

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALLERDE PEKLEŞME ÜSTELİNİN SÜNEKLİĞE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Müh. Ersin Asım GÜVEN

Anabil Dalı: Makine Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr. Levon ÇAPAN

KOCAELİ, 2006

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ *FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALLERDE PEKLEŞME ÜSTELİNİN SÜNEKLİĞE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Ersin Asım GÜVEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Mayıs 2006

Tezin Savunulduğu Tarih: 21 Haziran 2006

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Levon
ÇAPAN**


(.....)

**Üye
Yrd. Doç. Dr. Kenan
URAL**


(.....)

**Üye
Yrd. Doç. Dr. Erdal
KARADENİZ**


(.....)

KOCAELİ 2006

ÖNSÖZ

Bir çok alanda günlük yaşantımızın bir parçası olan metal ve alaşımlarının şekillendirilebilirliğinde kullanılan pekleşme üsteli pekleşme kapasitesini belirlemek açısından önemli parametrelerden biridir. Soğuk haddelenmiş çeşitli malzemelerle anizotropi de göz önüne alınarak yapılan bu çalışmanın literatürdeki bir eksikliği gidereceği kanaatindeyim.

Bu çalışmanın hazırlanması esnasında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Levon ÇAPAN 'a teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın gerçekleştirilmesini her türlü maddi ve manevi yardımlarıyla destekleyen Sayın Prof. Yük. Müh. İbrahim UZMAN 'a, malzemelerin kimyasal analizlerindeki yardımları için Sayın Mak. Yük. Müh. Mehmet TÜRKER 'e, malzeme temini ve numune hazırlanmasındaki yardımlarından dolayı Yılmazlar A.Ş. adına Sayın Turgay YILMAZ, Çemsan A.Ş. adına Sayın Sedat AÇILDI ve Thyssenkrupp adına Sayın Ethem Oğuz GÖRTAN' a, ayrıca sonsuz sabır ve yardımlarından dolayı bütün Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü mensuplarına teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLOLAR DİZİNİ	iv
SİMGELER.....	vi
ÖZET:	vii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Metal ve Metal Alaşımlarında Pekleşme ve Pekleşme Üsteli Kavramı.....	1
1.2 Pekleşme Özelliklerini Belirleme Metotları.....	5
1.2.1 Basit çekme deneyi	5
1.2.2 Basma deneyi	9
1.2.3 Basmada düzlemsel şekil değişimi.....	11
1.2.4 Hidrolik şişirme deneyi (İki eksenli çekme).....	14
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	17
2.1 Çalışmanın Amacı.....	22
3. MALZEME	24
3.1 Alüminyum Deney Malzemesi	24
3.2 DKP Çelik Deney Malzemesi	25
3.3 Pirinç Deney Malzemesi	25
3.4 409 Paslanmaz Çelik Deney Malzemesi	26
3.5 430 Paslanmaz Çelik Deney Malzemesi	27
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
4.1 M. Reihle Metodu	28
4.1.1 M.Reihle yöntemi değerler listesi	32
4.2 ASTM E 646-00 Deney Metodu	61
5. BULGULAR.....	66
6. SONUÇLAR	80
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Yük-uzama ile gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramları....	5
Şekil 1.2: a) Basma deneyi ve b) fiçilaşma oluşumu.....	9
Şekil 1.3: Basmada Watt ve Ford Metodu	10
Şekil 1.4: Basmada düzlemsel şekil değişimi.....	11
Şekil 1.5: Hidrolik şişirme deneyi.....	14
Şekil 2.1: H.K. Kim ve W.J. Kim tarafından yapılan şekillendirme tipinin şeması	17
Şekil 4.1: Numunelerin saç üzerindeki konumu.....	28
Şekil 4.2: Çekme numunesi.....	29
Şekil 4.3: Numune kodlaması.....	29
Şekil 4.4: Numunelerin saç üzerindeki konumu.....	61
Şekil 4.5: Numune kodlaması.....	62
Şekil 4.6: Çekme numunesi.....	62
Şekil 5.1: 1145 Al malzeme için pekleşme üsteli ve % kopma uzaması.....	67
Şekil 5.2: 1145Al malzeme için pekleşme üsteli ve maksimum yükteki % uzama grafiği.....	68
Şekil 5.3: CuZn C26800 malzeme için pekleşme üsteli ve % kopma uzaması grafiği.....	69
Şekil 5.4: CuZn C26800 malzeme için pekleşme üsteli ve maksimum yükteki % uzama grafiği.....	70
Şekil 5.5: DKP 1005 malzeme için pekleşme üsteli ve % kopma uzaması grafiği.....	71
Şekil 5.6: DKP 1005 malzeme için pekleşme üsteli ve maksimum yükteki % uzama grafiği.....	72
Şekil 5.7: 409 paslanmaz çelik malzeme için pekleşme üsteli ve % kopma uzaması grafiği.....	73
Şekil 5.8: 409 paslanmaz çelik malzeme için pekleşme üsteli ve maksimum yükteki % uzama grafiği.....	74
Şekil 5.9: 430 paslanmaz çelik malzeme için pekleşme üsteli ve % kopma uzaması grafiği.....	75
Şekil 5.10: 430 paslanmaz çelik malzeme için pekleşme üsteli ve maksimum yükteki % uzama grafiği.....	76
Şekil 5.11: Pekleşme Üstelinin % kopma uzamasına etkisi.....	77
Şekil 5.12: Pekleşme üstelinin maksimum yükteki % uzamaya etkisi.....	78

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1: Alüminyum malzemenin mekanik özellikleri.....	24
Tablo 3.2: 1145 alüminyum malzemenin kimyasal standardı.....	24
Tablo 3.3: Alüminyum malzemenin kimyasal analizi.....	24
Tablo 3.4: DKP çelik malzemenin mekanik özellikleri.....	25
Tablo 3.5 AISI 1005 malzemenin kimyasal standardı.....	25
Tablo 3.6: DKP çelik malzemenin kimyasal analizi.....	25
Tablo 3.7: Pirinç malzemenin mekanik özellikleri.....	25
Tablo 3.8: UNS C26800 malzemenin kimyasal standardı.....	26
Tablo 3.9: Pirinç malzemenin kimyasal analizi.....	26
Tablo 3.10: 409 paslanmaz çelik malzemenin mekanik özellikleri.....	26
Tablo 3.11: AISI 409 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal standardı.....	26
Tablo 3.12: 409 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal analizi.....	26
Tablo 3.13: 430 paslanmaz çelik malzemenin mekanik özellikleri.....	27
Tablo 3.14: AISI 430 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal standardı.....	27
Tablo 3.15: 430 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal analizi.....	27
Tablo 4.1: Çekme numunesinin ölçüleri.....	29
Tablo 4.2: 0 CuZn 01 kodlu numunenin değerleri.....	32
Tablo 4.3: 0 CuZn 02 kodlu numunenin değerleri.....	33
Tablo 4.4: 0 CuZn 03 kodlu numunenin değerleri.....	34
Tablo 4.5: 0 CuZn 04 kodlu numunenin değerleri.....	35
Tablo 4.6: 0 CuZn 05 kodlu numunenin değerleri.....	36
Tablo 4.7: 45 CuZn 01 kodlu numunenin değerleri.....	37
Tablo 4.8: 45 CuZn 02 kodlu numunenin değerleri.....	38
Tablo 4.9: 45 CuZn 03 kodlu numunenin değerleri.....	39
Tablo 4.10: 45 CuZn 04 kodlu numunenin değerleri.....	40
Tablo 4.11: 45 CuZn 05 kodlu numunenin değerleri.....	41
Tablo 4.12: 90 CuZn 01 kodlu numunenin değerleri.....	42
Tablo 4.13: 90 CuZn 02 kodlu numunenin değerleri.....	43
Tablo 4.14: 90 CuZn 03 kodlu numunenin değerleri.....	44
Tablo 4.15: 90 CuZn 04 kodlu numunenin değerleri.....	45
Tablo 4.16: 90 CuZn 05 kodlu numunenin değerleri.....	46
Tablo 4.17: 0 DKP 01 kodlu numunenin değerleri.....	47
Tablo 4.18: 0 DKP 02 kodlu numunenin değerleri.....	48
Tablo 4.19: 0 DKP 03 kodlu numunenin değerleri.....	49
Tablo 4.20: 0 DKP 04 kodlu numunenin değerleri.....	50
Tablo 4.21: 0 DKP 05 kodlu numunenin değerleri.....	51
Tablo 4.22: 45 DKP 01 kodlu numunenin değerleri.....	52
Tablo 4.23: 45 DKP 02 kodlu numunenin değerleri.....	53
Tablo 4.24: 45 DKP 03 kodlu numunenin değerleri.....	54
Tablo 4.25: 45 DKP 04 kodlu numunenin değerleri.....	55
Tablo 4.26: 45 DKP 05 kodlu numunenin değerleri.....	56
Tablo 4.27: 90 DKP 01 kodlu numunenin değerleri.....	57

Tablo 4.28: 90 DKP 02 kodlu numunenin değerleri.....	58
Tablo 4.29: 90 DKP 03 kodlu numunenin değerleri.....	59
Tablo 4.30: 90 DKP 04 kodlu numunenin değerleri.....	60
Tablo 4.31: Çekme numunesinin lleri.....	62
Tablo 5.1: ASTM yöntemi ile hesaplanan pekleşme üsteli, kopma uzaması ve maksimum yükteki uzama değerleri.....	66
Tablo 5.2: ASTM ve Reihle metoduna göre yapılan deneylerden elde edilen pekleşme üsteli, kopma uzaması ve maksimum yükteki uzama değerleri.....	66

SİMGELER

σ	:Gerçek gerilme
σ_n	:Nominal gerilme (mühendislik gerilmesi)
σ_{\max}	:Maksimum gerilme
$\Delta\sigma$:Gerilme farkı
ε	:Gerçek birim şekil değişimi
e	:Nominal birim şekil değişimi (mühendislik birim şekil değişimi)
l	:Son ölçü boyu
l_0	:İlk ölçü boyu
b_0	:İlk ölçü genişliği
b_1	:Son ölçü genişliği
e_0	:İlk ölçü kalınlığı
e_1	:Son ölçü kalınlığı
d_0	:Disk ilk ölçü çapı
d	:Disk son ölçü çapı
h_0	:Disk ilk ölçü yüksekliği
h	:Disk son ölçü yüksekliği
ρ_0	:İlk şişirme yarı çapı
ρ	:Son şişirme yarı çapı
n	:Pekleşme üsteli
K	:Mukavemet katsayısı
F	:Kuvvet
F_{\max}	:Maksimum kuvvet
p	:İç basınç

Kısaltmalar

ASTM :American Society for Testing Materials
AISI :American Iron and Steel Institute

METALLERDE PEKLEŞME ÜSTELİNİN SÜNEKLİĞE ETKİSİ

Ersin Asım GÜVEN

Anahtar Kelimeler: Pekleşme, pekleşme üsteli, süneklik

ÖZET: Bu çalışmada metal ve alaşımlarının pekleşme karakterlerini inceleyebilmek için gerekli olan ve deneysel olarak elde edilen gerçek gerilme gerçek şekil değişimi grafiklerindeki değerlere çok yakın sonuçlar veren, bazı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ampirik ifadelerden en çok kullanılanlardan biri olan Holloman tarafından 1945 yılında geliştirilmiş “Holloman Denklemi” üzerinde deneysel olarak çalışılarak farklı malzemeler için pekleşme üsteli değerleri bulunmuştur. Pekleşme üsteli ile malzemelerin süneklikleri arasındaki ilişki incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan malzemelerin pekleşme üsteli değerlerinin belirlenmesinde iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerden biri REIHLE, M. (1961)’nin önerdiği yöntemdir. Bu yöntem çekme deneyi öncesi ve sonrasında çekme numunelerinin en ve kalınlıklarının ölçümüne dayalıdır. Diğer yöntem ise ASTM tarafından geliştirilen ASTM E 646 – 00 test yöntemidir. Bu yöntem çekme deneyinde sürekli olarak kaydedilen yük ve uzama bilgilerinin kullanıldığı bir yöntemdir.

Bu çalışmada, bir çok araştırmacı tarafından yapıldığı gibi, haddeleme doğrultusuna paralel olan eksene sahip çekme numuneleri kullanılmıştır. Ayrıca saç şekillendirme işlemlerinden en sık kullanılanlardan biri olan bükme göz önüne alındığında bükme kıvrımının levhanın haddeleme doğrultusuna dik olması gerekirken zorunluluk nedeniyle bu doğrultuyla 45° açı yapacak şekilde hatta haddeleme doğrultusuna paralel bükümler yapıldığı bilinmektedir. Bu işlemde de pekleşme üsteli ve süneklik oldukça önemli bir etkidir. Literatür taramasında bu doğrultularda inceleme yapılmamış olduğu belirlendiği için, deneylerde kullanılacak olan çekme numuneleri haddeleme doğrultusuna paralel, dik ve bu doğrultuyla 45° açı yapacak şekilde hazırlanmıştır.

Tüm çekme deneyleri Reihle ve ASTM ‘nin önerdiği gibi oda sıcaklığında ve 5 mm/dk sabit hızda gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kendi alt başlıkları olan altı bölümden oluşmaktadır. Bunlar;

1. Giriş : Bu bölümde kısaca pekleşme ve pekleşme üstelinin şekillendirme bakımından önemi açıklanmış, geçmiş yıllarda geliştirilmiş olan ampirik bağıntılar derlenmiştir.
2. Literatür Çalışması: Bu bölümde araştırmacıların konu üzerinde yapmış oldukları çalışmaları ve elde ettikleri sonuçlar özetlenmiştir.
3. Malzeme: Bu bölümde deneylerde kullanılan malzemeler hakkında bilgi verilmiştir.

4. Deneysel Çalışmalar: Bu bölümde çalışmada yapılan deneyler ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiştir.
5. Bulgular : Bu bölümde deneylerden elde edilen sonuçlar ışığında çizilmiş diyagramlar ve yorumları bulunmaktadır.
6. Sonuçlar: Bu bölümde çalışmada elde edilen tüm sonuçlar maddeler halinde verilmiştir.

THE EFFECT OF STRAIN HARDENING EXPONENT ON DUCTILITY OF METALS

Ersin Asım GÜVEN

Keywords: Strain hardening, strain hardening exponent, work hardening, work hardening exponent, ductility

ABSTRACT: In this study, in order to analyze the strain hardening behaviour and achieve the strain hardening exponents of many materials, one of the most suitable and frequently used empirical Holloman Equation, which was presented in 1945, was used.

Two different methods were used during the experimental study. One of these methods was presented by REIHLE, M. (1961). This method was based on dimensions of width and thickness of tensile specimens before and after tensile test. The other method was a standard method of ASTM E 646-00, which was based on continuously archived load and strain data of tensile test. The results of tensile tests were evaluated by means of Holloman equation in order to achieve the strain hardening exponents of the materials.

In this work, the tensile tests were conducted with samples which have a parallel axis with rolling directions as suggested by many researches. In sheet metal forming industry bending is frequently using. The bending edge must be perpendicular to rolling direction. On the other hand because of the manufacturing obligations the angle of bending edge and rolling direction realized as 45° and moreover 0° (parallel to the rolling direction). This anisotropic nature makes the modeling of deformation of sheet difficult. In literature there is limited studies were presented about the anisotropic materials.

In this study we used the tensile test samples which have different angles with the rolling directions. The tensile tests were performed at room temperature and constant cross head speed of 5 mm/min was used.

This study is presented as a six section. These sections can be summarized as;

1. Introduction: This part has implies the importance of strain hardening behavior and strain hardening exponent in sheet metal forming and previously invented empirical equations were presented.
2. Literature: In this section the similar studies were presented and their results were discussed.
3. Material: In this section materials are presented, which are used in experimental studies.
4. Experimental Study: In this section the experimental parameters and the standards were presented.
5. Results and Discussions: In this section, the results of experiments were presented and the results are discussed.

6. Conclusions: In this final section the conclusions of the study were presented.

1. GİRİŞ

1.1 Metal ve Metal Alaşımalarında Pekleşme ve Pekleşme Üsteli Kavramı

Metal ve alaşımlarının şekillendirilebilirliği pekleşme davranışlarıyla ilişkilidir[18]. Her hangi bir alaşım için pekleşme üsteli önemli bir parametredir çünkü pekleşme üsteli plastik şekil değişimi esnasında pekleşme kapasitesini belirler.

Örnek olarak endüstride pekleşme üsteli şekillendirme kuvvetinin hesaplanmasında kullanılır. Böylece gerekli motor kapasitesi elde edilir ve makine seçimi yapılabilir. Ayrıca pekleşme üsteli, şekillendirme takım malzemesinin seçiminde kullanıldığı gibi şekillendirme toleranslarında da yarar sağlar. Talaşlı şekillendirme endüstrisinde pekleşme üsteliyle malzemenin talaşlı şekillendirme kabiliyeti hesaplanır. Büyük pekleşme üsteli talaşlı şekillendirmede problem yaratır, çünkü takım malzeme üzerine bastığında malzeme sertleşir[24].

Pekleşme ve iyileştirme metallerde plastik şekil değişimini yöneten önemli bir mekanizmadır. Dislokasyon etkileşimi, plastik şekil değişimi esnasında kristalin dayanımını arttırdığı gibi, daha sonraki şekil değişim direncini yükseltir.

Diğer yandan, toparlanma* ve yüksek sıcaklıkta tane sınırı kayması fiziksel özelliklerin, şekil değişiminden önceki değerleri almasını sağlar . Böylece pekleşme etkisi dengelenir. Pekleşme ve toparlanma arasındaki bu denge kararlı plastik deformasyon sonucuyla oluşur. Bu kararlı plastik deformasyon da metal alaşımının sünekliğini geliştirir [5,23].

Her hangi bir metal malzemenin gerçek gerilme gerçek şekil değiştirme eğrisinde pekleşme, pekleşme hızı ile açıklanabilir. Pekleşme hızı[13,6];

* İngilizce “recovery” karşılığı kullanılmıştır.

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = nK\varepsilon^{n-1} \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilir. Bu değer gerçek gerilme gerçek şekil değiştirme eğrisinin eğimidir. Şekil değişimi esnasında gerçekleşen pekleşme miktarı ise her hangi iki şekil değiştirmeye (ε_1 ve ε_2) karşılık gelen gerilmelerin farkıdır. Özetle pekleşme miktarı:

$$\Delta\sigma = (\sigma_{\varepsilon_2} - \sigma_{\varepsilon_1}) \quad (1.2)$$

dır. Fakat günümüzde sahip olduğumuz bilgisayar teknolojisi olmadan, gerçek gerilme gerçek şekil değiştirme eğrilerini kullanarak yukarıda bahsedilen pekleşme parametrelerini elde etmek ve başka malzemelerle karşılaştırmak oldukça zordur. Bu sebeple birçok araştırmacı deneysel olarak elde edilen gerçek gerilme - gerçek şekil değiştirme eğrilerine çok uyan bazı ampirik denklemler geliştirmişlerdir[5,18,2].

Holloman tarafından 1945 yılında geliştirilen ve en sık kullanılan denkleme göre gerçek gerilme ile gerçek şekil değiştirme arasında

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1.3)$$

bağıntısı mevcut olup, K birimi gerilme ile aynı olan mukavemet katsayısı, n ise birimsiz bir sayı olan pekleşme üstelidir. Benzer şekilde Ludwig tarafından

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (1.4)$$

Ludwigson tarafından

$$\sigma = K\varepsilon^n + \exp(K_1 + n_1\varepsilon) \quad (1.5)$$

Swift tarafından

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + K\sigma^n \quad (1.6)$$

ve Voce tarafından

$$\sigma = \sigma_s - K \exp(n\varepsilon) \quad (1.7)$$

ifadeleri geliştirilmiştir.

Holloman bağıntısına göre n pekleşme üsteli değeri, Dieter [6] ve Marin' e [13] göre

$$n = \frac{d(\log \sigma)}{d(\log \varepsilon)} \quad (1.8)$$

bağıntısıyla açıklanır. Ayrıca deneyde ölçülen maksimum kuvvette elde edilen gerçek şekil değiştirme ε , pekleşme üsteli n' e eşittir[5,2,12].

$$\varepsilon = n \quad (1.9)$$

Bu ifade aşağıdaki şekilde ispatlanabilir.

Çekme kuvveti F , gerçek birim uzama ε , yükün uygulandığı alan A ve gerçek gerilme σ ise;

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = \frac{d}{d\varepsilon}(\sigma A) = A \frac{d\sigma}{d\varepsilon} + \sigma \frac{dA}{d\varepsilon} \quad (1.10)$$

Çekme çubuğunun ölçü boyu arasındaki hacim $V=Al$ sabit kaldığı kabul edilirse

$$\frac{dV}{d\varepsilon} = \frac{d}{d\varepsilon}(Al) = l \frac{dA}{d\varepsilon} + A \frac{dl}{d\varepsilon} = 0 \quad (1.11)$$

$d\varepsilon$ yerine dl/l konduğu takdirde,

$$l \frac{dA}{d\varepsilon} + A \frac{dl}{dl/l} = 0 \quad (1.12)$$

$$\frac{dA}{d\varepsilon} = -A \quad (1.13)$$

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = A \frac{d\sigma}{d\varepsilon} - A\sigma \quad (1.14)$$

Çekme kuvveti maksimum olduğu anda $dF/d\varepsilon = 0$ olur,

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \quad (1.15)$$

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1.16)$$

ise

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = Kn\varepsilon^{n-1} = \sigma = K\varepsilon^n \quad (1.17)$$

$$\varepsilon = n \quad (1.18)$$

Böylece maksimum yükteki gerçek şekil değiştirme bulunarak pekleşme üsteli olan n değeri hesaplanabilir.

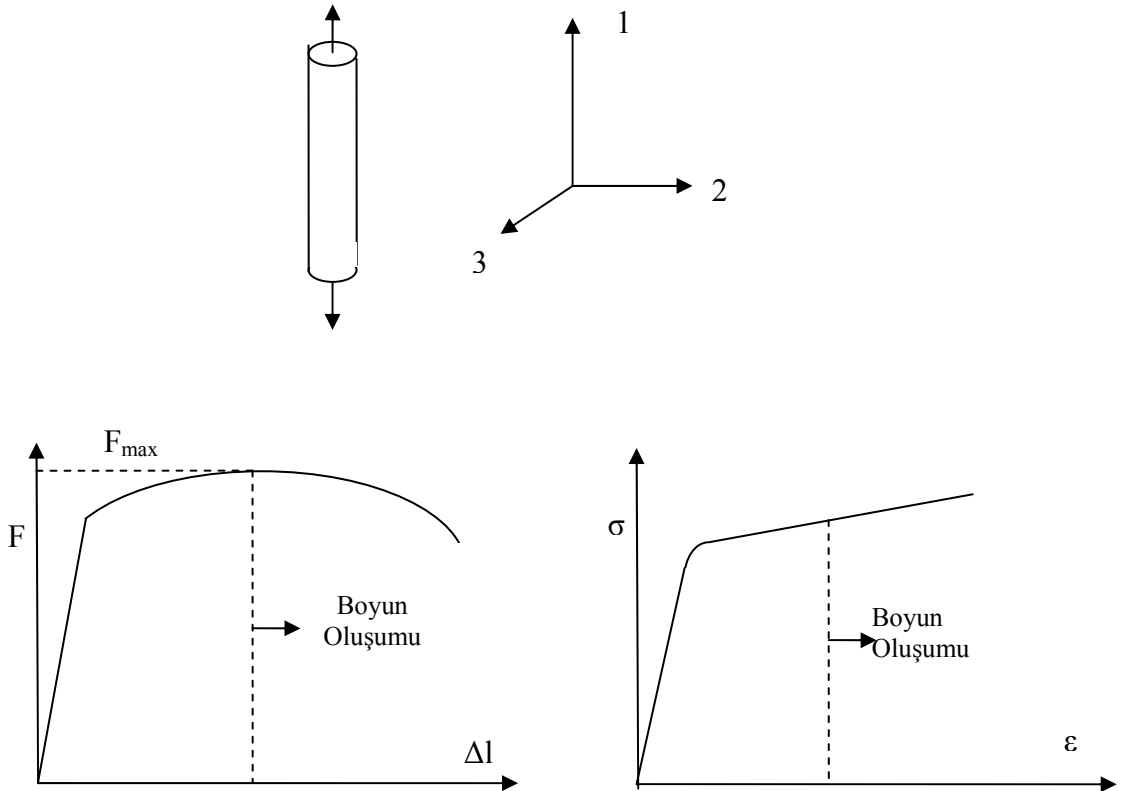
1.2 Pekleşme Özelliklerini Belirleme Metotları

Malzemelerin pekleşme özellikleri deneysel olarak belirlenebilir. Bu amaçla yapılacak deneyin tipi, malzemenin gerçekte kullanılan boyutları ve şekil verme tipi göz önüne alınarak karşılaştırılmalı.

1.2.1 Basit çekme deneyi

Burada çekme deneyi kabulleri verilmekte ve sonuç olarak eşdeğer gerilme ve eşdeğer şekil değiştirme terimleri çekme yönündeki ölçülebilir parametreler cinsinden ifade edilmektedir.

Şekil 1.1’de görüldüğü gibi çekme yönü (1) ile gösterilmiştir. Asal doğrultular 1, 2 ve 3 eksenleriyle çakışıktır.



Şekil 1.1: Yük-uzama ile gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramları[21]

İlk etapta çekme deneyindeki gerilme ve şekil değişimi durumu belirlenmelidir;

Gerçek çekme gerilmesi

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} \quad (1.19)$$

(2) ve (3) doğrultularında

$$\sigma_2 = 0 \quad (1.20)$$

$$\sigma_3 = 0 \quad (1.21)$$

dır. Çekim doğrultularında gerçek birim uzama

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1.22)$$

(2) ve (3) doğrultularında ise gerçek birim şekil değiştirmeler sırasıyla

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{b}{b_0} \quad (1.23)$$

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{e}{e_0} \quad (1.24)$$

şeklinde ifade edilir.

Levy-von Mises denklemleri, plastisitede, elastik şekil değiştirme bileşenini ihmal ederek, asal gerilmelerle asal şekil değiştirmeler arasında bağıntıları verirler

$$d\varepsilon_1 = \frac{2}{3} d\lambda \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right] \quad (1.25)$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{2}{3} d\lambda \left[\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right] \quad (1.26)$$

$$d\varepsilon_3 = \frac{2}{3} d\lambda \left[\sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (1.27)$$

$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ alınarak Levy-von Mises denklemlerinde çekme deneyi için;

$$d\varepsilon_1 = \frac{2}{3}d\lambda(\sigma_1) \quad (1.28)$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{2}{3}d\lambda\left(-\frac{1}{2}\sigma_1\right) \quad (1.29)$$

$$d\varepsilon_3 = \frac{2}{3}d\lambda\left(-\frac{1}{2}\sigma_1\right) \quad (1.30)$$

elde edilir. Buradan;

$$\frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_2} = -2 \quad (1.31)$$

$$\frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_3} = -2 \quad (1.32)$$

ve

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 \quad (1.33)$$

bulunur. Benzer şekilde efektif gerilmenin;

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2\right]^{1/2} \quad (1.34)$$

ifadesinde de çekme deneyi için $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ alınarak

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 \quad (1.35)$$

elde edilir.

Çekmede efektif şekil değiştirmeyi bulmak için, (1.31) ve (1.32) numaralı eşitlikler efektif şekil değiştirmenin;

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3)^2 \right]^{1/2} \quad (1.36)$$

ifadesine taşınır;

$$d\bar{\varepsilon} = d\varepsilon_1 \quad (1.37)$$

elde edilir.

Denklem (1.19) ve (1.35) ten

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 = \frac{F}{A} \quad (1.38)$$

ifadesine ulaşılır.

Hacim sabitliğinden

$$V = A_0 l_0 = Al \quad (1.39)$$

ve buradan

$$\frac{l}{l_0} = \frac{A_0}{A} \quad (1.40)$$

elde edilir.

Dolayısıyla Denklem (1.37) ve (1.40) tan

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_0} = \frac{A_0}{A} \quad (1.41)$$

elde edilir.

Denklem (1.38) ve (1.41)de elde edilen sonuçlar çekme deneyi için efektif gerilmenin çekme yönündeki gerçek gerilme değerine, efektif şekil değiştirmenin ise çekme yönündeki gerçek şekil değiştirme değerine eşit olduğunu ortaya koymaktadır. Deney sırasında elde edilen ölçümlerden efektif gerilme-efektif şekil değiştirme diyagramı çizilmelidir.

1.2.2 Basma deneyi

Birçok plastik şekil verme yönteminde iş parçası basma kuvvetlerinin etkisinde olmasına rağmen basma deneyi çekme deneyi kadar geniş uygulama alanına sahip değildir. Sürtünme sebebiyle oluşan fiçilaşma (Şekil1.2) basma deneyini ve ilgili hesaplamaları güçleştirir. Dolayısıyla gerilme ve şekil değişimleri üniform değildir. Bu deneyde h_0 yüksekliğinde ve d_0 çapındaki silindirik deney örneğine basma kuvveti uygulanır. Herhangi bir anda gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme

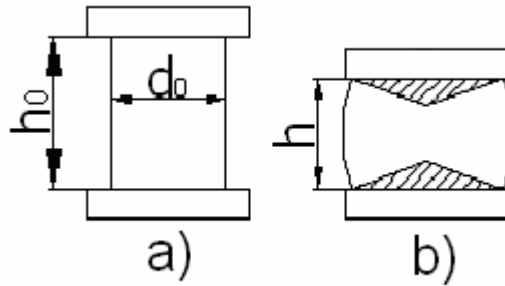
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.42)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{h}{h_0} \quad (1.43)$$

şeklinde hesaplanır.

Cook ve Larke tarafından çalışılan ve daha sonra Watts ve Ford tarafından geliştirilen bir yöntem bu deneyde gerilme şekil değişimi verisi toplama açısından iyi bir metottur. Bu yöntemde eşit çaplarda ve değişik boylarda deney parçaları kullanılır. Çap ve boylar için koşul;

$$0,5 < \frac{d_0}{h_0} < 3 \text{ olmalıdır.}$$



Şekil 1.2: a) Basma deneyi ve b) fiçilaşma oluşumu[21]

Deney prosedürü şu şekildedir:

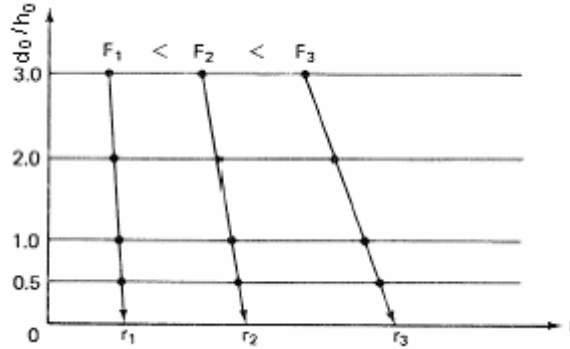
- Silindirler eş çaplı fakat değişik boylardadır.
- Parçaların uçları yağlanmalıdır.
- Belirli bir değere kadar yük uygulanır.
- Yük kaldırılarak boy ölçülür.
- Yukarıda belirtilenler artan yükte tekrar uygulanır.
- Belirli bir yük için boydaki azalma $\left(r = \frac{h_0 - h}{h_0} \right)$ ile numunenin $\frac{d_0}{h_0}$ oranına göre diyagram çizilir.
- Noktalardan geçen çizgi $\frac{d_0}{h_0} = 0$ 'a kadar uzatılır.

Şekil 1.3'de bu şekilde yapılan deney sonuçları verilmiştir. Yatay ekseninde belirtilen r boydaki azalma için kullanılmıştır. Şekil değiştirme ile r arasındaki ilişki

$$|\varepsilon| = \ln\left(\frac{1}{1-r}\right) \quad (1.44)$$

denkleminde bulunur.

- Belli sayıdaki nokta kullanılarak eşdeğer gerçek gerilme-eşdeğer gerçek şekil değişimi ($\sigma - \varepsilon$) eğrisi çizilir.

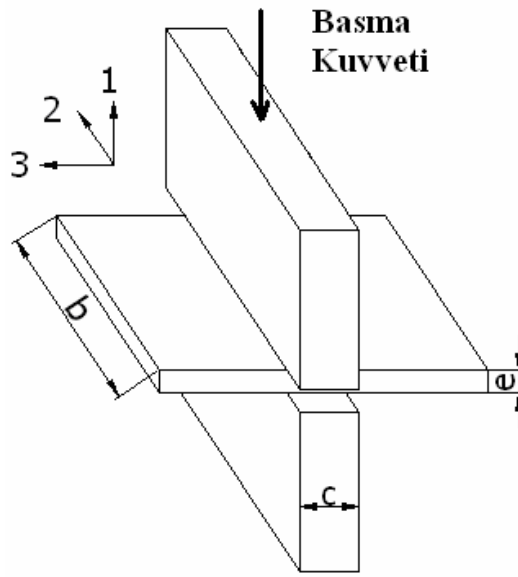


Şekil 1.3: Basmada Watt ve Ford Metodu [21]

Sünek metallerde çekme ve basmada efektif gerilme-efektif şekil değiştirme eğrileri çakışmıştır[5]. Bu eğrilerin çakışmaması halinde Bauschinger etkisi vardır. Bu durumda basmada, çekmeye kıyasla daha büyük şekil değişimleri elde edilir.

1.2.3 Basmada düzlemsel şekil değişimi

Özellikle levha malzemelere uygulanan bu deneyde özel kalıpların kullanılması gerekir. Kalıpların şematik görüntüsü ve asal doğrultular şekil 1.4 'te verilmiştir. Bu deneyin uygulanabilmesi için $\frac{b}{c} > 6$ ve $2 < \frac{c}{e} < 4$ sağlanmalıdır. Bu durumda (2) nolu yönde sürtünmeler nedeniyle şekil değişimi engellenir. Bu sebeple şekil değişimi (1) ve (3) nolu yönlerde olur yani şekil değişimi düzlemseldir



Şekil 1.4: Basmada düzlemsel şekil değişimi[21]

Denyde gerilme ve şekil değiştirme değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\sigma_1 = \frac{F}{bc} \quad (1.45)$$

$$\sigma_3 = 0 \text{ (Dar kalıplar için kabul edilebilir)} \quad (1.46)$$

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{e}{e_0} \quad (1.47)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{b}{b_0} = 0 \text{ (Düzlemsel şekil değişimi kabulünden)} \quad (1.48)$$

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1.49)$$

Hacim sabitliğinden

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (1.50)$$

olması nedeniyle

$$\varepsilon_3 = -\varepsilon_1 \text{ bulunur.} \quad (1.51)$$

Levy-von Mises denklemleri aşağıdaki şekildedir:

$$d\varepsilon_1 = \frac{2}{3}d\lambda \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right] \quad (1.52)$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{2}{3}d\lambda \left[\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right] \quad (1.53)$$

$$d\varepsilon_3 = \frac{2}{3}d\lambda \left[\sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (1.54)$$

Bu ifadelerde, Denklem (1.46) dan $\sigma_3 = 0$ alınırsa

$$d\varepsilon_1 = \frac{2}{3}d\lambda \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2) \right] \quad (1.55)$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{2}{3}d\lambda \left[\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_2) \right] = 0 \quad (1.56)$$

$$d\varepsilon_3 = \frac{2}{3}d\lambda \left[-\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (1.57)$$

elde edilir. Denklem (1.53) ten

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}\sigma_1 \quad (1.58)$$

$$\frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_3} = -1 \quad (1.59)$$

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 \quad (1.60)$$

elde edilir. Efektif gerilmenin

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right]^{1/2} \quad (1.61)$$

ifadesine Denklem (1.46) ve (1.59) taşınırsa

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_1 \quad (1.62)$$

elde edilir.

Efektif şekil değişimini bulmak için ise (1.48) ve (1.60) numaralı eşitlikler aşağıdaki eşdeğer şekil değişimi denklemine yerleştirilerek

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3)^2 \right]^{1/2} \quad (1.63)$$

sonuç olarak

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} d\varepsilon_1 \quad (1.64)$$

elde edilir.

Denklem (1.45) ve (1.62) vasıtasıyla;

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{F}{bc} \quad (1.65)$$

ifadesine ulaşılır.

Denklem (1.47) ve (1.64) vasıtasıyla

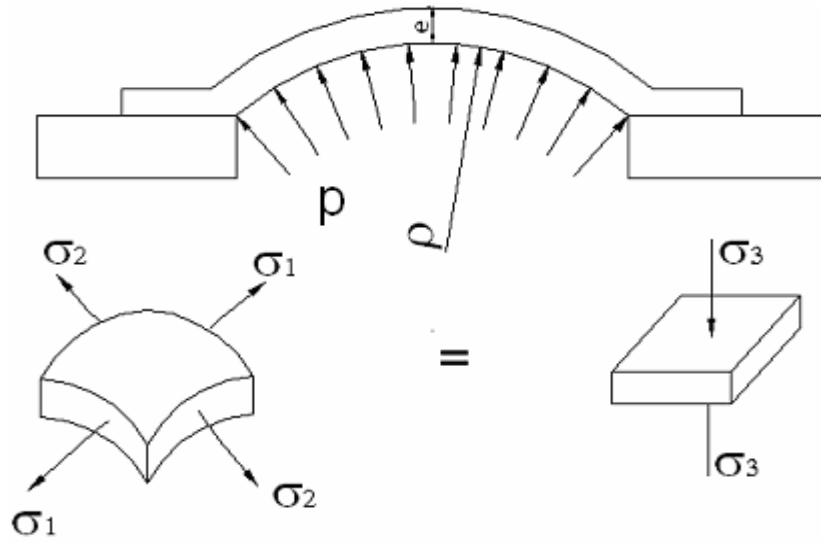
$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{e}{e_0} \quad (1.66)$$

elde edilir.

Denklem (1.65) ve (1.66) de elde edilen sonuçlar basmada düzlemsel şekil değişimi için efektif gerilme ve efektif şekil değişimi değerlerini basma yönündeki parametrelerle ilişkilendirmektedir. Deney sırasında elde edilen ölçümlerden efektif gerilme-efektif şekil değişimi diyagramı çizilmelidir.

1.2.4 Hidrolik şişirme deneyi (İki eksenli çekme)

Bu deneyde dairesel ince bir sac çevresi civarından tutturulur ve içten artan miktarda akışkan basıncına tabi tutulur. Basınç arttıkça sacın orta kısmı şişerek yaklaşık küresel bir şekil alır



Şekil 1.5: Hidrolik şişirme deneyi[21]

Gerilme ve şekil değiştirme ifadeleri aşağıda verilmiştir:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{p\rho}{2e} \quad (1.67)$$

$$\sigma_3 = 0 \quad (1.68)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \ln \frac{\rho}{\rho_0} \quad (1.69)$$

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{e}{e_0} \quad (1.70)$$

Denklem (1.67) ve (1.68) Levy-von Mises denklemlerine yerleştirilirse

$$d\varepsilon_1 = \frac{2}{3} d\lambda \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_1) \right] = \frac{2}{3} d\lambda \frac{1}{2}(\sigma_1) \quad (1.71)$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{2}{3} d\lambda \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_1) \right] = \frac{2}{3} d\lambda \frac{1}{2}(\sigma_1) \quad (1.72)$$

$$d\varepsilon_3 = \frac{2}{3} d\lambda \left[-\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_1) \right] = \frac{2}{3} d\lambda (-\sigma_1) \quad (1.73)$$

ve bu denklemlerden de

$$d\varepsilon_3 = -2d\varepsilon_1 = -2d\varepsilon_2 \quad (1.74)$$

elde edilir. Denklem (1.67) ve (1.68) aşağıdaki efektif gerilme denklemine taşınırsa;

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right]^{1/2} \quad (1.75)$$

sonuç olarak;

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 \quad (1.76)$$

elde edilir. Efektif şekil değiştirmeyi bulmak için ise (1.74) numaralı eşitlik aşağıdaki efektif şekil değiştirme denklemine yerleştirilir

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3)^2 \right]^{1/2} \quad (1.77)$$

sonuç olarak;

$$\bar{d\varepsilon} = 2d\varepsilon_1 \quad (1.78)$$

elde edilir.

(1.67) ve (1.76) kullanılarak;

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 = \frac{p\rho}{2e} \quad (1.79)$$

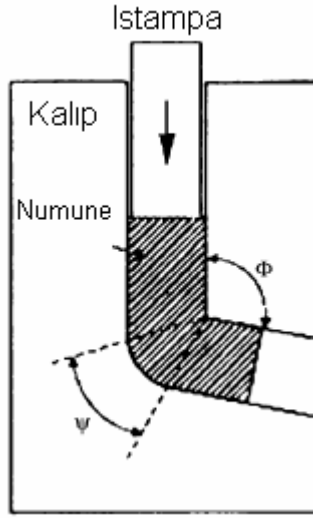
ifadesine ulaşılır. Denklem (1.69) ve (1.78) kullanılarak

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_1 = 2 \ln \frac{\rho}{\rho_0} = \ln \frac{e}{e_0} \quad (1.80)$$

elde edilir. Pratikte ε_1 ve ε_2 ölçümler sonucu elde edilen verilerden hesaplanır. Deney sırasında elde edilen ölçümlerden efektif gerilme-efektif şekil değiştirme diyagramı çizilir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

H.K. Kim ve W.J. Kim 2004 yılında yaptıkları çalışmayla 2024 alüminyum ve AZ31 magnezyum alaşımlarının pekleşme özellikleri incelemek amacıyla silindirik deney örneklerine 693°K 'de 2 saat süreyle katı çözelti tavlaması yapmışlardır.



Şekil2.1:H.K. Kim ve W.J. Kim tarafından yapılan şekillendirme tipinin şeması

Daha sonra numuneleri kalıp içinde, Şekil 2.1 deki gibi şekillendirmişler ve bu şekillendirme sonrasında tane büyüklüklerinin azaldığını gözlemişlerdir. Numuneleri bir de çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. AZ31 numunelerin şekillendirme sonrasında kopma uzaması artarken, 2024 alüminyum numunelerin kopma uzaması azalmıştır. Buna paralel pekleşme üsteli artarken kopma uzamasının da arttığını görmüşlerdir. Sonuçta pekleşme üsteli ve kopma uzaması arasında doğru orantı olduğuna kanaat getirmişlerdir [10].

N. Selvakumar ve R. Narayanasamy 2003 yılında yaptıkları çalışmada gözenekli malzemede pekleşme etkisini incelemek amacıyla % 99,68 saflıkta alüminyum tozlarını 280 MPa basınçta ve 520°C 'de sinterleyerek hazırladıkları disk şeklindeki numunelerle pekleşme üsteli ile şekil değişimleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Çalışmalar sonucunda pekleşme üstellerinin bir maksimum değerden geçerek artan

şekil değişimi ile azaldığı görülmüştür. Aynı şekilde mukavemet katsayıları da bir maksimumdan geçerek, artan şekil değişimi ile belirli bir değere kadar azalır daha sonra sabit kalmıştır [20].

E. Martin, A. Forn ve R. Nogué 2003 yılında yaptıkları çalışmada 2124 alüminyum alaşımına SiC partikül takviyelerin ilavesiyle pekleşme özelliklerinin nasıl değiştiğini incelemek amacıyla %17 SiC içeren silindirik numuneleri önce 505° C'de sinterlemişler daha sonra su verip doğal yaşlandırmaya tabi tutmuşlardır. Numunelere uygulanan çekme deneyi sonucunda takviyeli numunelerin dayanımı takviyesiz numunelere göre yüksek, pekleşme üsteli değerleri ise düşük çıkmıştır. Ayrıca hem takviyeli hem de takviyesiz numunelerin pekleşme üsteli değerleri sıcaklıktaki artışla azalmıştır. Gerçek gerilme ile gerçek birim şekil değiştirme arasında logaritmik koordinatlara çizilen eğride belirgin bir şekilde iki farklı bölge görülmüştür. Bu bölgeler farklı pekleşme üsteli değerlerine karşılık gelmektedir. Büyük ve küçük şekil değiştirmeler için farklı iki pekleşme üstelinin mevcut olduğu görülmüştür [14].

Praveen, Sastry ve Singh 2004 yılında yaptıkları çalışmada Nikel – Demir alaşımında pekleşme davranışlarını incelemişlerdir. Sıcak haddelemiş silindirik numunelerle yaptıkları çekme deneylerini pekleşme karakteristiklerini belirlemek amacıyla geliştirilen Ludwik, Hollomon, Ludwigson, Voce ve Swift denklemlerine değerlendirmişlerdir. Bu denklemlerin farklı ısıl işlemler için hangisinin daha doğru sonuç verdiğini araştırmışlardır. Sonuçta Ludwigson denklemi çözültü tavlama ve 1 saat bekleme süreli aşırı yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulan numunelerde daha doğru sonuç verirken, Ludwig denklemi tepe yaşlanması ve 100 saat bekleme süreli aşırı yaşlanma ısıl işlemi uygulanan numunelerde doğru sonuç vermiştir. Pekleşme hızı-şekil değişimi diyagramlarından, pekleşme hızının artmasıyla şekil değişiminde bir azalma görülmüştür. Pekleşme hızı-logaritmik şekil değiştirme diyagramlarında belirgin olarak üç bölge gözükmektedir. İkinci bölgede çözültü tavlama ve aşırı yaşlandırma için pekleşme hızı artarmış, tepe yaşlandırmasında azalmış ve 100 saatlik aşırı yaşlandırmada sabit kalmıştır [18].

R. Narayansany, T. Ramesh ve K. S. Pandey 2004 yılında yaptıkları çalışmada farklı oranda demir içeren alüminyum ve demir tozu karışımlarını 225 MPa basınçta ve 500° C ‘ de sinterleyerek elde ettikleri disk şeklindeki numunelere 0,01 MN ‘luk adımlarla basma deneyi yapmışlardır. Eksenel gerilme ile mukavemet katsayısı ve pekleşme üsteli hesaplanmıştır. Tek eksenli gerilme halinde %0, %2 ve %4 Fe ilaveli numunelerde pekleşme üsteli değeri bağıl yoğunlukla kararlı bir şekilde artmıştır. Numunelerin en/boy oranındaki artış, numune bünyesindeki porozitenin de miktarını arttırdığı için, n değerini düşürmektedir [17].

S. Nagarjuna, M. Srinivas, K. Balasubramanian ve D. S. Sarma 1998 yılındaki çalışmalarında modülasyonun* pekleşme üsteline etkisi incelemiştir. Deneyleri için bakır titanyum alaşımını ağırlıkça %1,5 3, 4,5 ve 5 Titanyum içerek şekilde hazırlamışlardır. Farklı tane büyüklüğü elde etmek amacıyla farklı sıcaklıklarda çözelti oluşturmuşlardır. Soğuk haddelenmiş silindirik çekme numunelerini haddeleme doğrultusunda, ölçü boyu 25 mm ve çapı 4 mm olacak şekilde hazırlayarak 0,001 s⁻¹ nominal şekil değiştirme hızında çekmişlerdir. %4 ‘ den fazla Ti içeren alaşımdaki küçük ölçekli çökeltme etkisinin hesaptan çıkarılmasını modülasyon olarak tanımlamışlardır. Modülasyonun pekleşme üsteline çok önemli bir etkisinin olmadığını fakat mukavemet katsayısı K ‘nın modülasyon mevcut iken artan Ti miktarına göre arttığını ve modülasyon yok iken ağırlıkça %4 Ti ‘ma kadar şiddetle arttığını bulmuşlardır [15].

J. Yang ve S. K. Putatunda, 2004 yılında yaptıkları çalışmalarında dökme demirde ostemperlemenin pekleşme üsteline etkisini incelemiştir. Bu çalışmada 25,4 mm çapında ve 370 mm boyunda hazırlanan silindirik numunelere tek adımlı ve iki adımlı olmak üzere iki farklı ostemperleme yapmışlardır. Tek adımlı ostemperlemede 927 °C sıcaklıkta 2 saat ostentilemeden sonra 2 saat süreyle farklı sıcaklıklarda (260, 288, 302, 316, 330, 343, 357, 371, 385 ve 400°C) ostemperleme yapılarak havada soğutulmuş. İki adımlı ostemperlemede ise 927°C sıcaklıkta 2 saat ostentilemeden sonra tuz banyosunda 260°C ye hızlı soğutma sonra 2 saat farklı sıcaklıklarda (288, 302, 316, 371, 385 ve 400°C) ostemperleme yapılarak havada

* Modülasyon: Numunenin %4 ‘ten fazla Ti içermesi esnasında küçük ölçekli çökeltme etkisinin göz ardı edilmesi.

soğutulmuştur. Ostemperlemesi biten numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Her iki proseste de artan ostemperleme sıcaklığı pekleşme üstelini azaltmış ve tek adımlı proseste 343 °C de ve iki adımlı proseste 385 °C civarında minimum pekleşme üsteli elde edilmiştir. Genellikle tek adımlıda daha büyük pekleşme üsteli değerleri elde edilmiştir. Pekleşme davranışını da ilgilendiren kritik bir ostemperleme sıcaklığı vardır. Tek adımlı proseste, kritik sıcaklığa kadar artan sıcaklıkla pekleşme üsteli azalır. Kritik sıcaklığın üzerinde artan sıcaklık pekleşme üstelini de arttırır. İki adımlı proseste kritik sıcaklığın üzerinde pekleşme üstelinin değişimi ihmal edilebilecek seviyededir. Bunun sebebi karbürün ara yüzeye çökmesidir. Pekleşme üsteli 0,1 ile 0,19 arasında ostemperleme sıcaklığına bağlıdır. Kritik sıcaklığın altında ferritin hacim yüzdesi pekleşme üzerinde baskın etki yapar. Kritik sıcaklığın üzerinde ise ostenitin hacim yüzdesi baskın hale gelir. Ostenitin martenzite dönüşmesi esnasında şekil değişimi az olur. Ostenitleme sıcaklığı arttıkça malzeme daha fazla sünekleşir. Böylece pekleşme üsteli artar [24].

M.Huang, J. Luo ve B. He 1984 yılında yaptıkları çalışmada farklı su verme ve temperleme sıcaklıklarında az karbonlu çeliklerde pekleşme üstelinin, ikinci fazın artan hacim yüzdesiyle azaldığını belirtmişlerdir.[9]

T. Chang ve W. Guo 1999 yılında yaptıkları çalışmada çatlak ucuna yaklaştıkça pekleşme ve gerilme durumunun nasıl değiştiğini incelemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalar sonucunda, zorlanma faktörlerinin pekleşme üsteli ile olan ilişkisi gözlenmiş ve düzlem gerilme halinde pekleşme üsteli arttıkça zorlanma faktörleri azalmıştır. Düzlem şekil değişiminde de artan pekleşme üsteli zorlanma faktörlerini azaltmıştır. Bu azalma, düzlem gerilme hali ile kıyaslandığında, ihmal edilebilir düzeydedir [3].

T.J. Douthit ve C.J. Van Tyne 2003 yılında yaptıkları çalışmada çelik içerisindeki nitrojen miktarının etkilerini incelemek amacıyla sıcak haddelenmiş ve farklı sıcaklıklarda ısıl işleme tabi tutulmuş levhadan, silindirik çekme numuneleri hazırlayarak farklı sıcaklıklarda çekme deneyine tabi tutmuşlardır. Sonuçta artan sıcaklıkla genelde pekleşme üsteli ve mukavemet katsayısı azalmaktadır. Düşük sıcaklıklarda az nitrojen içeren çelikte pekleşme üsteli büyük, yüksek sıcaklıkta az

nitrojen içeren çelikte küçük pekleşme üsteli hesaplanmıştır. 180 ppm nitrojen içeren çelikte 260°C de en büyük pekleşme üsteli ölçülmüştür. Mukavemet katsayısı da aynı davranışı göstererek benzer sıcaklıklarda maksimum değer almıştır. Sonuçta nitrojen ilavesiyle dayanım artarken süneklik azalmaktadır. Sıcaklık arttıkça dayanım azalmakta ve süneklik artmaktadır [7].

R. Narayanasamy, T. Ramesh ve K.S. Pandey 2005 yılında yaptıkları çalışmada alüminyum demir alaşımında farklı bileşim ve en boy oranındaki pekleşme özelliklerini belirlemek amacıyla farklı oranlarda hazırlanan alüminyum, demir tozu karışımlarını silindirik disk şeklinde sinterleyerek basma deneyine tabi tutmuşlardır. Sonuçta demir içermeyen kompozitte yoğunluk arttıkça, tek eksenli, çok eksenli ve düzlem gerilme durumları için pekleşme üsteli azalmakta ve bu azalma miktarı aynı aralıkta gerçekleşmektedir. %2 demir içeren kompozitte aynı davranış görülmektedir. Mukavemet katsayısı ise % 0 demir içeren kompozitte farklı gerilme durumları için aynı davranışı göstererek bir maksimumdan geçerek azalma eğiliminde iken, %2 demir içermesi halinde bir minimum değerden geçerek artma eğilimindedir. Hem pekleşme üsteli hem de mukavemet katsayısı farklı tane büyüklükleri için ayrı ayrı hesaplanması durumunda ise benzer davranış göstermiştir [16].

Ola Kristensson 2005 yılında yaptığı çalışmada şekillendirme sınır diyagramlarını sayısal olarak ifade etmiş pekleşme üstelinin bu diyagramlara nasıl etkidiğini araştırmıştır. Sonuçta pekleşme üsteli artışıyla şekillendirme sınır diyagramındaki şekillendirilebilirlik sınırının azaldığını fakat diyagramın şekil olarak değişmediğini gözlemiştir [11].

M.B. Toloczko, M.L. Hamilton ve G.E. Lucas 2000 yılında yaptıkları çalışmada çekme deneyi ile ıstampayla delme arasındaki sünekliği karşılaştırmışlardır. Bu çalışma için 0,25 mm kalınlığında farklı alüminyum alaşımlardaki levha 1 mm çapındaki ıstampa ile delinirken, aynı malzemelerden hazırlanan çekme numunelerine de çekme deneyi uygulanmıştır. Deney verileriyle pekleşme üsteli hesaplanmış ve sonuçta pekleşme üsteli ile şekil değişimi arasında doğru orantı olduğu görülmüştür. Ayrıca delme esnasında kayma gerilmesiyle hesaplanan pekleşme üsteli de şekil değişimi ile doğru orantılıdır [22].

Ayrıca sabit n ve K değerleri:

- Oda sıcaklığında yapılan deneylerle Bühler (1965), Wagener (1967), Datsko (1966), Fitzpatrick (1968) tarafından,
- Yüksek sıcaklıklarda yapılan deneylerle Bühler (1965), Wagener (1967), Drobjnak (1970), Parr (1970), Sellars ve Tegart (1972) tarafından,
- Yorulma durumundaki davranışların incelemek için Challenger ve Moteff (1972), Hickerson ve Hertzberg (1972), Krafft (1965), Rowe (1966), Schwalbe ve Macherauch (1971), Schwalbe (1973) tarafından,
- Kırılma tokluğu için Hahn ve Rosenfield (1968), Krafft (1964), Peel ve Forsyth (1973) tarafından,
- Sürünme için Schmidt ve Dietrich (1972), Schmidt ve von den Steinen (1972) tarafından,
- Sertlik için Cahoon (1972) tarafında,
- Sünek kırılma için McLintock (1968) tarafından,
- Metallerin şekillendirilebilirliği bakımından Dillamore (1974), Gren (1971), Hughes ve Page (1971), Kashar (1967), Levy (1970), Painter ve Pearce (1974), Rowe ve Wolstencroft (1970) tarafından araştırılmıştır.

2.1 Çalışmanın Amacı

Yapılan bu çalışma farklı malzemeler için, pekleşme üsteli ile süneklikleri arasında nasıl bir ilişki bulunduğunun incelenmesi amaçlanmıştır. Malzemelerin süneklikleri ile kopma uzamaları arasında doğru orantı bulunması sebebiyle süneklik direk olarak kopma uzaması ve / veya maksimum yükteki uzama şeklinde değerlendirilecektir.

Soğuk haddeleme yöntemiyle elde edilen saç levhaların daha sonraki şekillendirilmesi esnasında farklı doğrultular için farklı kopma uzamaları vermesi sebebiyle tüm malzemelerin haddeleme doğrultusu ile farklı açılarda eksene sahip numunelerin kullanılmasına karar verilmiştir. Farklı doğrultularda alınan numuneler için doğrultular şunlardır;

1. Haddeleme doğrultusu, numune eksenine paralel yönde

2. Haddeleme doğrultusu numune eksine ile 45° açı yapacak Şekilde
3. Haddeleme doğrultusu, numune eksenine dik yönde

Sonuğa hem farklı malzemeler, hem de farklı doğrular için pekleşme üsteli ve süneklik arasında bir bağ kurulması amaçlanmıştır.

3. MALZEME

Deneyleerde, nominal kalınlığı 1mm olan soğuk haddelenmiş DKP, pirinç, alüminyum, 409 paslanmaz çelik ve nominal kalınlığı 1,25 mm olan 430 paslanmaz çelik saçlar kullanılmıştır.

3.1 Alüminyum Deneysel Malzemesi

Kullanılan 1 mm kalınlığındaki alüminyum saç malzemenin mekanik özelliği ve kimyasal analizi aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 3.1: Alüminyum malzemenin mekanik özellikleri

	Çekme Dayanımı MPa	Akma Sınırı MPa	Kopma Uzaması δ_{10}
Alüminyum	110	105	<%6

Tablo 3.2: 1145 alüminyum malzemenin kimyasal standardı

Al	Si + Fe (max)	Cu (max)	Mn (max)
99,45	0,55	0,05	0,05

Tablo 3.3: Alüminyum malzemenin kimyasal analizi

Al				
Al	Si	Fe	Cu	Mn
99,48	0,0530	0,3280	0,0240	0,0040

Kimyasal analiz sonucunda kullanılan alüminyum saçın 1145 alüminyum alaşımı olduğu anlaşılmıştır.

3.2 DKP Çelik Deney Malzemesi

Kullanılan 1 mm kalınlığındaki DKP çelik saç malzemenin mekanik özelliği ve kimyasal analizi aşağıdaki tablolarda vermektedir.

Tablo 3.4: DKP çelik malzemenin mekanik özellikleri

	Çekme Dayanımı MPa	Akma Sınırı MPa	Kopma Uzaması δ_{10}
DKP	330	285	%40

Tablo 3.5 AISI 1005 malzemenin kimyasal standardı

C	Mn	P	S
0,06	0,35	0,04	0,05

Tablo 3.6: DKP çelik malzemenin kimyasal analizi

DKP			
C	Mn	P	S
0,0540	0,2460	0,0110	0,0090

Kimyasal analiz sonucunda kullanılan DKP çelik saçın AISI 1005 olduğu anlaşılmıştır.

3.3 Pirinç Deney Malzemesi

Kullanılan 1 mm kalınlığındaki pirinç saç malzemenin mekanik özelliği ve kimyasal analizi aşağıdaki tablolarda vermektedir.

Tablo 3.7: Pirinç malzemenin mekanik özellikleri

	Çekme Dayanımı MPa	Akma Sınırı MPa	Kopma Uzaması δ_{10}
Pirinç	379	172	%42

Tablo 3.8: C26800 malzemenin kimyasal standardı

Cu	Sn	Pb	Zn	Fe
62,0	0,5	0,2	39,2	0,10

Tablo 3.9: Pirinç malzemenin kimyasal analizi

CuZn				
Cu	Sn	Pb	Zn	Fe
63,610	0,0190	0,0110	36,310	0,0010

Kimyasal analiz sonucunda kullanılan pirinç saçın C26800 bakır alaşımı olduğu anlaşılmıştır.

3.4 409 Paslanmaz Çelik Deney Malzemesi

Kullanılan 1 mm kalınlığındaki 409 paslanmaz çelik saç malzemenin mekanik özelliği ve kimyasal analizi aşağıdaki tablolarda vermektedir.

Tablo 3.10: 409 paslanmaz çelik malzemenin mekanik özellikleri

	Çekme Dayanımı MPa	Akma Sınırı MPa	Kopma Uzaması δ_{10}
Paslanmaz 409	450	240	%22

Tablo 3.11: AISI 409 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal standardı

C	Mn	Si	Cr	P	S	Ti
0,08	1,00	1,00	11,75	0,045	0,045	0,48

Tablo 3.12: 409 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal analizi

409						
C	Mn	Si	Cr	P	S	Ti
0,008	0,470	0,531	11,770	0,022	0,001	0,245

Kimyasal analiz sonucunda kullanılan alaşımın AISI 409 Ferritik Paslanmaz Çelik olduğu anlaşılmıştır.

3.5 430 Paslanmaz Çelik Deney Malzemesi

Kullanılan 1,25 mm kalınlığındaki 430 paslanmaz çelik sac malzemenin mekanik özelliği ve kimyasal analizi aşağıdaki tablolarda vermektedir.

Tablo 3.13: 430 paslanmaz çelik malzemenin mekanik özellikleri

	Çekme Dayanımı MPa	Akma Sınırı MPa	Kopma Uzaması δ_{10}
Paslanmaz 430	480	275	%29

Tablo 3.14: AISI 430 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal standardı

C	Mn	Si	Cr	P	S
0,055	0,379	0,368	16,020	0,025	0,001

Tablo 3.15: 430 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal analizi

430					
C	Mn	Si	Cr	P	S
0,055	0,379	0,368	16,020	0,025	0,001

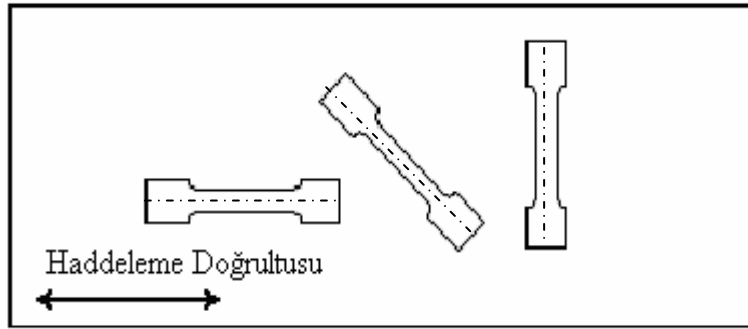
Kimyasal analiz sonucunda kullanılan alaşımın AISI 430 Ferritik Paslanmaz Çelik olduğu anlaşılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kullanılacak farklı özelliklere sahip deney numunelerinin çekme üsteli değerlerinin deneysel olarak elde edilmesi esnasında literatürde karşılaşılan iki farklı deney yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemlerden biri M. Reihle 'nin 1961 [19] yılında yayımlanan makalesini kaynak gösteren L. Çapan'ın doçentlik tezinden [4] alınmıştır. Diğer yöntem ise ASTM 'nin geliştirdiği deney metodudur.

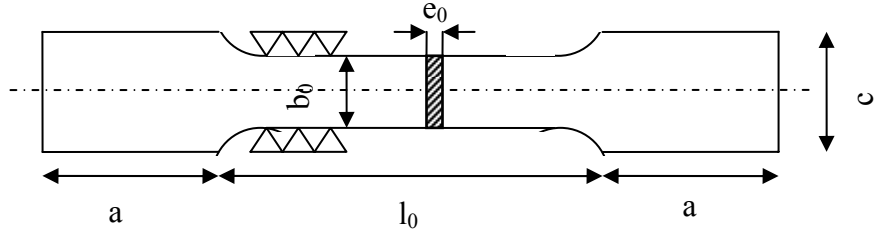
4.1 M. Reihle Metodu

Deney saçından Şekil 4.2 'de görülen çekme deneyi numuneleri soğuk haddelenmiş saçlardan, Şekil 4.1 'de görüldüğü gibi haddeleme doğrultusuna göre 3 farklı doğrultuda olacak şekilde, önce giyotin makasla dikdörtgen şekilde kesilmiştir.



Şekil 4.1: Numunelerin saç üzerindeki konumu

Daha sonra aynı doğrultuda kesilen parçalar bir arada olacak şekilde frezeyle sabitlenip, standardın önerdiği boyutlarda talaş kaldırarak hazırlanmıştır. Tüm numunelerde, nominal değeri $b_0 = 15$ mm olan kısmı üzerinde, 10 mm aralıklarla işaretlenen 12 farklı noktada e_0 saç kalınlıkları ve b_0 enleri ölçülerek kaydedilmiştir.

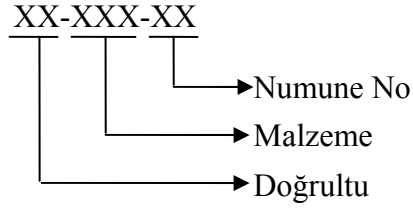


Şekil 4.2: Çekme numunesi [4,19]

Tablo 4.1: Çekme numunesinin ölçüleri[4,19]

b_0 (mm)	e_0 (mm)	l_0 (mm)	c (mm)	a (mm)
15	1	165	20	50

Numunelerin birbirleri ile karışmasını önlemek amacıyla her bir numuneye şekil 4.3 de gösterildiği gibi kodlama yapılmıştır.



Şekil 4.3: Numune kodlaması

Doğrultuyu gösteren kodlar 0, 90 ve 45 şeklindedir. Burada 0 numune ekseninin haddeleme doğrultusuna paralel, 90 numune ekseninin haddeleme doğrultusuna dik ve 45 ise numune ekseninin haddeleme doğrultusuyla 45° açı yapacak şekilde hazırlandığını göstermektedir.

Tüm hazırlıkları biten çekme numuneleri Dartec marka 600 kN kapasiteli universal çekme makinesinde, çekme hızı sabit 5 mm/dk olacak şekilde çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deney esnasında uygulanan çekme kuvveti load-cell tarafından kaydedilirken, şekil değiştirme değerleri ise LVDT yardımıyla ölçülmüştür. Deney esnasında güncel olarak çizilen yük – şekil değiştirme grafiğini daha hassas bir şekilde elde edebilmek amacıyla 600kN yerine 60 kN kapasiteli load-cell kullanılmasına karar verilmiştir.

Her numunenin çekme deneyinde, uygulanan kuvvette ve malzemenin gösterdiği şekil değişimine göre deney esnasında bilgisayar yardımıyla çizilen grafiklerde, deney gidişatına uygun olmayan bir azalma görüldüğünde, aynı zamanda da numune üzerinde bir boyun oluşumu fark edildiğinde uygulanan kuvvetin, maksimum kuvvet (F_{max}) olduğuna kanaat getirilerek deney sonlandırılıp yük boşaltılmıştır.

Çekme makinesinden çıkartılan numunede daha önce 12 farklı noktadan alınan e_0 ve b_0 değerleri tekrar ölçülerek e_1 ve b_1 olarak kaydedilmiştir.

Kaydedilmiş olan ölçüler ve maksimum kuvvet yardımıyla, n pekleşme üsteli değerine şu şekilde ulaşılmaktadır.

Çekme deneyi uygulanmadan önceki numune kesiti;

$$A_0 = e_0 b_0 \quad (4.1)$$

Çekme deneyi sonrasında numune kesiti ise

$$A_1 = e_1 b_1 \quad (4.2)$$

dir. Çekme kuvvetinin maksimum olduğu noktada;

$$\bar{\varepsilon} = n \quad (4.3)$$

ve

$$\bar{\varepsilon} = \ln(A_0 / A_1) \quad (4.4)$$

olduğuna göre, pekleşme üsteli

$$n = \ln(A_0 / A_1) \quad (4.5)$$

dır. Mukavemet katsayısı ise, σ_{max} sacın çekme dayanımı olmak üzere

$$K = \sigma_{max} (e/n)^n \quad (4.6)$$

* Bu formülde kullanılan “e”, numune kalınlığından ve nominal şekil değişiminden farklı olup değeri 2,71828... olan e sayısıdır..

denklemiyle hesaplanır.

Beş çekme deneyi haddeleme doğrultusunda, beş çekme deneyi haddeleme doğrultusuna dik doğrultuda ve beş çekme deneyi haddeleme doğrultusuyla 45° açı yapan doğrultuda yapılarak sonuçlar tablolar halinde verilmiştir. Ortalama n ve K değerleri her üç doğrultu için bulunduktan sonra, deney saçı malzemesinin pekleşme üsteli

$$n = \frac{1}{4}(n_0 + 2n_{45} + n_{90}) \quad (4.7)$$

mukavemet katsayısı ise

$$K = \frac{1}{4}(K_0 + 2K_{45} + K_{90}) \quad (4.8)$$

formüllerinden hesaplanır.

Hesaplamalar esnasında maksimum yük uygulandığında görülen boyun bölgelerinde şekil değişimi üniform değerden çok farklı olduğu için bu bölgeye denk gelen ölçümler hesaba katılmamıştır. Ayrıca çekme numunelerinin çekme çenelere yakın yerlere gelen ölçümler ise şekil değişimine yeterince katılmadıkları gerekçesiyle bazı numunelerde hesaplama katılmamıştır.

4.1.1 M.Reihle yöntemi değerler listesi

Tablo 4.2: 0 CuZn 01 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,914	1,032	15,3912	12,179	0,846	10,3034	1,4938		4,839	0,312	
2	14,971	1,032	15,4501	12,824	0,866	11,1056	1,3912	0,3302			0,626
3	15,092	1,038	15,6655	13,029	0,881	11,4785	1,3648	0,3110			0,613
4	15,064	1,024	15,4255	13,184	0,891	11,7469	1,3132	0,2724			0,584
5	15,090	1,020	15,3918	13,336	0,900	12,0024	1,2824	0,2487			0,566
6	15,098	1,024	15,4604	13,366	0,902	12,0561	1,2824	0,2487			0,566
7	15,120	1,034	15,6341	13,534	0,911	12,3295	1,2680	0,2375			0,557
8	15,126	1,032	15,6100	13,476	0,904	12,1823	1,2814	0,2479			0,565
9	15,099	1,032	15,5822	13,435	0,903	12,1318	1,2844	0,2503			0,567
10	15,078	1,024	15,4399	13,366	0,903	12,0695	1,2792	0,2463			0,564
11	15,052	1,028	15,4735	13,301	0,902	11,9975	1,2897	0,2544			0,570
12	15,038	1,030	15,4891	13,273	0,907	12,0386	1,2866	0,2520			0,568

Tablo 4.3: 0 CuZn 02 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	15,066	1,028	15,4878	13,405	0,854	11,4479	1,3529		4,830	0,311	
2	15,122	1,033	15,6210	13,573	0,862	11,6999	1,3351	0,2890			0,595
3	15,096	1,035	15,6244	13,627	0,874	11,9100	1,3119	0,2715			0,582
4	15,177	1,025	15,5564	13,633	0,874	11,9152	1,3056	0,2667			0,578
5	15,097	1,031	15,5650	13,732	0,876	12,0292	1,2939	0,2577			0,571
6	15,103	1,030	15,5561	13,748	0,884	12,1532	1,2800	0,2469			0,563
7	15,120	1,030	15,5736	13,695	0,880	12,0516	1,2922	0,2564			0,570
8	15,105	1,027	15,5128	13,664	0,876	11,9697	1,2960	0,2593			0,572
9	15,077	1,031	15,5444	13,664	0,878	11,9970	1,2957	0,2590			0,572
10	15,027	1,028	15,4478	13,603	0,878	11,9434	1,2934	0,2573			0,571
11	14,971	1,021	15,2854	13,543	0,873	11,8230	1,2928	0,2568			0,570
12	14,896	1,038	15,4620	13,252	0,858	11,3702	1,3599				

Tablo 4.4: 0 CuZn 03 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,834	1,031	15,2939	12,659	0,862	10,9121	1,4016	0,3376	4,751	0,309	0,625
2	14,87	1,032	15,3458	12,771	0,877	11,2002	1,3701	0,3149			0,610
3	14,910	1,032	15,3871	12,83	0,877	11,2519	1,3675	0,3130			0,608
4	14,937	1,029	15,3702	12,791	0,873	11,1665	1,3764	0,3195			0,613
5	14,940	1,026	15,3284	12,821	0,87	11,1543	1,3742	0,3179			0,612
6	14,957	1,025	15,3309	12,825	0,88	11,2860	1,3584	0,3063			0,604
7	14,969	1,037	15,5229	13,081	0,897	11,7337	1,3229	0,2799			0,584
8	14,970	1,027	15,3742	13,063	0,896	11,7044	1,3135	0,2727			0,579
9	14,942	1,029	15,3753	12,974	0,882	11,4431	1,3436	0,2954			0,596
10	14,927	1,031	15,3897	12,707	0,875	11,1186	1,3841	0,3251			0,617
11	14,903	1,029	15,3352	12,566	0,864	10,8570	1,4125	0,3453			0,631
12	14,885	1,027	15,2869	11,93	0,859	10,2479	1,4917				

Tablo 4.5: 0 CuZn 04 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	15,053	1,034	15,5648	13,033	0,83	10,8174	1,4389		4,650	0,299	
2	15,073	1,022	15,4046	13,374	0,849	11,3545	1,3567				
3	15,089	1,037	15,6473	13,526	0,871	11,7811	1,3282	0,2838			0,569
4	15,116	1,034	15,6299	13,616	0,88	11,9821	1,3044	0,2658			0,556
5	15,121	1,035	15,6502	13,611	0,875	11,9096	1,3141	0,2731			0,561
6	15,120	1,028	15,5434	13,617	0,857	11,6698	1,3319	0,2866			0,571
7	15,116	1,028	15,5392	13,632	0,861	11,7372	1,3239	0,2806			0,566
8	15,085	1,035	15,6130	13,593	0,875	11,8939	1,3127	0,2721			0,560
9	15,075	1,029	15,5122	13,592	0,869	11,8114	1,3133	0,2726			0,561
10	15,014	1,029	15,4494	13,498	0,864	11,6623	1,3247	0,2812			0,567
11	14,952	1,032	15,4305	13,471	0,873	11,7602	1,3121	0,2716			0,560
12	14,879	1,031	15,3402	13,256	0,859	11,3869	1,3472	0,2980			0,579

Tablo 4.6: 0 CuZn 05 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,993	1,034	15,5028	13,082	0,881	11,5252	1,3451		4,752	0,307	
2	15,037	1,028	15,4580	13,268	0,878	11,6493	1,3269				
3	15,076	1,029	15,5132	13,306	0,887	11,8024	1,3144	0,2734			0,576
4	15,111	1,023	15,4586	13,372	0,894	11,9546	1,2931	0,2570			0,564
5	15,136	1,022	15,4690	13,364	0,891	11,9073	1,2991	0,2617			0,567
6	15,133	1,025	15,5113	13,414	0,89	11,9385	1,2993	0,2618			0,567
7	15,127	1,026	15,5203	13,334	0,9	12,0006	1,2933	0,2572			0,564
8	15,081	1,027	15,4882	13,16	0,889	11,6992	1,3239				
9	15,062	1,024	15,4235	13,16	0,891	11,7256	1,3154	0,2741			0,577
10	15,007	1,03	15,4572	13,22	0,896	11,8451	1,3049	0,2662			0,571
11	14,979	1,025	15,3535	13,12	0,898	11,7818	1,3032	0,2648			0,570
12	14,910	1,028	15,3275	12,92	0,882	11,3954	1,3451	0,2964			0,593

Tablo 4.7: 45 CuZn 01 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,807	1,034	15,3104	11,964	0,814	9,7387	1,5721		4,452	0,288	
2	14,876	1,030	15,3223	12,606	0,849	10,7025	1,4317				
3	14,918	1,032	15,3954	12,822	0,856	10,9756	1,4027	0,3384			0,584
4	14,966	1,024	15,3252	13,002	0,868	11,2857	1,3579	0,3060			0,563
5	15,003	1,024	15,3631	13,196	0,88	11,6125	1,3230	0,2799			0,545
6	15,061	1,026	15,4526	13,278	0,884	11,7378	1,3165	0,2750			0,542
7	15,082	1,029	15,5194	13,364	0,892	11,9207	1,3019	0,2638			0,534
8	15,100	1,024	15,4624	13,359	0,891	11,9029	1,2990	0,2616			0,532
9	15,109	1,029	15,5472	13,27	0,883	11,7174	1,3268	0,2828			0,547
10	15,091	1,032	15,5739	13,366	0,895	11,9626	1,3019	0,2638			0,534
11	15,061	1,033	15,5580	13,13	0,863	11,3312	1,3730	0,3170			0,570
12	14,966	1,027	15,3701	12,932	0,855	11,0569	1,3901	0,3294			0,578

Tablo 4.8: 45 CuZn 02 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,684	1,029	15,1098	11,925	0,828	9,8739	1,5303		4,433	0,290	
2	14,719	1,027	15,1164	12,849	0,873	11,2172	1,3476				
3	14,788	1,025	15,1577	13,141	0,889	11,6823	1,2975	0,2604			0,535
4	14,847	1,028	15,2627	13,253	0,897	11,8879	1,2839	0,2499			0,527
5	14,902	1,024	15,2596	13,338	0,902	12,0309	1,2684	0,2377			0,518
6	14,925	1,029	15,3578	13,384	0,904	12,0991	1,2693	0,2385			0,519
7	14,935	1,028	15,3532	13,487	0,913	12,3136	1,2468	0,2206			0,506
8	14,965	1,027	15,3691	13,47	0,904	12,1769	1,2622	0,2328			0,515
9	14,950	1,029	15,3836	13,482	0,922	12,4304	1,2376	0,2132			0,500
10	14,917	1,026	15,3048	13,397	0,913	12,2315	1,2513	0,2242			0,508
11	14,865	1,024	15,2218	13,341	0,905	12,0736	1,2607	0,2317			0,514
12	14,876	1,024	15,2330	13,214	0,894	11,8133	1,2895	0,2542			0,531

Tablo 4.9: 45 CuZn 03 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,824	1,089	16,1433	11,727	0,773	9,0650	1,7808		4,561	0,278	
2	14,949	1,076	16,0851	12,669	0,871	11,0347	1,4577				
3	14,968	1,107	16,5696	12,958	0,875	11,3383	1,4614				
4	14,993	1,121	16,8072	13,178	0,878	11,5703	1,4526				
5	14,998	1,111	16,6628	13,306	0,909	12,0952	1,3776	0,3204			0,551
6	15,007	1,130	16,9579	13,332	0,888	11,8388	1,4324	0,3594			0,575
7	15,015	1,115	16,7417	13,4	0,899	12,0466	1,3897	0,3291			0,557
8	15,027	1,107	16,6349	13,299	0,889	11,8228	1,4070	0,3415			0,564
9	14,855	1,100	16,3405	13,345	0,893	11,9171	1,3712	0,3157			0,548
10	14,998	1,070	16,0479	13,329	0,875	11,6629	1,3760	0,3192			0,550
11	15,003	1,079	16,1882	13,211	0,879	11,6125	1,3940	0,3322			0,558
12	15,002	1,057	15,8571	12,977	0,869	11,2770	1,4061	0,3409			0,564

Tablo 4.10: 45 CuZn 04 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,959	1,028	15,3779	13,511	0,908	12,2680	1,2535	0,2259	4,450	0,288	0,506
2	14,995	1,024	15,3549	13,523	0,909	12,2924	1,2491	0,2225			0,503
3	15,056	1,033	15,5528	13,599	0,906	12,3207	1,2623	0,2330			0,511
4	15,063	1,030	15,5149	13,577	0,908	12,3279	1,2585	0,2299			0,509
5	15,095	1,028	15,5177	13,627	0,912	12,4278	1,2486	0,2220			0,503
6	15,054	1,033	15,5508	13,502	0,902	12,1788	1,2769	0,2444			0,520
7	15,019	1,026	15,4095	13,482	0,895	12,0664	1,2771	0,2446			0,520
8	14,985	1,037	15,5394	13,342	0,897	11,9678	1,2984	0,2612			0,532
9	14,937	1,036	15,4747	13,192	0,887	11,7013	1,3225	0,2795			0,545
10	14,851	1,028	15,2668	13,12	0,889	11,6637	1,3089	0,2692			0,537
11	14,804	1,030	15,2481	12,564	0,855	10,7422	1,4195				
12	14,727	1,044	15,3750	11,933	0,797	9,5106	1,6166				

Tablo 4.11: 45 CuZn 05 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,831	1,028	15,2463	12,571	0,802	10,0819	1,5122		4,554	0,295	
2	14,902	1,031	15,3640	13,223	0,859	11,3586	1,3526				
3	14,970	1,032	15,4490	13,505	0,86	11,6143	1,3302	0,2853			0,561
4	14,990	1,032	15,4697	13,599	0,889	12,0895	1,2796	0,2465			0,533
5	15,029	1,035	15,5550	13,742	0,888	12,2029	1,2747	0,2427			0,530
6	15,060	1,027	15,4666	13,854	0,887	12,2885	1,2586	0,2300			0,520
7	15,061	1,020	15,3622	13,936	0,894	12,4588	1,2330	0,2095			0,504
8	15,066	1,034	15,5782	14,002	0,89	12,4618	1,2501	0,2232			0,515
9	15,053	1,035	15,5799	13,952	0,909	12,6824	1,2285	0,2058			0,502
10	15,070	1,028	15,4920	14,045	0,896	12,5843	1,2311	0,2079			0,503
11	15,046	1,027	15,4522	13,942	0,883	12,3108	1,2552	0,2273			0,518
12	15,025	1,019	15,3105	13,838	0,874	12,0944	1,2659	0,2358			0,525

Tablo 4.12: 90 CuZn 01 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,700	1,034	15,1998	12,593	0,831	10,4648	1,4525		4,447	0,289	
2	14,805	1,038	15,3676	13,064	0,861	11,2481	1,3662	0,3121			0,567
3	14,844	1,034	15,3487	13,279	0,883	11,7254	1,3090	0,2693			0,538
4	14,901	1,023	15,2437	13,293	0,883	11,7377	1,2987	0,2614			0,532
5	14,920	1,032	15,3974	13,457	0,883	11,8825	1,2958	0,2591			0,531
6	14,941	1,034	15,4490	13,601	0,909	12,3633	1,2496	0,2228			0,504
7	14,924	1,023	15,2673	13,527	0,929	12,5666	1,2149	0,1947			0,482
8	14,937	1,038	15,5046	13,437	0,926	12,4427	1,2461	0,2200			0,502
9	14,920	1,038	15,4870	13,472	0,899	12,1113	1,2787	0,2459			0,521
10	14,944	1,045	15,6165	13,28	0,892	11,8458	1,3183	0,2764			0,543
11	14,877	1,037	15,4274	13,082	0,857	11,2113	1,3761	0,3192			0,572
12	14,903	1,041	15,5140	13,178	0,865	11,3990	1,3610	0,3082			0,565

Tablo 4.13: 90 CuZn 02 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,724	1,046	15,4013	12,265	0,864	10,5970	1,4534		4,639	0,298	
2	14,820	1,043	15,4573	12,794	0,901	11,5274	1,3409				
3	14,833	1,044	15,4857	12,948	0,902	11,6791	1,3259	0,2821			0,565
4	14,886	1,044	15,5410	13,099	0,917	12,0118	1,2938	0,2576			0,547
5	14,920	1,038	15,4870	13,118	0,9	11,8062	1,3118	0,2714			0,557
6	14,977	1,041	15,5911	13,359	0,917	12,2502	1,2727	0,2412			0,534
7	14,999	1,043	15,6440	13,46	0,934	12,5716	1,2444	0,2186			0,517
8	15,039	1,038	15,6105	13,756	0,952	13,0957	1,1920	0,1757			0,482
9	15,065	1,044	15,7279	13,674	0,939	12,8399	1,2249	0,2029			0,504
10	15,258	1,040	15,8683	13,61	0,939	12,7798	1,2417	0,2165			0,515
11	15,010	1,035	15,5354	13,579	0,938	12,7371	1,2197	0,1986			0,501
12	14,988	1,033	15,4826	13,586	0,953	12,9475	1,1958	0,1788			0,485

Tablo 4.14: 90 CuZn 03 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,912	1,025	15,2848	12,436	0,85	10,5706	1,4460		4,443	0,287	
2	14,990	1,025	15,3648	12,685	0,848	10,7569	1,4284				
3	15,019	1,024	15,3795	12,978	0,878	11,3947	1,3497				
4	15,013	1,024	15,3733	13,16	0,887	11,6729	1,3170	0,2754			0,540
5	15,091	1,024	15,4532	13,174	0,888	11,6985	1,3210	0,2784			0,542
6	15,143	1,024	15,5064	13,284	0,889	11,8095	1,3130	0,2724			0,538
7	15,191	1,023	15,5404	13,365	0,899	12,0151	1,2934	0,2573			0,527
8	15,176	1,025	15,5554	13,301	0,895	11,9044	1,3067	0,2675			0,534
9	15,175	1,026	15,5696	13,443	0,904	12,1525	1,2812	0,2478			0,520
10	15,138	1,026	15,5316	13,528	0,914	12,3646	1,2561	0,2280			0,506
11	15,120	1,028	15,5434	13,306	0,898	11,9488	1,3008	0,2630			0,531
12	15,043	1,023	15,3890	13,209	0,894	11,8088	1,3032	0,2648			0,533

Tablo 4.15: 90 CuZn 04 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,698	1,042	15,3153	13,403	0,905	12,1297	1,2626	0,2332	4,672	0,304	0,539
2	14,738	1,042	15,3570	13,243	0,903	11,9584	1,2842	0,2501			0,552
3	14,776	1,036	15,3079	13,241	0,898	11,8904	1,2874				
4	14,795	1,039	15,3720	13,545	0,916	12,4072	1,2390	0,2143			0,524
5	14,827	1,039	15,4053	13,504	0,915	12,3562	1,2468	0,2206			0,529
6	14,850	1,037	15,3995	13,642	0,922	12,5779	1,2243	0,2024			0,514
7	14,844	1,045	15,5120	13,696	0,943	12,9153	1,2011	0,1832			0,498
8	14,843	1,040	15,4367	13,827	0,942	13,0250	1,1852	0,1699			0,487
9	14,855	1,036	15,3898	13,876	0,944	13,0989	1,1749	0,1612			0,479
10	14,790	1,035	15,3077	13,776	0,941	12,9632	1,1809	0,1662			0,484
11	14,807	1,037	15,3549	13,841	0,962	13,3150	1,1532				
12	14,768	1,033	15,2553	13,849	0,959	13,2812	1,1486				

Tablo 4.16: 90 CuZn 05 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,949	1,033	15,4423	13,542	0,863	11,6867	1,3214	0,2787	4,521	0,290	0,547
2	15,081	1,031	15,5485	13,612	0,886	12,0602	1,2892	0,2541			0,530
3	15,104	1,032	15,5873	13,732	0,881	12,0979	1,2884	0,2534			0,529
4	15,115	1,027	15,5231	13,707	0,868	11,8977	1,3047	0,2660			0,538
5	14,919	1,019	15,2025	13,584	0,864	11,7366	1,2953	0,2587			0,533
6	15,084	1,039	15,6723	13,732	0,888	12,1940	1,2852	0,2509			0,527
7	15,112	1,028	15,5351	13,747	0,896	12,3173	1,2612	0,2321			0,513
8	15,099	1,034	15,6124	13,638	0,884	12,0560	1,2950	0,2585			0,533
9	15,055	1,038	15,6271	13,579	0,873	11,8545	1,3182	0,2763			0,546
10	15,058	1,025	15,4345	13,55	0,874	11,8427	1,3033	0,2649			0,537
11	15,003	1,036	15,5431	13,419	0,866	11,6209	1,3375				
12	15,941	1,024	16,3236	13,186	0,851	11,2213	1,4547				

Tablo 4.17: 0 DKP 01 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	15,011	1,004	15,0710	13,26	0,917	12,1594	1,2395	0,2147	4,810	0,320	0,552
2	15,034	1,005	15,1092	13,091	0,914	11,9652	1,2628	0,2333			0,568
3	15,019	1,003	15,0641	12,869	0,903	11,6207	1,2963	0,2595			0,589
4	15,000	1,004	15,0600	12,566	0,898	11,2843	1,3346				
5	15,008	0,993	14,9029	12,675	0,892	11,3061	1,3181				
6	15,016	1,001	15,0310	12,627	0,888	11,2128	1,3405				
7	15,035	0,999	15,0200	12,997	0,906	11,7753	1,2756	0,2434			0,576
8	15,025	1,002	15,0551	13,233	0,919	12,1611	1,2380	0,2135			0,551
9	15,026	1,003	15,0711	13,329	0,917	12,2227	1,2330	0,2095			0,548
10	15,015	0,988	14,8348	13,379	0,921	12,3221	1,2039	0,1856			0,527
11	14,992	0,999	14,9770	13,455	0,923	12,4190	1,2060	0,1873			0,529
12	14,986	1,002	15,0160	13,434	0,914	12,2787	1,2229	0,2013			0,541

Tablo 4.18: 0 DKP 02 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	15,161	1,006	15,2520	13,737	0,934	12,8304	1,1887	0,1729	5,100	0,336	0,541
2	15,137	1,006	15,2278	13,521	0,917	12,3988	1,2282	0,2055			0,571
3	15,128	1,005	15,2036	13,509	0,917	12,3878	1,2273	0,2048			0,570
4	15,126	1,007	15,2319	13,403	0,917	12,2906	1,2393	0,2146			0,579
5	15,113	1,01	15,2641	13,334	0,909	12,1206	1,2594	0,2306			0,593
6	15,126	1,007	15,2319	13,268	0,906	12,0208	1,2671	0,2368			0,599
7	15,094	1,007	15,1997	13,214	0,904	11,9455	1,2724	0,2409			0,602
8	15,084	1,003	15,1293	13,079	0,904	11,8234	1,2796	0,2465			0,607
9	15,057	1,005	15,1323	13,065	0,9	11,7585	1,2869				
10	15,048	1,001	15,0630	12,973	0,887	11,5071	1,3090				
11	15,073	1,006	15,1634	13,029	0,896	11,6740	1,2989				
12	15,043	1,005	15,1182	13,115	0,905	11,8691	1,2737				

Tablo 4.19: 0 DKP 03 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,999	0,995	14,9240	13,714	0,884	12,1232	1,2310	0,2079	4,920	0,325	0,555
2	14,988	1,004	15,0480	13,487	0,931	12,5564	1,1984	0,1810			0,531
3	15,001	1,005	15,0760	13,532	0,941	12,7336	1,1840	0,1689			0,520
4	15,024	1,005	15,0991	13,455	0,929	12,4997	1,2080	0,1889			0,538
5	15,020	1,006	15,1101	13,601	0,951	12,9346	1,1682	0,1555			0,507
6	15,024	1,019	15,3095	13,453	0,954	12,8342	1,1929	0,1764			0,527
7	15,030	1,014	15,2404	13,227	0,928	12,2747	1,2416	0,2164			0,562
8	15,030	1,014	15,2404	13,08	0,943	12,3344	1,2356	0,2116			0,558
9	15,006	1,014	15,2161	12,959	0,942	12,2074	1,2465	0,2203			0,566
10	14,993	1,010	15,1429	12,628	0,952	12,0219	1,2596	0,2308			0,575
11	14,997	1,010	15,1470	12,101	0,897	10,8546	1,3954				
12	14,970	1,001	14,9850	12,559	0,829	10,4114	1,4393				

Tablo 4.20: 0 DKP 04 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,937	1,006	15,0266	13,492	0,924	12,4666	1,2053	0,1868	4,896	0,324	0,535
2	14,965	1,002	14,9949	13,397	0,927	12,4190	1,2074	0,1885			0,536
3	14,987	0,990	14,8371	13,366	0,924	12,3502	1,2014	0,1835			0,532
4	15,008	1,007	15,1131	13,293	0,917	12,1897	1,2398	0,2150			0,560
5	14,997	1,007	15,1020	13,255	0,916	12,1416	1,2438	0,2182			0,562
6	15,032	1,005	15,1072	13,215	0,913	12,0653	1,2521	0,2248			0,568
7	15,059	1,006	15,1494	13,048	0,906	11,8215	1,2815	0,2480			0,587
8	15,042	1,007	15,1473	12,888	0,902	11,6250	1,3030				
9	15,038	1,011	15,2034	12,914	0,902	11,6484	1,3052				
10	15,034	1,008	15,1543	13,011	0,905	11,7750	1,2870				
11	15,040	1,010	15,1904	13,078	0,911	11,9141	1,2750	0,2429			0,583
12	15,039	1,003	15,0841	13,157	0,927	12,1965	1,2368	0,2125			0,558

Tablo 4.21: 0 DKP 05 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	15,154	1,004	15,2146	13,66	0,941	12,8541	1,1836		5,000	0,329	
2	15,157	1,005	15,2328	13,517	0,913	12,3410	1,2343	0,2105			0,564
3	15,177	1,005	15,2529	13,431	0,914	12,2759	1,2425	0,2171			0,569
4	15,149	1,006	15,2399	13,364	0,91	12,1612	1,2532	0,2257			0,577
5	15,138	1,009	15,2742	13,289	0,905	12,0265	1,2700	0,2391			0,588
6	15,138	1,006	15,2288	13,24	0,901	11,9292	1,2766	0,2442			0,592
7	15,128	1,007	15,2339	13,132	0,894	11,7400	1,2976	0,2605			0,606
8	15,120	0,995	15,0444	13,097	0,895	11,7218	1,2835	0,2496			0,597
9	15,101	1,010	15,2520	13,007	0,9	11,7063	1,3029	0,2646			0,609
10	15,078	1,005	15,1534	13,839	0,886	12,2614	1,2359	0,2118			0,565
11	15,064	1,007	15,1694	12,876	0,89	11,4596	1,3237				
12	15,037	1,005	15,1122	13,022	0,894	11,6417	1,2981	0,2609			0,606

Tablo 4.22: 45 DKP 01 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,935	1,000	14,9350	13,952	0,898	12,5289	1,1920	0,1757	5,232	0,351	0,567
2	14,893	1,002	14,9228	13,717	0,9	12,3453	1,2088	0,1896			0,581
3	14,905	1,000	14,9050	13,688	0,885	12,1139	1,2304	0,2073			0,598
4	14,910	1,001	14,9249	12,93	0,862	11,1457	1,3391				
5	14,930	1,000	14,9300	13,327	0,87	11,5945	1,2877				
6	14,922	1,001	14,9369	13,328	0,873	11,6353	1,2838	0,2498			0,637
7	14,925	1,000	14,9250	13,637	0,889	12,1233	1,2311	0,2079			0,599
8	14,942	0,994	14,8523	13,637	0,891	12,1506	1,2224	0,2008			0,592
9	14,900	1,004	14,9596	13,622	0,898	12,2326	1,2229	0,2013			0,592
10	14,859	1,003	14,9036	13,592	0,896	12,1784	1,2238	0,2019			0,593
11	14,836	1,005	14,9102	13,547	0,893	12,0975	1,2325	0,2090			0,600
12	14,798	1,007	14,9016	13,354	0,873	11,6580	1,2782	0,2455			0,633

Tablo 4.23: 45 DKP 02 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,901	1,006	14,9904	13,616	0,894	12,1727	1,2315	0,2082	5,106	0,341	0,581
2	14,910	1,006	14,9995	13,594	0,893	12,1394	1,2356	0,2116			0,585
3	14,959	1,000	14,9590	13,644	0,898	12,2523	1,2209	0,1996			0,574
4	14,979	1,001	14,9940	13,645	0,902	12,3078	1,2183	0,1974			0,572
5	14,964	0,997	14,9191	14,1	0,902	12,7182	1,1731	0,1596			0,535
6	15,003	1,002	15,0330	13,606	0,893	12,1502	1,2373	0,2129			0,586
7	15,009	1,002	15,0390	13,584	0,886	12,0354	1,2496				
8	14,991	1,002	15,0210	13,514	0,896	12,1085	1,2405				
9	15,002	1,000	15,0020	13,62	0,894	12,1763	1,2321	0,2087			0,582
10	14,994	1,000	14,9940	13,686	0,902	12,3448	1,2146	0,1944			0,569
11	14,967	1,000	14,9670	13,718	0,901	12,3599	1,2109	0,1914			0,566
12	14,929	1,004	14,9887	13,751	0,901	12,3897	1,2098	0,1904			0,565

Tablo 4.24: 45 DKP 03 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,955	1,002	14,9849	12,948	0,886	11,4719	1,3062		5,311	0,348	
2	14,999	1,014	15,2090	13,284	0,891	11,8360	1,2850	0,2507			0,633
3	15,019	1,014	15,2293	13,989	0,903	12,6321	1,2056	0,1870			0,575
4	15,032	1,008	15,1523	13,728	0,904	12,4101	1,2210	0,1996			0,587
5	15,081	1,008	15,2016	14,052	0,903	12,6890	1,1980	0,1807			0,569
6	15,126	1,011	15,2924	13,999	0,915	12,8091	1,1939	0,1772			0,565
7	15,154	1,005	15,2298	14,213	0,914	12,9907	1,1724	0,1590			0,547
8	15,167	1,009	15,3035	14,186	0,911	12,9234	1,1842	0,1690			0,557
9	15,118	1,000	15,1180	14,175	0,916	12,9843	1,1643	0,1521			0,540
10	15,217	1,014	15,4300	14,305	0,915	13,0891	1,1788	0,1645			0,553
11	15,267	1,013	15,4655	14,291	0,932	13,3192	1,1611				
12	15,222	1,005	15,2981	14,104	0,924	13,0321	1,1739	0,1603			0,549

Tablo 4.25: 45 DKP 04 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	14,675	1,007	14,7777	12,068	0,889	10,7285	1,3774		5,300	0,352	
2	14,772	1,010	14,9197	13,168	0,878	11,5615	1,2905	0,2550			0,643
3	14,863	1,014	15,0711	13,426	0,888	11,9223	1,2641	0,2344			0,624
4	14,919	1,007	15,0234	13,787	0,906	12,4910	1,2027	0,1846			0,578
5	14,975	1,005	15,0499	13,664	0,914	12,4889	1,2051	0,1865			0,580
6	15,027	1,007	15,1322	14,542	0,924	13,4368	1,1262	0,1188			0,510
7	15,040	1,012	15,2205	13,97	0,95	13,2715	1,1469	0,1370			0,529
8	15,051	1,014	15,2617	14,1	0,923	13,0143	1,1727	0,1593			0,552
9	15,051	1,012	15,2316	13,928	0,941	13,1062	1,1622	0,1503			0,543
10	15,013	1,010	15,1631	14,135	0,936	13,2304	1,1461	0,1364			0,529
11	14,964	1,000	14,9640	14,014	0,934	13,0891	1,1432	0,1339			0,526
12	14,830	1,017	15,0821	13,744	0,922	12,6720	1,1902	0,1741			0,567

Tablo 4.2.6: 45 DKP 05 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	15,033	0,997	14,9879	14,531	0,904	13,1360	1,1410		5,010	0,333	
2	15,046	0,999	15,0310	13,339	0,911	12,1518	1,2369	0,2126			0,573
3	15,063	1,000	15,0630	13,955	0,903	12,6014	1,1953	0,1784			0,542
4	15,071	1,003	15,1162	13,955	0,907	12,6572	1,1943	0,1775			0,541
5	15,070	1,002	15,1001	13,954	0,901	12,5726	1,2010	0,1832			0,547
6	15,078	0,999	15,0629	13,621	0,889	12,1091	1,2439	0,2183			0,578
7	15,069	1,001	15,0841	13,735	0,899	12,3478	1,2216	0,2002			0,562
8	15,053	1,001	15,0681	13,58	0,888	12,0590	1,2495	0,2228			0,582
9	15,026	1,000	15,0260	13,691	0,881	12,0618	1,2458	0,2197			0,580
10	14,959	1,002	14,9889	13,527	0,888	12,0120	1,2478	0,2214			0,581
11	14,921	1,001	14,9359	13,366	0,882	11,7888	1,2670	0,2366			0,594
12	14,837	0,999	14,8222	13,308	0,869	11,5647	1,2817				

Tablo 4.27: 90 DKP 01 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	15,032	1,008	15,1523	13,45	0,922	12,4009	1,2219	0,2004	4,865	0,324	0,547
2	14,982	1,012	15,1618	13,181	0,885	11,6652	1,2997				
3	14,954	1,007	15,0587	12,839	0,917	11,7734	1,2790	0,2461			0,585
4	14,917	1,003	14,9618	12,769	0,917	11,7092	1,2778	0,2451			0,585
5	14,886	1,006	14,9753	12,602	0,915	11,5308	1,2987				
6	14,882	1,012	15,0606	12,49	0,913	11,4034	1,3207				
7	14,869	1,005	14,9433	12,61	0,924	11,6516	1,2825				
8	14,875	1,005	14,9494	12,984	0,922	11,9712	1,2488	0,2222			0,565
9	14,875	1,008	14,9940	13,173	0,936	12,3299	1,2161	0,1956			0,542
10	14,883	1,002	14,9128	13,277	0,934	12,4007	1,2026	0,1845			0,532
11	14,890	1,008	15,0091	13,441	0,933	12,5405	1,1969	0,1797			0,528
12	14,897	1,004	14,9566	13,22	0,924	12,2153	1,2244	0,2025			0,548

Tablo 4.28: 90 DKP 02 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	15,011	1,004	15,0710	13,26	0,917	12,1594	1,2395	0,2147	4,810	0,320	0,552
2	15,034	1,005	15,1092	13,091	0,914	11,9652	1,2628	0,2333			0,568
3	15,019	1,003	15,0641	12,869	0,903	11,6207	1,2963	0,2595			0,589
4	15,000	1,004	15,0600	12,566	0,898	11,2843	1,3346				
5	15,008	0,993	14,9029	12,675	0,892	11,3061	1,3181				
6	15,016	1,001	15,0310	12,627	0,888	11,2128	1,3405				
7	15,035	0,999	15,0200	12,997	0,906	11,7753	1,2756	0,2434			0,576
8	15,025	1,002	15,0551	13,233	0,919	12,1611	1,2380	0,2135			0,551
9	15,026	1,003	15,0711	13,329	0,917	12,2227	1,2330	0,2095			0,548
10	15,015	0,988	14,8348	13,379	0,921	12,3221	1,2039	0,1856			0,527
11	14,992	0,999	14,9770	13,455	0,923	12,4190	1,2060	0,1873			0,529
12	14,986	1,002	15,0160	13,434	0,914	12,2787	1,2229	0,2013			0,541

Tablo 4.29: 90 DKP 03 kodlu numunenin değerleri

Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	15,122	1,002	15,1522	13,793	0,917	12,6482	1,1980	0,1806	4,963	0,329	0,536
2	15,116	1,000	15,1160	13,735	0,924	12,6911	1,1911	0,1748			0,531
3	15,110	0,992	14,9891	13,674	0,931	12,7305	1,1774	0,1633			0,520
4	15,105	1,003	15,1503	13,651	0,926	12,6408	1,1985	0,1811			0,537
5	15,126	1,003	15,1714	13,604	0,93	12,6517	1,1992	0,1816			0,537
6	15,108	0,998	15,0778	13,47	0,927	12,4867	1,2075	0,1886			0,544
7	15,084	0,996	15,0237	13,311	0,909	12,0997	1,2417	0,2164			0,568
8	15,078	1,001	15,0931	13,307	0,918	12,2158	1,2355	0,2115			0,564
9	15,078	1,003	15,1232	13,176	0,914	12,0429	1,2558	0,2278			0,578
10	15,087	1,003	15,1323	13,159	0,907	11,9352	1,2679				
11	15,137	0,998	15,1067	13,123	0,909	11,9288	1,2664				
12	15,030	1,001	15,0450	13,161	0,918	12,0818	1,2453				

Tablo 4.30: 90 DKP 04 kodlu numunenin değerleri

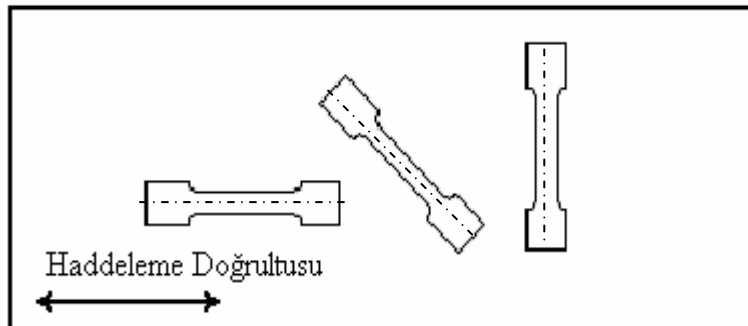
Ölçü Yeri	b_0 (mm)	e_0 (mm)	A_0 (mm ²)	b_1 (mm)	e_1 (mm)	A_1 (mm ²)	A_0 / A_1	$n = \ln(A_0 / A_1)$	F_{\max} (kN)	σ_{\max} (kN / mm ²)	K (kN / mm ²)
1	15,093	0,995	15,0175	13,8	0,927	12,7926	1,1739	0,1604	5,000	0,331	0,520
2	15,095	1,026	15,4875	13,712	0,937	12,8481	1,2054	0,1868			0,545
3	15,095	1,000	15,0950	13,653	0,932	12,7246	1,1863	0,1708			0,530
4	15,098	1,001	15,1131	13,612	0,928	12,6319	1,1964	0,1793			0,538
5	15,093	1,003	15,1383	13,574	0,929	12,6102	1,2005	0,1827			0,541
6	15,089	1,004	15,1494	13,429	0,917	12,3144	1,2302	0,2072			0,564
7	15,076	1,002	15,1062	13,237	0,92	12,1780	1,2404	0,2155			0,571
8	15,072	1,003	15,1172	13,15	0,91	11,9665	1,2633	0,2337			0,587
9	15,057	1,001	15,0721	13,087	0,912	11,9353	1,2628	0,2333			0,586
10	15,046	0,996	14,9858	12,813	0,902	11,5573	1,2967				
11	15,058	1,005	15,1333	12,627	0,892	11,2633	1,3436				
12	15,024	1,003	15,0691	12,796	0,902	11,5420	1,3056				

Tüm malzemelerde, her üç doğrultuda Reihle metoduna göre hesaplanan değerlerden elde edilen sonuçlarla ASTM 646 – 00 deney metodundan elde edilen sonuçların uygun olduğu görülmektedir.

Fakat Reihle metodunda bazı bölgelerdeki değerlerin hesaba katılması sonuçları önemli derecede etkilemektedir. Bu bölgelerden biri, şekil değişiminin homojenliğini kaybettiği büzülme bölgesiyken,. diğeri şekil değişimine katılamamış çekme çenelerine yakın bölgelerdir. Bu bölümlerin belirlenmesi oldukça öznel bir durum olması, başka bir araştırmacının aynı işlemleri yapması halinde farklı sonuçların bulunabileceği ihtimaliyle deneylerin yorumlanmasında ASTM metodu kullanılmıştır.

4.2 ASTM E 646-00 Deney Metodu

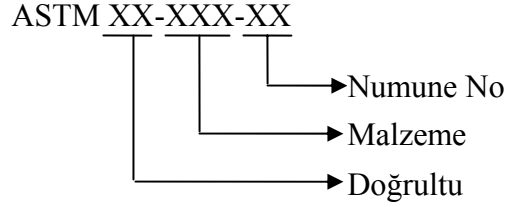
Bir önceki bölümde bahsi geçen deney yöntemine ek olarak ASTM ' nin en son Mayıs 2000 'de revize ettiği 646-00 test metodu hem karşılaştırma hem de doğrulama amacıyla kullanılmıştır. Uygulanan bu yöntem için de soğuk olarak haddelenmiş saçlar kullanılmıştır. Saç levhalardan numune eksenini Şekil 4.4 'te görüldüğü gibi haddelene yönünde, haddelene yönüne dik ve haddelene yönüyle 45° açı yapacak şekilde önce giyotin makasta dikdörtgen şeklinde parçalar kesilmiştir.



Şekil 4.4: Numunelerin saç üzerindeki konumu

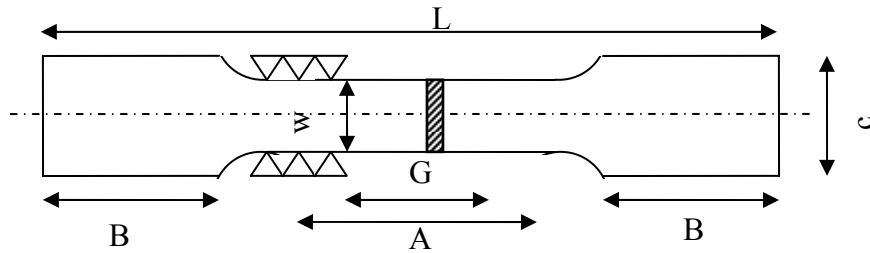
Bu parçalar daha sonra aynı doğrultuda kesilenler bir arada olacak şekilde frezeyle bağlanıp, ilgili standardın önerdiği ve Şekil 4.6 'da gösterilen ölçülerde talaş

kaldırılarak hazırlanmıştır. Numune doğrultularının birbirlerine karışmaması için numunelere şekil 4.5 teki gibi kodlama yapılmıştır.



Şekil 4.5: Numune kodlaması

Hazırlıkları biten numuneler 5 mm/dk sabit çekme hızına ayarlanmış Dartec marka 600 kN üniversal çekme makinesinde çekme deneyine tabi tutulmuştur. Uygulanan yük 60 kN kapasiteli load-cell ile ölçülüp kaydedilirken, numunelerin gösterdiği şekil değiştirme ise LVDT ile ölçülüp kaydedilmiştir. Deney esnasında hassasiyet amacıyla her 0,11 saniyede 1 veri kaydedilecek şekilde cihaz ayarlanmıştır. Tüm numunelere kopana kadar çekme deneyi uygulanmıştır.



Şekil 4.6: Çekme numunesi[1]

Tablo 4.31: Çekme numunesinin ölçüleri [1]

B (mm)	L (mm)	A (mm)	G (mm)	w (mm)	c (mm)
50	200	60	50	12,5	20

Her bir doğrultu için yapılan beş adet çekme deneyi sonucunda gerçek gerilme (σ)-gerçek şekil değiştirme (ϵ) diyagramları çizilmiştir.

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \text{ ve } e = \frac{l-l_0}{l_0} \text{ ise} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} \text{ ve } e = \frac{l}{l_0} - \frac{l_0}{l_0} \quad (4.10)$$

$$\frac{l}{l_0} = e + 1 \quad (4.11)$$

$$\varepsilon = \ln(e + 1) \text{ ve } \sigma = \sigma_n(e + 1) \quad (4.12)$$

elde edilir.

Holloman bağıntısı [8]

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (4.13)$$

bu ifadenin logaritması alındığında

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (4.14)$$

haline dönüşür.

Yukarıda logaritması alınan ifade doğru denklemine benzer,

$$y = ax + b \quad (4.15)$$

Bu ifadede a doğrunun eğimidir. Logaritmik koordinatlarda çizilen gerçek gerilme gerçek şekil değiştirme diyagramları da bir doğru halini almakta ve bu doğrunun eğimi pekleşme üstelini vermektedir. Fakat çekme deneyinde elde edilen gerilme ve şekil değiştirme verileri çok fazla olduğu için bu verilere uyan doğru denklemi en küçük kareler yöntemi ile elde edilir. Hesaba katılan veri sayısı N ise bu yöntem şu şekildedir;

$$Fonk = \sum_{i=1}^N [y_i - (ax_i + b)]^2 \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial Fonk}{\partial a} = aN + b \sum_{i=1}^N x_i - \sum_{i=1}^N y_i = 0 \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial Fonk}{\partial b} = a \sum_{i=1}^N x_i + b \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N x_i y_i = 0 \quad (4.18)$$

Denklem çözümlü katsayılar bulunduğunda, a yani pekleşme üsteli olan n ;

$$a = n = \frac{N \sum_{i=1}^N (\log x_i \log y_i) - \left(\sum_{i=1}^N \log x_i \sum_{i=1}^N \log y_i \right)}{N \sum_{i=1}^N (\log x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^N \log x_i \right)^2} \quad (4.19)$$

elde edilir. Deneyde x değişkeni şekil değişimi yani ε ve y değişkeni ise gerçek gerilme yani σ olduğuna göre, pekleşme üsteli

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N (\log \varepsilon_i \log \sigma_i) - \left(\sum_{i=1}^N \log \varepsilon_i \sum_{i=1}^N \log \sigma_i \right)}{N \sum_{i=1}^N (\log \varepsilon_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^N \log \varepsilon_i \right)^2} \quad (4.20)$$

ve mukavemet katsayısı

$$K = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^N y_i - n \sum_{i=1}^N x_i}{N} \right] \quad (4.21)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Pekleşme üstelinin hesaplanması için gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme eğrilerinden akma noktası ile maksimum yükün uygulandığı nokta arasındaki veriler kullanılmıştır.

Deneyde bazı numuneler ölçü boyu dışında kalan bir bölgeden kopmuşlardır. Bu numuneler hesaplamalarda kullanılmamıştır.

Deney sonucunda numunelerden ölçülen kopma uzamaları ve maksimum yükteki uzamalarla hesaplanan pekleşme üsteli değerleri Tablo 5.1 'de verilmiştir.

5. BULGULAR

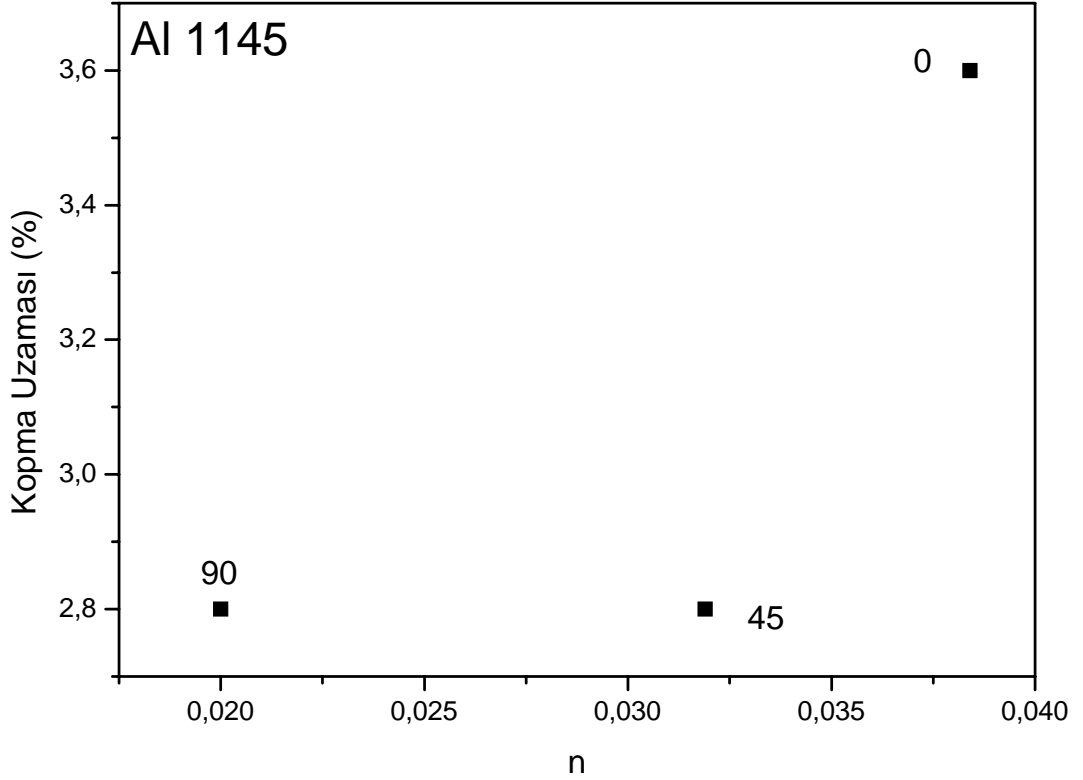
Tablo: 5.1 ASTM yöntemi ile hesaplanan pekleşme üsteli, kopma uzaması ve maksimum yükteki uzama değerleri

	Ort n ASTM	Ort. % Kop. Uzaması	Maks. Yükteki Ort. % Uzama
0Al	0,0384	3,360	1,94
45Al	0,0319	2,80	1,72
90Al	0,0200	2,80	1,42
Ort Al	0,0306	3,07	1,69
45CuZn	0,2857	40,00	34,30
0CuZn	0,2845	38,50	34,00
90CuZn	0,2612	28,00	25,90
Ort CuZn	0,2793	35,50	31,89
0DKP	0,2562	42,00	34,30
90DKP	0,2468	35,60	25,16
45DKP	0,2325	34,40	24,90
Ort DKP	0,2420	37,33	28,45
0409	0,2942	25,64	15,37
45409	0,2751	23,39	15,03
90409	0,2748	23,24	14,37
Ort 409	0,2798	24,09	14,92
0430	0,2427	29,40	21,42
45430	0,2361	29,20	21,10
90430	0,2355	28,40	20,08
Ort 430	0,2376	29,00	20,87

Tablo 5.2: ASTM ve Reihle metoduna göre yapılan deneylerden elde edilen pekleşme üsteli, kopma uzaması ve maksimum yükteki uzama değerleri

	Ort n Reihle	Ort n ASTM	Ort. % Kop. Uzaması	Maks Yükteki Ort. % Uzama
45CuZn	0,2679	0,2857	40,00	34,30
0CuZn	0,2768	0,2845	38,50	34,00
90CuZn	0,2416	0,2612	28,00	25,90
Ort CuZn	0,2635	0,2793	35,50	31,89
0DKP	0,2220	0,2562	42,00	34,30
90DKP	0,2036	0,2468	35,60	25,16
45DKP	0,1898	0,2325	34,40	24,90
Ort DKP	0,2013	0,2420	37,33	28,45

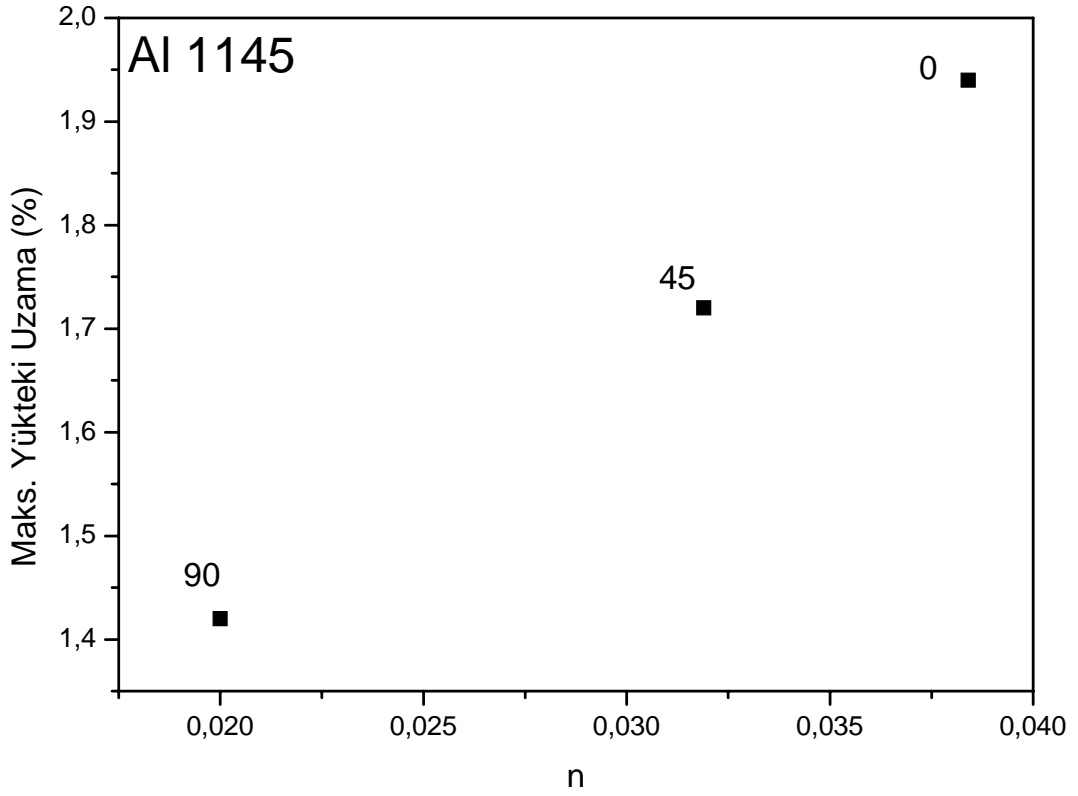
1145 Al malzeme, Tablo 5.1 'den de görülebildiği üzere, hem ortalama pekleşme üsteli (0,0306), hem ortalama % kopma uzaması (3,07), hem de ortalama maksimum yükteki % uzama (1,69) bakımından en son sıradadır.



Şekil 5.1: 1145 Al malzeme için pekleşme üsteli ve % kopma uzaması

1145 alüminyum malzemede Şekil 5.1 ve 5.2 'ye göre ölçülen en büyük pekleşme üsteli değeri (0,0384) haddeleme doğrultusuna paralel (0°) doğrultuda hazırlanan numunelerde görülürken, en küçük pekleşme üsteli değeri (0,0200) haddelemeye dik (90°) doğrultuda hazırlanan numunelerde görülmüştür. Pekleşme üsteli değerinin Şekil 5.1 'e göre 0,0200 den 0,0384'e artması % kopma uzamasını 2,80 'den 3,60 değerine yükselmiştir.

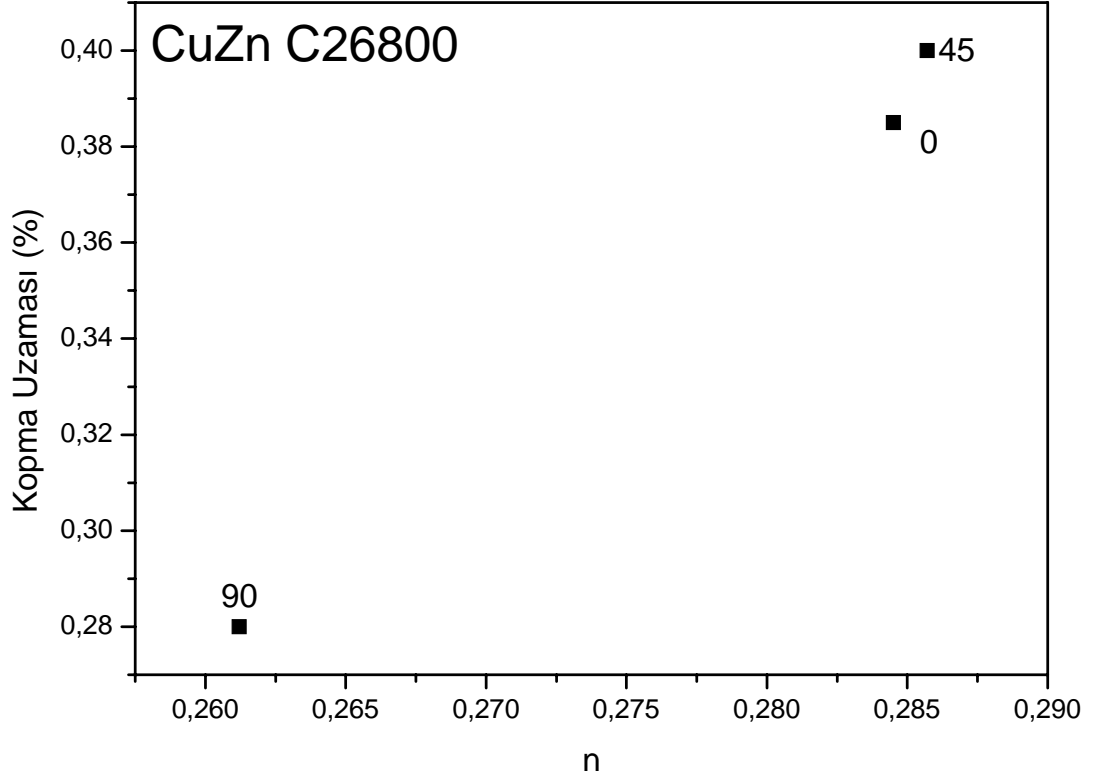
Pekleşme üstelindeki bu artış Şekil 5.2 'ye göre maksimum yükteki % uzamayı 1,42 değerinden 1,94 değerine arttırmıştır.



Şekil 5.2: 1145Al malzeme için pekleşme üsteli ve maksimum yükteki % uzama grafiği

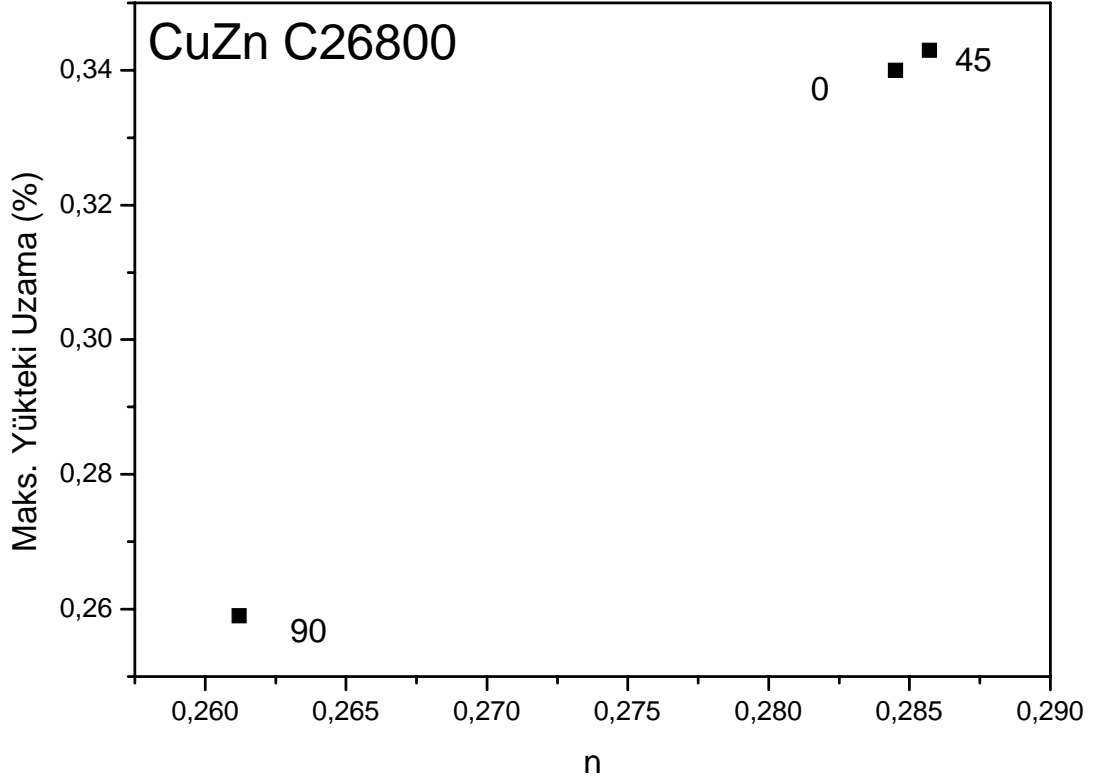
Al malzemedeki diğer malzemelere kıyasla en küçük uzama değerleri ölçülmüştür. Yaklaşık 1 ~ 2 mm uzama gösterdikten sonra numunelerde hasar gözlenmiştir. Bu küçük uzama değerleri sebebiyle Al malzeme için ölçülen kopma uzaması değerlerinin hassasiyeti diğer malzemelere göre daha azdır. Bu sebeple kopma uzaması değeri bakımından haddeleme doğrultusu ile 90° ve 45° açı yapan numunelerde aynı değer okunmuştur.

Tablo 5.1 e göre C26800 malzemede ölçülen ortalama pekleşme üsteli değeri (0,2793) tüm malzemeler içinde ikinci en büyük değerdir.



Şekil 5.3: CuZn C26800 malzeme için pekleşme üsteli ve % kopma uzaması grafiği

Şekil 5.3 ve 5.4 'e göre bu malzemedan elde edilen en büyük pekleşme üsteli değeri (0,2857) ise haddeme doğrultusuna ile 45° açı yapan numunelerde görülürken en küçük pekleşme üsteli değeri (0,2612) haddeme doğrultusuyla 90° açı yapan numunelerde ölçülmüştür.

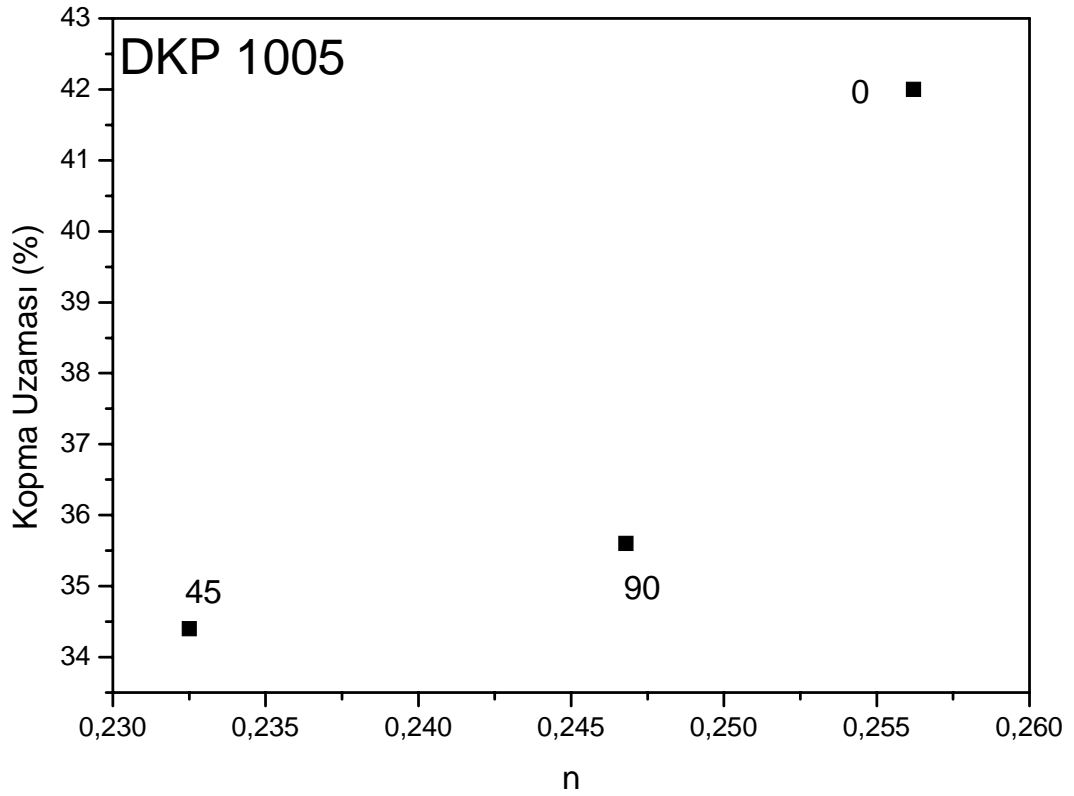


Şekil 5.4: CuZn C26800 malzeme için pekleşme üsteli ve maksimum yükteki % uzama grafiği

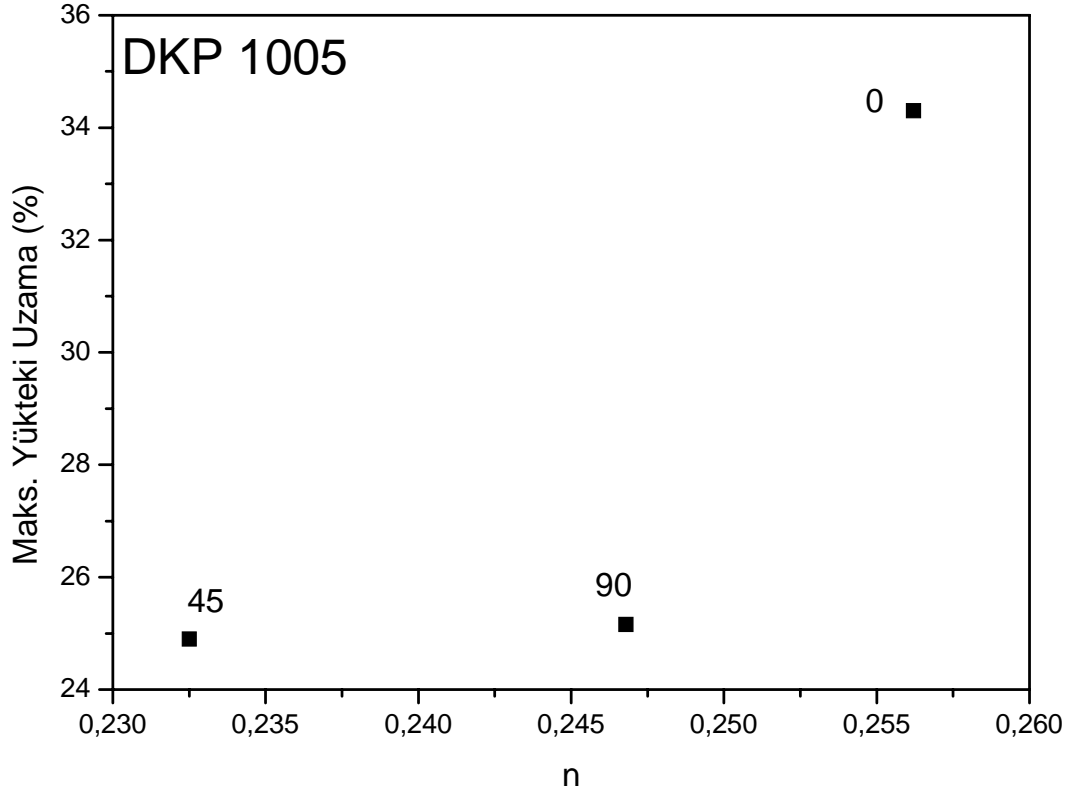
C26800 malzemedeki pekleşme üsteli değerinin 0,2612 ‘den 0,2857 ‘ye artmasıyla Şekil 5.3 ‘te görüldüğü gibi % kopma uzaması değeri 28,00 ‘den 40,00 ‘e yükselmiştir.

Ayrıca pekleşme üstelindeki bu artış Şekil 5.4 ‘te de görüldüğü üzere maksimum yükteki % uzama değerini de 25,90 ‘dan 34,30 ‘a artmıştır.

DKP 1005 çelik sac Tablo 5.1 'e göre ortalama pekleşme üsteli (0,2420) bakımından üçüncü büyük, maksimum yükteki ortalama % uzama (28,45) bakımından ikinci büyük malzeme olmasına rağmen ortalama % kopma uzaması (37,33) bakımından en büyük malzemedir. Bu malzemedeki hesaplanan en büyük pekleşme üsteli (0,2562) değeri haddeleme doğrultusuna paralel (0°) yönde hazırlanan numunelerde görülürken en küçük pekleşme üsteli (0,2325) değeri ise haddeleme doğrultusuyla 45° açı yapan numunelerde görülmüştür.



Şekil 5.5: DKP 1005 malzeme için pekleşme üsteli ve %kopma uzaması grafiği

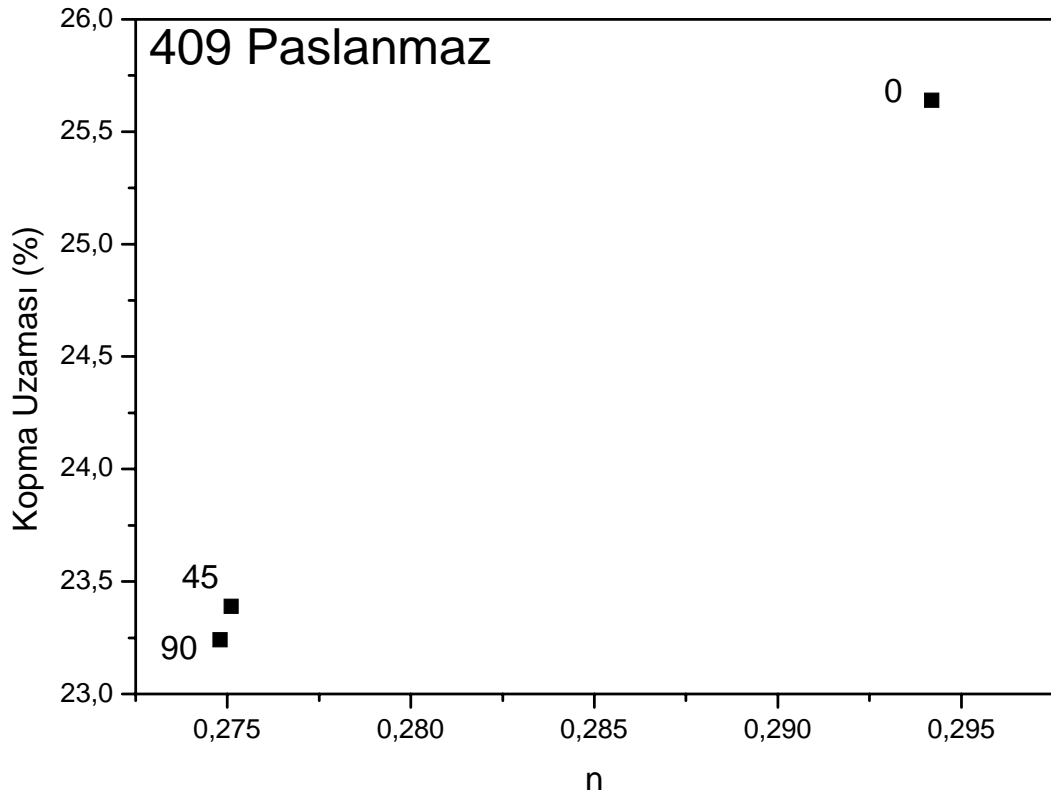


Şekil 5.6: DKP 1005 malzeme için pekleşme üsteli ve maksimum yükteki % uzama grafiği

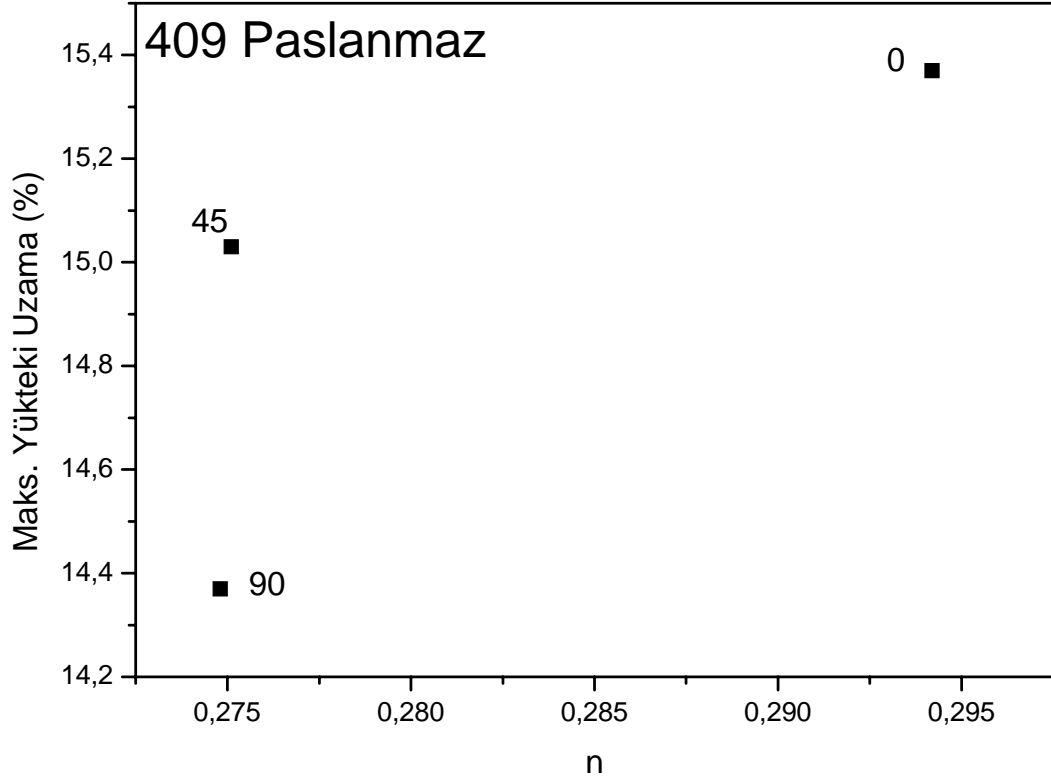
DKP 1005 çelik malzemede deneyler sonucunda hesaplanan pekleşme üsteli değerlerinin 0,2325'ten, 0,2562 'ye artmasıyla Şekil 5.5 'te görüldüğü gibi % kopma uzaması 34,40 'tan, 42,00'e yükselmektedir. Ayrıca pekleşme üstelindeki bu artış Şekil 5.6 'ya göre maksimum yükteki % uzama değerini de 28,45 'ten, 34,30 'a çıkılmaktadır.

409 Paslanmaz çelik malzemede yapılan deneyler sonucunda Tablo 5.1 'e göre deneyi yapılan tüm malzemeler içinde en büyük ortalama pekleşme üsteli (0,2798) değerine sahip olan malzeme iken gerek ortalama % kopma uzaması (24,09) ve gerekse maksimum yükteki ortalama % uzama (14,92) bakımında sondan ikinci malzemedir.

Şekil 5.7 ve 5.8 'e göre haddeleme yönüne paralel yönde (0°) hazırlanan numunelerde ölçülen pekleşme üsteli (0,2942) değeri diğer yönlerde hesaplanan pekleşme üsteli değerlerine göre en büyük değerdir. Bu malzemede hesaplanan en küçük pekleşme üsteli (0,2748) değeri ise haddeleme doğrultusuna dik (90°) yönde hazırlanan numunelerdedir.



Şekil 5.7: 409 paslanmaz çelik malzeme için pekleşme üsteli ve % kopma uzaması grafiği



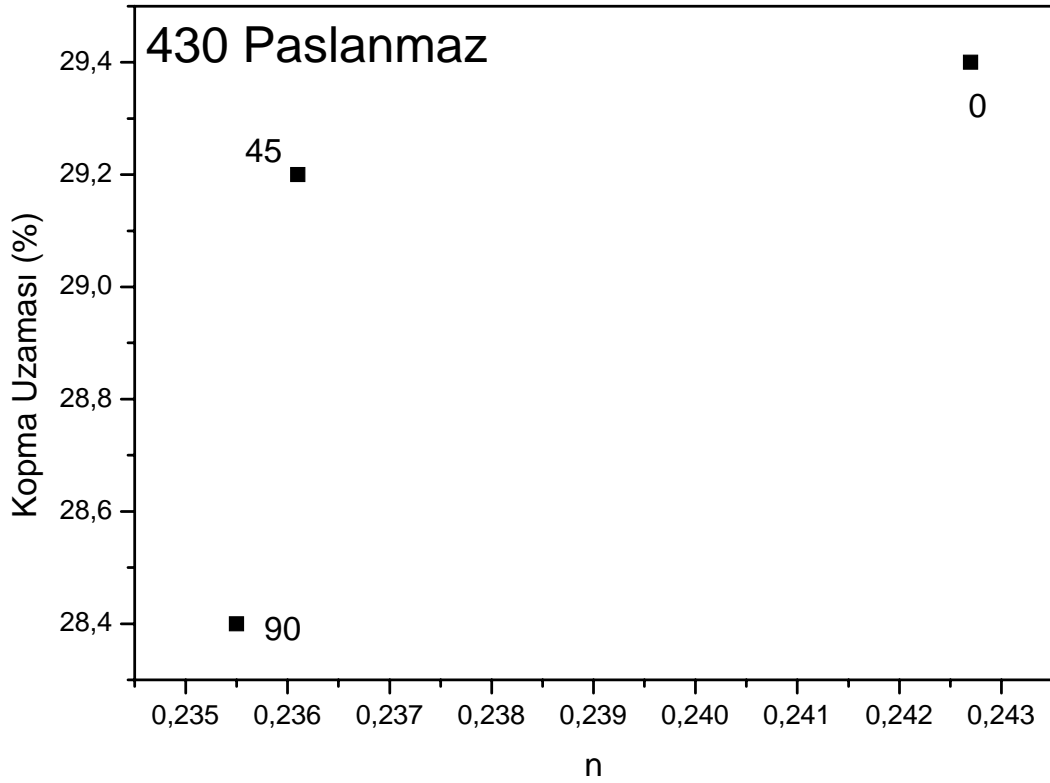
Şekil 5.8: 409 paslanmaz çelik malzeme için pekleşme üsteli ve maksimum yükteki % uzama grafiği

409 paslanmaz çelik malzemedan ölçülen pekleşme üsteli değerlerinin Şekil 5.7 'den de görüldüğü gibi 0,2748 'den, 0,2942 'ye artmasıyla malzemenin göstermiş olduğu kopma uzaması değerleri de 23,24 'ten, 25,64 'e yükselmiştir.

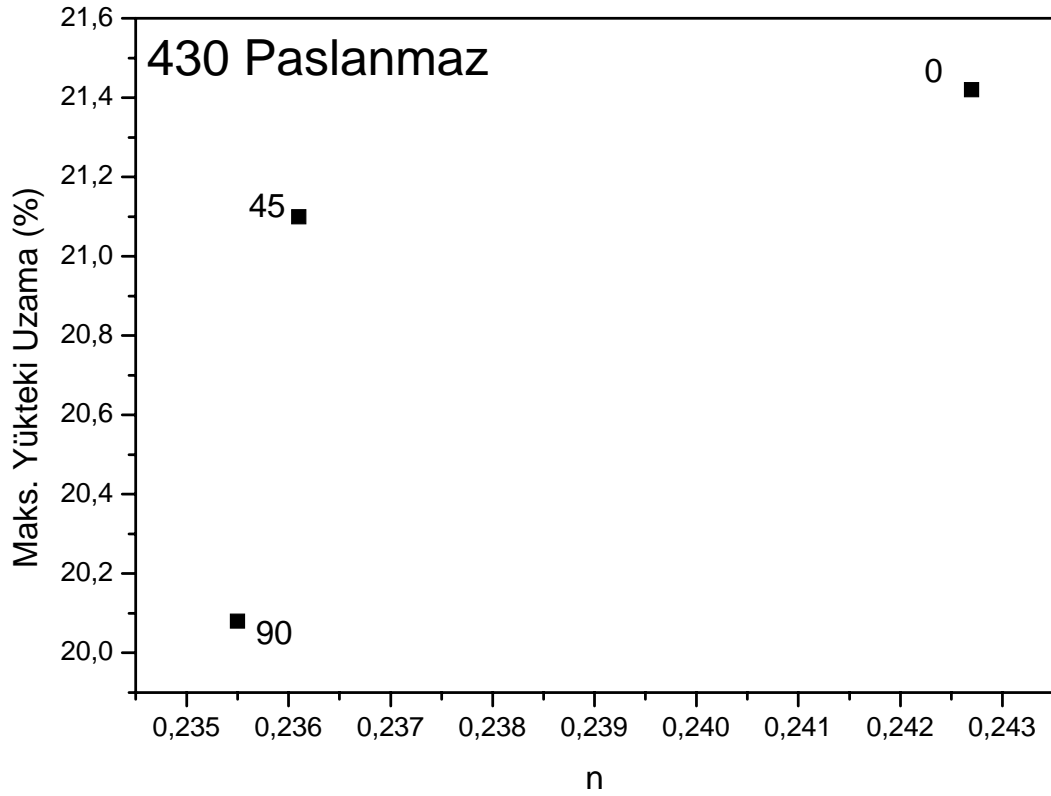
Benzer durum Şekil 5.8 'den de görüldüğü gibi maksimum yükteki uzama değerlerinde de gözlenmiş ve bu değerler 14,37 'den, 15,37 'ye artmıştır.

430 paslanmaz çelik numunede ölçülen ortalama pekleşme üsteli (0,2376) değeri bakımından sondan ikinci, gerek ortalama % kopma uzaması (29,00), gerekse maksimum yükteki ortalama % uzama (20,87) bakımından sondan üçüncüdür.

Bu malzemeden elde edilen değerlere göre en büyük pekleşme üsteli (0,2427) değeri haddeleme doğrultusuna paralel (0°) yönde hazırlanan numunelerde görülürken en küçük pekleşme üsteli (0,2355) değer ise haddeleme yönüne dik (90°) yönde hazırlanan numunelerde görülmüştür.



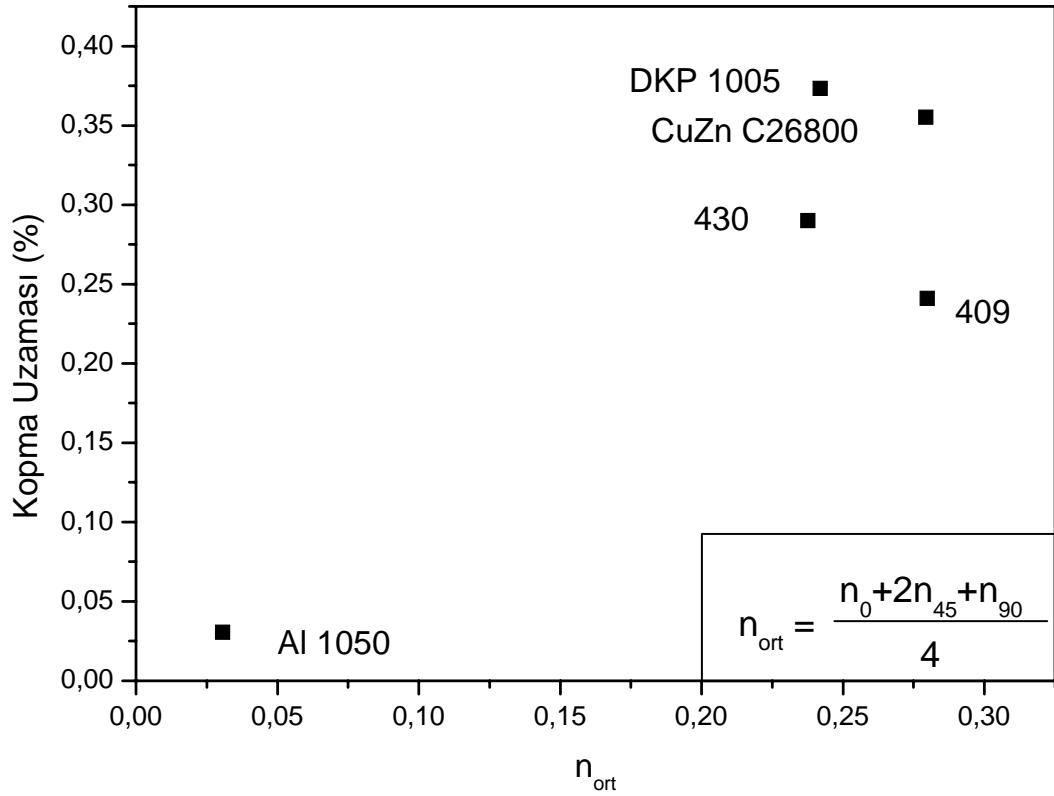
Şekil 5.9: 430 paslanmaz çelik malzeme için pekleşme üsteli ve % kopma uzaması grafiği



Şekil 5.10: 430 paslanmaz çelik malzeme için pekleşme üsteli ve maksimum yükteki % uzama grafiği

430 paslanmaz çelik malzemede yapılan deneyler sonucunda Şekil 5.9 'dan görüldüğü gibi pekleşme üsteli değerlerinin 0,2355 'ten, 0,2427 'ye artmasıyla % kopma uzaması değerleri 28,40 'tan, 29,40 'a yükselmektedir.

Benzer biçimde Şekil 5.10' dan görüldüğü gibi artan pekleşme üsteli değerleri maksimum yükteki % kopma uzaması değerlerini de 20,08 'den, 21,42 'ye yükseltmektedir.

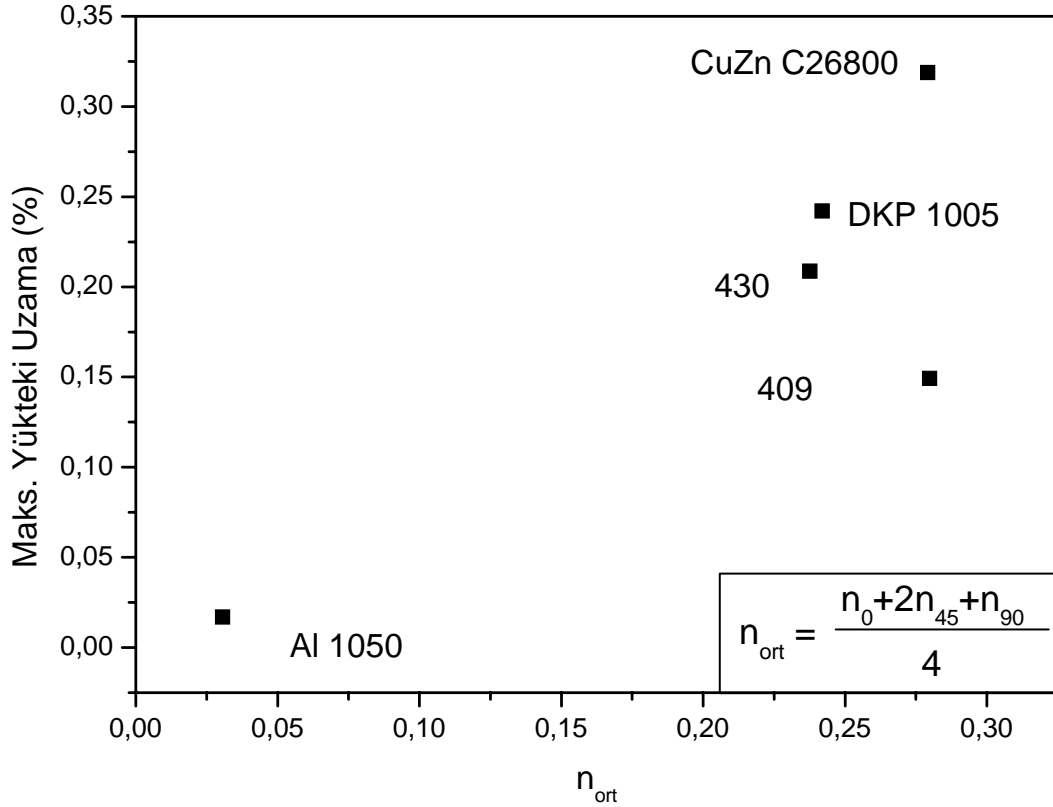


Şekil 5.11 Pekleşme Üstelinin % kopma uzamasına etkisi

Şekil 5.11 'den görüldüğü gibi tüm malzemelerin deneyleri sonucunda elde edilen veriler ışığında hazırlanan ortalama pekleşme üsteli ve ortalama % kopma uzaması diyagramında alüminyum malzeme hem pekleşme üsteli hem de kopma uzaması bakımından en küçük değerlere sahiptir.

Fakat 409 paslanmaz çelik malzemede en büyük pekleşme üsteli değerinin bulunmasına rağmen kopma uzamasında en büyük değer elde edilmemiştir. Benzer şekilde en büyük kopma uzaması ölçülen DKP çelik malzemede de en büyük pekleşme üsteli değeri bulunmamıştır.

Çekme deneyi yapılan sünek malzemelerde maksimum yük uygulandıktan sonra şekil değişimi homojenliğini kaybetmektedir ve büzülme (kesit daralması) oluşmaktadır. Şekil değişiminin homojenliğini kaybetmesiyle kopma uzamasının pekleşme üsteli ile doğrudan ilişkilendirilmemesi gerekmektedir.



Şekil 5.12: Pekleşme üstelinin maksimum yükteki % uzamaya etkisi

Pekleşme üsteli ile maksimum yükteki % uzama arasında çizilen diyagramda (Şekil 5.12) görüldüğü gibi, alüminyum numune pekleşme üsteli ve maksimum yükteki % uzama bakımından yine en düşük değeri almıştır.

C26800 malzeme ise maksimum yükteki % uzama bakımından en büyük değerde olduğu gibi, pekleşme üsteli de en yüksek değeri veren 409 paslanmaz çeliğinkine eşit kabul edilecek kadar yakındır (0,2793 ve 0,2798 Tablo 5.1).

Daha önce de belirtilmiş olduğu gibi, gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme eğrileri logaritmik koordinatlarda çizildikleri taktirde doğruya dönüşmüşlerdir. Akma

sınırı ile gerçek çekme dayanımı arasında bu doğruyu eğimi pekleşme üstelidir. Gerek gerilme gerekse şekil değişimi birer malzeme özelliğidir. Bu sebeple pekleşme üstelinin hesaplanmasında her malzemede farklı olan gerilme ve şekil değiştirme değerleri kullanılmaktadır. Bu sebeple aynı malzemelerin karşılaştırılması esnasında artan pekleşme üsteli değeri maksimum noktaya kadar olan uzamayı arttırmaktadır. Kopma uzaması maksimum noktaya kadar olan uzama ve büzülme esnasında meydana gelen uzamanın toplamıdır. Bu sebeple maksimum noktaya kadar olan uzama ne kadar çok ise kopma uzaması da o kadar çok olacaktır. Sonuçta pekleşme üstelindeki artış malzemenin maksimum noktaya kadar olan uzamasını arttırdığı için kopma uzamasını da arttırmaktadır.

430 ve 409 paslanmaz çeliklerle alüminyumda pekleşme üsteli değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanırsa, numunelerin haddeleme doğrultusuyla 0° , 45° ve 90° açı yaptığı sıralamada olduğu görülür. Diğer malzemelerde ise bu sıra değişmektedir. Yani haddeleme doğrultusuna göre hep aynı doğrultuda en büyük mukavemet değerleri elde edilmemektedir. Bunun sebebi ise malzemelerin haddeleme geçmişleridir. Haddeleme parametrelerine göre malzemenin mukavemet ve süneklik değerleri farklı doğrultulara göre farklı değerler alabilmektedir [5,6].

6. SONUÇLAR

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Numune doğrultusuna göre pekleşme üstelinin artması kopma uzamasını arttırmaktadır.
- Numune doğrultusuna göre pekleşme üstelinin artması maksimum yükteki uzamayı arttırmaktadır.
- Maksimum yükteki uzama değerlerinin sıralaması kopma uzaması değerlerinde de aynen korunmaktadır.
- 1145 alüminyum, 409 ve 430 paslanmaz çelik malzemedan doğrultulara göre hesaplanan pekleşme üsteli değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanırsa $n_0 > n_{45} > n_{90}$ olduğu gözlenirken, DKP 1005 ve CuZn C26800 malzeme bu sıralama farklıdır. Bu fark, malzemelerin haddeleme geçmişlerine bağlıdır.
- Malzemelerde maksimum yükten sonra oluşan büzülme bölgesinde şekil değişiminin üniform olmaması sebebiyle, pekleşme üsteli değerinin kopma uzamasını doğrudan etkileyen bir değişken olmadığı, pekleşme üstelinin maksimum noktaya kadar olan uzamayı doğrudan etkilediği anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

1. ASTM E 646 – 00, Standard Test Method for Tensile Strain – Hardening Exponents (n values) of Metallic Sheet Materials, *ASTM Standards*, 2000
2. Bowen A W, Partridge P G, Limitations of the Hollomon strain-hardening equation, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 7, 1974
3. Chang T., Guo W., Effects of strain hardening and stress state on fatigue crack closure, *International Journal of Fatigue* 21 (1999) 881–888
4. Çapan L., Silindirik Kapların Derin Çekilmesinde Anizotropinin Etkisi, Doçentlik Tezi, *İTÜ* 1979
5. Çapan L., Metallerde Plastik Şekil Verme, *Çağlayan Kitabevi*, 2003
6. Dieter G E (Jr), Mechanical Metallurgy, *McGraw-Hill* 1961
7. Douthit T.J., Van Tyne C.J., The effect of nitrogen on the cold forging properties of 1020 steel, *Journal of Materials Processing Technology* 160 (2005) 335–347
8. Hollomon J H *Trans. Metall. Soc. AZME* 162 268-90 1945
9. Huang M., Luo J., He B., Proceedings of the Fourth International Conference on the Mechanical Behavior of Material, vol. 2, *Pergamon Press, Oxford*, 1984 .
10. Kim H.K., Kim W.J., Microstructural instability and strength of an AZ31 Mg alloy after severe plastic deformation, *Materials Science and Engineering A* 385 (2004) 300–308
11. Kristensson Ola, Numerically produced forming limit diagrams for metal sheets with voids considering micromechanical effects, *European Journal of Mechanics A/Solids*
12. Low JR 1949, Properties of Engineering Materials, *ASM* pp 17-59
13. Marin J, Mechanical Behaviour of Engineering Materials, *Prentice-Hall*, 1962
14. Martin E., Forn A., Nogué R. ,Strain hardening behaviour and temperature effect on Al-2124/SiCp *Journal of Materials Processing Technology* 143–144 (2003) 4

15. Nagarjuna S., Srinivas M., Balasubramanian K., Sarma D. S., Effect of Modulations on Yield Stress and Strain Hardening Exponent of Solution Treated Cu-Ti Alloys *Scripta Materialia*, Vol. 38, No. 9, pp. 1469–1474, 1998
16. Narayanasamy R., Ramesh T., Pandey K.S. ,Some aspects on strain hardening behaviour in three dimensions of aluminium–iron powder metallurgy composite during cold upsetting, *Materials and Design*, 2005
17. Narayanasamy R., Ramesh T., Pandey K.S. An investigation on instantaneous strain hardening behaviour in three dimensions of aluminium–iron composites during cold upsetting, *Materials Science and Engineering A* 394 (2005) 149–160
18. Praveen K.V.U., Sastry G.V.S., Singh V. Work Hardening Behaviour of The Ni-Fe Based D Super Alloy IN 718 *International Symposium of Research Students on Material Science and Engineering* December 20-22, 2004, Chennai, India
19. REIHLE, M., Verfahren zur Ermittlung der Fließkurve von Stähle aus der Gleichmassdehnung und der Zugfestigkeit, *Blench Nr. II*, 1961, pp 828-833
20. Selvakumar N. , Narayanasamy R. ,Phenomenon of strain hardening behaviour of sintered aluminium preforms during cold axial forming *Journal of Materials Processing Technology* 142 (2003) 347–354
21. ŞENALP, A.Z. Metal Şekillendirme ve Plastisite Teorisi Ders Notları, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, 2005
22. Toloczko M.B., Hamilton M.L., Lucas G.E., Ductility correlations between shear punch and uniaxial tensile test data, *Journal of Nuclear Materials* 283-287 (2000) 987-991
23. Yang B., Riestler L., Nieh T.G., Strain hardening and recovery in a bulk metallic glass under nanoindentation , *Scripta Materialia* 54 (2006) 1277–1280
24. Yang J., Putatunda S. K., Influence of a novel two-step austempering process on the strain-hardening behavior of austempered ductile cast iron (ADI), *Materials Science and Engineering A* 382 (2004) 265–279

ÖZGEÇMİŞ

21.12.1980 İstanbul doğumlu Ersin Asım GÜVEN, eğitim hayatına İstanbul ili, Fatih ilçesinde bulunan Hırka-i Şerif ilkokulu'nda başlayıp daha sonra yine aynı semtte bulunan Oruçgazi Orta Okulu ve Özel Oğuzkaan Koleji'nde devam ederek ilk ve orta öğrenimini tamamlamıştır.

2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2004 yılında Makine Mühendisi olarak mezun olmuştur.

2004-2005 eğitim öğretim yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Halen bu eğitime devam etmektedir.

2004 yılı Kasım ayından itibaren Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde kadrolu olarak Makine Mühendisliği, Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojileri Ana Bilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak akademik çalışmalarına devam etmektedir.