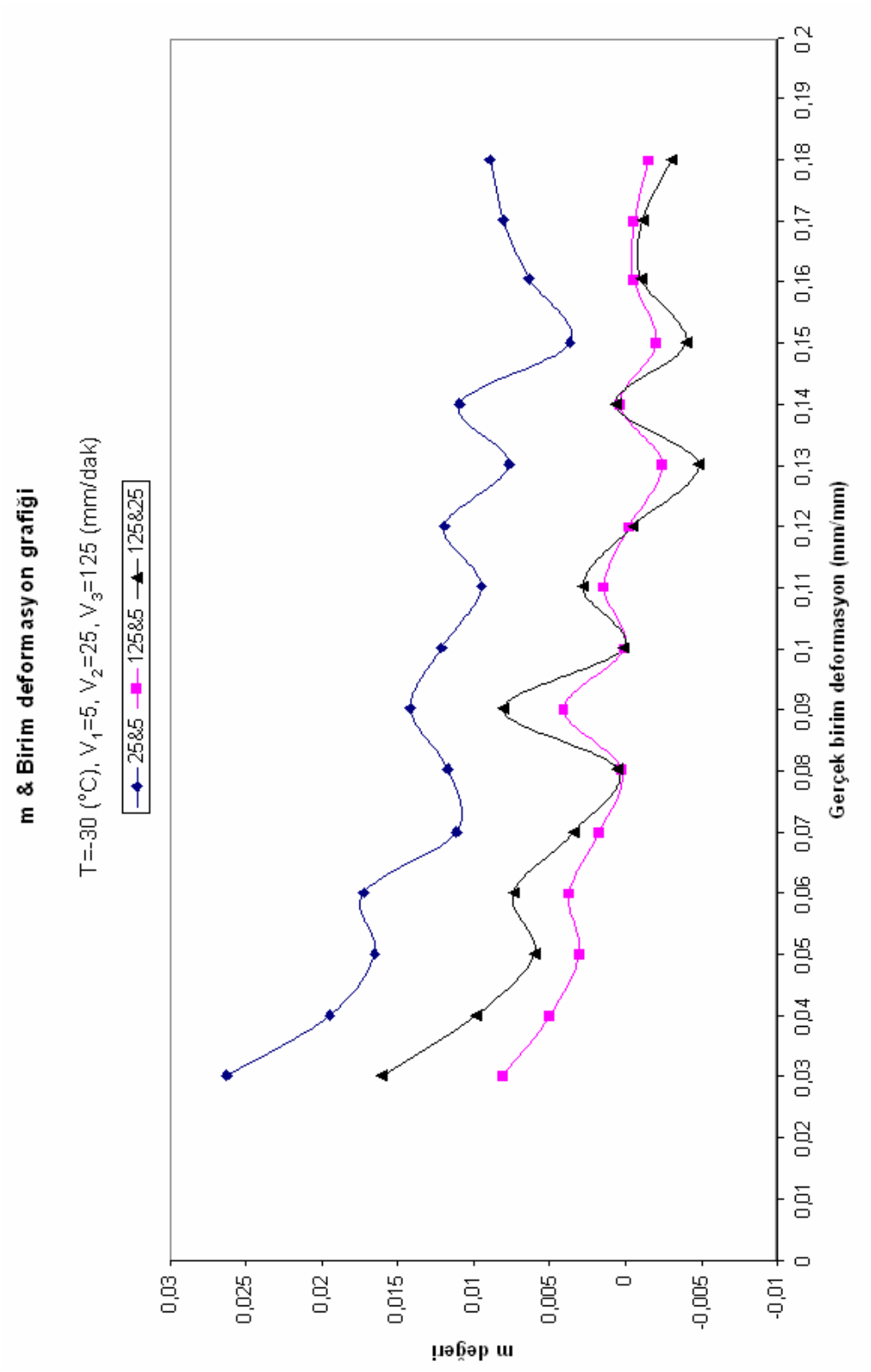


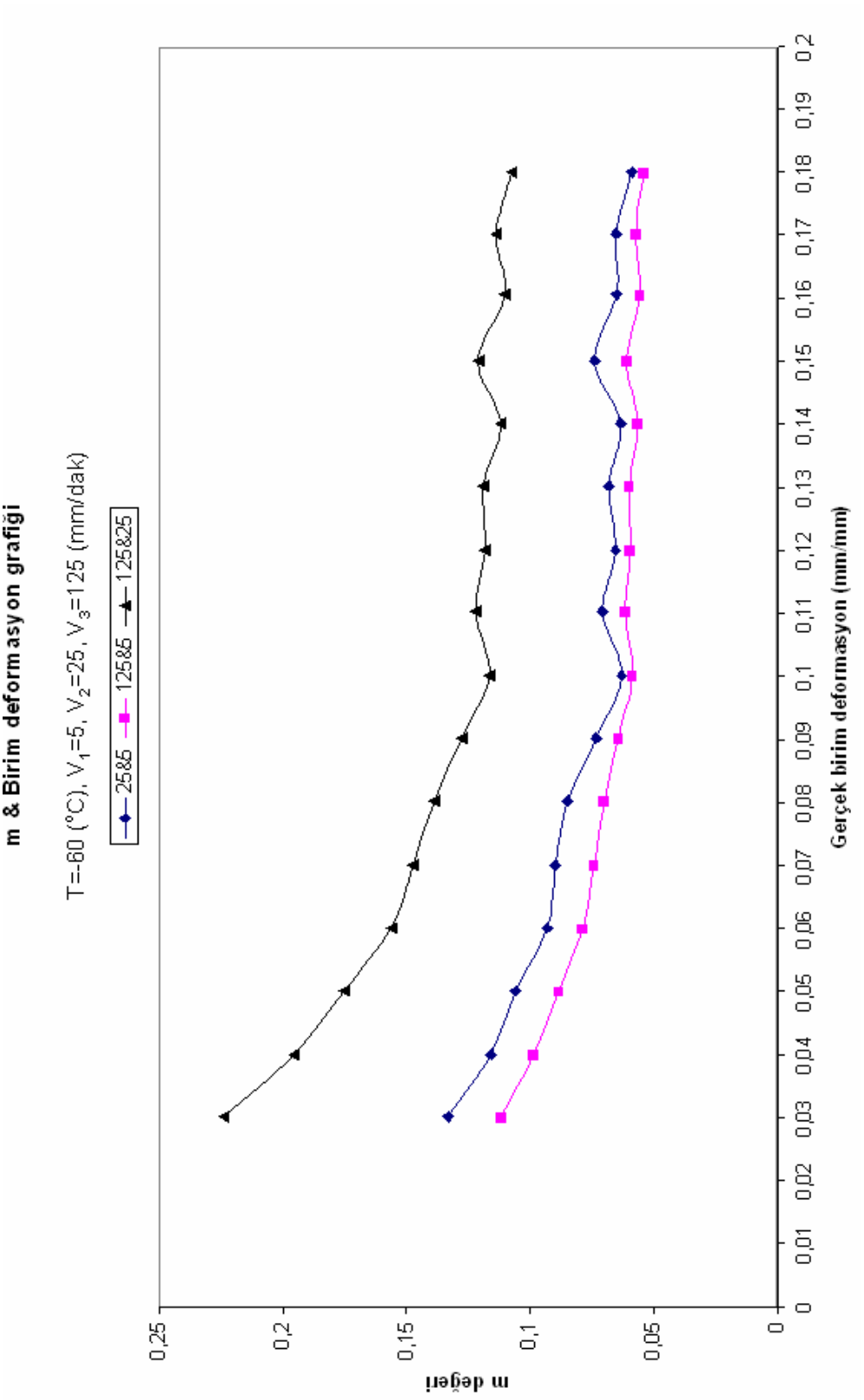

m & Birim deformasyon grafiği
T=100 (°C), V1=5, V2=25, V3=125 (mm/dak)
25&5
125&5
125&25
m değeri
Gerçek birim deformasyon (mm/mm)
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
-0,005
-0,01
-0,015
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
0,08
0,09
0,1
0,11
0,12
0,13
0,14
0,15
0,16
0,17
0,18
0,19
0,2

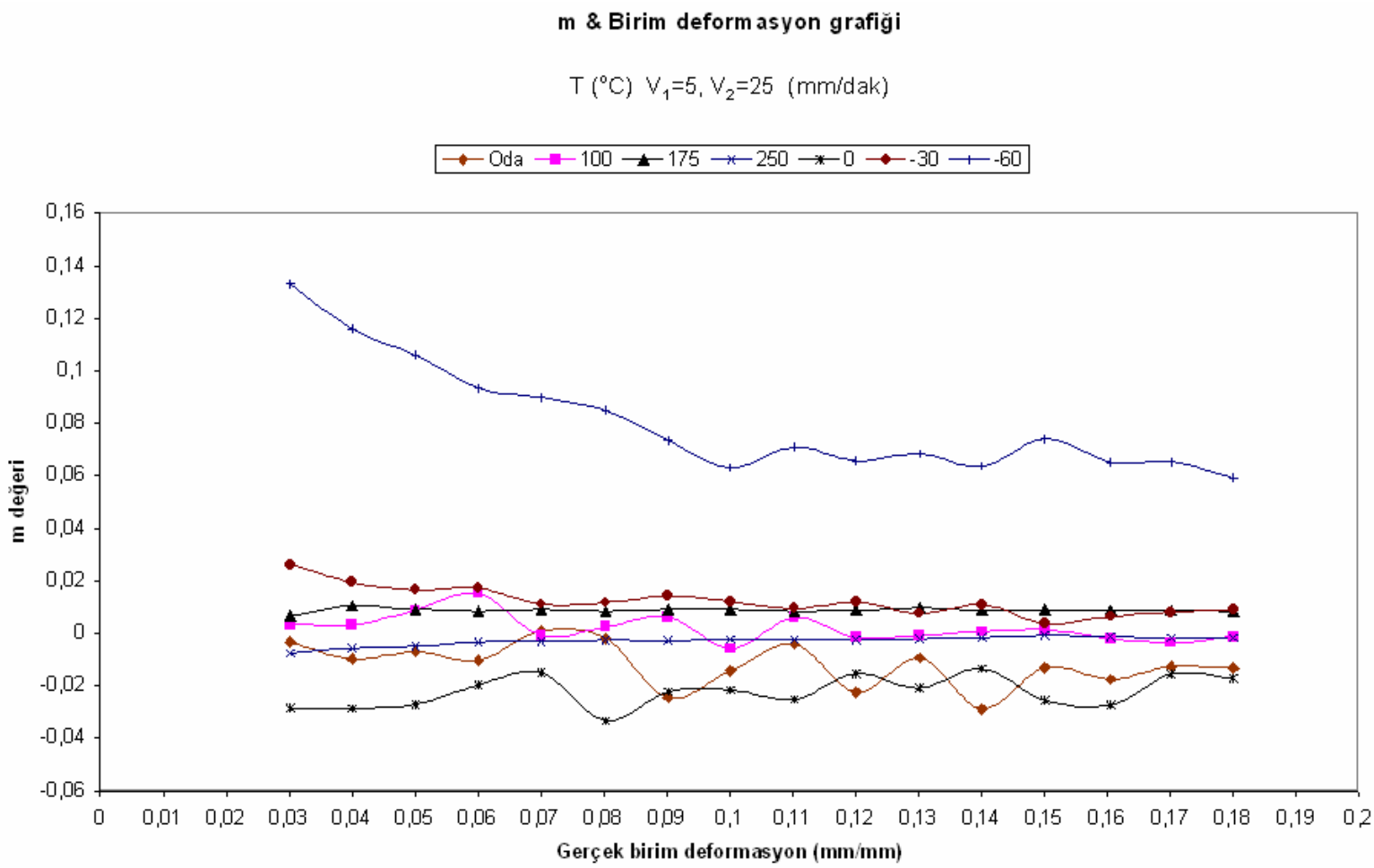

m & Birim deformasyon grafiği
T=175 (°C), V1=5, V2=25, V3=125 (mm/dak)
25&5
125&5
125&25
m değeri
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
0,08
0,09
0,1
0,11
0,12
0,13
0,14
0,15
0,16
0,17
0,18
0,19
0,2
Gerçek birim deformasyon (mm/mm)

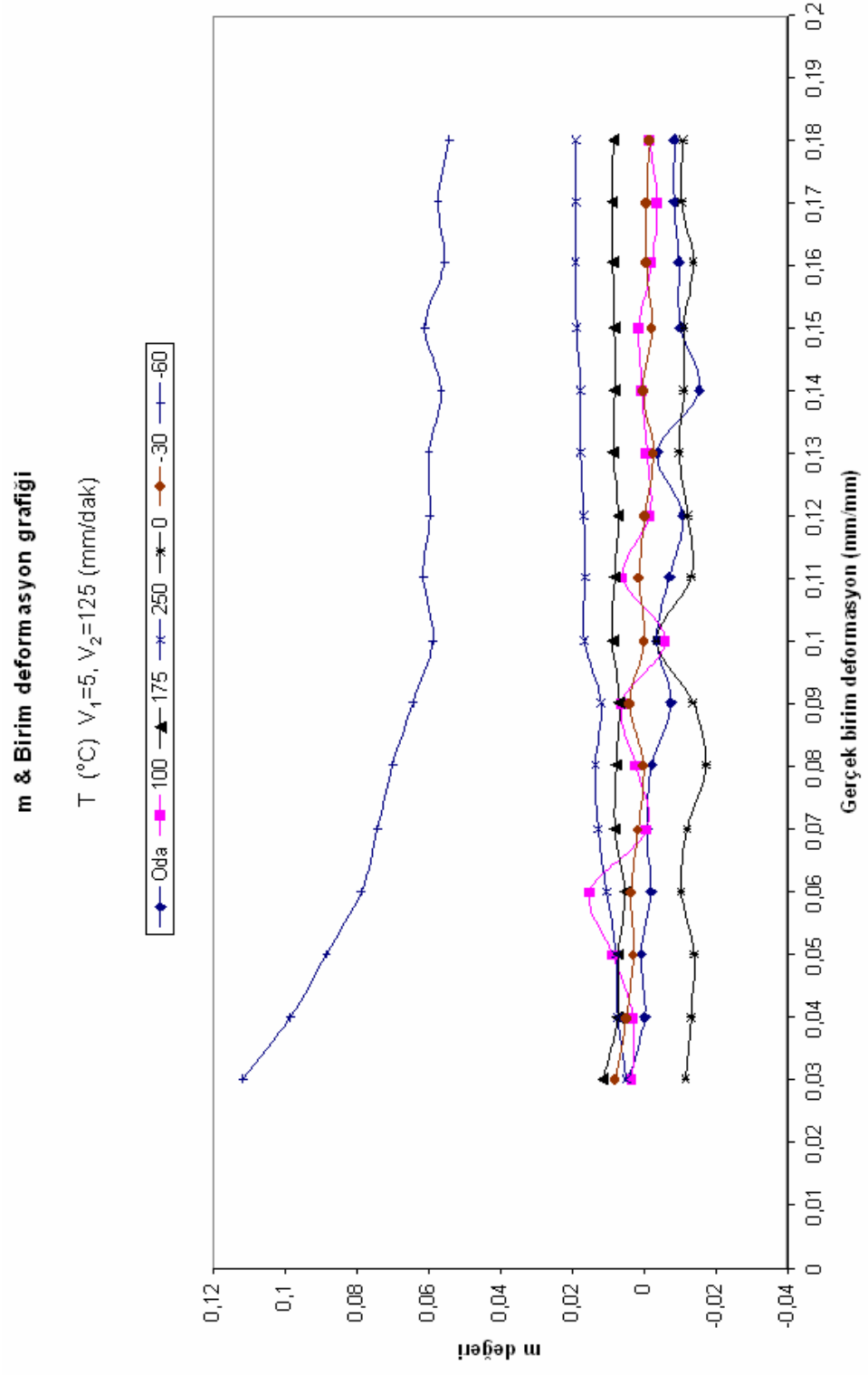

m & Birim deformasyon grafiği
T=250 (°C), V1=5, V2=25, V3=125 (mm/dak)
25&5
125&5
125&25
m değeri
Gerçek birim deformasyon (mm/mm)
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
-0,01
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
0,08
0,09
0,1
0,11
0,12
0,13
0,14
0,15
0,16
0,17
0,18
0,19
0,2

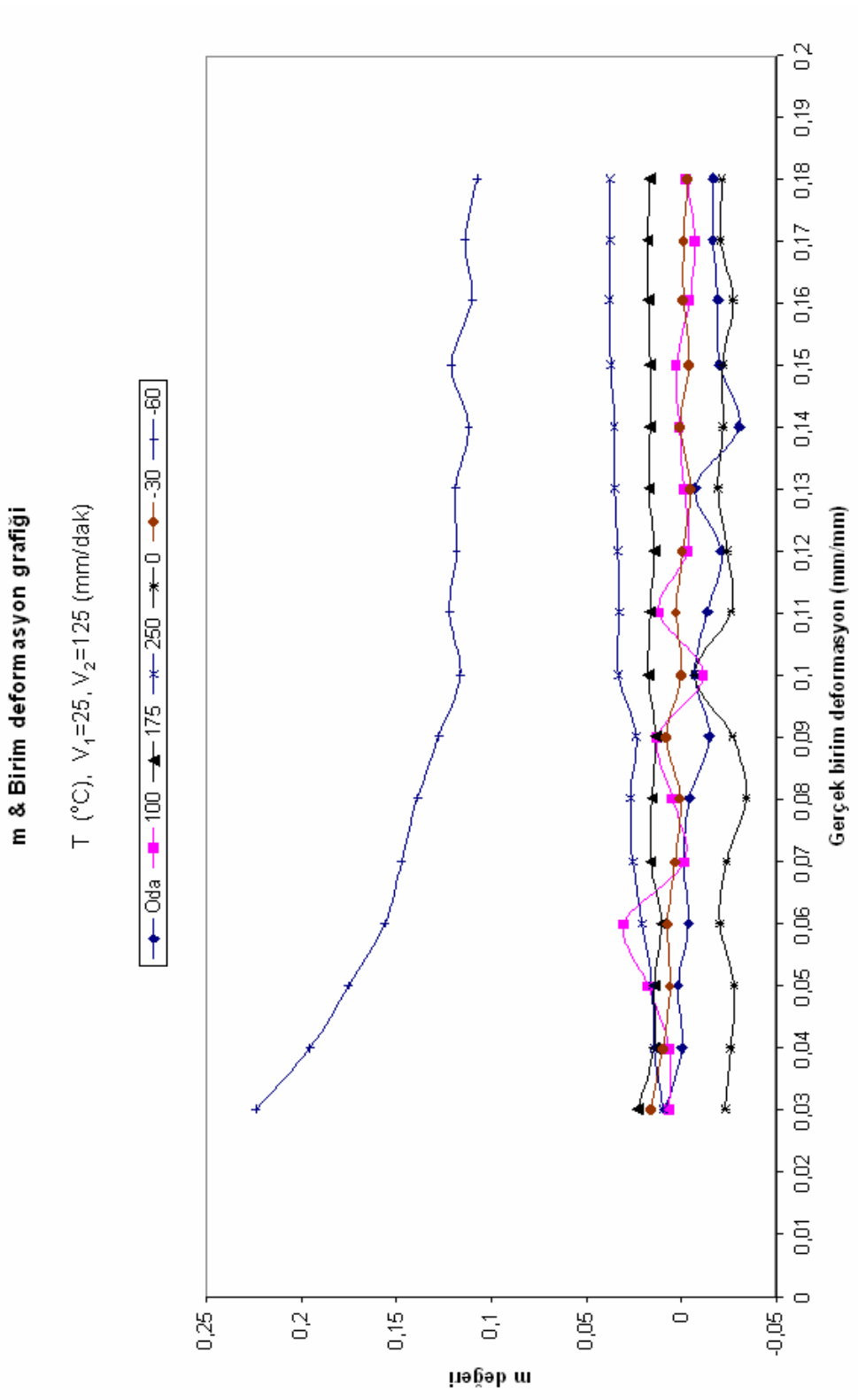

m & Birim deformasyon grafiği
T=0 (°C), V1=5, V2=25, V3=125 (mm/dak)
25&5
125&5
125&25
m değeri
0
-0,005
-0,01
-0,015
-0,02
-0,025
-0,03
-0,035
-0,04
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
0,08
0,09
0,1
0,11
0,12
0,13
0,14
0,15
0,16
0,17
0,18
0,19
0,2
Gerçek birim deformasyon (mm/mm)


m & Birim deformasyon grafiği
T=-30 (°C), V1=5, V2=25, V3=125 (mm/dak)
25&5
125&5
125&25
m değeri
Gerçek birim deformasyon (mm/mm)
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
-0,005
-0,01
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
0,08
0,09
0,1
0,11
0,12
0,13
0,14
0,15
0,16
0,17
0,18
0,19
0,2


m & Birim deformasyon grafiği
T=-60 (°C), V1=5, V2=25, V3=125 (mm/dak)
25&5
125&5
125&25
m değeri
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
0,08
0,09
0,1
0,11
0,12
0,13
0,14
0,15
0,16
0,17
0,18
0,19
0,2
Gerçek birim deformasyon (mm/mm)


m & Birim deformasyon grafiği
T (°C) V1=5, V2=25 (mm/dak)
Oda
100
175
250
0
-30
-60
m değeri
0,16
0,14
0,12
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
-0,02
-0,04
-0,06
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
0,08
0,09
0,1
0,11
0,12
0,13
0,14
0,15
0,16
0,17
0,18
0,19
0,2
Gerçek birim deformasyon (mm/mm)


m & Birim deformasyon grafiği
T (°C) V1=5, V2=125 (mm/dak)
Oda
100
175
250
0
-30
-60
m değeri
0,12
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
-0,02
-0,04
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
0,08
0,09
0,1
0,11
0,12
0,13
0,14
0,15
0,16
0,17
0,18
0,19
0,2
Gerçek birim deformasyon (mm/mm)


m & Birim deformasyon grafiği
T (°C), V1=25, V2=125 (mm/dak)
Oda
100
175
250
0
-30
-60
m değeri
Gerçek birim deformasyon (mm/mm)
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
-0,05
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
0,08
0,09
0,1
0,11
0,12
0,13
0,14
0,15
0,16
0,17
0,18
0,19
0,2