



**AÇILI DERİN ÇEKME KALIPLARINDA
SICAKLIĞIN LİMİT ÇEKME ORANINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Vedat TAŞDEMİR

**Doktora Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Cebeli ÖZEK
ARALIK-2016**

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AÇILI DERİN ÇEKME KALIPLARINDA SICAKLIĞIN
LİMİT ÇEKME ORANINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Vedat TAŞDEMİR

(101119201)

Anabilim Dalı: Makine Eğitimi

Programı: Talaşlı Üretim

Danışman: Doç. Dr. Cebeli ÖZEK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 7 Kasım 2016

ARALIK-2016

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AÇILI DERİN ÇEKME KALIPLARINDA SICAKLIĞIN
LİMİT ÇEKME ORANINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Vedat TAŞDEMİR

(101119201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Kasım 2016

Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Aralık 2016

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cebeli ÖZEK (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Abdulkadir EKŞİ (Ç.Ü)
Prof. Dr. Niyazi ÖZDEMİR (F.Ü)
Prof. Dr. Vedat SAVAŞ (F.Ü)
Doç. Dr. Yahya Hışman ÇELİK (B.Ü)

ARALIK-2016

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesinde bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışmanım Sayın Doç. Dr. Cebeli ÖZEK'e teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Çalışma boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen Sn. Prof. Dr. Vedat SAVAŞ'a, Sn. Prof. Dr. Niyazi ÖZDEMİR'e, Sn. Doç. Dr. Ulaş ÇAYDAŞ'a, Sn. Yrd. Doç. Dr. Engin ÜNAL'a teşekkür ederim.

Bu eğitim seviyesine kadar, bana verdikleri emeklerinin karşılığını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim değerli anne ve babama ve ayrıca çalışma süresince bana her zaman destek olan sevgili eşim Nejla TAŞDEMİR'e ve varlığı ile ilham kaynağım olan tatlı kızım Elifnur'a da sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Atölye ve Laboratuvar çalışanlarına desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Vedat TAŞDEMİR
ELAZIĞ – 2016

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
TABLOLAR LİSTESİ	XV
SEMBOLLER LİSTESİ	XVI
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. TEMEL BİLGİLER	14
3.1. Plastik Deformasyon	14
3.2. Derin Çekme ve Derin Çekme Mekanikliği	20
3.3. Derin Çekmeyi Etkileyen Faktörler	24
3.3.1. İşlem Değişkenleri	24
3.3.1.1. Çekme Kuvveti	24
3.3.1.1.1. Silindirik Parçalar İçin Çekme Kuvveti	24
3.3.1.1.2. Dikdörtgen Parçalar İçin Çekme Kuvveti	26
3.3.1.2. Baskı Plakası (Pot Çemberi) Kuvveti (BPK)	27
3.3.1.3. Çekme Hızı	28
3.3.1.4. Limit Çekme Oranı (LÇO)	29
3.3.1.4.1. Silindirik Parçalar İçin Derin Çekme Adımları	30
3.3.1.4.2. Dikdörtgen Parçalar İçin Derin Çekme Adımları	32
3.3.1.5. Çekme Boşluğu	33
3.3.1.6. Kalıp Geometrisi	34
3.3.1.7. Yağlama	36
3.3.2. Malzeme Değişkenleri	40
3.3.2.1. Sıcaklığın Etkisi	40
3.3.2.2. Birim Şekil Değiştirme Hızı ve Hız Duyarlılığı İndeksinin “m” Etkisi	42
3.3.2.3. Pekleşme Katsayısının “n” Plastik Şekil Değişimine Etkisi	43
3.3.2.4. Anizotropinin Etkisi	46
3.3.2.5. Malzeme Tane Boyutunun Etkisi	48

3.3.2.6. Kalıntı Gerilmelerin Etkisi	48
3.4. Sac Metal Şekillendirme İşlemini Etkileyen Olumsuz Olaylar	49
3.4.1. Geri Yaylanma(Esneme)	49
3.4.1.1. Demire Testi (Split-ring test) (Geri yaylanma testi)	50
3.4.2. Portevin-Le Chatelier (PLC) Etkisi	50
3.5. Ilık Metal Şekillendirme Yöntemleri.....	51
3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi	56
3.6.1. İmplicit Yöntem.....	57
3.6.2. Eksplisit Yöntem	58
4. MATERYAL ve METOT	60
4.1. Çalışmanın Amacı	60
4.2. Deneysel Çalışmalar	60
4.3. Sonlu Elemanlar Analiz Çalışmaları	66
5. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA.....	69
5.1. Limit Çekme Oranı (LÇO) Sonuçları.....	71
5.1.1. Kalıp Açısının Çekme Oranına Etkisi	71
5.1.2. Sıcaklığın Çekme Oranı Üzerine Etkisi	82
5.2. Et Kalınlığı Ölçüm Sonuçları	97
5.2.1. Kalıp Açısının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi.....	98
5.2.2. Şekillendirme Sıcaklığının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	101
5.2.3. Baskı Plakası Kuvvetinin(BPK) Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	101
5.3. Zımba Kuvveti Ölçüm Sonuçları.....	105
5.4. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	108
5.5. Deney Parametrelerinin Kap Hasarları Üzerindeki Etkisi.....	113
5.6. Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi	115
6. SONLU ELEMANLAR METODU İLE SAYISAL ANALİZ.....	122
6.1. Limit Çekme Oranı (LÇO) Sonuçları.....	123
6.1.1. Kalıp Açısının Çekme Oranına Etkisi	123
6.1.2. Sıcaklığın Çekme Oranı Üzerine Etkisi	125
6.2. Et Kalınlığı Ölçüm Sonuçları	128
6.2.1. Kalıp Açısının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi.....	128
6.2.2. Şekillendirme Sıcaklığının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	131
6.2.3. Baskı Plakası Kuvvetinin(BPK) Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	132
6.3. Kaplardaki Gerilme Dağılımı Sonuçları.....	135

6.4. Sayısal Analiz Sonuçlarının Deneysel Çalışma Sonuçları ile Karşılaştırılması.....	139
7. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	142
7.1. Genel Sonuçlar	142
7.2. Öneriler.....	144
KAYNAKLAR.....	146
ÖZGEÇMİŞ	155



ÖZET

Derin çekme işlemi oldukça geniş uygulama alanına sahiptir. Bundan dolayı endüstrinin vazgeçilmez metal şekillendirme yöntemlerinden biridir. Özellikle oda sıcaklığında, yüksek mukavemetli ve düşük şekillendirme yeteneğine sahip sac metallerin (Al, Mg, Ti alaşımları vb.) şekillendirilebilirliğinde önemli zorluklar vardır. Bu zorlukları ortadan kaldırmak için son zamanlarda sıcaklık etkisiyle derin çekme çalışmaları hız kazanmıştır. Sıcaklığın yanı sıra, kalıbın şekli ve geometrisi, malzemenin mekanik özellikleri, ilkel parça geometrisi ve büyüklüğü, kalıp-malzeme-baskı plakası arasındaki sürtünme ve yağlama şartları, baskı plakası kuvveti ve kalıp boşluğu gibi faktörler yöntemi doğrudan etkilemektedir. Bu bakımdan yöntemin verimliliği için uygun işlem şartlarının seçimi önemlidir.

Bu çalışmada, silindirik kapların açılı derin çekme kalıplarında şekillendirilmesinde, şekillendirme sıcaklığının, kalıp/baskı plakası açısının ve baskı plakası kuvvetinin; limit çekme oranı, zımba kuvveti, kap et kalınlıkları ve kabın sertlik dağılımı üzerindeki etkileri deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır. Bunun için, kalıp yüzeylerine 0°, 5°, 10° ve 15° açılar verilerek deneyler 25 °C, 100 °C, 175°C ve 250 °C sıcaklıklarda, 1200 N, 2400 N ve 3600 N baskı plakası kuvvetlerinde ve 4 mm/s sabit zımba hızında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kalıp boşluğu 1,35 mm, zımba ve kalıp radyüsleri ise 8 mm sabit alınmıştır. Deneyler, 1 mm kalınlığında EN AW-5754 (AlMg3) malzeme ile kalıp ve iş parçası arasındaki sürtünme kuvvetini düşürmek için MoS₂ katı yağlayıcı kullanılarak yapılmıştır.

Derin çekme sırasında oluşan çekme kuvvetleri, çekme eksenine yerleştirilen yük hücresi yardımıyla 10⁻¹ saniye aralığında ölçülmüştür. Çekilen kaplardaki kalınlık değişimi 10⁻⁴ mm hassasiyetli mikrometre ile tespit edilmiştir. Numunelerin sertlik ölçümleri de hadde doğrultusu boyunca 200 gr yük uygulanarak (HV 0,2 kg) yapılmıştır. Çalışma aynı zamanda, sonlu elemanlar metodu (SEM) ile eta/Dynaform paket programında modellenmiştir. Veriler, tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, eta/Dynaform paket program sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, kalıp yüzeylerine açı vererek yapılan ılık derin çekmenin limit çekme oranı, et kalınlığı, zımba kuvveti ve kabın sertlik dağılımı üzerinde olumlu etkilerinin olduğu, sıcaklık arttıkça limit çekme oranının önemli ölçüde arttığı, et kalınlığının daha

homojen hale geldiği, zımba kuvveti ve kabın sertlik değeri nin ise önemli ölçüde düştüğü deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir. SEM ile elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile elde edilen sonuçlara yakın oldukları gözlenmiştir. Deneysel sonuçları varyans analizi (ANOVA) metodu ile istatistiksel olarak da değeri len dirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İlık Derin Çekme, Sertlik Dağılımı, Açılı Derin Çekme, Limit Çekme Oranı, Sonlu Elemanlar Metodu, ANOVA.



SUMMARY

The Investigation of the Effect of Temperature on Limit Drawing Ratio in Angular Deep Drawing Dies

The deep drawing process has very wide applications. For that reason, it is one of the most important metal forming process in industry. It is difficult to shape metals such as Al, Mg, and Ti alloys with features of high strength and low forming ability at especially room temperature. The deep drawing investigations have been recently accelerated in order to eliminate these problems. In addition to the temperature, such as the shape and geometry of the die, the mechanical features of the material, the dimensions and geometry of blank, the friction and lubrication between the die-blank-blank holder, the blank holder force and the die cavity have been effecting the process directly. Therefore, it's important to choose the appropriate process conditions for the productivity of the method.

In this study, the effects of the forming temperatures, die/blank holder angles and blank holder force on the limit drawing ratio, the punch force, the wall thickness and hardness distribution were investigated both experimentally and numerically in angular deep drawing of cylindrical cups. For this purpose, tests were conducted by giving 0°, 5°, 10° and 15° angles to die/blank holder surfaces at room temperature, 100°C, 175°C and 250°C temperatures. The EN AW-5754 (AlMg3) sheet metal parts in 1 mm in thickness were used as the target material. MoS₂ (3-4 µm) was used as a lubricant for the purpose of reducing friction between surfaces.

The punching forces during deep drawing operations were recorded by a load cell conducted on the forming axis with 10⁻¹ second intervals. A micrometer in 10⁻⁴ mm resolution was used to measure the variations in the wall thickness of the cups. The hardness of the samples was measured by applying a force of 200 g (HV 0,2 kgf) through the rolling direction. The experimental results were also modeled using finite element method. eta/Dynaform computer package program was used for this purpose. Full factorial experimental design method was used to collect the data. The eta/Dynaform results were compared with experimental findings.

As a result, it was observed the positive effects on the limit drawing ratio, wall thickness, punch force, and the hardness distribution of the warm deep drawing. It was found out that when the limit drawing ratio was increased from 2,14 to 2,80; the distribution of wall thickness was became more homogeneous and the hardness value of

the cup was decreased with the increasing temperature. The FEM model results were in a good agreement with the experimental results. The experimental results were statistically evaluated by analysis of variance (ANOVA) method.

Keywords: Warm Deep Drawing, Hardness Distribution, Angular Deep Drawing, Limit Drawing Ratio, Finite Elements Method, ANOVA.



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Temel şekil değişimi [64]; a) Basma, b) Çekme, c) Kayma	14
Şekil 3.2. Derin çekme işlemi, a. Şematik, b. Perspektif [67].....	21
Şekil 3.3. Derin çekmenin mekaniği [68].	22
Şekil 3.4. Derin çekme esnasında parçada boylamsal kısımlarda meydana gelen gerilmeler [68].....	22
Şekil 3.5. Derin çekme işleminde iş parçasına etki eden kuvvetler [66].....	23
Şekil 3.6. Dikdörtgen veya kare kapların köşe gerilme analizi [70].	23
Şekil 3.7. a) Dikdörtgen kabın boyutları, b) Eşit alanlı elemanlara ayrılması [72].....	27
Şekil 3.8. Silindirik iş parçasında limit çekme oranının araştırılması sonucu ortaya çıkan hasar [81].	32
Şekil 3.9. Çekme oranının büyük olmasından dolayı parçada meydana gelen yırtılma [78]	33
Şekil 3.10. Zimba ve kalıp radyüsü [66].	35
Şekil 3.11. Sıcaklığın mühendislik çekme diyagramına etkisi[64]	40
Şekil 3.12. Sıcaklığın pekleşme üsteline etkisi [64].....	41
Şekil 3.13. Sıcaklığın elastiklik modülüne etkisi [64].....	41
Şekil 3.14. Şekil değiştirme hızının çekme dayanımına etkisi [64].	42
Şekil 3.15. Pekleşme üstelinin gerçek gerilme-gerçek şekil değişimine etkisi $\sigma_g = K \cdot \epsilon^n$ [64].....	44
Şekil 3.16. Logaritmik koordinatlarda gerçek çekme diyagramı [64].	45
Şekil 3.17. Dikey anizotropi parametresi, r [64]	46
Şekil 3.18. Geri yaylanma numunesi[101].....	49
Şekil 3.19. Split- ring testi; 1) çekilmiş kap, 2) açılmış halka (split-ring), 3) bilezik alındıktan sonra kabın alt ve üst kısmı[98].....	50
Şekil 3.20. Geleneksel ısıtma yöntemi ile şekillendirme şeması	52
Şekil 3.21. Lokal ısıtma yöntemi	53
Şekil 3.22. Farklı uygulamalarda kullanılan özellikler	54
Şekil 3.23. Oda sıcaklığında(a) ve yüksek sıcaklıkta(b) çekilmiş numune[16].	55
Şekil 3.24. Bir problemin sonlu elemanlar modeli [89].	56
Şekil 3.25. Eksplisit yöntem kullanılan dinamik durumlar [93, 94].	57
Şekil 4.1. 5754-O malzemenin sıcaklığa bağlı gerçek gerilme-gerinim eğrileri [96].	61
Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan kalıp geometrileri, ölçüler mm	62

Şekil 4.3. Ilık derin çekme işlem sıralaması.....	63
Şekil 4.4. Çalışmaların yapıldığı deney seti	65
Şekil 4.5. Kalıp, zımba, baskı plakası ve deney numunesi ağ yapıları	67
Şekil 4.6. Kalıp elemanlarının oluşturulması	68
Şekil 5.1. Derin çekme işleminde meydana gelen gerilmeler	69
Şekil 5.2. Dairesel kapta derin çekme esnasında oluşan gerilme bölgeleri.....	70
Şekil 5.3. Derin çekmede zımba kuvveti- kurs mesafesi ilişkisi	70
Şekil 5.4. 25 °C ve 1200 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$	71
Şekil 5.5. 25 °C ve 2400 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$	72
Şekil 5.6. 25 °C ve 3600 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$	72
Şekil 5.7. T=25 °C'de çekilen numuneler için kalıp yüzey açısının çekme oranı üzerindeki etkisi.....	73
Şekil 5.8. 100°C ve 1200 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$... 74	74
Şekil 5.9. 100°C ve 2400 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$... 74	74
Şekil 5.10. 100°C ve 3600 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$. 75	75
Şekil 5.11. T=100°C'de çekilen numuneler için kalıp yüzey açısının çekme oranı üzerindeki etkisi.....	75
Şekil 5.12. 175 °C ve 1200 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$	76
Şekil 5.13. T=175 °C sıcaklık ve 1200 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi... 76	76
Şekil 5.14. 175 °C ve 2400 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$	77
Şekil 5.15. T=175 °C sıcaklık ve 2400 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi... 77	77
Şekil 5.16. 175 °C ve 3600 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$	78
Şekil 5.17. T=175 °C sıcaklık ve 3600 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi... 78	78
Şekil 5.18. 250 °C ve 1200 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$	79
Şekil 5.19. T=250°C sıcaklık ve 1200 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi 79	79
Şekil 5.20. 250 °C ve 2400 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$	80
Şekil 5.21. T=250 °C sıcaklık ve 2400 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi... 80	80
Şekil 5.22. 250 °C ve 3600 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$	81
Şekil 5.23. T=250 °C sıcaklık ve 3600 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi... 81	81
Şekil 5.24. 1200 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	83

Şekil 5.25. 1200 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi.....	83
Şekil 5.26. 2400 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	84
Şekil 5.27. 2400 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi.....	84
Şekil 5.28. 3600 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	85
Şekil 5.29. 3600 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi.....	85
Şekil 5.30. 1200 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	86
Şekil 5.31. 1200 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri.....	86
Şekil 5.32. 2400 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	87
Şekil 5.33. 2400 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri.....	88
Şekil 5.34. 3600 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	88
Şekil 5.35. 3600 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri.....	89
Şekil 5.36. 1200 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	90
Şekil 5.37. 1200 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri.....	90
Şekil 5.38. 2400 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	91
Şekil 5.39. 2400 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri.....	91
Şekil 5.40. 3600 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	92
Şekil 5.41. 3600 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri.....	92
Şekil 5.42. 1200 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	93
Şekil 5.43. 1200 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri.....	93
Şekil 5.44. 2400 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	94
Şekil 5.45. 2400 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri.....	94
Şekil 5.46. 3600 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	95
Şekil 5.47. 3600 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri.....	95
Şekil 5.48. α ve T'nin β üzerindeki etkileri.....	96
Şekil 5.49. Et kalınlığı ölçümü için hazırlanan numune	97
Şekil 5.50. Et kalınlıklarının ölçülmesi	97
Şekil 5.51. $\beta=2,14$ için 25°C 'de α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi	98
Şekil 5.52. $\beta=2,14$ için 100°C 'de α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi	99
Şekil 5.53. $\beta=2,35$ için 175°C 'de α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi	99
Şekil 5.54. $\beta=2,75$ için 250°C 'de α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi	100
Şekil 5.55. $\beta=2,17$ için şekillendirme sıcaklığının et kalınlığı üzerindeki etkisi	101
Şekil 5.56. $\beta=2,14$ için BPK'nin sıcaklığa bağlı olarak et kalınlığı üzerindeki etkisi	102
Şekil 5.57. $\beta=2,75$ için, 250°C ve $\alpha=0^\circ$ 'de BPK'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi	103

Şekil 5.58. $\beta=2,75$ için, 250°C ve $\alpha=10^{\circ}$ de BPK'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi	103
Şekil 5.59. $\beta=2,14$ için 25°C 'de kalıp açısının zımba kuvvetine olan etkisi.....	105
Şekil 5.60. $\beta=2,75$ için 250°C 'de kalıp açısının zımba kuvvetine olan etkisi.....	106
Şekil 5.61. $\beta=2,14$ için zımba kuvvetinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi.....	106
Şekil 5.62. $\beta=2,75$ için zımba kuvvetinin BPK'ne bağlı olarak değişimi	107
Şekil 5.63. Numunenin mikrosertlik ölçüm şeması	108
Şekil 5.64. $\beta=2,14$ için sıcaklığının sertlik dağılımı üzerindeki etkisi	109
Şekil 5.65. $\beta=2,14$ için BPK'nin sertlik dağılımı üzerindeki etkisi	109
Şekil 5.66. $\beta=2,14$ için kalıp açısının(α) oda sıcaklığında sertlik dağılımı üzerindeki etkisi	110
Şekil 5.67. $\beta=2,14$ için kalıp açısının(α) 250°C 'de sertlik dağılımı üzerindeki etkisi	110
Şekil 5.68. Farklı LÇO ve sıcaklık değerleri sonucu elde edilen kaplardaki sertlik dağılımı	111
Şekil 5.69. $\beta=2,75$ için kalıp açısının(α) 250°C 'de sertlik dağılımı üzerindeki etkisi	111
Şekil 5.70. Çekilen kaplarda oluşan yırtılma(a) ve buruşma(b) hataları.....	113
Şekil 5.71. $\beta=2,75$ için 250°C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde elde edilen numuneler, a) $\alpha=0^{\circ}$ b) $\alpha=5^{\circ}$ c) $\alpha=10^{\circ}$ d) $\alpha=15^{\circ}$	114
Şekil 5.72. Limit çekme oranı için S/N grafikleri	118
Şekil 5.73. Zımba kuvveti için S/N grafikleri	119
Şekil 5.74. Et kalınlığı için S/N grafikleri.....	120
Şekil 6.1. Kalıp modelinin sonlu elemanlar sistemi	122
Şekil 6.2. 25°C ve 1200 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^{\circ}$ b) $\alpha=5^{\circ}$ c) $\alpha=10^{\circ}$ d) $\alpha=15^{\circ}$	123
Şekil 6.3. 100°C ve 1200 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^{\circ}$ b) $\alpha=5^{\circ}$ c) $\alpha=10^{\circ}$ d) $\alpha=15^{\circ}$	124
Şekil 6.4. 175°C ve 1200 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^{\circ}$ b) $\alpha=5^{\circ}$ c) $\alpha=10^{\circ}$ d) $\alpha=15^{\circ}$	124
Şekil 6.5. 250°C ve 1200 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^{\circ}$ b) $\alpha=5^{\circ}$ c) $\alpha=10^{\circ}$ d) $\alpha=15^{\circ}$	125
Şekil 6.6. 1200 N BPK ve $\alpha=0^{\circ}$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	126
Şekil 6.7. 3600 N BPK ve $\alpha=10^{\circ}$ deneylerinden elde edilen numuneler.....	127
Şekil 6.8. $\beta=2,17$ için 25°C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi a) $\alpha=0^{\circ}$ b) $\alpha=5^{\circ}$ c) $\alpha=10^{\circ}$ d) $\alpha=15^{\circ}$	128
Şekil 6.9. $\beta=2,17$ için 100°C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi a) $\alpha=0^{\circ}$ b) $\alpha=5^{\circ}$ c) $\alpha=10^{\circ}$ d) $\alpha=15^{\circ}$	129
Şekil 6.10. $\beta=2,35$ için 175°C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi a) $\alpha=0^{\circ}$ b) $\alpha=5^{\circ}$ c) $\alpha=10^{\circ}$ d) $\alpha=15^{\circ}$	130

- Şekil 6.11.** $\beta=2,53$ için $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi **a)** $\alpha=0^{\circ}$ **b)** $\alpha=5^{\circ}$ **c)** $\alpha=10^{\circ}$ **d)** $\alpha=15^{\circ}$ 131
- Şekil 6.12.** $\beta=2,17$ için $\alpha=5^{\circ}$ kalıp açısı ve 1200 N baskı plakası kuvveti şartlarında şekillendirme sıcaklığının et kalınlığı üzerindeki etkisi **a)** 25°C **b)** 100°C **c)** 175°C **d)** 250°C 132
- Şekil 6.13.** $\beta=2,17$ için BPK'nin sıcaklığa bağlı olarak et kalınlığı üzerindeki etkisi ($T=25^{\circ}\text{C}$, $\alpha=0^{\circ}$) **a)** 1200 N **b)** 2400 N **c)** 3600 N 133
- Şekil 6.14.** $\beta=2,17$ için BPK'nin sıcaklığa bağlı olarak et kalınlığı üzerindeki etkisi ($T=250^{\circ}\text{C}$, $\alpha=0^{\circ}$) **a)** 1200 N **b)** 2400 N **c)** 3600 N 133
- Şekil 6.15.** $\beta=2,53$ için BPK'nin, 250°C ve $\alpha=0^{\circ}$ 'ye bağlı olarak et kalınlığı üzerindeki etkisi **a)** 1200 N **b)** 2400 N **c)** 3600 N 133
- Şekil 6.16.** $\beta=2,53$ için BPK'nin, 250°C ve $\alpha=10^{\circ}$ 'ye bağlı olarak et kalınlığı üzerindeki etkisi **a)** 1200 N **b)** 2400 N **c)** 3600 N 134
- Şekil 6.17.** 3600 N ve 25°C sıcaklık şartlarında kalıp açısının gerilme dağılımına etkisi(MPa) **a)** $\alpha=0^{\circ}$ **b)** $\alpha=5^{\circ}$ **c)** $\alpha=10^{\circ}$ **d)** $\alpha=15^{\circ}$ 135
- Şekil 6.18.** 3600 N ve $\alpha=0^{\circ}$ şartlarında sıcaklığın gerilme dağılımına etkisi(MPa) **a)** 25°C **b)** 100°C **c)** 175°C **d)** 250°C 136
- Şekil 6.19.** 25°C ve $\alpha=10^{\circ}$ şartlarında baskı plakası kuvvetinin gerilme dağılımına etkisi(MPa) **a)** 1200 N **b)** 2400 N **c)** 3600 N 137
- Şekil 6.20.** 1200 N baskı plakası kuvvetinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen limit çekme oranlarının değişimi 139
- Şekil 6.21.** 1200 N baskı plakası kuvvetinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen zımba kuvvetlerinin değişimi 140
- Şekil 6.22.** 2400 N baskı plakası kuvvetinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen zımba kuvvetlerinin değişimi 140
- Şekil 6.23.** 3600 N baskı plakası kuvvetinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen zımba kuvvetlerinin değişimi 141

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. Çeşitli metallerin kristal yapısı [65].	17
Tablo 3.2. d/D oranına bağlı olarak düzeltme(korreksiyon) faktörü, k	25
Tablo 3.3. Bazı derin çekme çeliklerine ait maksimum çekme dayanımı $R_{m_{max}}$	25
Tablo 3.4. Silindirik çekmelerde malzemelerin cinsine göre çekme hızları [70].	29
Tablo 3.5. Zımba çapı ve sac kalınlığına bağlı olarak ortalama β değerleri [72].	30
Tablo 3.6. Çeşitli malzemeler için kademelendirme katsayısı [64].	31
Tablo 3.7. Çekme boşluğu değerleri [66,82]	34
Tablo 3.8. Kalıp radyüsü için önerilen değerler [66].	35
Tablo 3.9. Yağlama maddesine göre çekme işlemindeki sürtünme katsayıları [85].	37
Tablo 3.10. Düşük karbonlu çeliklerin çekimlerinde kullanılabilecek yağlama maddeleri [66].	38
Tablo 3.11. Çeşitli malzemelerin çekimlerinde kullanılabilen yağlama maddeleri [66].	39
Tablo 3.12. Çeşitli malzemelerin oda sıcaklığındaki K ve n değerleri [64].	45
Tablo 4.1. EN AW-5754 (AlMg3) sacının kimyasal analizi, %	61
Tablo 4.2. Deney numunesinin mekanik özellikleri	61
Tablo 4.3. İlkel parça çaplarına karşılık gelen limit çekme oranları	62
Tablo 4.4. Derin çekme parametreleri	64
Tablo 4.5. Analizlerde kullanılan sac malzemenin mekanik özellikleri[3,12,109,110]	66
Tablo 4.6. Analizlerde kullanılan sac ve kalıp malzemelerinin termal özellikleri[108].	66
Tablo 5.1. Kalıp açısı ve şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen LÇÖ değerleri	96
Tablo 5.2. Derin çekme parametre ve seviyeleri	117
Tablo 5.3. Limit çekme oranı için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları	117
Tablo 5.4. Zımba kuvveti için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları	118
Tablo 5.5. Et kalınlığı için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları	119
Tablo 5.6. Limit çekme oranı için ANOVA sonuçları.	120
Tablo 5.7. Zımba kuvveti için ANOVA sonuçları.	121
Tablo 5.8. Et kalınlığı için ANOVA sonuçları	121
Tablo 6.1. Zımba kurs mesafesi boyunca gerilme dağılımı(2400 N ve 25°C)	138

SEMBOLLER LİSTESİ

σ_g	: Gerçek gerilme
K	: Mukavemet katsayısı
ε	: Gerçek birim şekil değiştirme
n	: Deformasyon sertleşmesi üssü
σ	: Plastik gerilme
C	: Malzeme sabiti
m	: Deformasyon hızı duyarlılığı üssü
$\dot{\varepsilon}$	: Gerçek deformasyon hızı (mm/s)
l_o	: Numunenin deformasyon öncesi uzunluğu
l	: Numunenin deformasyon sonrası uzunluğu
v	: Pres hızı
F_z	: Zımba kuvveti
d	: Zımba çapı
s	: Sac malzeme kalınlığı
R_m	: Sac malzemenin çekme dayanımı
n	: Katsayı
r_e	: Köşe radyüsü
p	: Baskı plakası basıncı
D	: İlkel parça çapı
β_{actual}	: Gerçek çekme oranı (ilk çekme)
r_k	: Kalıp radyüsü
r_z	: Zımba radyüsü
w	: Çekme boşluğu
α	: Kalıp açısı
β	: Limit çekme oranı
E	: Elastikiyet modülü
ν	: Poisson oranı
BPK	: Baskı plakası kuvveti
ZK	: Zımba kuvveti
$L\check{C}O$	: Limit çekme oranı

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi ile sınırlı malzeme kaynaklarının daha verimli bir biçimde kullanılması için yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Mevcut malzemelerden daha verimli bir şekilde yararlanmak için birçok yeni malzemeler ve yeni yöntemler geliştirilmektedir.

Bu yöntemler içinde sac şekillendirme, ev aletleri, beyaz eşya, otomotiv ve savunma sanayi başta olmak üzere pek çok uygulama alanı bulduğundan büyük bir önem arz etmektedir. Bu nedenle, sac metal kalıpcılığı tekniğinde kullanılan yöntem ve parametrelerin iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Derin çekme sacların şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Derin çekme yöntemi ile sac metal şekillendirme işleminde, sac malzeme zımbaya sarıldığından ve çekmeyi etkileyen birçok parametre olduğundan bu durum şekillendirme işlemini karmaşık hale getirmektedir.

Derin çekme işleminde karşılaşılan problemlerin çözümünde deneysel ve teorik çalışmalar birlikte yürütülmektedir. Çekme işleminin düzenli olarak yapılabilmesi çekme işlemini etkileyen parametrelerin doğru ve uygun olarak seçilmesi ile ilişkilidir.

Derin çekmede ürün kalitesi, çekilen sacın boyutlarına bağlıdır. Burada önemli olan, malzemenin kalıp içerisine akışının kontrol edilmesidir. Bu kontrol, baskı plakası yardımı ile ilkel parça yüzeyine belirli bir kuvvet uygulaması ile sağlanmaktadır. Baskı plakası kuvveti(BPK), malzemenin kalıp içerisine daha düzenli bir şekilde akmasını sağlayan önemli bir parametredir. Baskı plakası kuvvetinin yanı sıra, zımba–kalıp radyüsleri, zımba kuvveti(ZK), çekilecek kabın ilkel parça geometrisi, malzeme anizotropisi, hadde yönü, malzemenin kimyasal bileşimi, mekanik özellikleri, imalat yöntemi, deformasyon hızı, ısıtma işlem ve şekillendirme sırasında uygulanan sıcaklık değerleri gibi faktörler derin çekme işlemi üzerinde önemli etkiye sahiptirler [1]. Buna yüksek sıcaklık gerinim hız hassasiyet indeksi de eklenebilir. Yukarıda bahsedilen bu parametrelerin bazıları sıcaklığa bağlıdır. Bundan dolayı yüksek sıcaklığın kritik bir fonksiyonu vardır. Bu noktada yüksek sıcaklıkta deformasyon işleminin parametreleri şöyle özetlenebilir; Sıcaklık, Sıcaklık gradyanı, Gerinim hızı, Gerinim hızı hassasiyet indeksi (m), Malzeme geçmişi [2].

Günümüzde, yüksek sıcaklıkta (ılık/sıcak) derin çekme uygulamaları henüz etkili bir şekilde kullanılmamasına rağmen yakın gelecekte imalat uygulamalarında çok önemli bir yere sahip olacağı açıktır. Özellikle yüksek mukavemetli/düşük şekillendirme yeteneğine sahip metallerin oda sıcaklığında derin çekilebilirliğinde, malzemenin anizotropisine bağlı olarak malzeme yüzeyinde meydana gelebilecek buruşukluklar, kırışıklıklar, kulaklanmalar ve yırtılmalar gibi önemli problemler vardır. Bu tür problemleri ortadan kaldırmak için yüksek sıcaklıkta (ılık/sıcak) derin çekme çalışmaları hız kazanmıştır.

Bu çalışma ile, sıcaklığın ve kalıp geometrisinin derin çekme işlemi üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Şekillendirilebilirliği kontrol etmek için deneyler, kalıp ve baskı plakası yüzeylerine 0°, 5°, 10° ve 15° açılar verilerek 25°C, 100°C, 175°C ve 250°C sıcaklıklarında ve 1200 N, 2400 N, 3600 N'luk baskı plakası kuvvetlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde zımba ve kalıp köşe radyüsü 8 mm olarak sabit tutulmuş, MoS₂ yağlayıcı kullanılmıştır. Çalışma aynı zamanda, eta/Dynaform paket programı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak da yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen limit çekme oranları, kap et kalınlıkları ve zımba kuvvetleri sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla büyük benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, kalıp yüzeylerine açı vererek yapılan ılık derin çekmenin limit çekme oranı, et kalınlığı, zımba kuvveti ve kabın sertlik dağılımı üzerinde olumlu etkilerinin olduğu, deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir. Yapılacak çalışmanın kalıpcılık sektöründeki uygulamalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Derin çekme kalıplarında, çekme parametrelerinin ürün kalitesi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar değerlendirildiğinde, şekil verme işlemi sırasında oluşan deformasyonların, kuvvetlerin ve gerilmelerin incelendiği tespit edilmiştir. En uygun ürünü elde etmek için, farklı parametrelerin kullanıldığı ve bu parametrelerin optimizasyonunu yapmak amacıyla, çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

Erdin ve diğ. [2], yüksek mukavemetli ve düşük şekillendirme özelliğine sahip metal sacların yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, IMI 230 titanyum bakır alaşımı ile 20MnCr5 düşük karbonlu çelik kullanmışlardır. Deneyleri 5 mm/s çekme hızında, sıcaklık aralığı olarak da titanyum alaşımı için 25-750 °C sıcaklık, çelik için ise 25-850 °C sıcaklığında gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda derin çekilebilirliğin, sıcaklıkla orantılı olmadığı ancak maksimum derin çekme yüksekliğinin yüksek sıcaklıklarda elde edildiğini belirtmişlerdir.

Laurent ve diğ. [3], AA5754-O alüminyum alaşımının ılık derin çekilmesi üzerine deneysel ve Von Mises izotropik kriteri ile Hill 48 anizotropik akma kriterini kullanarak sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, şekillendirme sıcaklığının 150 °C'nin üzerine çıkması durumunda ütüleme kuvvetinin ve geri yaylanma miktarının azaldığını, şekillendirilebilirliğin ise önemli ölçüde arttığını bulmuşlardır. Sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçların büyük bir benzerlik gösterdiğini ancak akma kriterlerinin doğru şekilde seçiminin oldukça önemli olduğunu tespit etmişlerdir.

Afshin ve diğ. [4], farklı tane boyutuna sahip 1,8 mm ve 2 mm kalınlığında Al1050, Al5052 ve AISI304 sac malzemelerin çok katlı ılık derin çekilebilirliği üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Al malzemelerin tane boyutunu değiştirmek için malzemeleri 350 °C, 400 °C ve 450 °C'de 1 saat tavladıktan sonra derin çekme işlemlerini 25 °C, 100 °C ve 160 °C'de gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda tane boyutunun gerilme, uzama ve sürtünmeye önemli etkisinin olduğunu bulmuşlardır.

Jayahari ve diğ. [5], ılık derin çekme yöntemi ile üretilen 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin metalürjik incelemelerini yapmışlardır. Mikroyapıdaki değişimleri gözlemek amacı ile çalışmalarını farklı sıcaklık ve farklı limit çekme oranı(LÇO) değerlerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, martenzitik dönüşümün sadece

sıcaklıktan etkilenmediğini aynı zamanda malzemenin deformasyon hızından da etkilendiğini, 300 °C'nin üzerine çıkıldığında dinamik gerilme rejiminin görüldüğünü ve gevrekleşen yapının malzemenin şekillendirilebilirliği düşürmesinden dolayı en yüksek LÇO'na 150 °C'de ulaşıldığını belirtmişlerdir.

Ghosh ve diğ. [6], 6016 ve 6061 alaşımlarının ılık ve geleneksel derin çekilmesi üzerine bir çalışma yapmışlar ve çalışmalarında 1 mm ve 1,2 mm kalınlıklarında iki farklı malzeme kullanmışlardır. Deneyleri, oda sıcaklığı ve 250°C'de gerçekleştirerek çekme hızı, çekme oranı, tutma zamanı ve temperleme işleminin etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, sıcaklık artışının kulaklanma oluşumunu azalttığı, anizotropinin sıcaklıkla değişmediğini ve kap ağzına doğru kalınlık artışının meydana geldiğini bulmuşlardır.

Jayahari ve diğ. [7], 1 mm kalınlığında AISI 304 çelik malzemenin derin çekilebilirliğini oda sıcaklığı ve 150 °C'de deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Oda sıcaklığında 2,1 olan LÇO'nun 150 °C'de 2,5'e kadar çıktığını, daha yüksek sıcaklıklarda yapılan deneylerde herhangi bir artışın olmadığını ve sonlu elemanlar analizi sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının birbirine yakın olduğunu tespit etmişlerdir.

Wen-yu Ma ve diğ. [8], 2 mm kalınlığında AA6111 alaşımının yüksek sıcaklıkta derin çekilmesi üzerine sürtünme katsayısının etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Sayısal çalışmalarını 0, 0.1, 0.15, 0.20 ve 0.25 sürtünme katsayısı değerlerinde yapmışlardır. Yağlamanın ve sürtünme katsayısının et kalınlığını önemli ölçüde etkilediğini, en ideal sürtünme değerinin 0.15 olduğunu ve simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, oluşan hasarların kap tabanına ve kap köşesine yakın bölgelerde olduğunu belirtmişlerdir.

Kotkunde ve diğ. [9], 0,89 mm kalınlığında Ti-6Al-4V alaşımının ılık derin çekilmesi üzerine anizotropi akma kriterlerinin etkisini 400 °C'de deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Hill 48, Barlat 1989, Barlat 1996, Barlat 2000 ve Cazacu-Barlat anizotropi akma kriterlerini kullanmışlardır. Kalınlık dağılımı, kulaklanma profili, malzemenin tanımlanmasındaki karmaşıklık ve çözme süresi olarak deneysel sonuçlara en yakın sonucun Cazacu-Barlat kriteri ile elde edildiğini belirtmişlerdir.

Ghaffari Tari ve diğ. [10], 1 mm kalınlığında AZ31B magnezyum alaşımının teflon yağlayıcı kullanılarak farklı ısı şartları altında derin çekilmesi üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmalarını kalıbı, baskı plakasını ve zimbayı ısıtarak ve zimbanın dış cidarını da soğutarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda AZ31B

alaşımının derin çekilmesi sırasında oluşan kırılma mekanizmasının şekillendirme sıcaklığının kontrolüne bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Çavuşoğlu ve diğ. [11], 1,5 mm kalınlığında malzeme kullanarak 7,5 mm/dk, 75 mm/dk, 225 mm/dk ve 450 mm/dk deformasyon hızlarının DP600 ve DP780 malzemelerinin mekanik özellikleri ve derin çekilmesi üzerine deneysel ve sayısal çalışma yapmışlardır. Analiz sonucunda deformasyon hızındaki artışın kabın üst kısımlarında et kalınlığında incelmeleri arttırdığı, etek kısmında kalınlık artışına yol açtığı, geri esneme miktarı ve kalıplama kuvvetini ise arttırdığını belirtmişlerdir.

Laurent ve diğ. [12], 1 mm kalınlığında AA5754-O alaşımı kullanarak 25⁰C, 100⁰C, 150⁰C ve 200⁰C’de sıcaklıklardaki şekillendirme koşulları altında alüminyum alaşımının mekanik davranışı ve geri yaylanması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Sıcaklığın zımba kuvvetini ve geri yaylanmayı etkileyen önemli bir faktör olduğunu ayrıca geri yaylanma mekanizmasına sebep olan temel faktörün kap duvarındaki teğetsel gerilmeler olduğunu vurgulamışlardır.

Şen ve Kurgan [13], 1,2 mm ve 1,5 mm kalınlığında HC300LA malzemenin 25⁰C, 150⁰C ve 300⁰C sıcaklıklarda şekillendirilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Deneylerinde kullanmışlar ve deneyleri yapmışlardır. Bu malzeme için şekillendirme sıcaklık aralığının 170-295⁰C olduğunu, 1,2 mm kalınlık için LÇO’nın 2,14’den 2,61’e, 1,5 mm kalınlığındaki malzeme için ise 2,15’den 2,59’a çıktığını belirtmişlerdir. 170-295⁰C’de çekilen kapların mikro yapılarında herhangi bir değişimin olmadığını belirtmişlerdir.

Ethiraj ve diğ. [14], 1 mm kalınlığında AISI 304 paslanmaz çeliğin derin çekilebilirliğine sıcaklığın ve çekme kuvvetinin etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, ılık şekillendirme işlemin çekme kuvvetini azalttığını, sıcaklığın etkisi ile boyun verme ve çatlama olayının olmadığını belirtmişlerdir.

Palumbo ve diğ. [15], 0,6 mm kalınlığındaki Mg alaşımlarının ılık derin çekilmesi üzerine deneysel ve sayısal çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında 2 sistem tasarlanmışlardır. Birinci sistemde ısıtıcıları dışı kalıp içine yerleştirerek ve zımbayı soğutmadan 10 mm/dk çekme hızında ve 120 °C, 140 °C, 150 °C, 160 °C ve 170 °C sıcaklıklarda; ikinci sistemde ise ısıtıcıları baskı plakası içine yerleştirerek ve zımbayı soğutarak 15 mm/dk çekme hızında ve 250 °C sıcaklığında yapılmışlardır. İkinci sistemde 3,1 limit çekme oranına ulaşıldığını ifade etmişlerdir.

Takuda ve diğ. [16], 1 mm kalınlığında AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin oda sıcaklığı, 90 °C, 120 °C ve 150 °C sıcaklıklarda derin çekilerek şekillendirilmesi üzerine

deneysel ve sayısal çalışma yapmışlardır. Hem deneysel hem de sayısal olarak oda sıcaklığında 2,0 olan limit çekme oranının ılık derin çekme ile 2,7'ye yükseldiğini belirterek ısıtmanın şekillendirme üzerinde önemli etkisinin olduğunu vurgulamışlardır.

Palumbo ve diğ. [17], 0,8 mm kalınlığında alüminyum alaşımının ılık derin çekilebilirliğini 100-250 °C numune merkez sıcaklığı aralığında ve 1 mm/dk, 5 mm/dk zımba hızlarında sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda 110 °C sıcaklık ve 1 mm/dk hızda LÇO'da %44'lük önemli bir artışın olduğunu bulmuşlardır

Swadesh ve diğ. [18], yüksek sıcaklıkta 2 mm kalınlığındaki EDD çeliğinin kap duvarlarında deformasyon uzamasının etkisini belirlemek üzere bir çalışma yapmışlardır. Deneylerde kalınlık azalmasını %10, %25, %40 oranında sağlayacak üç farklı kalıp ve 200, 400, 600 °C sıcaklıklar kullanmışlardır. Çalışmada en iyi üniform kalınlık dağılımını veren %25 azalmayı 600 °C sıcaklıkta elde etmişlerdir.

Shoichiro ve diğ. [19], lokal ısıtma ve soğutma tekniği kullanarak 0,5 mm kalınlığındaki AZ31-O Mg alaşımının 400 °C sıcaklık ve 200 mm/dk zımba hızında derin çekilebilirliği üzerine bir çalışma yapmışlardır. Lokal ısıtma ve soğutma tekniği ve değiştirilebilir baskı plakası kuvveti ile 115 mm yüksekliğinde kapların çekilebildiği, bu yöntem ile LÇO'nun 2,1 den 5'e yükseldiğini belirtmişlerdir.

Palumbo ve diğ. [20], 180 °C ve 230 °C sıcaklık ve 6, 15 ve 30 mm/dk zımba hızlarında 0,7 mm kalınlığında AZ31 Mg alaşımının ılık derin çekilebilirliğine ısıtma yönteminin ve zımba hızının etkisini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Zımba hızı ve sıcaklığın önemli ölçüde derin çekilebilirliği etkilediğini, en büyük 3,375 LÇO değerine 230 °C sıcaklık ve 6 mm/dk hızda ulaşıldığını tespit etmişlerdir.

Ren ve diğ. [21], 150–250 °C sıcaklık ve 6–120 mm/dk zımba hızlarında 0,7 mm kalınlığında AZ31 magnezyum alaşımının ılık derin çekilebilirliğini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle teorik olarak incelemişlerdir. Sıcaklığın, dikdörtgen kesitli kapların şekillendirilebilirliğini artırdığını ve derin çekilebilirliği etkileyen önemli bir faktör olduğunu deneysel ve sayısal olarak belirlemişlerdir.

Savaş ve Seçkin [22], baskı plakası ile kalıp arasına 0°, 2,5°, 5°, 10° ve 15° olmak üzere beş farklı açı vermek suretiyle, silindirik kapların çekme oranlarının artırılması, dolayısıyla derin çekmedeki operasyon sayısının azaltılarak kalıp ve enerji maliyetlerinin düşürülmesini hedeflemişlerdir. 0° açı da 1,75 olarak tespit edilen limit çekme oranını, 15° açı değerinde 2,175'e hatasız olarak yükseltebilmişlerdir.

Özek ve Bal [23], dairesel kesitli kapların derin çekilmesinde, kalıp ve zımbaya farklı radyüsler, kalıba da farklı açılar verilerek radyüs ve açının limit çekme oranı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında 1 mm kalınlığında DKP37 malzeme kullanılmış, artan kalıp/zımba radyüsü ve kalıp açısı değerlerine bağlı olarak limit çekme oranının arttığı belirlenmiştir.

Lin ve diğ. [24], hidromekanik derin çekme kalıbı için yeni bir zımba tasarlayarak, harici bir hidrolik basınç kaynağına ihtiyaç olmadan kalıplama basıncının bir avantaj olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Herrera ve diğ. [25], SAE 1050 çeliğinin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla soğuk haddeleme ve ısıtma işlemleri uygulamışlardır. Haddeleme sonucunda malzemede meydana gelen uzamanın %2'den düşük olduğu ve çekme dayanımının 1400 MPa olarak ölçüldüğü, optik ve mekanik incelemeler neticesinde soğuk haddelemenin derin çekme işleminde daha az bir etkisinin olduğunu, ancak ısıtma işleminin daha etkili sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir.

Van den Bosch ve diğ. [26], polimer kaplı metal levhaların derin çekme işlemi esnasında tabaka kalınlığını önceden hesaplamak için bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada metal polimer ara yüzeyinin özelliğini yitirmeden ne kadarlık bir kalınlığa ulaşabileceğini ve bunun kalıplama radyüsü, kalıp/zımba arasındaki düzleme etkisini araştırmışlardır. Kaplama kalınlığının artmasıyla elde edilen numunenin yüzey kalitesinin bozulduğunu tespit etmişlerdir.

Plaut ve diğ. [27], haddelemeyle %50– %80 inceltile SAE 1050 çeliğinin ısıtma işlemi mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini araştırmışlar, soğuk haddelemede %50 oranında inceltile numunenin daha iyi şekillendirilebilme kabiliyetinin olduğunu belirtmişlerdir. Optik mikroskop ve mekanik test sonuçlarının sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerlerle aynı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Roizard ve diğ. [28], derin çekme işleminde zımba–sac malzeme ve kalıp arasında gerçekleşen sürtünme sonucu oluşan ısı ve metal akışı olaylarını LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensörü bulunan bir potansiyometre ile ölçmüşlerdir. Kullandıkları ölçüm yönteminin, diğer mekanik ölçüm yöntemlerine göre daha doğru sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Sivasankaran ve diğ. [29], saf alüminyum sacları farklı sıcaklıklarda tavlama işlemine tabi tutarak buruşma ve çeşitli deformasyon hataları olmadan konik biçimde derin çekilebilirliğini yapay sinir ağı yöntemi kullanarak modellemişlerdir. Modelden elde

edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, sonuçların birbirine benzer olduğunu, bu model ile oluşan deformasyonların tahmin edilebildiğini ve ayrıca mekanik analizlerinde yapılabildiğini tespit etmişlerdir.

Lang ve diğ. [30], alüminyum alaşımının derin çekmesi esnasında ilkel parça şeklini ve kalıplama basıncını optimize etmek amacıyla deneysel bir çalışma yaparak bu sonuçları LS-DYNA 3D sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlar ile analiz sonuçları arasında önemli bir benzerlik olduğunu belirlemişlerdir.

Lin ve Kwan [31], elipstik bir şeklin kulaklaşma olmadan derin çekilebilirliğini, deneysel ve sonlu elemanlar metodunu kullanarak araştırmışlardır. Teorik yöntemde, limit çekme oranı ve malzeme akış karakteristiklerini hesaba katmışlardır. Çalışma neticesindeki sonuçları karşılaştırdıklarında deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyumun olduğu ifade etmişlerdir.

Padmanabhan ve diğ. [32], kare şekilli kapların derin çekme ile şekillendirme işleminde, ilkel parça boyutlarının üretilen parçanın kalitesinde önemli bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada NURBS (Non-uniform rational basis spline) sayısal yöntemini ve simülasyon için de DD3IMP programını kullanarak optimum ilkel parça boyutlarını hesaplamışlardır. Geliştirilen metot ile, ilkel parça geometrisi ve meydana gelecek çeşitli deformasyonların rahatlıkla hesaplayabildiğini belirtmişlerdir.

Bastos ve Simões [33], yüzeyi çinko, fosfat ve organik filmle kaplanmış galvanizli çelik levhalarda derin çekilmesi sonucu meydana gelen korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler karşılaştırıldığında, korozyon direncinin kaplı numunelerde daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Hwang ve diğ. [34], kesme, bükme ve derin çekme olmak üzere çok amaçlı bir tümleşik kalıp tasarlamışlardır. Geliştirilen sistem için, plastisite teorisi, deneysel sonuçlar ve uzman deneyimlerinden faydalanarak çeşitli bağıntılar elde edilmiştir. Sistemde ürün geometrisi, numune ve kalıp yerleşimi olmak üzere 3 temel kısım bulunmaktadır. Çalışmada, ilkel parça geometrisi, zımba profilleri, derin çekme, eğme, kesme, malzeme tipi ve kalınlığı gibi faktörler sistem tasarımı için göz önüne alınmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen sistemin tasarım ve üretim alanındaki uygulamalarda verimli bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Le Port ve diğ. [35], saf titanyum malzemenin derin çekilmesinde kalıp parametrelerini optimize etmek için 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanmışlardır. Kalıp boşluğuna doğru akan malzemenin et kalınlığının ve kalıp-sac malzeme arasındaki

sürtünmenin önemli bir etkiye sahip olduğunu deneysel ve sonlu eleman modeli ile elde etmişler, uygun bir limit çekme oranı belirlemişlerdir.

Delucchi ve diğ. [36], soğuk haddelenmiş paslanmaz çeliklerin (AISI304L ve 305) derin çekme işlemi için uygun olduğunu, haddeleme esnasında yüzeylerde oluşan oksit tabakasının çekme işlemi sırasında zımba/kalıp yüzeylerine zarar verdiğini ve malzemenin kalıp içerisine akışını güçleştirdiğini belirlemişlerdir. Malzeme yüzeyinde oluşan oksit tabakalarını elektrolitik yöntemle kaldırarak derin çekme işleminin daha verimli hale geldiğini göstermişlerdir.

Vollertsen ve diğ. [37], 20 ve 50 μm kalınlıklarında saf titanyum, bakır ve paslanmaz çelik plakalar kullanarak, mekanik yöntemlerden farklı olarak vurumlu lazer yöntemi kullanarak mikro derin çekme deneyleri yapmışlardır. Bu yöntemde çekilecek plaka üzerine bir plazma şok dalgası yollayarak çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yöntemde ayrıca enerji yoğunluğunu arttırmaksızın, bir noktaya çok sayıda vurumların gönderilmesi ile yüksek çekme miktarlarına ulaşılmıştır. Yüzeye gönderilen şok dalgasının basıncı ölçülmüş ve optimize edilmiştir. Sonuç olarak, vurumlu lazer yöntemi ile plakaların tek adımla şekillendirilebildiğini tespit etmişlerdir.

Saxena ve Dixit [38], silindirik ve kare kesitli kapların derin çekilmesi işleminde zımba geometrisi ve işlem parametrelerinin kulaklanmaya olan etkilerini araştırmışlardır. Kare kesitli kaplarda, kulaklanma oluşumuna düzensiz malzeme akışının neden olduğunu belirtmişlerdir. Lagrangian yaklaşımına göre bir sonlu eleman modeli kullanılarak analizler yapılmıştır. Modelde izotropik sertleşmenin gerçekleştiği varsayarak ve güç kanunundan faydalanılarak bazı denklemler elde edilmiştir. Bu denklemlerin çözümü için Newton Raphson tekniğini kullanmışlardır.

Yang [39], saf titanyum levhaların kare kap biçiminde farklı sıcaklıklarda derin çekilmesi işleminin simülasyonunu yapmak ve optimum ilkel parça formunu tasarlamak için bir çalışma yapmıştır. Çalışmada sonlu elemanlar yazılımı olan DEFORM-3D paket programını kullanmıştır. Bu programda, çeşitli parametrelere bağlı olarak basınç dağılımı ve en büyük kuvvetleri tespit etmiştir. Tasarlanan modelde daha küçük dairesel ilkel parça boyutlarının kullanılmasıyla daha düşük zımba kuvveti ve kabul edilebilir çekme oranlarının elde edildiğini tespit etmişlerdir.

Padmanabhan ve diğ. [40], Tailor kaynak yöntemiyle birleştirilmiş alüminyum–çelik sacların derin çekme işlemini sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişler ve baskı plakası kuvvetinin derin çekme işlemini önemli ölçüde etkilediğini görmüşlerdir.

Luo ve diğ. [41], yaptıkları çalışmada mekanik ön şekillendirmeyi arttırmak ve maliyeti düşürmek için süper plastik şekillendirme yöntemi geliştirmişler, bu yöntem sonucunda kalıplanan malzemenin et kalınlığının arttırılabildiğini ve kalıplama zamanının ise azaltılabildiğini belirlemişlerdir.

Daxin ve diğ. [42], analitik hesaplama, deneysel analiz ve sonlu elemanlar analizi yöntemlerini kullanarak dikdörtgen kesitli kapların derin çekilmesi işleminde meydana gelen gerilmeleri tespit ederek karşılaştırmışlardır. Her üç yöntemde de basınç dağılımının etkili olduğu görülmüş, kalıplamadaki bazı özel noktalarda yöntemlerin birbirlerinden farklı sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Kalıp radyüsü ve baskı plakası kuvvetinin belirlenmesinde sonlu elemanlar yönteminden ziyade üçlü analiz yönteminin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

Khelifa ve Oudjene [43], anizotropik elastoplastisite ve izotropik süneklik hasarı yöntemlerinin her ikisine dayalı hasar analiz modeli gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri model yardımıyla deformasyon esnasında iş parçasındaki hasarın oluşma yerini ve zamanını tahmin etmişlerdir.

Zhang ve diğ. [44], hidro-mekanik derin çekme metodunda, sonlu elemanlar analizi ile elde edilen şekillendirme-limit çekme diyagramı ile tane kenarlarındaki çatlakların etkisini incelemişlerdir. Tane sınırında oluşan çatlak hasarlarının ilk defa kendi çalışmalarında incelendiğini ifade etmişlerdir.

Demirci ve diğ. [45], AA5754-O alüminyum malzemeden kare kesitli kapların derin çekme ile şekillendirilmesi esnasında baskı plakası kuvvetinin etkisini incelemişlerdir. Deneysel ve LS-DYNA yazılımından elde edilen sonuçları karşılaştırarak sonuçların %85 oranında birbirleriyle uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

Park ve Yarlagadda [46], farklı asimetrik şekilli parçaların kademeli olarak derin çekilebilirliğini üzerine bir araştırma yapmışlardır. Elipstik parçalarda zımba ve kalıp radyüslerinin ve ilkel parça geometrisinin zımba kuvveti üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir.

Oliveira ve diğ. [47], geliştirdikleri implisit algoritma ile şekillendirme işlemindeki metal plakanın simülasyonunu optimize etmişlerdir. Çalışmada deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında, DD3IMP yazılımının önemli ölçüde doğru sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Sattari ve diğ. [48], dikdörtgen kapların derin çekilmesinde simülasyon programları ile elde edilen kabın farklı kesitlerindeki kalınlık değişimlerini incelemişler ve incelenmenin en çok zımba radyüsü bölgesinde olduğunu belirlemişlerdir.

Gavas ve İzçiler [49], ETIAL-8 alüminyum sacın kare olarak derin çekmesi işleminde baskı plakası boşluğunun 1–1,8 mm arasındaki değişimin ürün yüzey kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlar, derin çekme işleminde kare kap çekmek için ideal baskı plakası boşluğu ve oluşan hasarlar tiplerini belirlemişlerdir. Baskı plakası boşluğunun 1,3 mm'den büyük olması durumunda yüzey kalitesinin düştüğünü ifade etmişlerdir.

Lee ve diğ. [50], AZ31 alaşımının derin çekme yöntemi ile şekillendirilmesi işlemlerinde limit çekme oranı üzerine deneysel ve sonlu elemanlar analizlerini kullanarak bir çalışma yapmışlardır Sıcaklığa bağlı şekillendirme sınırlarını LS–Dyna programı yardımı ile tahmin etmişlerdir.

Karalı [51], derin çekme işlemi esnasında kalıp boşluğunun çekilen kap üzerindeki etkilerini MSC-Marc sonlu elemanlar analiz programı yardımı ile araştırmış ve kalıp boşluğunun derin çekme işlemi için oldukça önemli olduğunu tespit etmiştir.

Gavas ve İzçiler [52], kare kapların derin çekilebilmesi için yeni tip bir baskı plakası tasarlamışlardır. Baskı plakası yüzeyine spiral kanallar açarak yapılan deneyler neticesinde, kabın duvarlarında homojen bir kalınlık dağılımı, daha iyi malzeme akışı ve derin çekme işleminde yağlama etkisinin daha uzun süre devam etmesinin sağlandığını görmüşlerdir.

Wei ve diğ. [53], derin çekme işlemi sonucu elde edilen numunelerin kalınlıklarındaki değişimleri araştırarak levha yüzeyindeki sürtünme dağılımlarının düzenli olup olmadığını ve zımbanın hareket mesafesi süresince baskı plakasına gelen kuvvetleri incelemişlerdir. Kullanılan yeni tip kalıbın, kabın incelmesini ve yüzeydeki sürtünmeyi azalttığını, baskı plakasına gelen kuvvetleri ise homojen hale getirdiğini belirtmişlerdir.

Yuqi ve diğ. [54], kare kapların derin çekilmesi işleminde kap kenarlarında kulaklanma oluşumunu sonlu elemanlar metoduyla analiz ederek, deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar analizinin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırılan sonuçların birbirine yakın sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Menezes ve Teodosiu [55], kare kapların derin çekilmesi sonucunda oluşan gerilme ve burulmaları sayısal olarak hesaplamak amacıyla üç boyutlu sonlu elemanlar modeli üzerinde çalışmışlardır. Oluşturulan modelden ve yapılan deneysel çalışma neticesinden elde edilen sonuçların büyük oranda tutarlı olduğunu belirlemişlerdir.

Zimmiak [56], sonlu elemanlar yöntemini kullanarak limit çekme diyagramlarının oluşturulması üzerine bir çalışma yapmıştır. Basınç-gerilme arasındaki bağıntının altı elemanlı Barlat akma kriterinde boyun verme başlangıcını iyi tahmin ettiğini ve deneysel çalışma sonuçlarıyla büyük bir benzerlik içinde olduğu sonucuna varmıştır.

Marumo ve diğ. [57], alüminyum malzemeden çekilen kare kaplarda, zımba köşe radyüsünün ve deformasyon sertleşmesinin çekilebilirliğe olan etkisini araştırmışlardır. Küçük radyüslerde limit çekme oranının azaldığı, büyük radyüslerde ise bu oranın artması ile birlikte kaptaki yırtılmanın azaldığı ve önlendiğini belirlemişlerdir.

Marumo ve Saiki [58], kare kapların derin çekme işleminde işlem parametrelerinin (ilkel parça malzemesi, ilkel parça şekli, zımba şekli ve zımbanın yağlaması) elde edilen kabın kalitesi, kap hasarları ve dinamik yırtılma kuvvetine olan etkilerini araştırarak, derin çekme esnasında kaptaki incelmelerin azaldığını ve limit çekme oranının arttığını tespit etmişlerdir.

Gea ve Ramamurthy [59], kare kapların derin çekilmesi işleminde üç farklı geometriye sahip ilkel parça şekli kullanarak, ilkel parça boyutlarının optimizasyonunu sayısal bir yöntem kullanarak yapmışlardır. Amaç fonksiyonu olarak yırtılma olmadan elde edilen en büyük limit çekme oranlarını kullanmışlar ve en büyük limit çekme oranının dairesel geometriye sahip ilkel parçalarda ulaşıldığını belirlemişlerdir.

Mamalis ve diğ. [60], kaplanmış galvanizli çelik malzemelerin kare derin çekilmesini deneysel olarak araştırarak, çekme parametrelerine bağlı olarak üretilen kaplardaki hasar değişimini belirlemişlerdir. Kaplarda meydana gelen yırtılma, büzülme, gerilme dağılımları, alt-üst çekme limitleri ve deformasyon tipleri tespit edilmiştir. Elde edilen veriler doğrusal olmayan sonlu elemanlar metoduyla modellenmiş, sonuç olarak deneysel verilerle modelin büyük oranda tutarlı olduğunu gözlemişlerdir.

Kuwabara ve Si [61], düzensiz şekillere sahip kapların derin çekilmesinde en iyi ilkel parça şeklini belirlemek üzere bir çalışma yapmışlardır. Çekme işlemi sonucunda oluşan büzülme hasarı şekilleri ile model sonuçlarının benzer olduğunu, malzeme karakteristiklerinin diğerlerine göre parça şekline olan etkisinin küçük olduğunu ifade etmişlerdir.

Koga ve Paisarn [62], daire ve kare kesitli iki farklı geometriye sahip AZ31 magnezyum alaşımlı sacların ısı etkisi ile derin çekilebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, zımba radyüslerini değiştirerek 30 mm çapında yuvarlak ve 20x20 ölçülerinde kare kesitli

kaplar elde etmişler ve en iyi sonucun 247°C sıcaklıkta kare kesitli kaplarda gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Gavas ve Küçükrendeci [63], yaptıkları çalışmada alüminyum malzemeden hazırlanan değişik geometrideki ilkel parçaları kare kap biçiminde çekerek incelemişlerdir. Çektikleri tüm parçalarda herhangi bir kopma ve yırtılma meydana gelmemiştir. Taslak malzemenin optimum olduğu durumda hasarsız, diğer durumlarda ise kulaklanma ve dalgalanma olduğunu ve buna bağlı olarak maliyetin arttığını tespit etmişlerdir.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, derin çekme işleminde, şekillendirme sıcaklığı, şekillendirme kuvveti, kalıp geometrisi, çekilen malzemenin yapısı, baskı plakası kuvveti, sürtünme katsayısı ilkel parça geometrisi ve kap profili gibi bir çok parametrenin etkilerinin araştırıldığı görülmektedir. Ayrıca çekme yüksekliği, elde edilen ürünün yüzey kalitesi, buruşmalar, et kalınlıklarındaki değişim, yırtılma ve benzeri hatalar, farklı paket programlar kullanarak da analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde malzemelerdeki gerilmeler, et kalınlıklarındaki değişimler ve limit çekme oranı gibi işlem verimliliğini etkileyen faktörlerin simülasyonu yapılmıştır.

Bu çalışmada, mevcut çalışmalardan farklı olarak kalıp yüzeylerine 0°, 5°, 10° ve 15°'lik açılar verilerek ve 25 °C, 100 °C, 175 °C ve 250 °C şekillendirme sıcaklıklarında derin çekme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca malzeme akışı ve kalıp içerisindeki şekillendirme işleminin kontrolünü sağlamak için baskı plakasına 1200 N, 2400 N, 3600 N'luk kuvvetler uygulanmış, zimba ve kalıp köşe radyüsü 8 mm olarak sabit alınmıştır. Malzemenin kalıp içerisine akışını kolaylaştırmak amacı ile MoS₂ katı yağlayıcı kullanılmıştır. Çalışmalar neticesinde, LÇO'nun 2,14'den 2,80'e çıkması ve et kalınlığındaki dağılımın sıcaklığında etkisi ile daha homojen hale gelmesi sağlanmıştır. Deneysel çalışmaların yanı sıra sonlu elemanlar yöntemi de kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın, kalıpcılık sektöründeki uygulamaların yanı sıra akademik çalışmalara da katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

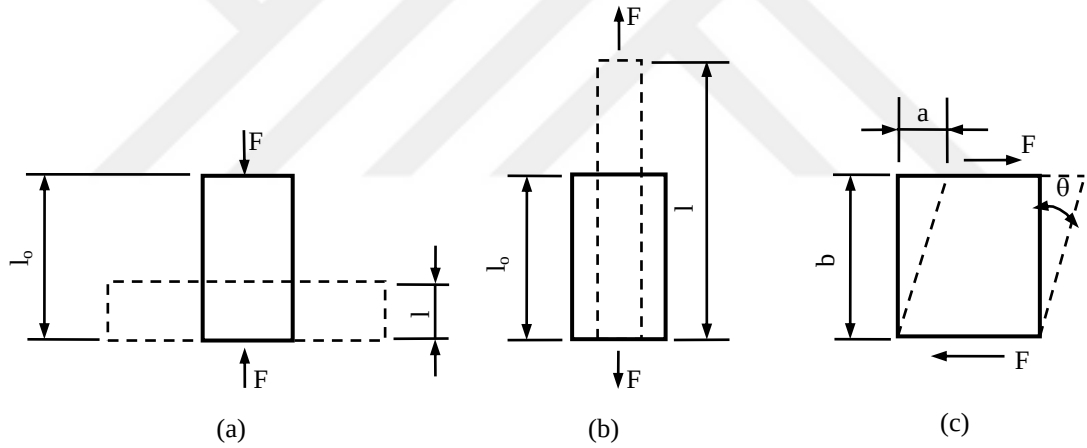
3. TEMEL BİLGİLER

3.1. Plastik Deformasyon

Bir katı cismin şeklini başka bir şekle dönüştürmek amacıyla uygulanan ve bu işlem sırasında cismin malzemesindeki kütle ve kimyasal bileşim değişikliğine yol açmayan üretim yöntemlerine plastik şekil verme yöntemleri denir.

Metalik malzemelerin çoğu ve özellikle de karbonlu ve alaşımlı çelikler, alüminyum, çinko, bakır ve bunların alaşımları plastik şekil verme yöntemleri ile işlenebilmektedir [64].

Plastik şekil verme işleminde malzeme, çekme, basma ve kayma gibi üç temel şekil değişiminden birinin veya birkaçının etkisinde kalır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Temel şekil değişimi [64]; a) Basma, b) Çekme, c) Kayma

Herhangi bir şekil değiştirme işlemi uygulanan elemanda meydana gelen birim şekil değiştirme, bu elemanın şekil değiştirme işleminden önceki ve sonraki boyutlarına bağlıdır. Basma ve çekmede birim şekil değiştirme;

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (3.1)$$

olarak alınır. Birim şekil değiştirme, basmada negatif, çekmede ise pozitifdir. Kaymada ise şekil değiştirme;

$$\gamma = \frac{a}{b} = \tan \theta \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir [64].

Kristal yapılı malzemelerde en önemli deformasyon mekanizması olan kayma, kayma gerilmesi etkisiyle atom düzlemlerinden birinin komşu atom düzlemi üzerinde kayması ile gerçekleşir. Plastik deformasyonu sağlayan en büyük teorik kayma gerilmesi (τ_{max});

$$\tau_{max} = G \cdot \gamma \quad (3.3)$$

mertebedesindedir. Burada, G , kayma modülüdür. Teorik olarak çekme mukavemeti (σ_{max}) ise;

$$\sigma_{max} = E \cdot \varepsilon \quad (3.4)$$

alınabilir.

Gerçekte, plastik şekil değişimine yol açan kayma gerilmesi, Denklem 3.3'den hesaplanan teorik kayma gerilmesinden (τ_{max}) daha düşüktür. Teorik ve ölçülen değerler arasındaki bu fark, kristal yapı hatalarından (özellikle dislokasyon) ileri gelmektedir.

Kristal yapılı malzemelerde kayma, atom yoğunluğunun en fazla olduğu düzlemlerde (kayma düzlemi) ve kayma düzlemi üzerinde atomların en sık bulundukları doğrultularda (kayma yönü) dislokasyonların hareketi ile gerçekleşmektedir [65].

Plastik deformasyon amacıyla bir kristale uygulanan kuvvetin meydana getirdiği gerilmenin kayma düzlemine dik doğrultudaki bileşeni kaymayı etkilemez. Kayma ancak, kayma düzlemi üzerindeki gerilmenin kayma yönündeki bileşeni (τ_r) ile gerçekleşir. Kayma yönündeki gerilme bileşeni,

$$\tau_r = \sigma \cdot \cos \lambda \cdot \cos \phi \quad (3.5)$$

eşitliği ile bulunabilir. Burada, σ normal gerilme olup,

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.6)$$

Hook kanunu olarak ifade edilir.

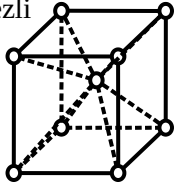
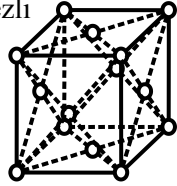
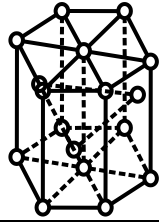
Bir kristalde kayma, denklem 3.6'dan hesaplanan σ normal gerilmesinin kristalin τ_{kr} kayma direncine eşit olması halinde mümkündür. Kaymanın gerçekleşebilmesi için aşılması gerekli kayma direncine kritik kayma gerilmesi (τ_{kr}) denir.

Metallerin tek bir kristalinde plastik şekil değişimi, $\tau_r > \tau_{kr}$ olmak şartıyla ve denklem 3.5'e göre, en büyük τ_{rmax} kayma gerilmesi bileşeninin olduğu kayma sisteminde gerçekleşir. Ancak, kristal şekil değiştirdiğinde deformasyon sertleşmesi nedeniyle mukavemet artar ve daha fazla şekil değişimi için uygulanan gerilmeyi artırmak gerekir [65].

Metaller kristal yapılarına bağlı olarak farklı deformasyon davranışı göstermektedirler. Sıkı düzenli hegzagonal (SDH) ve yüzey merkezli kübik (YMK) yapıli metallerde kayma sadece bir kayma düzleminde meydana gelir. Uygulanan gerilmenin artırılmasıyla ve deformasyon sertleşmesi etkisiyle, kritik kayma gerilmesi değeri artmış olan diğer kayma sistemleri de deformasyona katılır. Hacim merkezli kübik (HMK) yapı daha deformasyonun başlangıcında en büyük kayma gerilmesi doğrultusunu paylaşan iki veya daha fazla kayma düzlemi üzerinde kayar, yani tek kayma düzleminde kayma yerine birden çok kayma düzleminde kayma olur. Çeşitli metallerin kristal yapısı Tablo 3.1'de verilmiştir.

Bir kristalde kritik kayma gerilmesini artırıcı yönde etkide bulunan faktörler, mukavemetin artmasına sebep olurlar. Metallerde artık gerilme miktarı, alaşım elementlerinin miktarı ve kristal yapı hatalarının (özellikle dislokasyonlar) yoğunluğu arttıkça kritik kayma gerilmesi de artmaktadır. Sıcaklık ve deformasyon hızı gibi deformasyon parametreleri de kritik kayma gerilmesini etkilemektedir. Genelde deformasyon sıcaklığının azalması ve deformasyon hızının artmasıyla kritik kayma gerilmesi artmaktadır.

Tablo 3.1. Çeşitli metallerin kristal yapısı [65].

Hacim merkezli kübik (HMK) 	Yüzey merkezli kübik (YMK) 	Sıkı düzenli hegzagonal (SDH) 
Krom Demir (α) Molibden Tungsten Vanadyum Tantal Titanyum (β) Zirkonyum (β)	Alüminyum Demir (γ) Bakır Altın Kurşun Nikel Gümüş Kobalt (β)	Berilyum Magnezyum Çinko Kobalt (α) Titanyum (α) Zirkonyum (α)

Metalik malzemelerin plastik deformasyon kabiliyeti, kimyasal bileşim ve metalürjik yapı tarafından kontrol edilen mekanik özelliklerin yanı sıra deformasyon şartlarına da bağlıdır [65].

Deformasyon sıcaklığı malzemelerin deformasyon davranışlarını önemli derecede etkilemektedir. Genellikle deformasyon sıcaklığı artarken mukavemet azalır, süneklik ise artar. Bu nedenle, deformasyon sıcaklığına bağlı olarak deformasyon işlemlerinin sınıflandırılmasına gerek duyulmuştur.

Klasik sınıflandırmada, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı (T_{yk}) ile deformasyon sıcaklığı kıyaslanır. Metalik malzemelerin yeniden kristalleşme sıcaklığı yaklaşık olarak mutlak ergime sıcaklığının $1/3$ 'ü ile $1/2$ 'si arasındadır. $T > T_{yk}$ ise sıcak işlem, $T < T_{yk}$ ise soğuk işlem olarak tanımlanır.

Soğuk işlem koşullarında, malzemeye uygulanan deformasyon miktarına bağlı olarak deformasyon sertleşmesi nedeniyle mukavemet artar ve malzemenin metalürjik yapısı, özellikle tane şekli değişikliğe uğrar. Plastik deformasyon sırasında tanelerin deformasyon yönünde uzaması sonucu malzeme özellikleri yöne bağımlı hale gelir (anizotropi). Metalik malzemelerde anizotropinin kristallografik anizotropi ve mekanik fiberleşme(malzeme akış yönü) olmak üzere iki tipi vardır.

Soğuk şekil verme işlemlerinde, malzeme yapısında iç gerilmeler de oluşmaktadır. Bunların yanı sıra, malzemenin işlem gören yüzeylerinin düzgün olması ve istenen boyut toleranslarında ürün elde edilebilmesi soğuk işlemin avantajlarıdır. Soğuk işlemin malzeme

yapısında oluşturduğu etkilerden kaçınmak, deformasyon sertleşmesi nedeniyle azalan sünekliği artırmak için soğuk işlem sırasında ara tavlama yapılmaması zorunlu olabilir. Tavlama sonunda, elde edilmek istenen özelliklere göre tavlama sıcaklığı, yeniden kristalleşme sıcaklığının altında veya üstünde seçilebilir.

Sıcak işlemde ise, deformasyon sertleşmesi ve bozulan tane yapısı, deformasyon sırasında oluşan yeniden kristalleşme sonucu yeni tanelerin oluşumu ile giderilerek büyük eksenli taneler haline dönüşür. Sıcak işlem yüksek sıcaklıklarda yapıldığından tavlama işlemi maliyeti artırır ve aynı zamanda malzeme yüzeyinin oksitlenmesine de sebep olur. Bu oksitlenme nedeniyle iyi yüzey elde etmek oldukça zordur. Boyut toleransları, sıcak işlem görmüş ürünlerde soğuk işlem uygulanmışlara göre daha fazladır. Sıcak işlem koşullarında, malzemede deformasyon sertleşmesi olmadığından, deformasyon sabit gerilme altında gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda ($T > 0,5 \cdot T_m$) deformasyon hızının etkisi oldukça fazladır. Deformasyon hızının mukavemet üzerindeki etkisi;

$$\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (3.7)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir [65].

Burada,

- σ : Plastik gerilme (N/mm^2),
- C : Malzeme sabiti (N/mm^2),
- m : Deformasyon hızı duyarlılığı üssü,
- $\dot{\epsilon}$: Gerçek deformasyon hızı (1/s),

olarak alınır.

Deformasyon hızının, artmasıyla malzemelerin mukavemeti artarken, sünekliği azalır. HMK yapılı metaller diğer kristal yapılı malzemelere göre deformasyon hızına daha duyarlıdır. Birim zamanda malzemeye uygulanan deformasyon miktarını belirten deformasyon hızı, mühendislik deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) ve gerçek deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) olmak üzere iki ayrı sembolle ifade edilmektedir [65].

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d[(L - L_0)/L_0]}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0} \quad (3.8)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d[(L - L_0)/L_0]}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L} \quad (3.9)$$

Burada;

L_0 : Numunenin deformasyon öncesi uzunluğu (mm),

L : Numunenin deformasyon sonrası uzunluğu (mm),

V : Pres hızı ($V = dL / dt$) (mm/s),

Mühendislik ve gerçek deformasyon hızları ($\dot{\epsilon}$ ve $\dot{\epsilon}$) arasında,

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\epsilon}}{1 + e} \quad (3.10)$$

şeklinde bir ilişki mevcuttur. Ilık işlem koşullarında ($0,5 \cdot T_m > T > 0,3 \cdot T_m$) yapılan plastik şekil verme işlemlerinde, plastik gerilmeye deformasyon oranının, deformasyon sertleşmesinin ve deformasyon hızının birbirine yakın derecede ortak etkileri vardır. Bu durumda;

$$\sigma = D \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot \epsilon^n \quad (3.11)$$

şeklinde genel bir eşitlik kullanılır [65].

Burada;

D : Malzeme sabitidir.

Ilık işlemin sıcak ve soğuk işleme göre bir takım avantajları vardır. Sıcak işleme göre en önemli avantajı enerji tasarrufudur. Soğuk işleme göre en önemli avantajı ise, gerçekleştirilebilen toplam deformasyon oranının soğuk işlemdekinden fazla olması, aynı zamanda soğuk işlenmiş malzeme mukavemetine yakın bir mukavemette ürün elde edilmesidir. Ilık işlemde, deformasyon sertleşmesinin etkisi soğuk işlemdeki etkisinden daha azdır. Ilık işlemde, malzemede yeniden kristalleşme olmaz, dinamik toparlanma olur. Metalik malzemelerin plastik deformasyon kabiliyeti, malzeme özellikleri, deformasyon sıcaklığı, deformasyon miktarı ve deformasyon hızının yanı sıra, sürtünme ve yağlama,

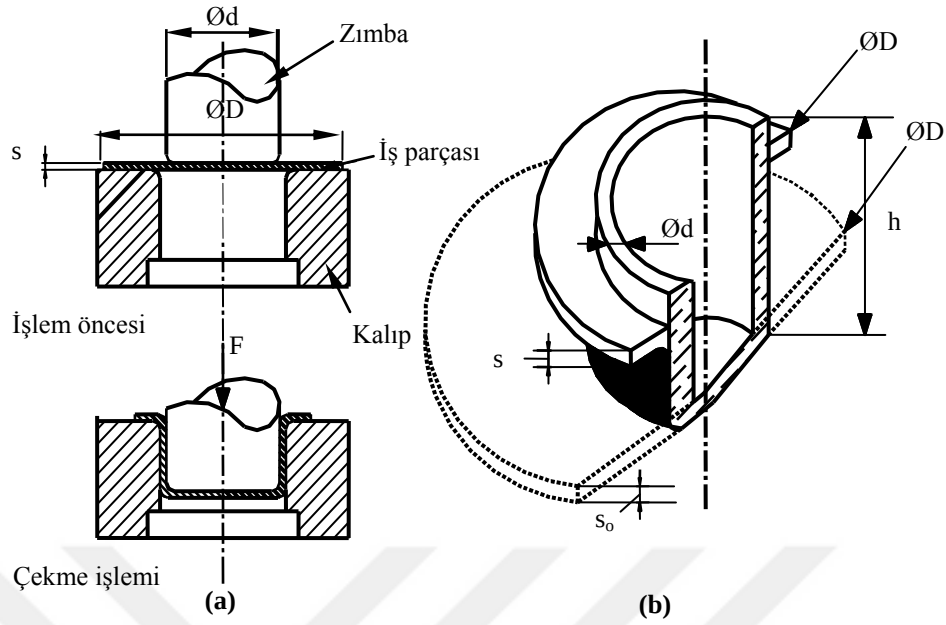
hidrostatik basınç, kalıntı gerilmeler ve geometrik faktörler gibi diğer faktörlere de bağlıdır [65].

Plastik deformasyon işleminde sürtünme önemlidir. Sürtünme, aşınmaya ve güç kaybına sebep olur. Ayrıca sürtünme, malzemenin deformasyon kabiliyetini olumsuz yönde etkiler. Sürtünmeyi en aza indirmek için yağlayıcı kullanmak gerekir. Yağlayıcı maddeler fiziksel durumlarına göre katı, sıvı, yarı katı ve gaz yağlayıcılar olarak dört gruba ayrılmaktadır. Yağların seçiminde özellikle çalışma şartları ve yağın kalitesi göz önüne alınmalıdır. Plastik deformasyon işlemleri sırasında iş parçasına hidrostatik basınç uygulanması, mikro boşluk oluşumunu engellediğinden özellikle kırılma ile sınırlanmış deformasyon işlemlerinde iş parçasının deformasyon kabiliyeti üzerine olumlu etkiye bulunur. Boyun verme ile sınırlanmış deformasyon işlemlerinde ise, hidrostatik basıncın şekil değiştirmeye süneklik açısından olumlu etkisi hemen hemen yoktur. Plastik şekil verme işlemlerinde malzemeler düzenli deformasyona uğrayamadıklarından, yapılarında kalıntı gerilmeler oluşur. Kalıntı gerilmeler elastik gerilmeler olup, en fazla malzemenin akma mukavemeti değerine erişebilirler ve ısıtma işlemi veya plastik şekil değişimi ile azaltılabilir veya yok edilebilirler. Şekillendirilecek metalin işlem öncesi şekli, kalıbın şekli, metalin istenilen şekli alması için deformasyon sırasındaki metal akışının durumu, plastik deformasyonu etkileyen geometrik faktörlerdir [65].

3.2.Derin Çekme ve Derin Çekme Mekanik

Derin çekme, zımbanın mekanik hareketi ile sac metale kalıp şeklini veren bir sıkıştırma-germe işlemidir. Bu işlemle iki boyutlu, düzlemsel geometriye sahip iş parçasının çekme kalıbı denilen elemanlar yardımıyla preste çökertilmesi sonucunda belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçalar elde edilir. Çekme yardımıyla elde edilmesi düşünülen kaplar birden fazla işlem ile de oluşturulabilirler. Birbirini takip eden ve çok sayıda çekme işleminden oluşan bu imalat yöntemi derin çekme yöntemi olarak bilinmektedir [14,66].

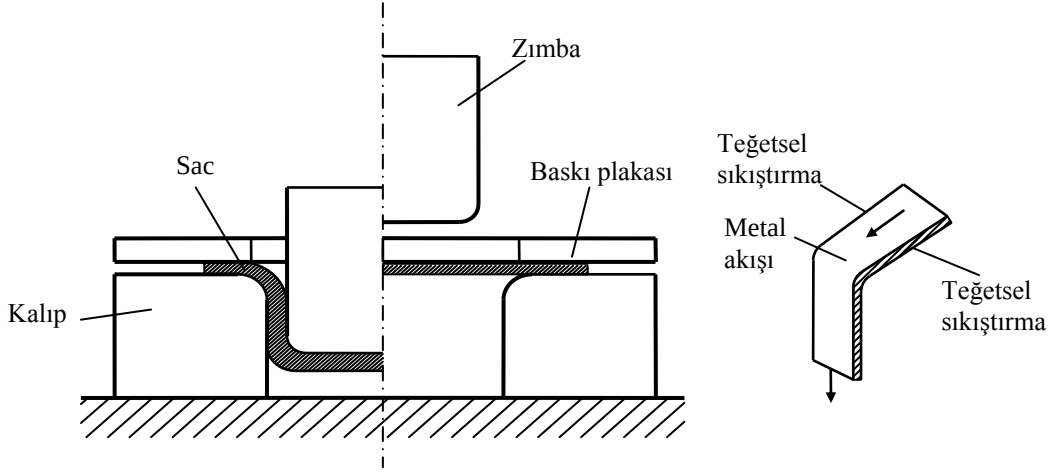
Şekil 3.2’de, dairesel iş parçasından d çapına sahip silindirik bir kabın çekme işlemiyle elde edilmesi şematik olarak verilmektedir.



Şekil 3.2. Derin çekme işlemi, a. Şematik, b. Perspektif [67].

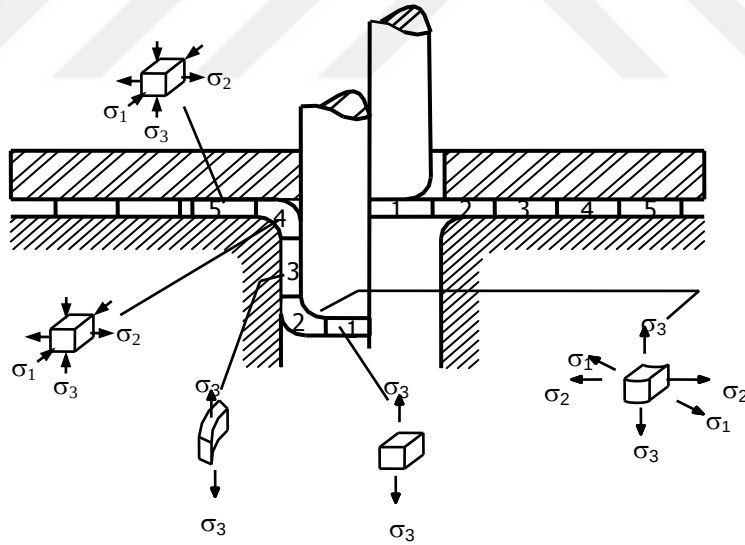
Şekilde görüldüğü gibi, başlangıçta s kalınlığı ve D başlangıç çapına sahip düzlemsel, metalik ve şekillendirilebilir bir levha, d çapındaki bir zımba yardımıyla kalıp (matris) içine çekilmek suretiyle, altı düz, silindirik bir parça haline getirilmektedir [67].

Çekme olayında zımbanın sac levhaya baskı yapması ile sac levha kalıp kenarlarındaki radyüsler (kalıp kavis yarıçapı) üzerine doğru eğilerek kalıp boşluğuna girmeye başlar. Zımbanın ileri hareketi ile sac levha zımba ile kalıp arasında halka şeklinde bulunan çekme boşluğundan kalıp içine doğru hareket ederek düz düşey duvar oluşturur. Son aşamada sac levhanın kalan kısmı radyal olarak akarak kalıp boşluğuna otururken, sac levhanın kalıp üstünde yani baskı plakasının altında kalan kısmı sürtünme kuvveti oluşturarak bu olayı engellemeye çalışır. Bunlar başlangıçtaki statik sürtünme kuvvetleri olup sac levha hareket etmeye başladığında bu kuvvetler azalır. Şekil 3.3’de ki gibi çekilmekte olan bir sac parçası için, sac levha radyal olarak akmaya başladığında kalınlığı azalmaya başlar ve geniş olan dış çevresi küçük olan kalıp çapına göre şekillenir. Bu olay levha yüzeyinde teğetsel gerilmelere sebep olur. Zımbanın ilerleme hareketi ile sac levhanın büyük bir kısmı kalıp boşluğunda küçük dairesel flanş oluşturur.



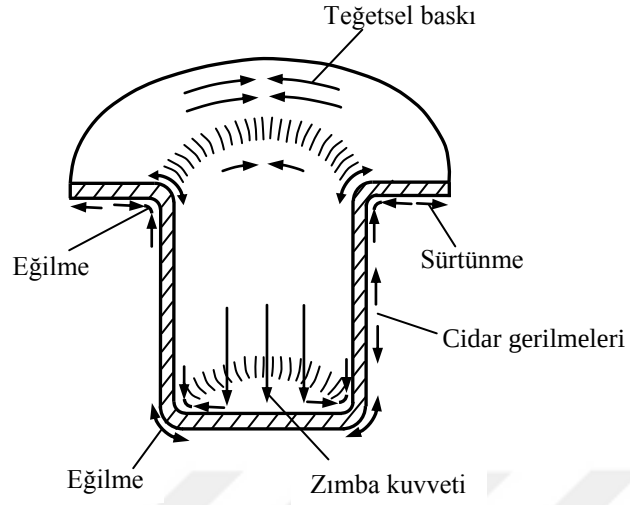
Şekil 3.3. Derin çekmenin mekanik mekanizması [68].

Derin çekme esnasında malzemenin plastik deformasyona zorlanması malzeme üzerinde birçok gerilmenin ortaya çıkmasına sebep olur. Bu gerilmeler Şekil 3.4 'de verilmiştir. Çekme işleminin başarılı olması için malzemenin bu gerilmelere karşı dayanıklı olması gerekir [68, 69].



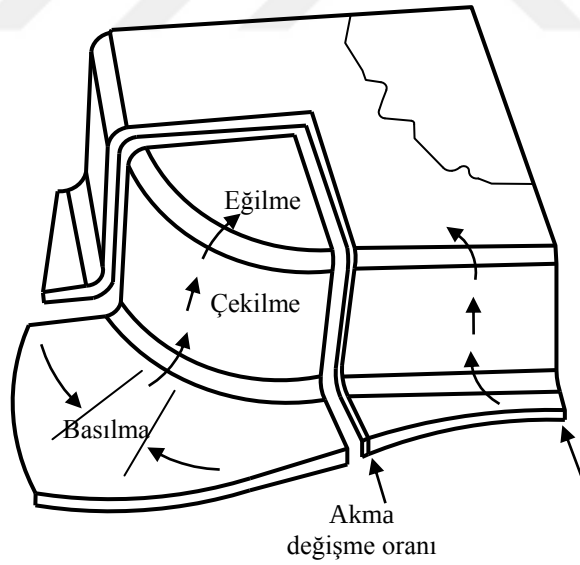
Şekil 3.4. Derin çekme esnasında parçada boylamsal kısımlarda meydana gelen gerilmeler [68].

Silindirik bir parçanın sac çekme yöntemiyle üretimi esnasında, parça iç yapısında ortaya çıkan kuvvet ve gerilmeler Şekil 3.5'de görülmektedir.



Şekil 3.5. Derin çekme işleminde iş parçasına etki eden kuvvetler [66].

Kare kapların çekilmesi esnasında, çekilen kabın köşelerinde eğme, çekme ve basma gerilmeleri meydana gelir (Şekil 3.6) [70].



Şekil 3.6. Dikdörtgen veya kare kapların köşe gerilme analizi [70].

3.3. Derin Çekmeyi Etkileyen Faktörler

3.3.1. İşlem Değişkenleri

3.3.1.1. Çekme Kuvveti

Çekilmesi istenen parçanın (kabın) çekme esnasında gösterdiği dirence çekme kuvveti denir. Çekme kuvveti aşağıdaki faktörlere bağlı olarak değişir:

- Çekilen parçanın ilkel çapına,
- Çekilecek parçanın büyüklüğüne,
- Sac kalınlığına,
- Çekilen sacın cinsine,
- Baskı plakası kuvvetine,
- Çekme hızına,
- Kalıp geometrisine,
- Çekme boşluğuna,
- Yağlama durumuna,
- Çekme derinliğine [71].

3.3.1.1.1. Silindirik Parçalar İçin Çekme Kuvveti

a. İlk Çekmede Silindirik Parçalar İçin Çekme Kuvveti

$$F_d = L \cdot s \cdot R_m \cdot k = \pi \cdot d \cdot s \cdot R_m \cdot k \dots\dots[N] \quad (3.12)$$

Burada;

F_d : Çekme kuvveti [N],

L : Çekme zımbasının çevresi [mm],

d : Zimba çapı [mm],

s : Sac kalınlığı [mm],

R_m : Malzeme çekme dayanımı [N/mm²],

k : Düzeltme faktörü.

Düzeltilme faktörü k , gerilme dayanımı ve çekme gerilmesinin oranına bağlıdır. Temel olarak çekme parçasının boyutlarından gelen gerçek çekme oranına bağlıdır. Aşağıdaki Tablo 3.2’ de düzeltme faktörü ve Tablo 3.3’ de bazı derin çekme çeliklerine ait maksimum çekme dayanımı $R_{m_{max}}$ verilmiştir [72,73].

Tablo 3.2. d/D oranına bağlı olarak düzeltme(korreksiyon) faktörü, k

d/D	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65	0,675	0,7	0,72	0,75
k	1	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,6	0,55	0,5
d/D	0,775	0,8	0,825	0,85	0,875	0,9	0,925	0,95	
k	0,45	0,40	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	

Tablo 3.3. Bazı derin çekme çeliklerine ait maksimum çekme dayanımı $R_{m_{max}}$

Malzeme	St 1303	St 1404	CuZn28	Al 99,5
$R_{m_{max}} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$	400	380	300 Derin çekme kalitesi	100 Orta sertlik

b. İkinci Çekmede Silindirik Parçalar İçin Çekme Kuvveti

$$F_{sec} = \frac{F_d}{2} + \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot R_m \cdot k \dots \dots [N] \quad (3.13)$$

Burada;

d_1 = İkinci çekmedeki zımba çapı [mm].

Yuvarlak parçalar için tekli çekimde, maksimum çekme kuvveti F_U aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [74].

$$F_U = \pi \cdot (d_1 + s) \cdot s \cdot R_m \cdot 1,2 \cdot \left(\frac{\beta - 1}{\beta_{max} - 1} \right) \dots \dots [N] \quad (3.14)$$

Burada;

d_1 : Zımba çapı [mm],

s : Sac kalınlığı [mm],

R_m : Malzeme çekme dayanımı [N/mm²],

β : Gerçek çekme oranı [-]

β_{max} : Maksimum çekme oranı [-]

Maksimum çekme oranı, kullanılan malzemenin özelliklerine bağlıdır. Kaba bir tahmin olarak, ilk çekmede $\beta = 2$ maksimum oranına sahip olarak hesaplanır [75].

3.3.1.1.2. Dikdörtgen Parçalar İçin Çekme Kuvveti

$$F_d = \left(2 \cdot \pi \cdot r_e + 4 \cdot \frac{(a+b)}{2} \right) \cdot s \cdot R_m \cdot k \dots \dots [N] \quad (3.15)$$

Burada;

F_d : Çekme kuvveti [N],

d : Zımba çapı [mm],

s : Sac malzeme kalınlığı [mm],

R_m : Sac malzemenin çekme dayanımı [N/mm²],

k : Katsayı,

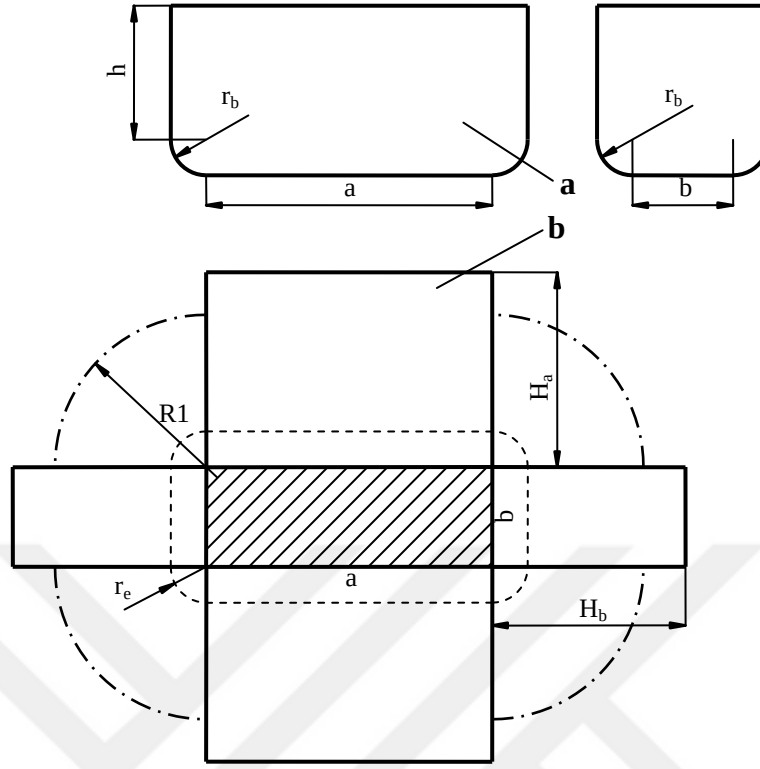
r_e : Kalıp köşe radyüsü [mm],

r_b : Zımba köşe radyüsü [mm],

a : r_b alt yarıçapı olmaksızın kabın uzunluğu [mm],

b : r_b alt yarıçapı olmaksızın kabın genişliği [mm] [72].

Dikdörtgen profilli derin çekme işleminde, ilkel parça boyutlarını belirlemek amacıyla elde edilecek kap eşit alana sahip elemanlara bölünür (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. a) Dikdörtgen kabın boyutları, b) Eşit alanlı elemanlara ayrılması [72].

3.3.1.2. Baskı Plakası (Pot Çemberi) Kuvveti (BPK)

Baskı plakası kuvvetinin büyüklüğü, çekme işleminde oluşan kırışmaları (ondülasyonu) önlemek için gereken en önemli faktörlerdendir. Bu kuvvet sayesinde malzeme akışı daha kontrollü olmaktadır. BPK'nin artmasıyla kalıp ile sac malzeme arasındaki tutunma kuvveti artar ve buna bağlı olarak sac malzemesinin yüzeyindeki gerilmeler de artmış olur.

Derin çekme işlemi için gerekli BPK aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir.

$$F_{BH} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - (d + 2 \cdot r)^2) \cdot p \dots \dots [N] \quad (3.16)$$

Genellikle, kalıp yarıçapı ve zımba ile kalıp arasındaki çekme boşluğu ihmal edildiği için, BPK'nin yaklaşık değeri, zımba çapına bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [75].

$$F_{BH} \cong \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot p \dots \dots \dots [N] \quad (3.17)$$

Farklı malzemeler için baskı plakasının gerekli özgül basıncı, malzeme kalınlığı ve zımba çapına bağlı olarak aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$p = \left[(\beta - 1)^2 + \frac{d}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{R_m}{400} \dots \dots \dots [N/mm^2] \quad (3.18)$$

Burada;

- p : Baskı plakası basıncı $[N/mm^2]$,
- d : Zımba çapı $[mm]$,
- D : İlkel parça çapı $[mm]$,
- s : Sac malzeme kalınlığı $[mm]$,
- R_m : Sac malzemenin çekme dayanımı $[N/mm^2]$,
- β : Gerçek çekme oranı (ilk çekmede).

Baskı plakası kuvvetinin yetersiz olması halinde katlanmalar, gereğinden büyük olması durumunda ise yırtılmalar meydana gelir [64].

3.3.1.3. Çekme Hızı

Derin çekme işleminde zımbanın plastik deformasyona başladığı andaki hızına çekme hızı denir. Çekme hızının çekme olayına etkisi üzerindeki çalışmalar henüz kesin kurallara bağlanmamıştır ve deneysel çalışmalar neticesinde belirlenmektedir. Çekme hızı, çekilen malzemenin fiziksel özellikleri ve şekil değiştirmesini önemli ölçüde etkilemektedir [76, 77]. Çekme işleminde anormal durumlarla karşılaşmamak için (yırtılma vb.) malzemeye şekil değiştirmesi için yeterli zaman verilmelidir [73].

Tablo 3.4. Silindirik çekmelerde malzemelerin cinsine göre çekme hızları [70].

Malzeme Cinsi	Çekme hızı (m/dk)	
	Tek etkili	Çift etkili
Alüminyum	56	33
Alüminyum Alaşımları	–	10 – 12
Pirinç	66	33
Bakır	50	28
Çelik	20	10 – 18
Çinko	50	15

Çekme hızı değerinin tespiti aşağıdaki formülle hesaplanabilmektedir.

$$V = 33,3 \cdot \left(1 + \frac{d}{2} \cdot \sqrt{D-d}\right) \dots\dots\dots [\text{mm/s}] \quad (3.19)$$

Mekanik preslerde, piston hızı presin kursu boyunca değişkendir. Hidrolik preslerde ise, piston hızı kurs boyunca sabit kaldığı için kurs boyunca sabit kuvvet uygulamak mümkündür [77].

Mekanik preslerde hız aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$V = 0,105 \cdot n \cdot \sqrt{h \cdot (H-h)} \dots\dots\dots [\text{mm/s}] \quad (3.20)$$

Burada;

V :İş kursunun hızı [mm/s],

H :Kurs yüksekliği [mm],

h :Çekmeye başlanan yerden alt ölü noktaya olan mesafe [mm],

n :Krank mili devir sayısı [dev/dk],

3.3.1.4.Limit Çekme Oranı (LÇO)

Derin çekme kalıplarının tasarımında göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktörlerden biri de limit çekme oranıdır. Üretilcek olan parçanın kaç kalıpta imal edilebileceği, sacın çekme oranıyla yakından ilişkilidir [78]. Limit çekme oranı, yırtılmadan ideal şekilde çekilebilecek en büyük dairesel iş parçası çapının (D), bu işlemi

gerçekleştirebilmesi öngörülen zımba çapına (d) oranı, şeklinde tarif edilir [79]. Limit çekme oranı;

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (3.21)$$

şeklinde gösterilir.

Bu değer, malzemelerin derin çekilebilirliğinin ifadesidir. Malzemelerin çatlak başlangıcından önce maksimum hangi çapa kadar çekilebileceğini açıklar [80]. Bu oran, taslak malzeme büyüklüğünün artması ile artar. Bu sebeple, tek operasyonlu çekme işlemlerinde istenilen çekme derinliğine ulaşılmasında çekme oranı limiti göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktördür. Çekme oranı limiti, sac malzemelerin çekilebilirliklerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [74].

İlk çekme için izin verilen en büyük limit çekme oranı β , zımba çapının sac kalınlığına oranına bağlı olarak Tablo 3.4 yardımıyla β belirlenir.

Tablo 3.5. Zımba çapı ve sac kalınlığına bağlı olarak ortalama β değerleri [72].

d/s	30	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600
β	2.1	2.05	2.0	1.95	1.9	1.85	1.8	1.75	1.7	1.65	1.60	1.5

Gerçek limit çekme oranı daima $\beta_{gerçek} \leq \beta$ olmalıdır.

3.3.1.4.1. Silindirik Parçalar İçin Derin Çekme Adımları

Çekme işlemi esnasında, zımba kuvvetinden dolayı çekilen parçanın cidarlarında çekme gerilmeleri meydana gelir. İlkel parça çapı ile zımba çapı arasındaki fark ne kadar büyük olursa bu gerilmeler de o kadar büyük olur. Parçada meydana gelecek olan bu aşırı gerilmeler, deformasyona ve yırtılmaya yol açacaktır. Bu nedenle çapları belirli bir oran dahilinde azaltmak gereklidir. Kademe oranının (m) tespitinde, ilkel parça çapı, sac kalınlığı, malzeme kalitesi dikkate alınmalıdır [73].

$$1. \text{ çekme } d_1 = \frac{D}{\beta_0} = D \cdot m \quad (3.22)$$

$$2. \text{ çekme } d_2 = \frac{d_1}{\beta_1} = d_1 \cdot m_1 \quad (3.23)$$

$$3. \text{ çekme } d_3 = \frac{d_2}{\beta_1} = d_2 \cdot m_1 \quad (3.24)$$

$$n. \text{ çekme } d_n = \frac{d_{n-1}}{\beta_1} = d_{n-1} \cdot m_1 \quad (3.25)$$

Silindirik çekmelerin kademelendirilmesinde (çekme sayısı hesabında) kullanılan “Hubert” eşitliği aşağıda verilmiştir [72].

$$n \cong \frac{h_n}{d_n} = \frac{D^2 - d_n^2}{4 \cdot d_n^2} \quad (3.26)$$

Burada;

- n : Gereken çekme sayısı
 h_n : n’inci çekim sonrası kap yüksekliği [mm],
 d_n : n’inci çekim sonrası kap çapı [mm],
 D : İlkel parça çapı [mm],

Tablo 3.6. Çeşitli malzemeler için kademelendirme katsayısı [64].

Malzeme	Baskı plakalı çekme		Baskı plakasız çekme
	m	m_1	$m = m_1$
Çelik sac	0,56	0,80	0,90...0,93
Pirinç, bakır, gümüş	0,50	0,75	"
Çinko	0,75	0,91	"
Alüminyum	0,55	0,80	"
Paslanmaz çelik	0,60	0,80	"

3.3.1.4.2. Dikdörtgen Parçalar İçin Derin Çekme Adımları

Dikdörtgen parçalar için derin çekme adımları, tasarım yarıçapı R_1 ve malzeme sabit q değerlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır. Derin çekme sacları için $q \approx 0,3$ alınır.

$$1. \text{ çekme } r_1 = 1,2 \cdot q \cdot R_1 \quad (3.27)$$

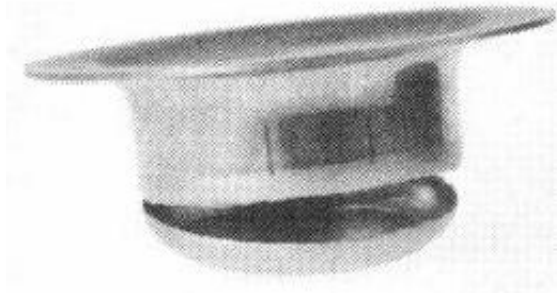
$$2. \text{ çekme } r_2 = 0,6 \cdot r_1 \quad (3.28)$$

$$3. \text{ çekme } r_3 = 0,6 \cdot r_2 \quad (3.29)$$

$$n. \text{ çekme } r_n = 0,6 \cdot r_{n-1} \quad (3.30)$$

Başka bir deyişle, tıpkı ilkel parça boyutlarının belirlenmesi gibi, kap tabanı temel dikdörtgeni ve köşe yarıçapının belirlendiği varsayılır [72].

Silindirik derin çekme işleminde kullanılan dairesel iş parçası çapının, bu işlemde kullanılacak zımbanın çapına tekabül eden limit çekme oranını aşacak değerler alması durumunda, parça yırtılarak hasara uğrar. Çünkü iş parçasının başlangıç çapı büyüdükçe çekme işlemini gerçekleştirmek için ihtiyaç duyulan zımba kuvveti de artmaktadır. Şekil 3.8’ te de bir örneği görülmekte olan bu türdeki bir hasar genellikle kabın yan duvar (veya cidar) kısmında ve zımba yuvarlatma yarıçapının başlangıç bölgesinde ortaya çıkmaktadır [67]. Şekil 3.9’ te de çekme oranının aşılması sonucu parçada meydana gelen yırtılma görülmektedir.



Şekil 3.8. Silindirik iş parçasında limit çekme oranının araştırılması sonucu ortaya çıkan hasar [81].



Şekil 3.9. Çekme oranının büyük olmasından dolayı parçada meydana gelen yırtılma [78]

Derin çekme işlemi ile ilgili yapılan araştırmaların temel amacı sacın çekilebilirliğini, yani çekme derinliğini arttırabilmektir. Çekme derinliği, sacın ilkel çapı ve zımba çapı ile ilgilidir. Bu nedenle limit çekme oranının arttırılması, bir defada üretilebilecek maksimum çekme derinliğini de arttırmaktadır. Ayrıca limit çekme oranı sacın yapısal özellikleri ile ilgili olduğundan her sacın limit çekme oranı farklıdır [78].

3.3.1.5.Çekme Boşluğu

Kalıp ile zımba arasındaki tek taraflı boşluğa çekme boşluğu denir. Bu büyüklüğün belirlenmesinde göz önüne alınan temel husus, çekme işlemi sırasında parçanın üst bölgelerinde ortaya çıkan malzeme yığılması kökenli kalınlaşmadır. Bu nedenle zımba ve kalıp arasındaki boşluk nominal sac kalınlığının belirli bir miktar üzerinde seçilir [76].

Çekme işleminde çekme boşluğunun az olması, sürtünmenin artmasına, ısı oluşumuna ve takımın aşınmasına, fazla olması ise yumuşak malzemelerde çekilen parça cidarının bozulmasına, ince malzemelerde buruşmalara yol açar. Bu nedenle zımba ile kalıp arasında belirli toleranslarda bir boşluk bulunmalıdır.

Çekme boşluğunu çekmenin metoduna ve takımın yapısına bağlı olarak değerlendirmek gerekir. Çekilecek malzemenin kalınlık değişiminin belirli sınırlar içinde kalması gerekmektedir.

Çekme boşluğunun belirlenmesinde kullanılan eşitlikler aşağıdaki gibidir [66].

$$\text{Çelik için} \quad c = s + 0,07\sqrt{10 \cdot s} \dots \dots \dots [\text{mm}] \quad (3.31)$$

$$\text{Alüminyum için} \quad c = s + 0,02\sqrt{10 \cdot s} \dots \dots \dots [\text{mm}] \quad (3.32)$$

$$\text{Demir olmayan metaller için} \quad c = s + 0,04\sqrt{10 \cdot s} \dots \dots \dots [\text{mm}] \quad (3.33)$$

Çekme boşluğunun bulunması için kullanılabilecek bir diğer eşitlik de aşağıda verilmiştir.

$$c = s \cdot \left(1 + 0,01 \cdot R_m \cdot (\beta - 1)^3\right) \dots \dots \dots [\text{mm}] \quad (3.34)$$

Çekme boşluğu değerlerinin tespit edilmesinde pratik olarak aşağıdaki Tablo 3.7 kullanılabilir.

Tablo 3.7. Çekme boşluğu değerleri [66,82]

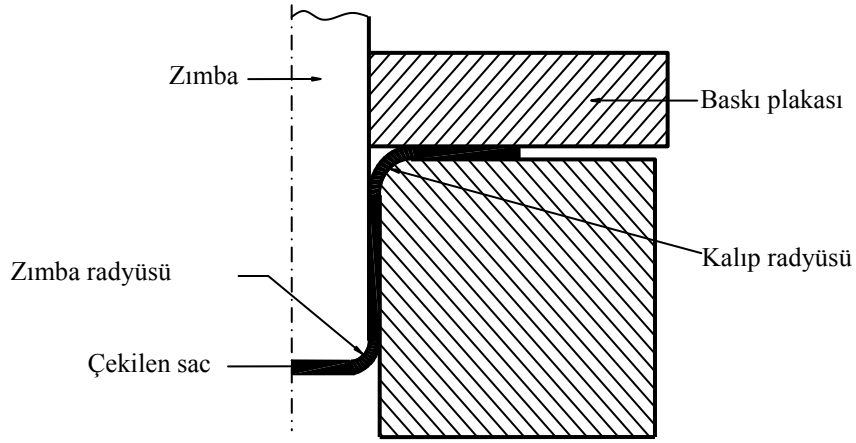
Malzeme Kalınlığı	İlk Çekme	Ara Çekme	Son Çekme
<0,4	(1,07-1,09)s	(1,08-1,10)s	(1,04-1,05)s
0,4-1,3	(1,08-1,10)s	(1,09-1,12)s	(1,05-1,06)s
1,3-3,2	(1,10-1,12)s	(1,12-1,14)s	(1,07-1,09)s
>3,2	(1,12-1,14)s	(1,15-1,20)s	(1,08-1,10)s

3.3.1.6. Kalıp Geometrisi

Bir sacın biçimlendirilmesinde zımba radyüsü en önemli parametrelerden biridir. Zımba radyüsünün küçük olması, bir sac üzerindeki keskin hatların iyi bir şekilde elde edilmesi için arzu edilen bir özelliktir. Fakat böyle keskin hatlar birim şekil değişimi artışını bir yerde toplayacağı için imalatta zorluklar ortaya çıkartır ve hata olasılığını arttırır. Bu ise sacın çatlamasına veya yırtılmasına sebep olur [76].

Çekme işleminde sac malzemenin kalıp içerisine akışını kolaylaştırmak için zımba ve dişi kalıp radyüslerinin mümkün olduğu kadar büyük tutulması gerektiği düşünülmektedir. Ancak, gereğinden büyük tutulmuş zımba ve dişi kalıp radyüslerinde, baskı plakası etki yüzeyi küçüleceğinden, sac malzemenin takımla temas etmeyen yüzeyi büyümekte ve parça üzerinde istenmeyen kırışıklıklar oluşmaktadır [1,66].

Zımba ucu radyüsü ve dişi kalıp radyüsü Şekil 3.10’da gösterilmiştir [66].



Şekil 3.10. Zımba ve kalıp radyüsü [66].

Kalıp radyüsü için önerilen değer aralıkları Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8. Kalıp radyüsü için önerilen değerler [66].

Malzeme kalınlığı (mm)	Kalıp radyüsü (mm)	
	En az	En fazla
0,4	4	6,5
0,5	4	7
0,6	5	7
0,7	5	7
0,8	5	8
1	5	8
1,3	6	9
1,4	6	9
1,5	6	9
1,6	6,5	10

Kalıp yarıçapının bulunması için kullanılan eşitlik aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$r_k = 0,035 \cdot [50 + (D - d)] \cdot \sqrt{s} \quad (3.35)$$

Burada;

r_k : Kalıp radyüsü [mm],

D : İlkel parça çapı [mm],

s : Sac malzeme kalınlığı [mm],

d : Zımba çapı [mm], olarak verilmiştir.

İlave çekme işlemlerinde ($D-d$) yerine ($d_{n-1}-d_n$) kullanılmakta, 0,035 katsayı değeri ise 0,08 'e kadar artırılabilir.

Küçük zımba radyüsü cidar zayıflaması etkisi göstermektedir. Cidar zayıflaması sonucu, parça tekrar çekme işlemlerindeki gerilmelere dayanamamakta ve yırtılmaktadır. Baskı plakalı çekme işleminde, başarılı bir çekme gerçekleşmesi için kalıp ve zımba radyüsleri arasında aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır [66, 83].

$$\frac{s}{D} \cdot 100 > 0,6 \quad \text{ise} \quad r_z = r_k \quad (3.36)$$

$$0,3 < \frac{s}{D} \cdot 100 < 0,6 \quad \text{ise} \quad r_z = 1,5 \cdot r_k \quad (3.37)$$

$$\frac{s}{D} \cdot 100 < 0,3 \quad \text{ise} \quad r_z = 2 \cdot r_k \quad (3.38)$$

Burada;

r_z : Zımba ucu radyüsü [mm],

Pratik uygulamalarda, zımba ucu radyüsü sac malzeme kalınlığının 3 ile 10 katı arasında alınır. Dişi kalıp radyüsü ise, sac malzeme kalınlığının 10 katı veya üzerindeki bir değerde seçilir.

3.3.1.7.Yağlama

Derin çekmede yağlama, zımba kuvvetini düşürmesi, derin çekme oranı sınırını yükseltmesi, takım aşınmasını azaltarak ömrünü uzatması ve üretim kusurlarını önlemesi bakımından önem taşır [64]. Yağlama, malzeme ve takım arasındaki sürtünmeyi azaltmayı amaçlar. Böylece şekillenmeye karşı göstereceği direnç azaltılmış olur. Yağlama iş parçasının takımdan kolayca ayrılmasını sağlamak amacıyla da kullanılır. Ayrıca yüksek basınçlardaki derin çekme işleminde seçilen yağ kalıp ve iş parçasını soğutmalıdır [66, 84]. Yağlama için kullanılacak maddelerde aşağıdaki genel özelliklerin bulunması gerekir.

- Yağlama maddesinin meydana getirdiği yağ filmi, homojen olmalı ve yüksek basınçlarda yırtılarak kuru sürtünmeye sebep olmamalıdır.
- Yağlama maddesi malzeme yüzeyini iyi ısıtmalı (yapışmalı) ve bütün yüzeylere homojen olarak dağılmalıdır.
- İş parçası üzerindeki yağ tabakası operasyondan sonra kolayca temizlenebilmelidir.

- Yağlama maddesi takım ve malzeme yüzeyinde kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar meydana getirmemelidir.
- Yağlama maddesinin bileşimi kararlı olmalı ve sağlığa zararlı etkileri bulunmamalıdır.
- Kullanılan operasyon sıcaklığında yağlama özelliğini kaybetmemeli, zararlı etkileri bulunabilecek duman ve gaz çıkarmamalıdır.
- Yağlama maddesinin temini kolay ve ucuz olmalıdır [66].

Pratikte dolgu maddeli dediğimiz, içinde grafit talk (magnezyum silikat), tebeşir (kalsiyum karbonat), MoS₂ (Molibden disülfid) vs. gibi katık maddeleri bulunan yağlarla, dolgu maddesiz çok çeşitli yağlama maddeleri kullanılmaktadır. Tecrübeler, dolgu maddesiz yağlama maddelerinin, dolgu maddeli yağlar kadar yağ filmi kararlılığına sahip olmadığını göstermektedir. Aynı zamanda dolgu maddeli yağlarda sürtünmenin diğerine nazaran 2 ile 3 kat daha az olduğu, bu sebepten takım ömrünün uzadığı görülmektedir. Tablo 3.9’ da yağlama maddelerinin cinsine göre sürtünme katsayılarının değerleri görülmektedir [66].

Tablo 3.9. Yağlama maddesine göre çekme işlemindeki sürtünme katsayıları [85].

Yağlama maddesi	Çekilen malzeme		
	Çekilen sac	Alüminyum	Al Alaşımları
Dolgu maddesiz makine yağı	0,14 – 0,16	0,15	0,16
Dolgu maddeli makine yağı	0,06 – 0,10	0,10	0,08 – 0,10
Kuru çekme	0,18 – 0,20	0,25	0,22

Çekme işlerinde kullanılabilecek yağlama maddeleri çeşitli malzemeler için Tablo 3.10 ve 3.11’ de verilmiştir.

Yağlama maddesinin kullanılması ile ilgili birkaç öneriyi aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz.

- İlkel pulun yağlama maddesine daldırılarak bütün yüzeylerinin yağlanması tavsiye edilmemektedir.
- İlkel pulun yalnızca çekme kalıbına bakan tarafı belli aralıklarla yağlanmalıdır.
- Malzemenin zımba boyunca kayarak cidar incelmeye uğrayacağı düşünülerek ilkel pulun baskı plakasına bakan tarafının yağlanmaması iyidir.
- Parçanın taban ile zımba alın yüzeyi arasındaki sürtünmeyi artırmak için zımbanın alın yüzeyinin parlatılmaması gerekir. Malzeme, zımba alın yüzeyinden kolayca

kayarsa kavis bölgesinde malzeme incilmesi daha fazla olacak ve malzemenin çekmede yırtılması kolaylaşacaktır.

- Malzeme ile takım elemanları arasındaki sürtünmeyi azaltmak, malzemenin kırılmaya olan eğilimini artırır. Bu sebepten $s/D < \%0,3$ gibi düşük malzeme kalınlığı oranlarında ilk çekme operasyonunda yağlama yapılmaması tavsiye edilir. Fakat takım aşınmalarını ve iş parçası yüzey bozukluklarını önlemek için dişi kalıp kavis bölgelerinin yağlanması gerekir.
- Bir üstteki maddede açıklanan öneriler ince saclardan yarım küre ve benzeri şekilli parçaların çekimleri içinde uygulanmalıdır.
- Magazine doldurularak otomatik besleme yapılan küçük boyutlu ilkel pulların yağlanması besleme esnasında pulların birbirlerine yapışmalarına sebebiyet verebileceğinden, yağlama yapılmaması iyidir. Bu durum takım aşınmalarını artırır ve çekme oranını olumsuz yönde etkiler.

Yüksek şekillendirme basınçları ve şekillenme dereceleri gerektiren işlerde “fosfatlama” tabir edilen uygulamada sıklıkla başvurulanan yağlama çözümlerindendir [66].

Tablo 3.10. Düşük karbonlu çeliklerin çekimlerinde kullanılabilecek yağlama maddeleri [66].

Yağlama maddesinin bileşimi	Ağırlık oranı %	AÇIKLAMALAR
Makine yağı Balık yağı Grafite Yağ asidi Kükürt Yeşil sabun Su	43 8 15 8 5 6 15	Uygun nitelikli yağlama maddeleridir. Kükürt bileşimine toz halinde ilave edilmelidir.
Makine yağı Hint yağı Balık yağı Tebeşir Yağ asidi Sudkostik Su	33 1,5 1,2 45 5,5 0,7 12	Büyük boyutlu parçaların yağlanmasında kullanılan bu yağlama maddesi iş parçasından kolayca temizlenebilir.
Yeşil sabun Su	20 80	60 – 70 °C de erir. İş parçasından kolayca temizlenebilir. Yarım küre çekmeler gibi operasyonlarda kullanılır.

Tablo 3.11. Çeşitli malzemelerin çekimlerinde kullanılabilen yağlama maddeleri [66].

Çekilen malzeme	Yağlama maddesi
Alüminyum Al alaşımları	Bitkisel yağ (soda yağı), vazelin, pul grafit ile gaz karışımı, parafin
Bakır Bakır Bronz	Bitkisel yağ ve suda eritilmiş sert sabun karışımı (1:1), pul grafit karıştırılmış mazot, soda ilaveli veya ilavesiz koyu sabunlu su
Nikel ve Alaşımları	Kalın sabun çözeltisi (NaOH, KOH) ile yağ karışımı
Paslanmaz çelik	Su ile grafit bulamacı, %10 kükürt ilave edilmiş kalın bezir yağı ile üstübeç karışımı (Zehirlidir)
Çinko ve alaşımları	Don yağı ile pul grafit karışımı

Yapılacak operasyona ve çekilecek malzemeye uygun çekme yağlarının sanayi yağ üreticilerinden hazır alınması çoğu zaman daha başarılı olabilir.

3.3.2. Malzeme Değişkenleri

3.3.2.1. Sıcaklığın Etkisi

Malzeme şekillendirme işlemleri soğuk (oda sıcaklığında), yarı sıcak (ılık) ve sıcak olarak yapılabilir. Malzemelerin mutlak erime sıcaklığı, T_e ve şekillendirme sıcaklığı ise T ile gösterilirse;

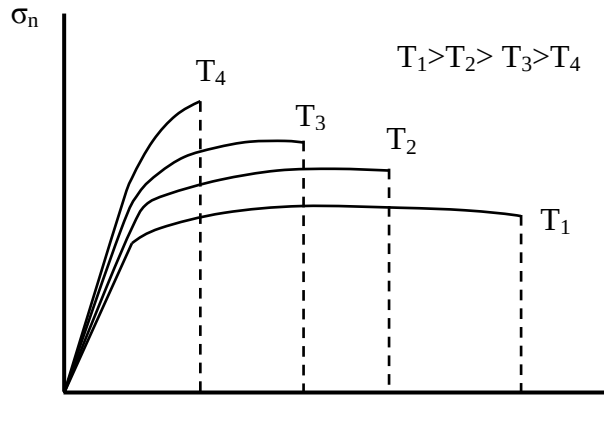
$$T < 0,3 \cdot T_e \Rightarrow \text{soğuk şekillendirme,}$$

$$0,3 \cdot T_e \leq T \leq 0,5 \cdot T_e \Rightarrow \text{ılık(yarı sıcak) şekillendirme,}$$

$$T > 0,6 \cdot T_e \Rightarrow \text{sıcak şekillendirme olarak adlandırılır.}$$

Soğuk şekillendirme ile malzemelerin kristal ve tane yapısı sürekli olarak bozulur, sertlik ve pekleşmesi(dayanım değeri) artarken, süneklik ve elektrik iletkenliği ise azalır. Bundan dolayı malzemeleri şekillendirmek için gerekli olan kuvvet de artar. Malzemelerin sünekliğindeki azalma malzemenin istenilen şekli almadan hasara uğramasına neden olabilir.

Oda sıcaklığının üzerinde fakat yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yapılan yarı sıcak(ılık) işleminde yeniden kristalleşme görülmez ancak soğuk şekil değiştirmeye göre daha küçük şekil verme kuvveti gerekir ve malzemenin şekillendirme esnasında hasara uğrama tehlikesi azalır.

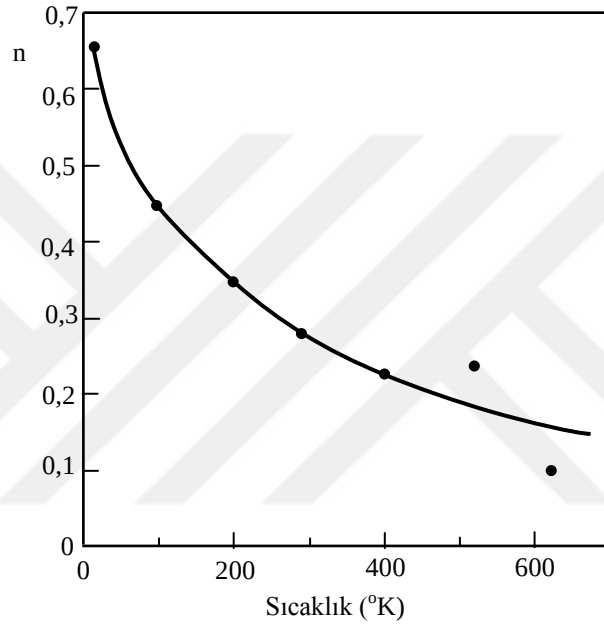


Şekil 3.11. Sıcaklığın mühendislik çekme diyagramına etkisi[64]

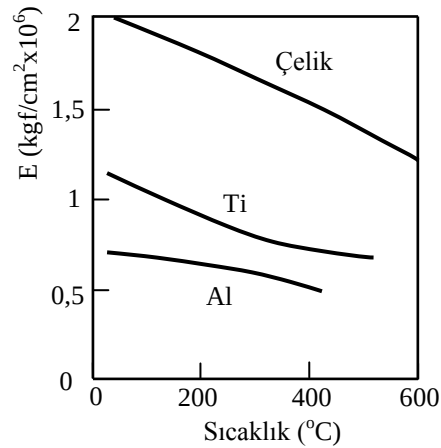
Sıcak şekil verme ise yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde yapıldığı için, şekillendirme esnasında bozulan yapı hemen hemen yeniden kristalleşir. Genelleştirme

yapmak bir dereceye kadar zor olsa da sıcaklığın yükselmesi çoğunlukla sünekliği ve tokluğu artırır. Ayrıca sıcaklığın etkisi ile elastikiyet modülü, çekme dayanımı ve akma sınırının düşmesi, sıcak şekil verme işleminin soğuk şekil verme işlemine kıyasla daha küçük bir kuvvetle yapılabilmesini sağlar.

Bunun yanı sıra pekleşme üsteli “n” de sıcaklıktan etkilenir. Sıcaklığın yükselmesi pekleşme üstelinin düşmesine sebep olur. Bu da şekillendirme esnasında dayanım artışının önüne geçerek şekillendirmeyi kolaylaştırır. Yani presleme kuvvetini azaltır [64,2].



Şekil 3.12. Sıcaklığın pekleşme üsteline etkisi [64]



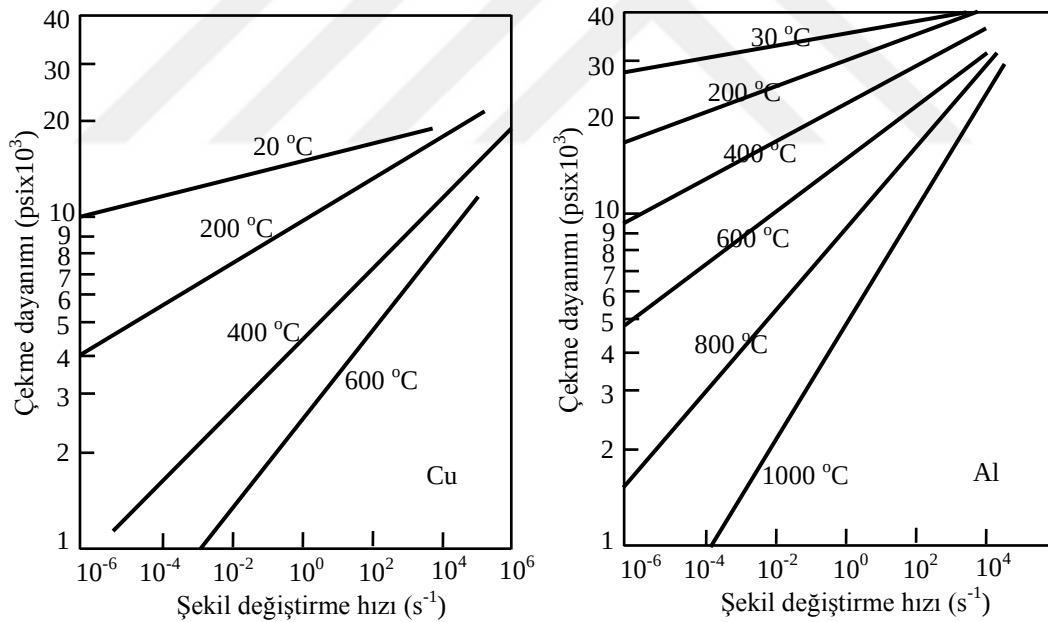
Şekil 3.13. Sıcaklığın elastiklik modülüne etkisi [64].

3.3.2.2. Birim Şekil Değiştirme Hızı ve Hız Duyarlılığı İndeksinin “m” Etkisi

Yüksek sıcaklıkta deformasyon işlemini etkileyen parametrelerden biri de gerininim (birim şekil değiştirme) hızı hassasiyet indeksidir [2].

Birim şekil değiştirme hızı hassasiyeti gerilim dağılımına yardım eden önemli özelliklerden biridir. Birim şekil değiştirme duyarlılığı katsayısı “m” pozitif ve yüksek olan malzemelerde boyun verme olayından sonraki şekil değiştirme miktarı artar. Bu tür malzemelerde boyun verme bölgesindeki plastik gerilme artışı ile boyun verme olayının komşu bölgelere yayılması sağlar. Böylece kalınlık incelmesinin sadece bir bölgede yoğunlaşmayıp tüm malzemede üniform olarak gelişmesi sağlanır [76].

Sıcaklık parametre olmak üzere şekil değiştirme hızının çekme dayanımına etkisi Şekil 3.14’de verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, sabit sıcaklıkta şekil değiştirme hızının artması malzemenin dayanımını arttırmaktadır. Bu olaya şekil değiştirme sertleşmesi de denebilir.



Şekil 3.14. Şekil değiştirme hızının çekme dayanımına etkisi [64].

Ayrıca şekil değiştirme hızının çekme dayanımına etkisi oda sıcaklığında nispeten az, yüksek sıcaklıkta ise oldukça büyüktür.

Şekil değiştirme hızının dayanıma etkisi, sabit sıcaklık ve birim şekil değiştirme miktarı için genel olarak;

$$\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m \big|_{\epsilon, T} \quad (3.39)$$

bağıntısı ile ifade edilir.

Burada;

σ : Plastik gerilme veya akma gerilmesi (N/mm²),

C : Malzeme sabiti (N/mm²),

m : Şekil değiştirme hızı duyarlılığı indeksi,

$\dot{\epsilon}$: Gerçek deformasyon hızı (s⁻¹), olarak verilmiştir.

“m” değeri log σ -log $\dot{\epsilon}$ diyagramlarından elde edilir ve çizilen doğrunun eğimidir. Eğimin 45⁰ olması m=1 anlamındadır. Sıcaklığın yükselmesi “m” değerinin artmasına yol açar ve dolayısı ile malzemenin dayanımı şekil değiştirme hızına daha duyarlı hale gelir. Soğuk şekillendirmede m<0,05, sıcak şekil vermede m=0,05-0,4, süperplastik malzemeler için ise m=0,3-0,85 arasındadır[64].

3.3.2.3. Pekleşme Katsayısının “n” Plastik Şekil Değişimine Etkisi

Bir malzemenin taneleri çarpılmış durumda ise, o malzemenin soğuk şekil değişimine uğradığı kabul edilir. Soğuk şekil değiştirme malzemenin kafes yapısına bağlı olan bütün özelliklerini etkiler [86].

Bir sacın soğuk şekillendirilebilirliğini etkileyen en önemli malzeme özelliği, gerilme artışı sonucu meydana gelen deformasyon ile pekleşmesidir. Pekleşme deformasyondan dolayı mukavemetteki artış olarak da tanımlanabilir [80]. Pekleşme özelliği yüksek olan malzemelerin deformasyona uğramış bölgeleri incelendiğinde dislokasyon yoğunluğu artışı sebebiyle bu bölgenin deformasyona karşı koyduğu görülür. Bu durumda uygulanan gerilme altında deformasyon komşu bölgelere doğru yayılarak sacda üniform bir incelme meydana getirir. Eğer malzemenin pekleşme özelliği düşükse, incelme belli bir bölgede başlar ve hızla o bölgede yoğunlaşır. Sonunda o bölgede hasar oluşur [76].

Çekme testinde üniform birim şekil değişimi, maksimum yükteki birim şekil değişimi olarak adlandırılır ve sacın pekleşme kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Pekleşmenin diğer bir ölçüsü ise pekleşme katsayısı “n” dir [76].

Deneysel olarak elde edilen gerç k gerilme-gerç k Şekil değiştirme eğrilerine  ok uyan bazı ampirik denklemler geliştirilmiştir [64].

Bunlardan ilki;

$$\sigma_g = K \cdot \varepsilon^n \quad (3.40)$$

őeklindeki ‘‘Holloman’’ denklemdir. [86].

Ancak burada $\varepsilon=0$ alınırsa $\sigma_g = 0$ olur. Bu sebeple bu denkleme σ_a eklenmiş ve yeni denklem;

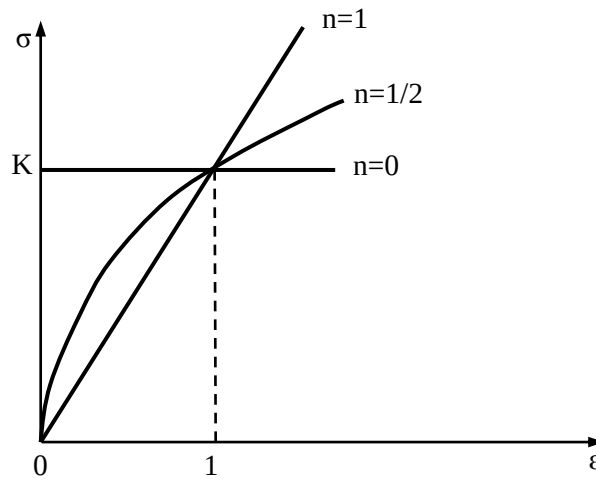
$$\sigma_g = \sigma_a + K \cdot \varepsilon^n \quad (3.41)$$

őeklindeki ‘‘Ludwing’’ denklemi adını almıştır [64].

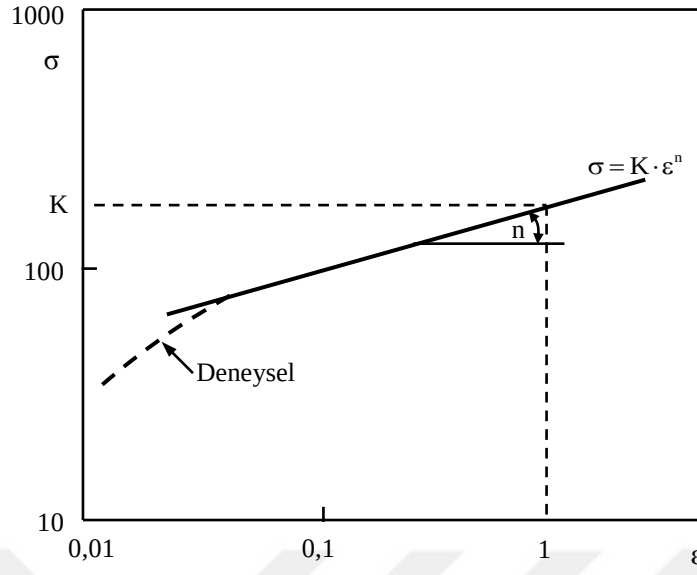
Burada;

- σ_g : Gerç k gerilme (N/mm^2),
- σ_a : Akma gerilmesi (N/mm^2),
- K : Mukavemet katsayısı (N/mm^2),
- ε : Gerç k birim şekil değiştirme,
- n : Pekleşme katsayısı d r.

Aşağıdaki şekil 3.15’da pekleşme katsayısının gerç k gerilme-gerç k şekil değiştirme eğrilerine etkisi g r lmektedir.



şekil 3.15. Pekleşme  stelinin gerç k gerilme-gerç k şekil değişimine etkisi $\sigma_g = K \cdot \varepsilon^n$ [64].



Şekil 3.16. Logaritmik koordinatlarda gerçek çekme diyagramı [64].

Tablo 3.12. Çeşitli malzemelerin oda sıcaklığındaki K ve n değerleri [64].

Malzeme	K (Mpa)	n
Alüminyum		
1100-0	180	0,20
2024-T4	690	0,16
6061-0	205	0,20
6061-T6	410	0,05
7075-0	400	0,17
Pirinç		
70-30, tavlı	900	0,49
80-15, soğuk haddelenmiş	580	0,34
Bakır, tavlı	315	0,54
Çelik		
Az karbonlu, tavlı	530	0,26
4135, tavlı	1015	0,17
4135, soğuk haddelenmiş	1100	0,14
4340, tavlı	640	0,15
304 paslanmaz çelik, tavlı	1275	0,45
410 paslanmaz çelik, tavlı	960	0,10

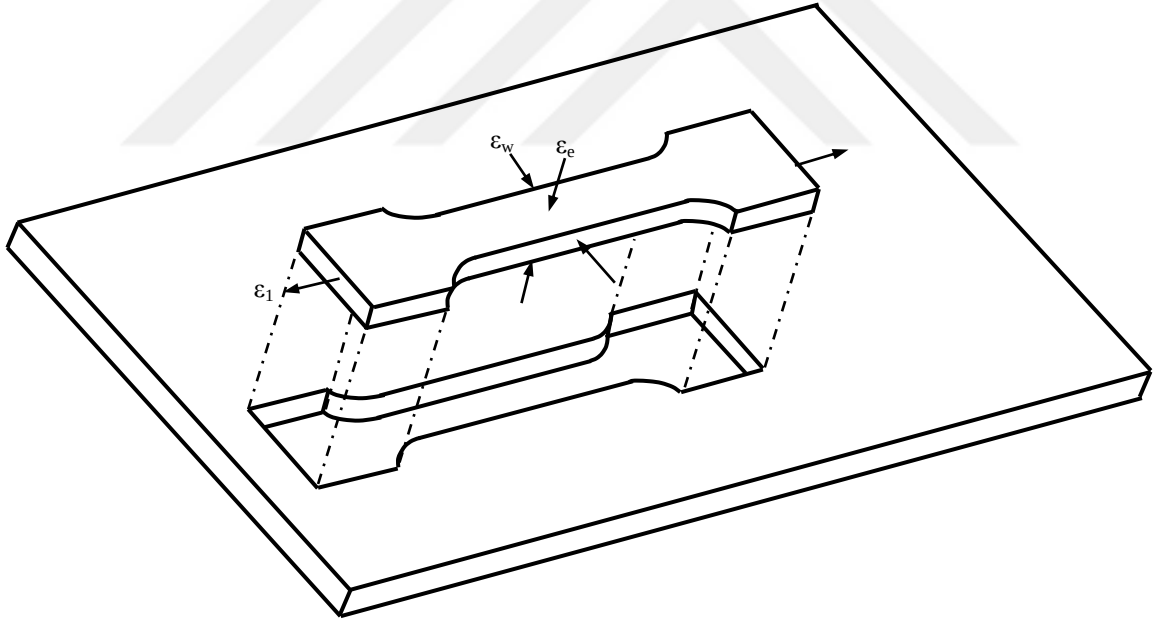
3.3.2.4. Anizotropinin Etkisi

Özelliklerin doğrultuya bağlı olması anlamına gelen “anizotropi” sacların şekillendirilmesinde önemli bir faktördür[64]. Anizotropinin üç önemli kaynağı vardır. Bunlar;

1. Tek kristallerde olduğu gibi doğuştan veya orijinal anizotropi,
2. Plastik deformasyon öncesi ve deformasyona bağlı kazanılmış anizotropi,
3. Son yapısal anizotropi [80].

Bir sac kristalografik yönlenmeden dolayı farklı yönlerde (0° , 45° , 90°) farklı anizotropi değerlerine sahip olabilir [76]. Plastik anizotropi(r); genişlikteki birim şekil değiştirmenin kalınlık yönündeki şekil değiştirme oranı olarak verilir.

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_e} = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(e/e_0)} \quad (3.42)$$



Şekil 3.17. Dikey anizotropi parametresi, r [64].

Genişlik yönündeki şekil değişiminin, kalınlık yönündeki şekil değişimine oranı “dikey anizotropi parametresi” olarak da anılır. Pozitif bir sayı olan dikey anizotropi sayısının fiziksel anlamı; $r > 1$ olduğu takdirde, malzemenin sac düzlemindeki şekil

değişimine kıyasla incelmeye karşı daha dayanıklı olduğu şeklindedir. Aksi halde $r < 1$ olur. İzotropik bir malzemede ise $r = 1$ 'dir [64].

Sac malzemelerde “r” nin haddeleme yönüne göre farklı değerler verdiğini bilmekteyiz. Bu nedenle elde edilen farklı dikey anizotropi katsayılarının ortalaması alınır[76]. Bu da aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (3.43)$$

Ortalama dikey anizotropi katsayısı “r” derin çekilebilirliğin bir ölçüsü olduğu için $r > 1$ olması istenir. Böylece malzeme kalınlığında fazla incelme olmadan, birim şekil değiştirme büyük oranda sac düzleminde oluşacak ve şekillendirme başarıyla sonuçlanacaktır.

Derin çekme işleminde dikey anizotropi katsayısı istenmekle beraber, “düzlemsel anizotropi” aşağıdaki bağıntı ile tanımlanmakta ancak istenmemektedir. Bunun sebebi ise kulak oluşumuna yol açmasıdır. Δr büyüdükçe kulak oluşumu da artar [64, 76].

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (3.44)$$

Çelik sacın plastik deformasyon özellikleri, derin çekmenin önemli parametrelerinden haddeleme yönü ve plastik anizotropi ile ilgilidir. Normal anizotropi incelmeye karşı sacın dayanımını belirlediği için deforme olmuş sacın anizotropiksel özellikleri iyi belirlenmelidir. Bu özellikleri belirlemek ve iyileştirmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan biri de sacların ılık/sıcak şekillendirilmesidir. Malzemelerin haddeleme geçmişi ve anizotropi özelliği sadece sac ısıtıldığında ortadan kalkar. Bundan dolayı da deformasyon esnasında sacdaki umulmadık hatalar azalır. Böylece malzeme mukavemetindeki azalma ve malzemenin anizotropi özelliğinin ortadan kalkması yırtılma ve buruşma hataları olmaksızın daha yüksek derin çekme oranlarına ulaşılabilir [2].

3.3.2.5. Malzeme Tane Boyutunun Etkisi

Saclarda tane büyüklüğü malzemelerin mekanik özelliklerine ve ürünün yüzey görünümüne etkileri bakımından büyük önem taşır.

Tane büyüklüğünün belirlenmesi için, mikroskop vasıtası ile belirli bir alandaki tane adedi veya büyütülmüş bir fotoğrafta rastgele çizilmiş belirli bir uzunluktaki bir doğrunun kestiği tane adedi sayılır. Genel olarak plastik şekil verilecek saclarda ASTM tane büyüklüğü numarası(n) 7 (1024 tane/mm^2) veya malzemenin daha ince taneli olması istenir. İnce taneli malzemelerde $5 \leq n \leq 8$ olmalıdır.

Oda sıcaklığında tane büyüklüğü arttıkça akma sınırı, çekme dayanımı ve sertlik düşer süneklik ise artar. Ayrıca iri taneli bir metal plastik şekil değiştirdikten sonra yüzeyi portakal kabuğu görünümünde pürüzlü olur. Bu nedenle iri taneli saclar derin çekme, gererek biçimlendirme, bükme gibi şekil verme işlemlerine uygun değildir [64].

3.3.2.6. Kalıntı Gerilmelerin Etkisi

Birçok plastik şekil verme ve yüzey işleme yönteminde, malzemenin üniform olmayan bir şekilde biçim değiştirmesinden dolayı, şekillendirmeyi sağlayan kuvvetler kalktıktan sonra iş parçasının içinde var olmaya devam eden gerilmelere “kalıntı(artık) gerilme” denir [64, 87].

Kalıntı gerilmelerin denge hali çeşitli plastik şekil verme yöntemleri(talaşlı ve talaşsız imalat) ile bozulabilir. Bu takdirde gerilmeler yeni bir denge dağılımı meydana getirir. Bu da malzemenin eğilmesi veya çarpılmasına neden olabilir. Benzer şekilde iç gerilmeleri bulunan bir malzemeye silindirik delikler açıldığında deliklerin ovalleştiği görülebilir. Ayrıca bir parçadaki kalıntı gerilmelerin dengesi, belli bir süre sonra gerilme gevşemesi(rölaksasyon) sonucunda da bozulabilir. Parçalarda şekil ve boyut kararsızlığına yol açan bu durum kullanım yerine göre önemli bir sorunun kaynağı olabilir.

Üniform olmayan plastik şekil değişiminden başka, kalıntı gerilmelerin oluşumuna neden olan bir diğer sebep de parça içindeki sıcaklık gradyanlarıdır. Yani bir parçanın ısı işlem veya döküm sonrasındaki soğuması sırasında kalıntı gerilmeler oluşabilir.

Kalıntı gerilmelere neden olan bir diğer etken de faz değişimleridir. Bu durum özellikle ılık ve sıcak şekil değiştirmede önem kazanır. Fazlar arasındaki yoğunluk farkı mikroyapıda değişimlere yol açarak kalıntı gerilmelerin oluşmasına sebep olur.

Sacların şekillendirilmesi esnasında yüzeyde meydana gelen çekme kalıntı gerilmeler, giderilmediği takdirde, gerilmeli korozyon çatlamasına neden olabilir [64,76].

Kalıntı gerilmelerdeki küçük değişimler bir parçanın ömründe önemli bir etki yapabilir. Bu etkilerin önemini anlamak ve bir parçanın olası performansını değerlendirmek için parça içindeki kalıntı gerilmelerin seviyesinin bilinmesi gerekir [76, 87].

3.4. Sac Metal Şekillendirme İşlemini Etkileyen Olumsuz Olaylar

Başta otomotiv endüstrisi olmak üzere oldukça yaygın kullanım alanına sahip olan AA 5754-O parçalarındaki iki esas problem PLC (Portevin-Le Chatelier) etkisi ve geri yaylanma olayıdır. Son zamanlarda yapılan yenilikçi çalışmalar bu olaylara odaklanmıştır. Yapılan çalışmalar, sıcaklık etkisi ile şekillendirmenin bu olayları olumlu yönde etkilediğini göstermiştir.

3.4.1. Geri Yaylanma(Esneme)

Geri yaylanma parçaların nihai şekli ile kalıpta şekillendirildikten sonraki şekli arasındaki fark olarak ölçülür. Sac malzeme şekillendirme işleminde malzeme üzerinden yükün kaldırılması neticesinde, elastik geri dönüşten dolayı meydana gelen geri ve ileri esneme, çıkan ürünlerin kalitesini, parça maliyetini vb. olumsuz yönde etkilemekte hatta ciddi geometrik hatalara sebep olabilmektedir [88]. Bundan dolayı son zamanlarda araştırmacılar farklı deney şartları altında sayısal ve deneysel çalışmalarla geri yaylanma olayının etkilerini en aza indirecek çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. Esneme deneylerinde yaygın olarak kullanılan en basit yöntem Demire testidir.



Şekil 3.18. Geri yaylanma numunesi[101].

3.4.1.1. Demire Testi (Split-ring test) (Geri yaylanma testi)

Demire testi bölünmüş halka testi olarak da bilinen basit bir karşılaştırma testidir. Demire testi şekilde de görüldüğü gibi tam olarak çekilmiş(1) bir derin çekme kabından bilezik şeklinde numune alındıktan(2) sonra radyal düzlemde bir kenarının kesilmesi(3) işlemidir. Bölünme işleminden önceki ve sonraki çaplar arasındaki fark geri esneme miktarını ve dolaylı olarak da artık gerilme değerini verir. Geri yaylanma olayının asıl nedeni ayrılma düzlemine dik teğetsel gerilmelerdir[97-99].



Şekil 3.19. Split- ring testi; 1) çekilmiş kap, 2) açılmış halka (split-ring), 3) bilezik alındıktan sonra kabın alt ve üst kısmı[98]

3.4.2. Portevin-Le Chatelier (PLC) Etkisi

PLC(Portevin-Le Chatelier) etkisi homojen olmayan plastik deformasyon bantlarının yayılımı olarak da bilinir. Birim şekil değiştirme hızı duyarlılık indeksinin negatif ve homojen olmayan deformasyonun başlaması ile PLC etkisi görülür. PLC olayını, sıcaklık, deformasyon oranı, çökteliler (özellikle Al alaşımlarındaki Mg elementi), tane boyutu, malzeme yüzey kalitesi önemli ölçüde etkiler. Bu etki özellikle 5000 serisi Al alaşımlarında Mg atomunun dislokasyon hareketini engellemesi ile ortaya çıkar. Bu da şekillendirme esnasında malzemenin plastikliğini ve sünekliğini plastik deformasyon esnasında azaltır [96,100,101].

3.5. Ilık Metal Şekillendirme Yöntemleri

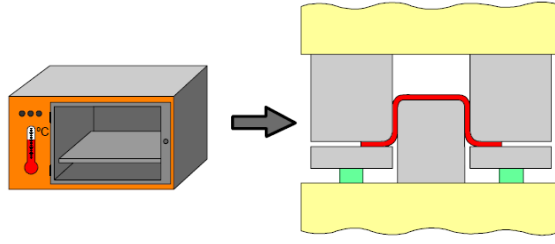
Derin çekme işlemi oldukça geniş uygulama alanına sahiptir. Bundan dolayı derin çekme işlemi endüstrinin vazgeçilmez metal şekillendirme yöntemlerinden biridir. Özellikle yüksek mukavemetli/düşük şekillendirme yeteneğine sahip metallerin derin çekilebilirliğinde oda sıcaklığında ciddi problemler vardır. Bunlar; malzemenin anizotropisine bağlı olarak malzeme yüzeyinde meydana gelebilecek buruşukluklar, kırışıklıklar, kulaklanmalar ve yırtılmalar. Bu tür problemleri ortadan kaldırmak için son zamanlarda yüksek sıcaklıkta (ılık/sıcak) derin çekme çalışmaları hız kazanmıştır.

Sıcaklık artışı malzemelerin akma dayanımını düşürdüğünden malzemenin şekillendirilebilirliğini artırır. Preslemedeki temel faktör plastik deformasyondur. Bundan dolayı, deformasyon sıcaklığı bu nokta dikkate alınarak belirlenmelidir [2, 14].

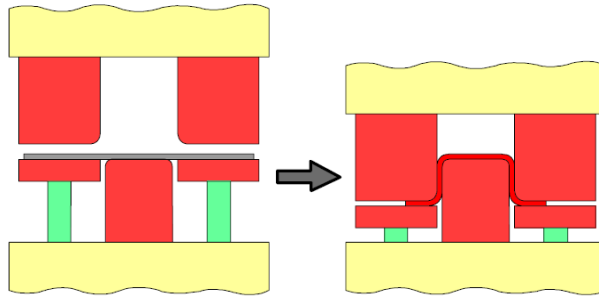
Ilık/sıcak sac şekillendirmenin birçok avantajı vardır. Bunlardan bazıları şöyle sıralanabilir.

- Oda sıcaklığında şekillendirilemeyen metalleri şekillendirmek kolaylaşır.
- Bu yolla hafif ve yüksek mukavemetli ürünlerin (Al, Mg, Ti vb.) üretimine imkân sağlanır.
- Şekillendirme için gerekli olan presleme kuvveti düşer.
- Ürün yüzeyindeki kusur oluşumunu azaltarak daha pürüzsüz ve homojen yüzeyler elde etmeyi sağlar.
- Karmaşık geometriye sahip parçaların şekillendirilmesini kolaylaştırır.
- Artık madde kayıpları en aza iner [2, 15].

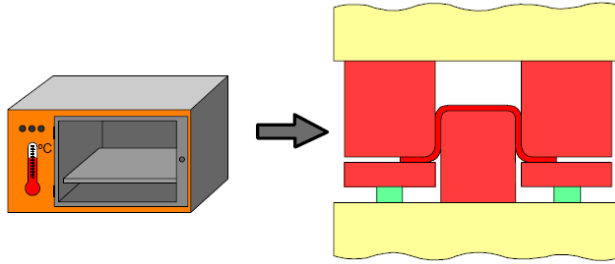
Yüksek sıcaklıkta derin çekme işlemi için iki farklı yöntem kullanılır. Birinci yöntem geleneksel yöntem olarak adlandırılır. Bu yöntemde malzeme fırın içerisinde, kalıplar arasında veya her ikisi birlikte kullanılarak ısıtılır ve ardından preslenir. Bu yöntemle homojen ısıtma koşulları sağlanır ancak malzeme transferi esnasında ısı kaybı meydana gelir. Şekil 3.20’de geleneksel yöntemle yapılan şekillendirme şeması verilmiştir.



Fırın içerisinde ısıtma



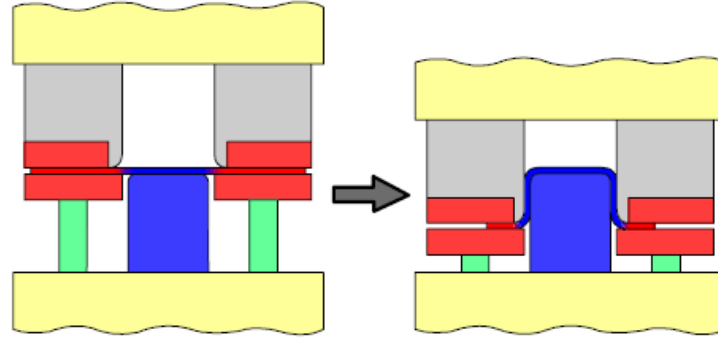
Kalıplar arasında ısıtma



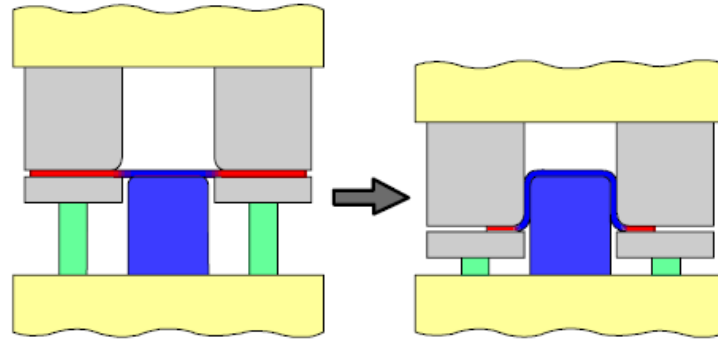
Kombine ısıtma

Şekil 3.20. Geleneksel ısıtma yöntemi ile şekillendirme şeması

İkinci yöntemde ise sac malzemenin ısıtılması kalıp ve baskı plakası arasında veya sac metale elektrik akımının verilmesi ile gerçekleştirilir. Ancak şekillendirme esnasında hem zımba hem de zımba ile sacın temas bölgesi soğutulur. Bu yöntemle lokal ısıtma yöntemi denir. Bu yöntemle sacın flanş bölgesinin akma dayanımı düştüğünden ve zımbanın temas bölgesinde ise önemli bir değişim olmadığından daha yüksek limit çekme oranlarına ve arzu edilen kap şekline daha kolay ulaşılır. Şekil 3.21’de lokal ısıtma şeması görülmektedir.



Kalıp içi ısıtma ve soğutma



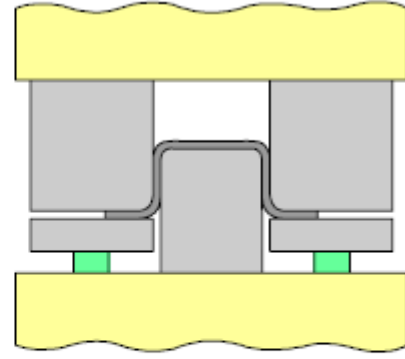
Şekil 3.21. Lokal ısıtma yöntemi

Yapılan son çalışmalarda geleneksel yöntemle yapılan üniform ısıtma işleminin hafif sac metallerin derin çekilebilirliğinde şekillendirilebilirliğinin iyileştirilmesine ciddi bir katkı sağlamadığı vurgulanmaktadır. Bunun yerine ısıtmada sıcaklık gradyanı uygulamasının, derin çekme işlemini kolaylaştıran ve daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlayan önemli bir parametre olduğu söylenmektedir. Ayrıca sıcaklık gradyanı, derin çekme işlemi esnasında sac malzemede meydana gelen gerilme dağılımını çevreleyebildiğinden üniform şekillendirme için oldukça gereklidir [2, 15].

Geleneksel(soğuk) sac metal
şekillendirme.

Pekleşme üsteli(n)

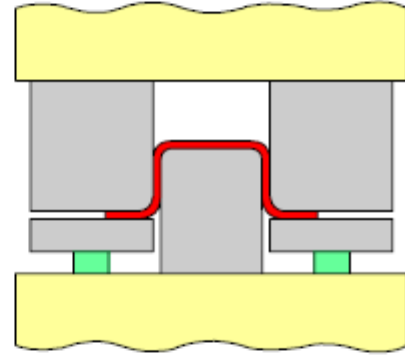
$$\sigma = K \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}^n \cdot \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^m$$



Geleneksel ısıtma yöntemi ile
ılık sac metal şekillendirme.

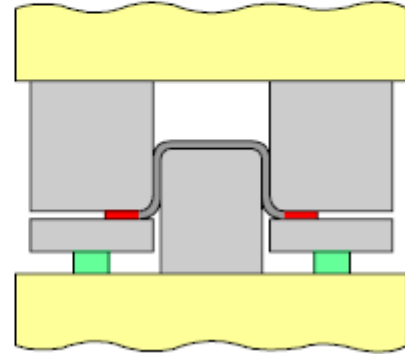
Deformasyon hızı
hassasiyet indeksi(m)

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \cdot \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^m$$



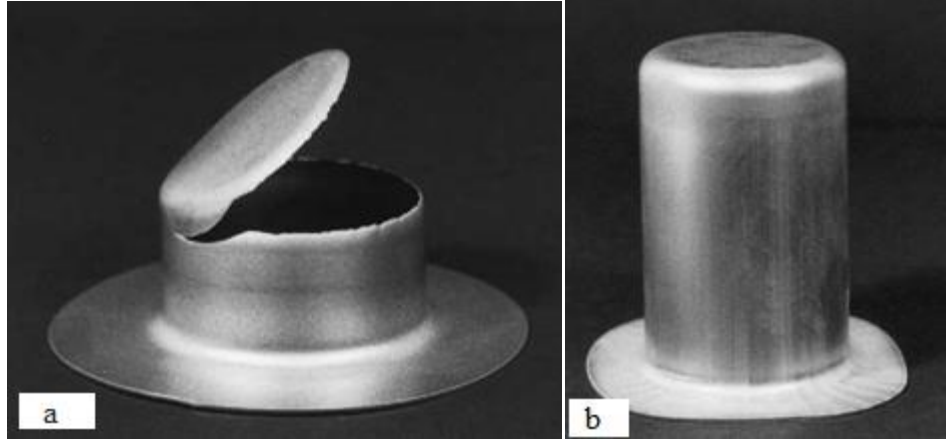
Lokal ısıtma yöntemi ile ılık sac
metal şekillendirme.

Şekillendirme sırasında
ısıtma bölgesinde
deformasyonun düşmesi.



Şekil 3.22. Farklı uygulamalarda kullanılan özellikler

Isıtılmış olan zımba ve matris derin çekme esnasında sacın akışını kolaylaştırarak, kap yan duvarlarındaki gerilimi ve zımba kuvvetini azaltır. Böylece daha üniform ve kolay şekillendirme gerçekleşmiş olur. Şekil 3.23’de sıcaklığın şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisi görülmektedir.



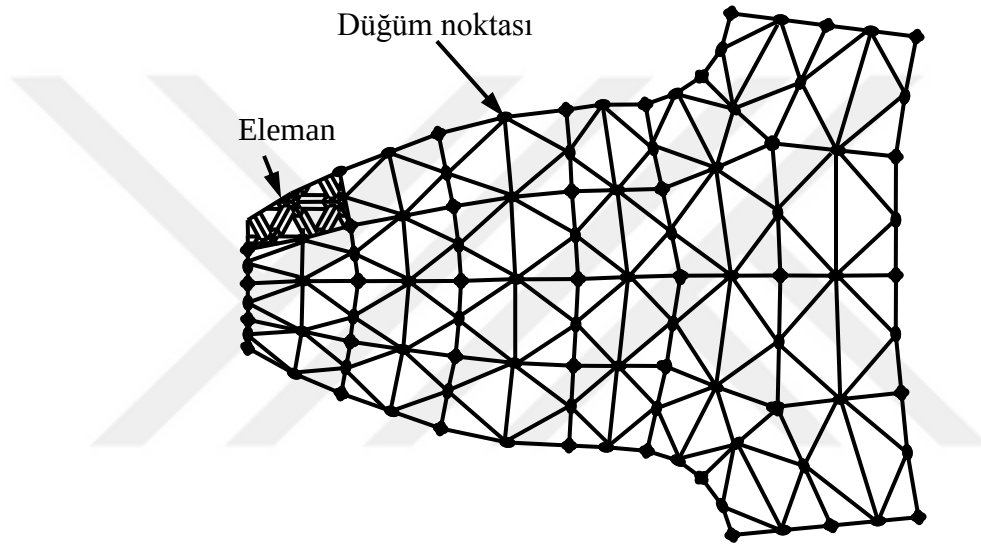
Şekil 3.23. Oda sıcaklığında(a) ve yüksek sıcaklıkta(b) çekilmiş numune[16].

Genellikle şekillendirilebilirliği etkileyen parametreler; malzemenin akma gerilmesi, maksimum mukavemet, uzama, plastik deformasyon hızı, anizotropi, sertleşme, gerinim hızı, deformasyon hızı hassasiyet indeksi, kimyasal bileşim, soğuk/sıcak haddeleme ve termomekanik özellikler olarak sıralanabilir. Yukarıda bahsedilen bu parametrelerin bazıları sıcaklığa bağlıdır. Bundan dolayı yüksek sıcaklığın derin çekme üzerinde kritik bir etkisi vardır. Yüksek sıcaklıkta deformasyon işleminin parametreleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Sıcaklık,
- Sıcaklık dağılımı,
- Gerinim hızı,
- Gerinim hızı hassasiyet indeksi (m) ve
- Malzeme geçmişi'dir[2].

3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method – FEM) yada sonlu elemanlar analizi (Finite Element Analysis – FEA) günümüzde bir çok problemin çözümünde kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodunda problem daha önce belirlenmiş birçok parçalara (elemanlara) ayrılarak basitleştirilir (Şekil 3.24). Her elemanın uygulanan kuvvete vereceği tepkiyi ifade eden bir denklemi vardır. Bu her bir elemanın vereceği tepkilerin toplamı, tasarımın yükleme kuvvetine vereceği toplam tepkiyi gösterir.



Şekil 3.24. Bir problemin sonlu elemanlar modeli [89].

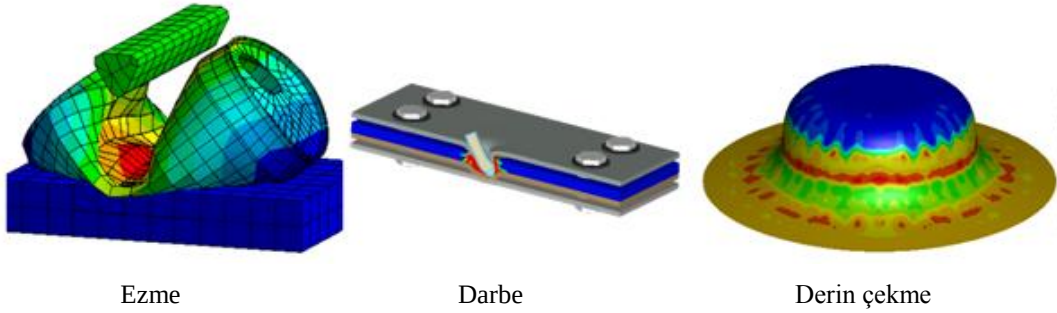
Sonlu sayıda bilinmeyişi olan sonlu elemanlar modeli sonsuz sayıda bilinmeyeni içeren modellerle yalnızca benzeşim yapar, asla gerçeğin yerini tutmaz. Problemin çözümü için kurulan sistemin başarısı hangi sistemin simüle edildiğine ve simülasyon için nelerin kullanıldığına bağlıdır [90].

Mühendislikte FEM;

- Makine, Uzay, İnşaat ve Otomotiv endüstrisinde,
- Yapısal analizlerde (statik/ dinamik, linear/nonlinear),
- Isıl ve Akış analizlerinde,
- Elektromanyetik alanların hesaplanmasında,
- Geometrik yapılarda ve
- Biyomekanik gibi alanlarda geniş bir şekilde uygulanmaktadır [91].

Günümüzde metalleri biçimlendirme konusunda dünyada 60'a yakın benzeşim (simülasyon) yazılımı mevcuttur. Bunların %90'ı üniversite ve araştırma merkezlerinde geliştirilmiş olup yalnızca % 10'u ticari amaçlı kullanıma açıktır [92].

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çözümlemeler statik, yarı statik ve dinamik durumlar için ayrı ayrı değerlendirilir ve duruma uygun çözüm yöntemi seçilir. Statik durumlar için implisit yöntem kullanılırken, dinamik durumlar için eksplisit yöntemi daha uygun ve doğru çözümler vermektedir. Derin çekme yönteminde malzemenin kalıp içerisine akışı ve bir takım dinamik yüklemelere maruz kalması dikkate alındığında, eksplisit yönteminin kullanılması daha uygun olacaktır. Şekil 3.25'de dinamik durumlar için bu yöntemin uygulamalarından bazı örnekler verilmiştir.



Şekil 3.25. Eksplisit yöntem kullanılan dinamik durumlar [93, 94].

3.6.1. İmplicit Yöntem

Bu yöntemde denge denklemleri $t+dt$ anında çözülür. Sac şekillendirmedeki birçok nonlinear davranış nedeni ile denge konumu iteratif olarak elde edilir. Bu yöntemde genelde, denklem 3.45'de verilen Newton-Raphson yöntemi kullanılarak analiz yapılır.

$$\Delta u^{(i+1)} = \Delta u^{(i)} + K_t^{-1} (F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (3.45)$$

Burada, K_t bilinen teğetsel direngenlik matrisi, F dış kuvvetlerin vektörü, I iç kuvvetlerin vektörü ve Δu ise bir zaman adımındaki deplasmanların vektörüdür. Bu yöntemde her iterasyon adımında teğetsel direngenlik matrisinin yeniden oluşturulması ve ayrıştırılması gerekir. Bu yöntem teoride iki artış arasındaki adım aralığı istenen büyüklükte seçilebilmesine karşın pratikte nonlinear temas şartları nedeni ile sınırlıdır. Çözümde bir yakınsama kriterine ulaşıldığında hesaplama durur [95].

3.6.2. Eksplisit Yöntem

Bu yöntemde denge denklemi t anında çözülür ve iterasyona gerek duyulmaz. Biçimlendirme işlemi statik değil dinamik bir işlem olarak algılanır ve hareket denkleminin integrasyonu için merkezi farklara dayalı bir çözüm adımı kullanılır.

$$\begin{aligned} u^{(i+1)} &= u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} u'^{(i+\frac{1}{2})} \\ u'^{(i+\frac{1}{2})} &= u'^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^i}{2} u''^{(i)} \end{aligned} \quad (3.46)$$

buradaki merkezi farklar operatörü bir önceki artışlardan bilinen hız ve ivme değerlerini kullandığından yöntem eksplisit olarak adlandırılır. İvme için;

$$u''^{(i)} = M^{-1} (F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (3.47)$$

formülü kullanılır ki burada M^{-1} kütle matrisinin tersi olup “lumped mass” yöntemi kullanıldığı taktirde ters alma işlemi diyagonal bir matrisin tersini alma işlemi şeklinde kolaylaşır. Kararlılık açısından kullanılabilecek zaman adımı genişliği ise sınırlıdır.

l : karakteristik sonlu eleman büyüklüğü,

c : malzemedeki ses hızı,

olmak üzere kararlı bir zaman adımı yaklaşık olarak

$$\Delta t = \frac{l}{c} \quad (3.48)$$

eşitliği ile bulunur. Yani bir zaman adımı içinde bir dalga en fazla bir sonraki sonlu elemana ulaşabilir. Ağ yoğunluğunda mm seviyesinde eleman büyüklükleri kullanıldığında μs mertebesinde zaman adımları elde edilir. Bu demektir ki bir derin çekme işleminin simülasyonu 10^5-10^6 μs kadar zaman adımına gerek duyulabilir. Bu da doğrudan hesaplama zamanına yansır. Bu problemi gidermek için şekillendirme işlemleri gerçekte olduğundan daha hızlı şekilde oluyormuş gibi benzeştirilir. Benzeşim sırasında ortaya çıkabilecek atalet etkilerini gidermek için (örneğin sönüm elemanları kullanmak gibi)

önlemler alınmalıdır. Yapılan araştırmalar, işlem hızının sonuçları etkilemeden on kata kadar çıkarılabileceğini göstermiştir. Malzeme özelliklerinin ve katsayıların şekil değiştirme hızına bağlı olduğu malzeme modelleri için ise hızın değiştirilmesi söz konusu olamaz. Alternatif bir yöntem de işlem hızı sabit tutularak malzemenin yoğunluğunun artırılması ve buna bağlı olarak malzeme içindeki ses hızı küçültülmesidir. Yoğunluğun 100 kat artırılması ses hızını 10 kat düşürür ve problem 10 kat hızlı çözülür [91].



4. MATERYAL ve METOT

4.1. Çalışmanın Amacı

Derin çekme işlemi geniş uygulama alanına sahip olduğundan endüstrinin vazgeçilmez metal şekillendirme yöntemlerinden biridir. Özellikle Al ve Mg gibi şekillendirme yeteneği düşük sünek metallerin geleneksel yöntemlerle oda sıcaklığında şekillendirilebilmesi sınırlıdır. Teknolojik gelişmelerle birlikte hafif metallere olan ilginin artması şekillendirilebilirlikleri zor olan bu alaşımlar için yenilikçi şekillendirme teknikleri geliştirmeyi zorunlu kılmaktadır. Çalışmalar, Al-Mg alaşımlarının şekillendirilebilirliklerinin sıcaklıkla artırılabilirdiğini göstermiştir. Normalde karmaşık olan derin çekme işlemi sıcaklık ve deformasyon hızı etkisi ile daha da karmaşık hale gelmektedir.

Bu çalışma ile, sıcaklığın ve kalıp geometrisinin limit çekme oranı üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Şekillendirilebilirliği kontrol etmek için deneyler, kalıp ve baskı plakası yüzeylerine 0°, 5°, 10° ve 15° açılar verilerek oda sıcaklığı 25°C(OS), 100°C, 175 °C ve 250 °C sıcaklıklarda MoS₂ yağlayıcı kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada, zımba ve kalıp köşe radyüsü 8 mm, baskı plakası kuvveti 1200 N, 2400 N, 3600 N olarak belirlenmiştir.

4.2. DeneySEL Çalışmalar

Deneylerde, 1 mm kalınlığında EN AW-5754 (AlMg3) sac malzeme kullanılmıştır. 5754 alaşımı, ısıtıl işlem uygulanamayan alaşımlar sınıfına giren, düşük seviyede gerilimle sertleştirilmiş “H111” formunda temin edilmiş, bu gerilimleri gidermek için 380 °C sıcaklıkta 4 saat tavlanarak en yumuşak şekli olan “O” formuna getirilmiştir. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 4.1’de verilmiştir.

Malzemenin oda sıcaklığındaki mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 5000 kN kapasiteli SHIMATZU marka çekme test cihazında 5 mm/dak çekme hızında 0°, 45° ve 90° olmak üzere üç farklı haddeleme yönünde toplam 9 adet numune çekme testine tabi tutulmuştur. Sertlik ölçümü ise Emcotest DuraScan mikrosertlik cihazında yapılmıştır.

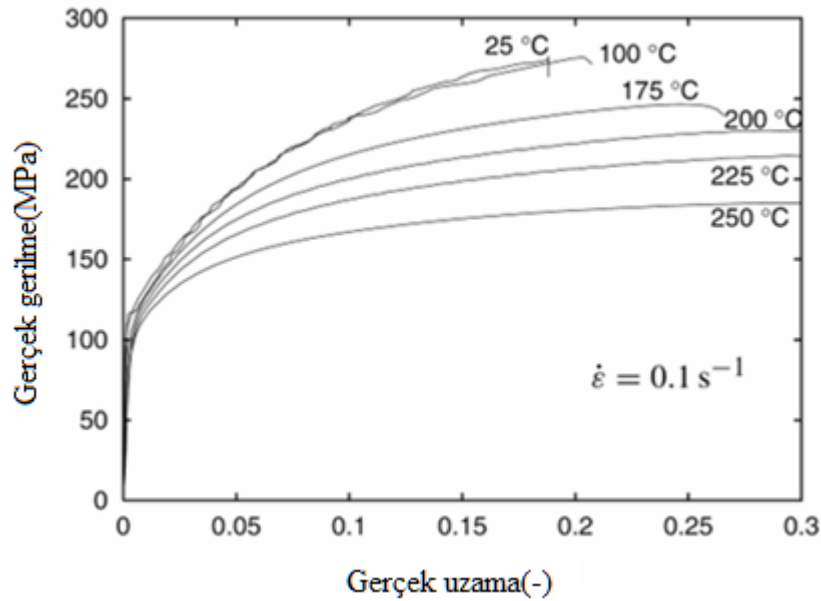
Mekanik deney sonuçları Tablo 4.2’de, farklı sıcaklıklar altındaki gerçek gerilme-gerinin eğrileri ise Şekil 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. EN AW-5754 (AlMg3) sacının kimyasal analizi, %

Kimyasal Bileşim, %											
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
0,13	0,3	0,019	0,14	2,72	0,005	0,005	0,022	0,018	0,01	0,013	Geriye kalan

Tablo 4.2. Deney numunesinin mekanik özellikleri

Hadde yönü (°)	Akma dayanımı (N/mm ²)	Çekme dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)	Elastikiyet modülü (GPa)	Sertlik, HV0.2	
					Isıl işlem öncesi, “H111”	Isıl işlem sonrası, “O”
0	167,748	248,544	10,321	66	82,6	61,7
45	163,257	235,162	12,826			
90	165,643	240,119	11,684			



Şekil 4.1. 5754-O malzemenin sıcaklığa bağlı gerçek gerilme-gerinim eğrileri [96].

Limit çekme oranını belirlemek amacıyla sac malzemeler 80-125 mm arasında değişen farklı çaplarda hazırlanmıştır. Tablo 4.3’de deneylerde kullanılan ilkel parça çaplarına karşılık gelen limit çekme oranları verilmiştir.

İlkel parça çapı (mm)	Limit çekme oranı (β)
85	2,14
86	2,17
93	2,35
109	2,75
111	2,80

Soğuk su çıkışı

Basınçlı hava girişi

Soğuk su girişi

Zımba

Termokupl

Sac

Baskı plakası

R8

α

Isıtıcılar

Kalıp

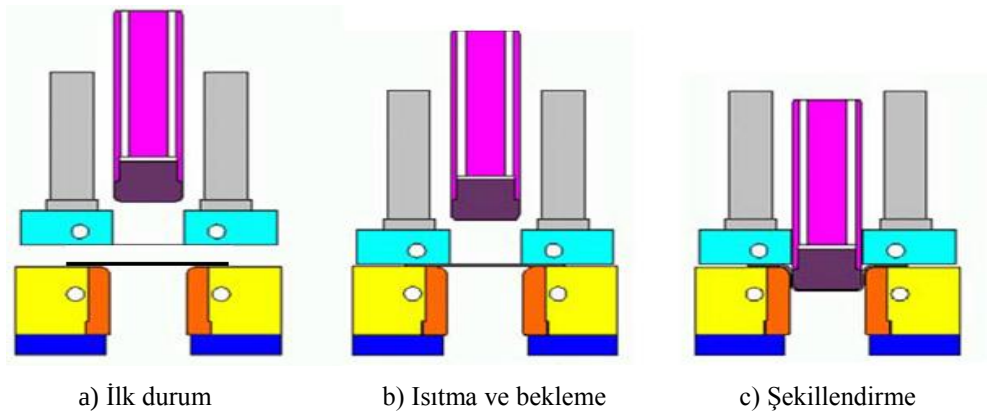
Termokupl

Ø42,25

Ø39,60

62

Deneylerde kalıp ve baskı plakası, 3800 W gücünde ısıtıcı rezistanslar ile ısıtılmış, şekillendirme esnasında zımba su ile, deney malzeme ise basınçlı hava ile soğutulmuştur. Kalıp ve baskı plakasının sıcaklıkları kalıplar içerisine yerleştirilen termokupl ile ölçülmüştür. Isıtma işleminde kalıp ve baskı plakasını istenilen sıcaklıkta tutmak için dijital termostatlı kontrol ünitesi kurulmuştur. Deney malzemesi baskı plakası ile dışı kalıp arasında yaklaşık 30-90 saniye süre arasında ısıtılmıştır. Sac, kalıp ve baskı plakası arasında 1200 N, 2400 N ve 3600 N’luk kuvvetler uygulanarak ısıtılmıştır.



Şekil 4.3. Ilık derin çekme işlem sıralaması

Deneysel çalışmalarda zımba kuvvetinin belirlenmesi için CAS LS-20T marka 20 ton kapasiteli tek yönlü kuvvet ölçme özelliğine sahip bir yük hücresi kullanılmıştır. Kuvvetin hassas olarak ölçülebilmesi için yük hücresinin çekme eksenine dik ve tam ekseninde yerleştirilmesi önemlidir. Şekillendirme sıcaklıklarının, kalıp yüzey açılarının ve baskı plakası kuvvetlerinin şekillendirmeye olan etkileri yük hücresine gelen kuvvetin ölçülmesiyle tespit edilmiştir.

Yük hücresinden elde edilen sonuçların bilgisayar ortamına aktarılması ve kaydedilmesi amacıyla CAS 1500A marka bir indikatör kullanılmış ve elde edilen veriler RS232 bağlantısı kullanılarak DNC bilgisayar programı yardımıyla 10^{-1} saniye aralığında bilgisayara kaydedilmiştir.

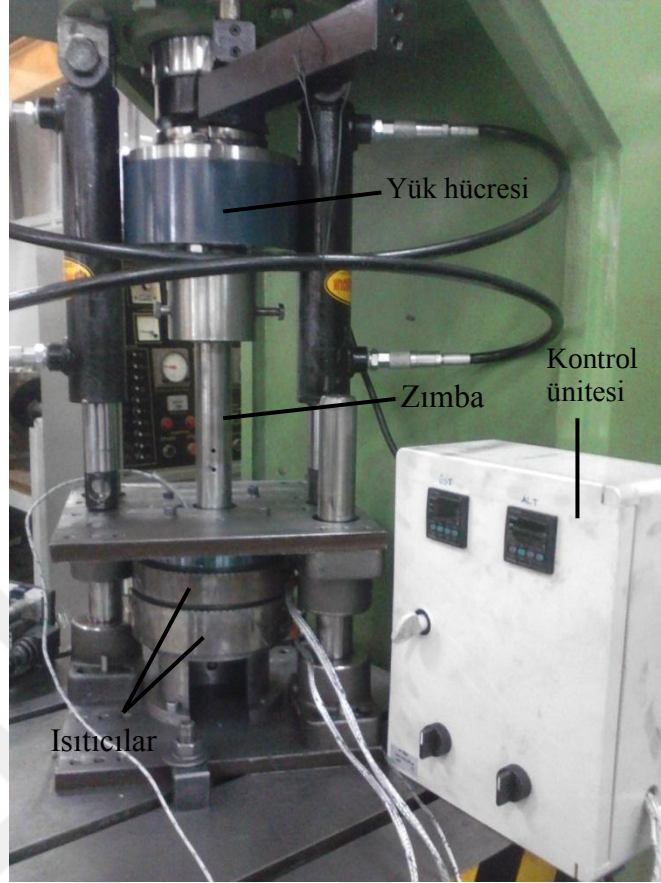
Çekme deneylerinde kullanılan çekme parametreleri değerleri Tablo 4.4’de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi ile deney parametreleri oluşturulmuştur.

Tablo 4.4. Derin çekme parametreleri

Çekme parametreleri				
Matris/Baskı plakası açısı, α (°)	0	5	10	15
Şekillendirme sıcaklığı (°C)	25	100	175	250
Baskı plakası kuvveti (N)	1200	2400	3600	-
Kalıp/zımba radyüsü (mm)	8	-	-	-

Baskı plakası kuvvetini kontrol etmek amacıyla bir hidrolik pompa kullanılmış ve bu hidrolik pompaya basınç kontrol valfi, yön kontrol valfi, manometre ve iki adet de hidrolik silindir bağlanarak pres gövdesine monte edilmiştir. Manometrede okunan basınç değerine karşılık gelen kuvvetler yük hücresi yardımıyla belirlenmiş ve baskı plakası kuvvetleri ayarlanmıştır.

Derin çekme deneyleri, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Atölyesinde bulunan 600 kN basma kapasiteli C tipi Şahinler marka hidrolik pres tezgahında yapılmıştır. Deney seti pres tezgahına bağlanmış, çekme hızı sabit 4 mm/s olacak şekilde ayarlanmış ve pres hızı MECHAOPTO Dijital Takometre ile ölçülmüştür. Şekil 4.4’de derin çekme deneylerinde kullanılan deney setinin fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.4. Çalışmaların yapıldığı deney seti

Derin çekme işlemi sırasında sac malzeme, baskı plakası, kalıp ve zımba arasında ki sürtünmeyi azaltmak, sac malzemenin kalıp yüzeyinde daha kolay kaymasını sağlamak ve kalıp elemanlarının aşınmalarını önlemek amacıyla, Molykote Pulver Z (MoS_2 toz) katı yağlayıcı kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar, pres hızı ve kalıp/zımba radyüsleri sabit tutularak her deney sonunda baskı plakası kuvveti değiştirilerek 3 farklı baskı plakası kuvveti, 4 farklı sıcaklık ve 4 farklı kalıp açısı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Kalıp/baskı plakası açısı, şekillendirme sıcaklığı ve baskı plakası kuvvetlerinin çekme işlemine etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Her bir parametre için çekme deneyleri en yüksek çekme boyu, kapların deformasyona uğramadan çekilebildiği en büyük β değerine ulaşınca kadar tekrarlanmıştır.

4.3. Sonlu Elemanlar Analiz Çalışmaları

Deney numuneleri üzerinde meydana gelen deformasyonlar sonlu elemanlar yönteminde eta/Dynaform paket programı ile belirlenmiştir. eta/Dynaform paket programı sac metal deformasyon işlemlerinin analizinde yaygın olarak kullanılan yüksek güvenilirliğe sahip bir paket programdır.

Derin çekme işleminin analiz edilebilmesi için öncelikle kalıp elemanlarının ve deney malzemenin bilgisayar ortamında modellenmesi, paket programa aktarılması, ağ yapılarının oluşturulması ve sac malzeme özelliklerinin atanması gerekmektedir.

Deneylerde kullanılan kalıba ait bütün geometrik özellikler (kalıp boyutları, zımba radyüsleri, kalıp açıları vb.) dikkate alınarak kalıp elemanlarının üç boyutlu modelleri SolidWorks 2015 paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Kalıp seti için SolidWorks’de kullanılan koordinat sistemi esas alınmış, eta/Dynaform paket programı için oluşturulan modeller çağırılarak paket programı içine alınmıştır.

Tablo 4.5’de analizlerde kullanılan sac malzemenin farklı sıcaklıklardaki mekanik özellikleri, Tablo 4.6.’da ise sac ve kalıp malzemelerinin termal özellikleri verilmiştir [94, 110].

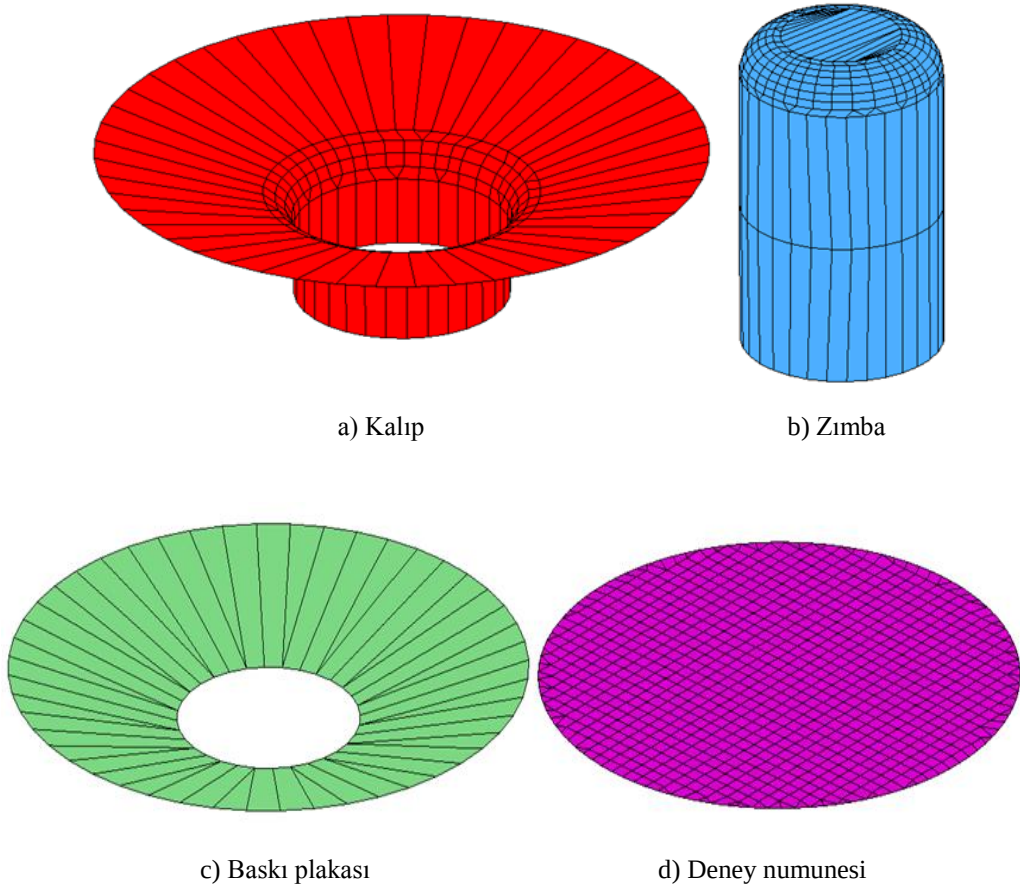
Tablo 4.5. Analizlerde kullanılan sac malzemenin mekanik özellikleri[3,12,109,110]

Malzeme özelliği	25 °C	100 °C	175 °C	250 °C
Yoğunluk (kg/m ³), g	2700	2700	2700	2700
Elastikiyet modülü (Gpa),E	69	66	63	60
Poisson oranı, v	0,33	0,33	0,33	0,33
Akma dayanımı (MPa), σ_a	87	100	86	72.5
Sertleşme Modülü (MPa), K	350	350	250	200
Sertleşme üsteli, n	0,275	0,25	0,185	0,101

Tablo 4.6. Analizlerde kullanılan sac ve kalıp malzemelerinin termal özellikleri[108]

Malzeme özelliği	Sac(Alüminyum)	Rijit kalıplar(Çelik)
Isı kapasitesi(J/kgK)	904	450
Isıl iletkenlik(W/mK)	220	70
Yoğunluk(kg/m ³)	2700	7850

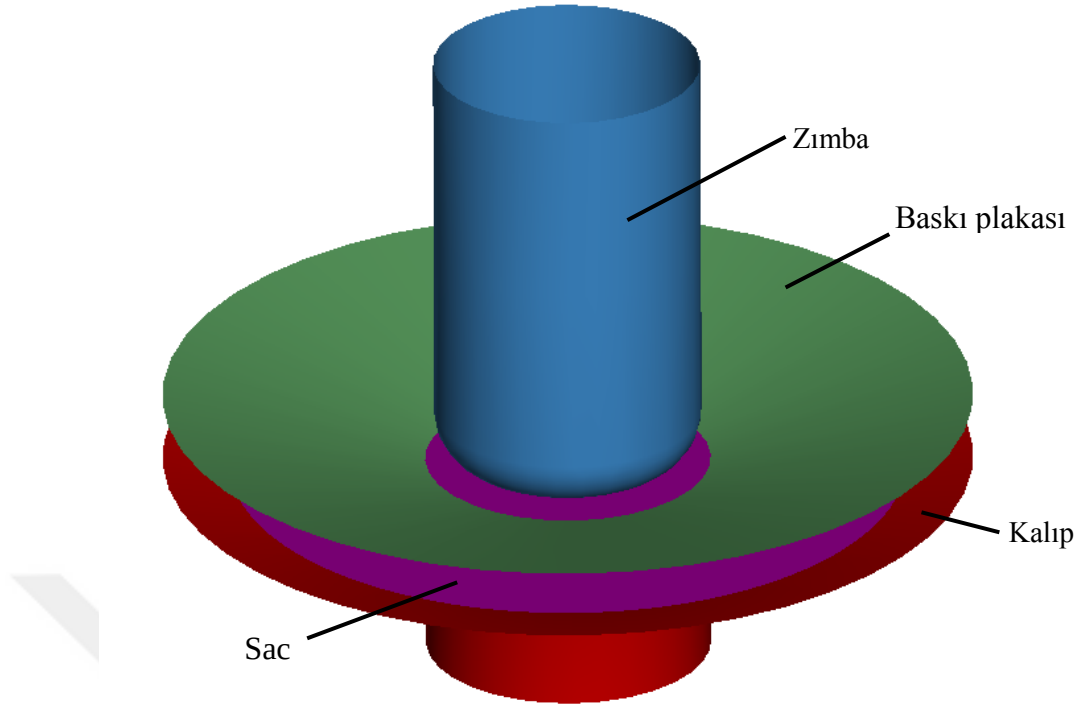
Kalıp, zımba, baskı plakası ve deney numunesi için ağ yapıları oluşturulmuş, oluşturulan bu ağ yapıları Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Kalıp, zimba, baskı plakası ve deney numunesi ağ yapıları

Ağ yapılarının oluşturulması esnasında, baskı plakası, zimba ve kalıbın ağ aralıkları maksimum 30 mm, minimum ise 0,5 mm olarak ayarlanmıştır, sac malzemedeki ise ağ aralığı 3 mm olarak alınmıştır.

Analiz çalışmalarında, kalıplama şekli deneysel çalışmalarla uyumlu olarak, tek etkili preste çekme işlemine göre ayarlanmıştır (Şekil 4.6). Farklı kalıp/baskı plakası açısı, sıcaklık ve baskı plakası kuvvetleri için ayrı modeller oluşturulmuş ve her biri üzerinde analiz çalışmaları tekrarlanmıştır.

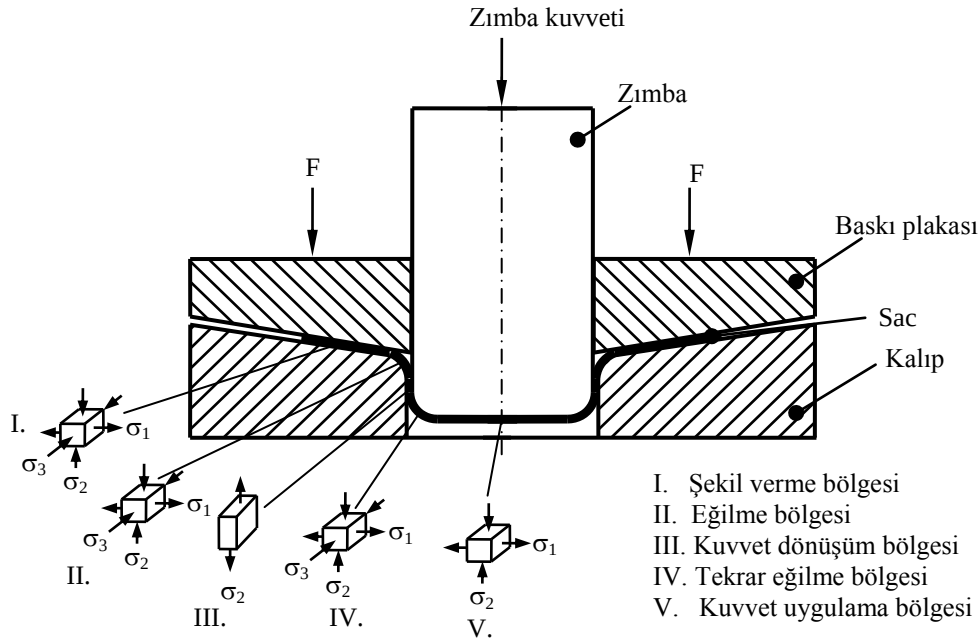


Şekil 4.6. Kalıp elemanlarının oluşturulması

5. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

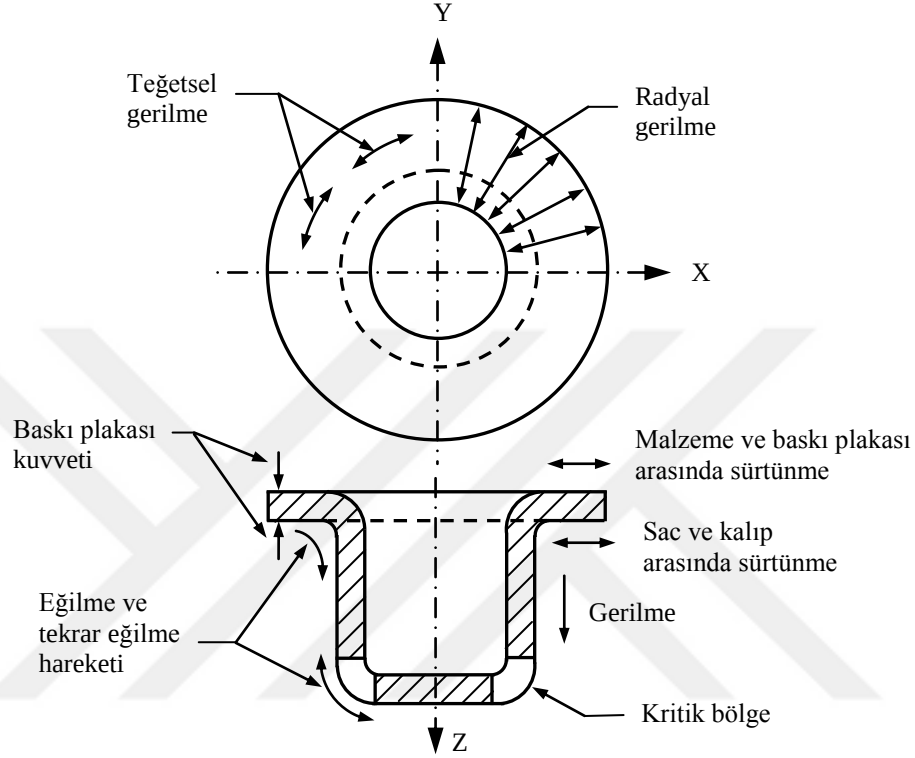
Derin çekilebilirliğin en önemli ölçütlerinden biri limit çekme oranı (LÇÖ)'dir. LÇÖ'daki artış deney şartlarının doğru bir şekilde tespitine bağlıdır. Kalıp geometrisi, şekillendirme sıcaklığı, kullanılan yağlayıcı gibi faktörler malzemenin kalıp boşluğu içerisine akışını kolaylaştırmalı ve neticesinde de hasarsız kaplar üretilmelidir. Tek seferde hasarsız ve yüksek boyutlu kapların üretilmesi üretim maliyetlerinin düşürülmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Derin çekme işleminde sac malzemede meydana gelen gerilmeler Şekil 5.1'de verilmiştir. Derin çekilen bir parçanın I. bölgesinde, radyal çekme gerilmeleri(σ_1), baskı plakasının oluşturduğu basma gerilmeleri(σ_2) ve teğetsel basma gerilmeleri(σ_3) oluşmaktadır. Kalıp radyüsü üzerinde kalan II. bölgede ise sac malzeme eğilmeye zorlanır ve yine burada da 3 eksenli gerilme hali oluşur. III. bölgede çekme gerilmesi etkisi ile uzamalar ve incelmeler meydana gelmektedir. IV. bölgede malzeme çekme ve tekrar eğilmeye maruz kalarak incelmekte, kap tabanı olan V. bölge ise gerilmenin ve şekil değişiminin en az olduğu bölgedir.



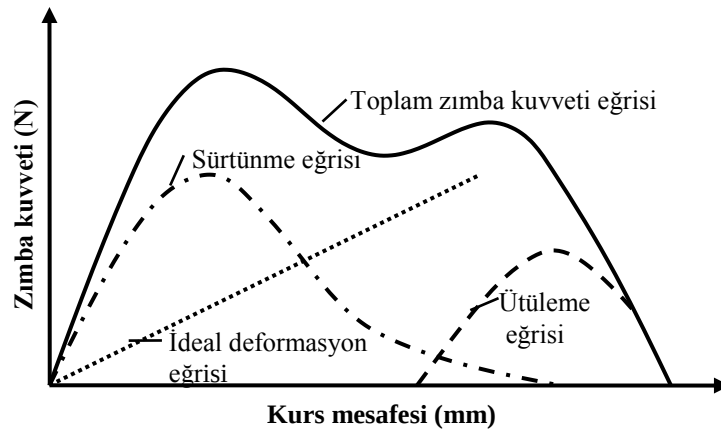
Şekil 5.1. Derin çekme işleminde meydana gelen gerilmeler

Kalıp/baskı plakası yüzey açısı arttıkça çekme işlemini kolaylaştıran radyal gerilmeler artar, teğetsel gerilmeler ise azalır. Ancak radyal gerilmelerin çok fazla artması kapta çatlama ve yırtılmalara yol açar. Çekme işlemi sırasında kabın alt köşeleri genelde en yüksek çekme ve basma gerilmelerinin etkisi altındadır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Dairesel kapta derin çekme esnasında oluşan gerilme bölgeleri

Toplam zımba kuvveti derin çekme işleminde ideal deformasyon kuvveti, sürtünme kuvveti ve ütüleme için gerekli olan kuvvetlerin toplamıdır.



Şekil 5.3. Derin çekmede zımba kuvveti- kurs mesafesi ilişkisi.

5.1. Limit Çekme Oranı (LÇO) Sonuçları

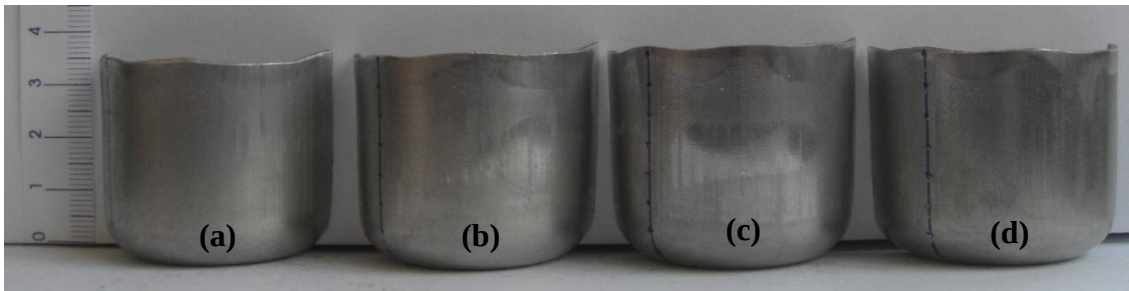
Derin çekme kalıplarının tasarımı esnasında göz önünde bulundurulması gereken önemli faktörlerden biri LÇO'dır. Üretilcek kabın kaç kalıpla üretileceği LÇO'su ile ilişkilidir. Limit çekme oranı sacın ilkel çapının zımba çapına oranı olarak tanımlanır. LÇO deneylerinde sac ilkel çapı arttıkça sacı kalıp boşluğuna itecek olan zımba kuvveti de artmakta bu artan kuvvet de kabın yırtılmasına sebep olmaktadır[1]. Derin çekme deneylerinde temel amaç yırtılmadan kabın çekilebilirliğini artırmaktır. Bu doğrultuda özellikle oda sıcaklığında şekillendirme yeteneği sınırlı olan Al-Mg alaşımının derin çekilmesine kalıp açısı, baskı plakası kuvveti ve şekillendirme sıcaklığının etkisi değerlendirilmiştir.

5.1.1. Kalıp Açısının Çekme Oranına Etkisi

25 °C'de ve 1200 N, 2400 N ve 3600 N baskı plakası kuvvetleri sonucunda elde edilen numunelere ait deney sonuçları sırası ile Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.

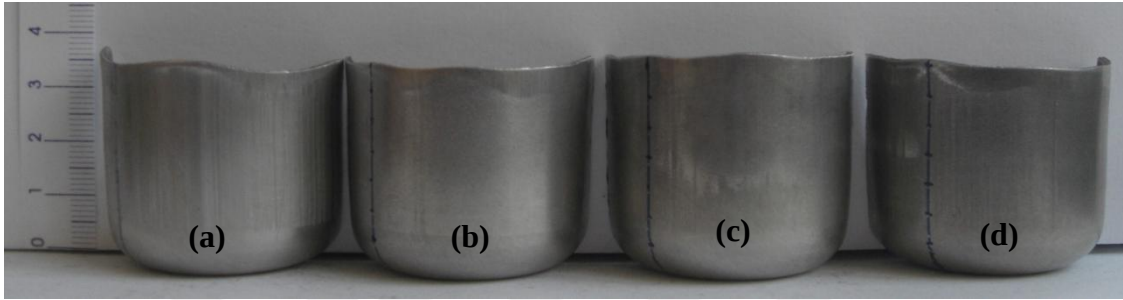
25 °C, 100 °C, 175 °C ve 250 °C sıcaklıklar için baskı plakası kuvveti (BPK) ve kalıp açısının(α) değişimi sonucu elde edilen limit çekme oranları (β) değerlendirilmiştir.

25 °C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti 24681,96 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24623,1 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24662,34 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24289,56 N olarak elde edilmiştir.



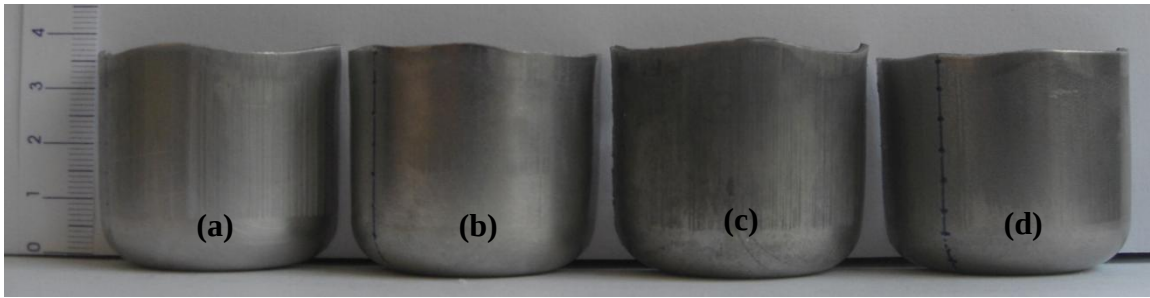
Şekil 5.4. 25 °C ve 1200 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$

Baskı plakası kuvveti 2400 N olarak uygulandığında, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti 26290,8 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24760,44 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 25388,28 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24466,14 N olarak elde edilmiştir.

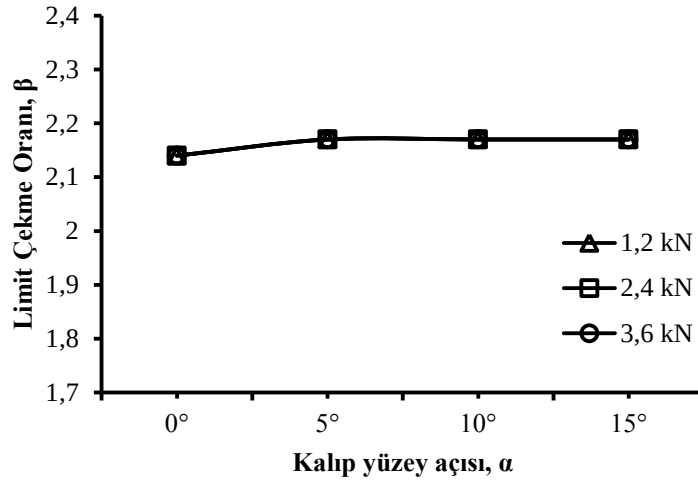


Şekil 5.5. 25 °C ve 2400 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$

Baskı plakası kuvveti 3600 N olarak uygulandığında, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti 26545,86 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24328,8 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24897,78 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24858,54 N olarak elde edilmiştir.



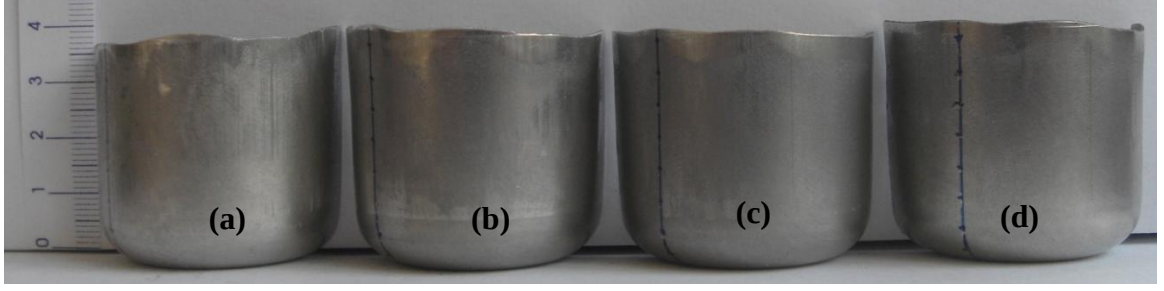
Şekil 5.6. 25 °C ve 3600 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$



Şekil 5.7. T=25 °C’de çekilen numuneler için kalıp yüzey açısının çekme oranı üzerindeki etkisi

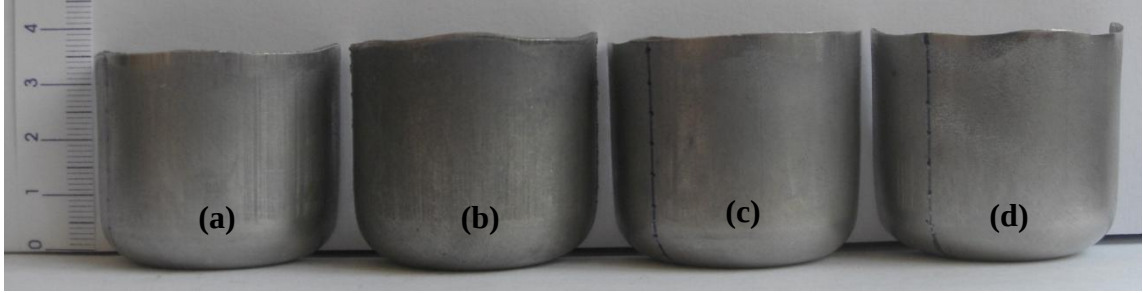
Şekil 5.7’de oda sıcaklığında çekilen numunelerin limit çekme oranlarının kalıp açısı ile değişimi verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi kalıp açısının LÇO’ya olan etkisi oldukça sınırlıdır. Çünkü AA5754 alaşımı %2,72 oranında Mg içermektedir. Alüminyum alaşımları içerisindeki Mg elementi önemli ölçüde mukavemet artışı sağlarken sünekliği de düşürmektedir. Mg hekzagonal kristal kafes yapısına sahip olduğundan oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirliği de çok düşüktür. Yapılan çalışmalar oda sıcaklığındaki deformasyonun temel düzlemlerde kayma ile, piramit {1012} düzlemlerde ise ikizlenme ile gerçekleştiğini göstermiştir. Ancak yaklaşık 250 °C’nin üzerinde piramit {1011} düzlemlerde kaymanın olduğu, ikizlenmenin önemli ölçüde azaldığı buna bağlı olarak da plastik deformasyonun önemli bir şekilde arttığı görülmüştür[102].

100 °C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti 24525 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24583,86 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 25015,5 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24152,22 N olarak elde edilmiştir.



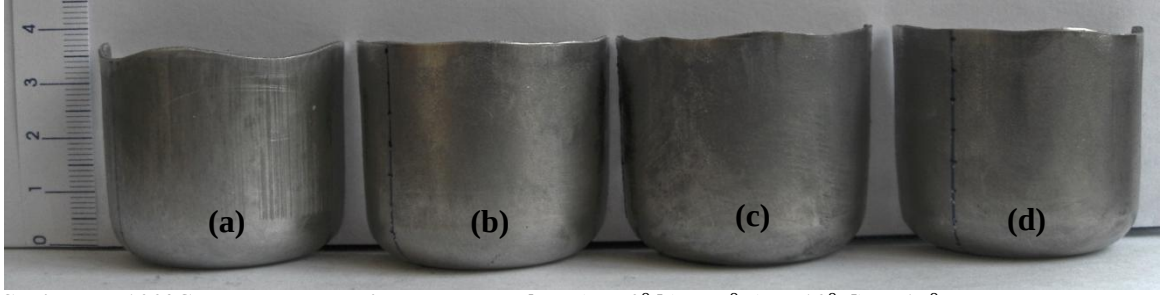
Şekil 5.8. 100°C ve 1200 N BPK'ne ait numuneler **a)** $\alpha=0^\circ$ **b)** $\alpha=5^\circ$ **c)** $\alpha=10^\circ$ **d)** $\alpha=15^\circ$

Baskı plakası kuvveti 2400 N olarak uygulandığında, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti 24976,26 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24740,82 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 26330,04 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24701,58 N olarak elde edilmiştir.

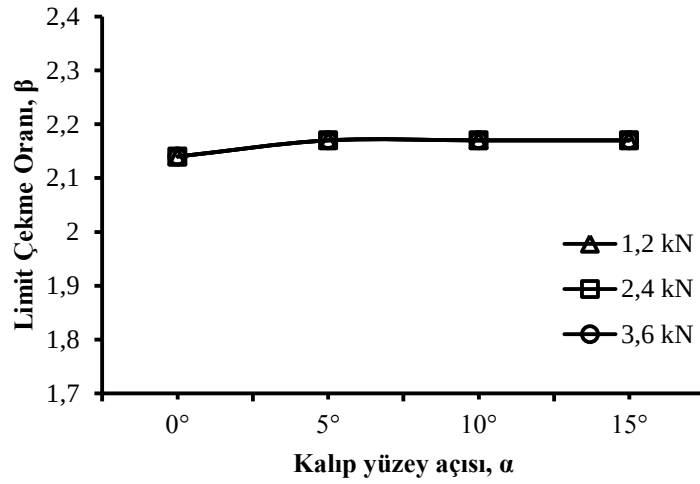


Şekil 5.9. 100°C ve 2400 N BPK'ne ait numuneler **a)** $\alpha=0^\circ$ **b)** $\alpha=5^\circ$ **c)** $\alpha=10^\circ$ **d)** $\alpha=15^\circ$

Baskı plakası kuvveti 3600 N olarak uygulandığında, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti 25192,08 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24525 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24348,42 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24564,24 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.10. 100°C ve 3600 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$



Şekil 5.11. T=100°C'de çekilen numuneler için kalıp yüzey açısının çekme oranı üzerindeki etkisi

100 °C ve 1200 N, 2400 N ve 3600 N baskı plakası kuvvetleri sonucunda elde edilen numunelere ait deney sonuçları Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10'da ve Şekil 5.11'de ise 100 °C'de çekilen numunelerin limit çekme oranlarının kalıp açısı ile değişimi verilmiştir. Kalıp açısının LÇO'ya olan etkisinin oldukça sınırlı kaldığı görülmüştür. 100 °C'de yapılan deneylerin LÇO değerleri ile oda sıcaklığında yapılan deneylerin sonuçları aynı çıkmıştır. Buda 100°C'de malzemenin mukavemet ve deformasyon sertleşmesi değerinde değişiminin olmadığını göstermektedir.

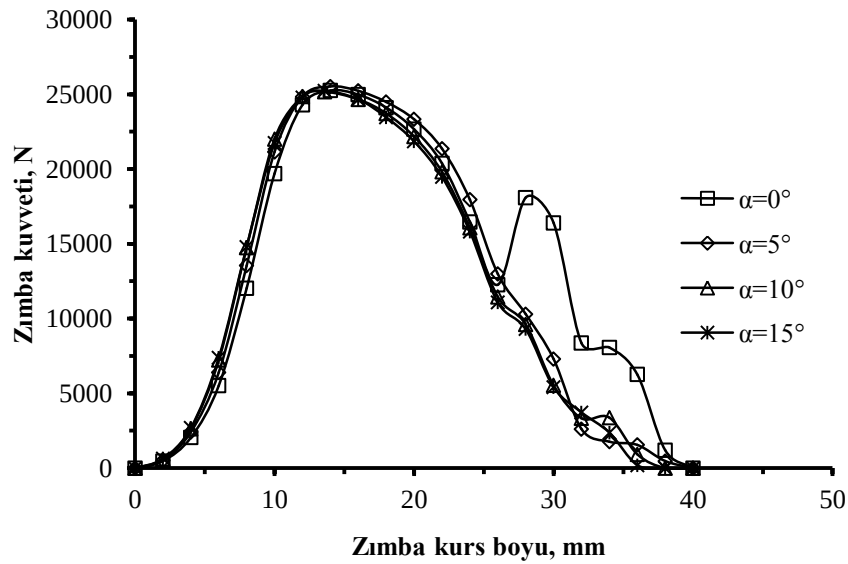
Şekil 5.12, Şekil 5.14 ve Şekil 5.16'da 175 °C'de sırası ile 1200 N, 2400 N ve 3600 N BPK şartlarında farklı kalıp açıları sonucu elde edilen çekme numuneleri ve Şekil 5.13, Şekil 5.15 ve Şekil 5.17'da ise deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri verilmiştir.

175 °C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde yapılan deneylerde, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25250,94 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25525,62 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25172,46 N;

kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25231,32 N olarak elde edilmiştir.

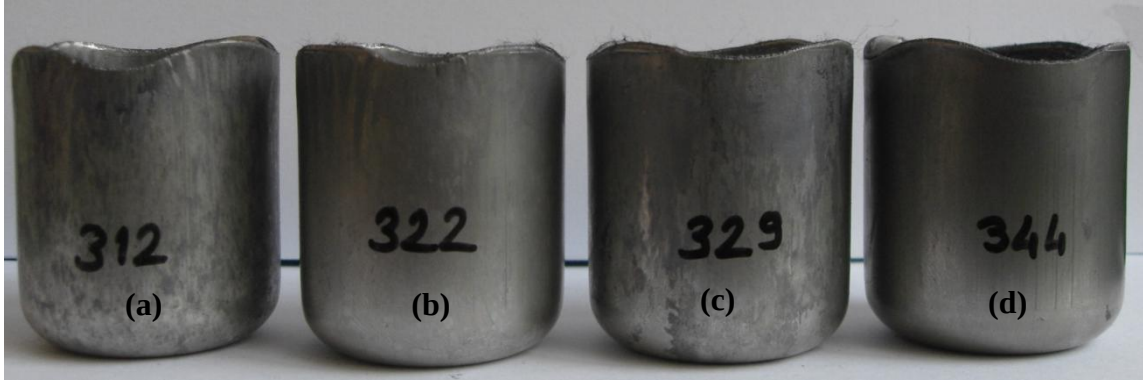


Şekil 5.12. 175 °C ve 1200 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$

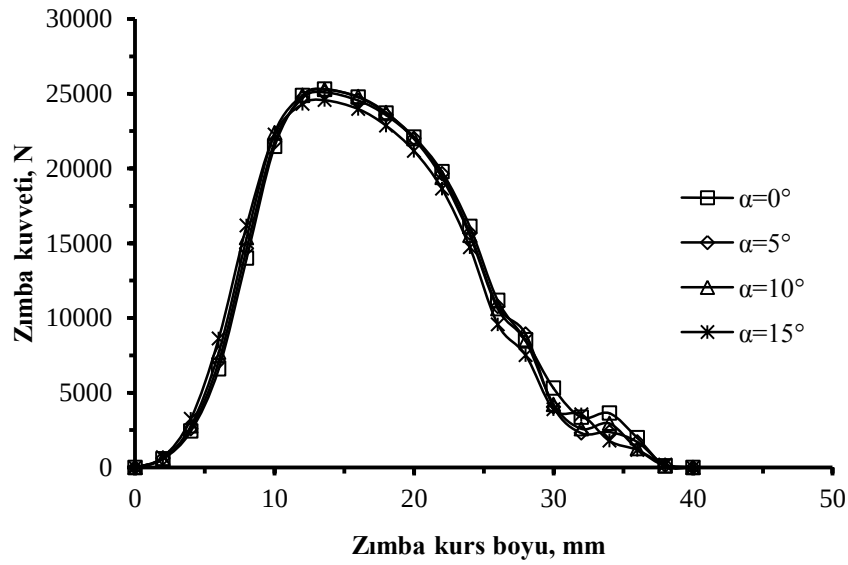


Şekil 5.13. T=175 °C sıcaklık ve 1200 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi

Baskı plakası kuvveti 2400 N olarak uygulandığında, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25309,8 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25093,98 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25270,56 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 24564,24 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.14. 175 °C ve 2400 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$

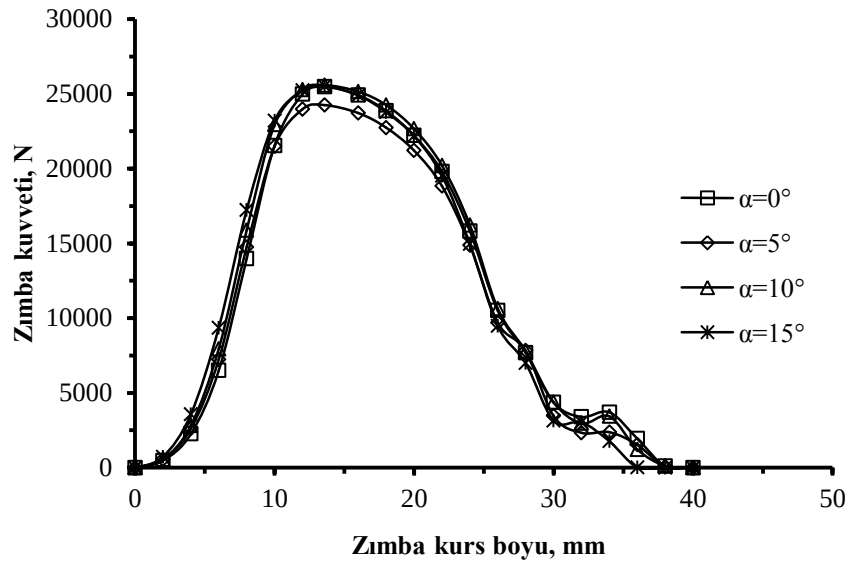


Şekil 5.15. T=175 °C sıcaklık ve 2400 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi

Baskı plakası kuvveti 3600 N olarak uygulandığında, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25466,76 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 24250,32 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25584,48 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25525,62 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.16. 175 °C ve 3600 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$



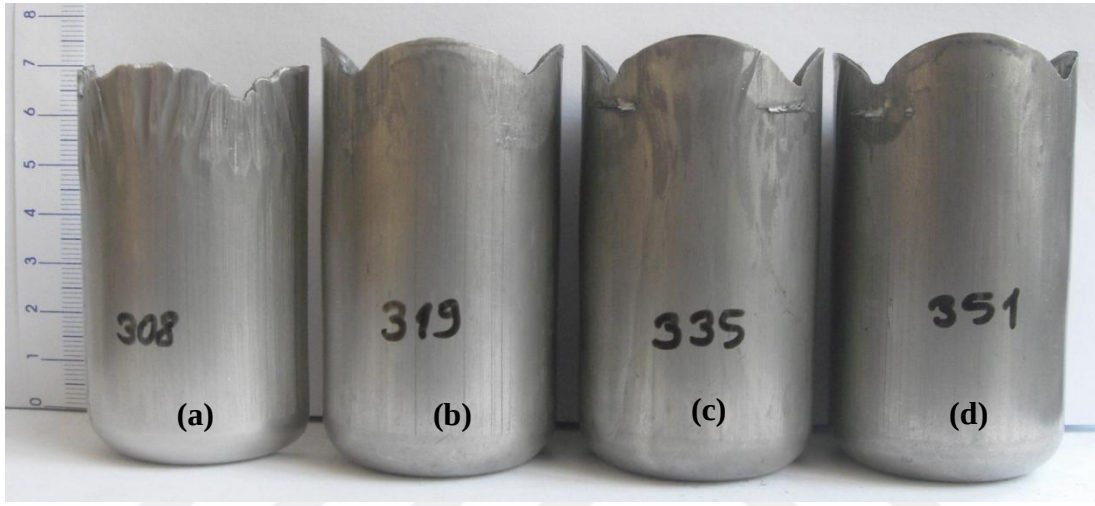
Şekil 5.17. T=175 °C sıcaklık ve 3600 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi

Farklı kalıp açıları sonucunda elde edilen deneylerin LÇO sonuçları aynı çıkmış ve 2,35'dir. Zımba kuvvetleri grafikleri incelendiğinde de önemli bir değişim olmamıştır. Ancak 1200 N BPK'de yapılan deneylerde $\alpha=0^\circ$ kalıpta özellikle ütüleme kuvvetinde önemli bir artışın olduğu, kap ağzında gözle görülür buruşmaların meydana geldiği ve BPK arttıkça buruşmalarında nispeten azaldığı, aynı BPK'de $\alpha=0^\circ$ 'den farklı kalıp açılarında ise buruşmaların olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, kalıp açısının malzeme akışını kolaylaştırdığını ve düşük baskı plakası kuvvetlerinde hasarsız kapların elde edilebileceğini göstermiştir.

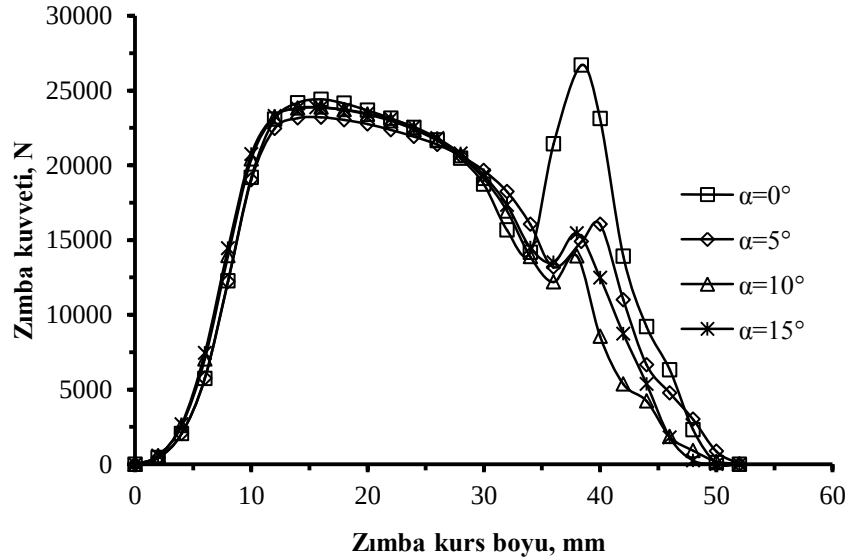
250 °C sıcaklık ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde yapılan deneylerde, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,75$, en büyük zımba kuvveti 24410,42 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,80$, en büyük zımba kuvveti 23210,46 N; kalıp

yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,80$, en büyük zımba kuvveti 23880,68 N ve kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,80$, en büyük zımba kuvveti 23877,54 N olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.18, Şekil 5.20 ve Şekil 5.22’de 250 °C’de sırası ile 1200 N, 2400 N ve 3600 N BPK şartlarında farklı kalıp açıları sonucu elde edilen çekme numuneleri ve Şekil 5.19, Şekil 5.21 ve Şekil 5.23’de ise deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri verilmiştir.



Şekil 5.18. 250 °C ve 1200 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$



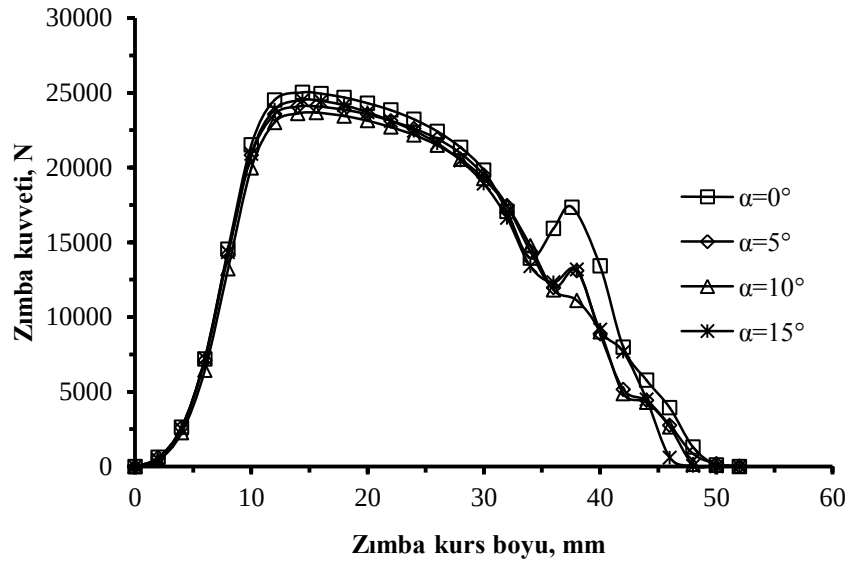
Şekil 5.19. T=250°C sıcaklık ve 1200 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi

Baskı plakası kuvveti 2400 N uygulandığında, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,75$, en büyük zımba kuvveti 25024,97 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit

çekme oranı $\beta=2,80$, en büyük zımba kuvveti 24093,75 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,80$, en büyük zımba kuvveti 23975,64 N ve kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,75$, en büyük zımba kuvveti 24514,69 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.20. 250 °C ve 2400 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$



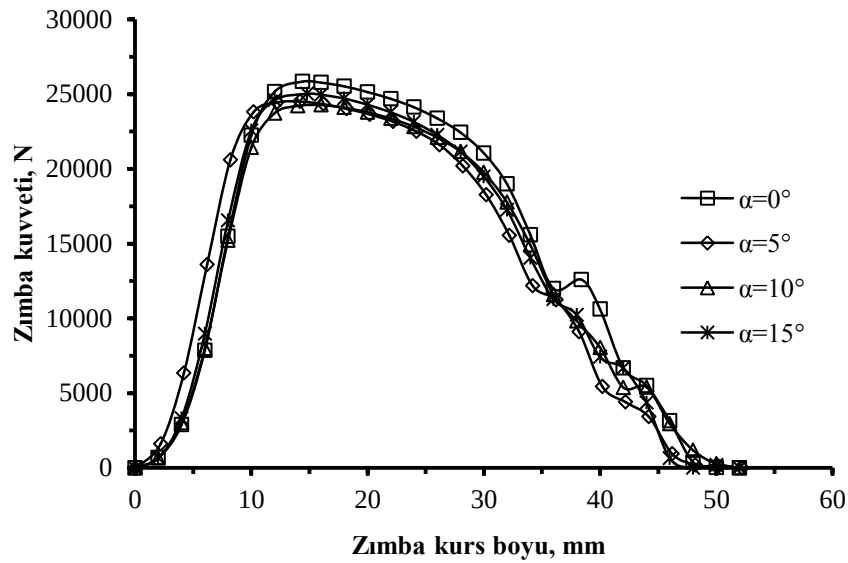
Şekil 5.21. T=250 °C sıcaklık ve 2400 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi

Baskı plakası kuvveti 3600 N olarak uygulandığında, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,75$, en büyük zımba kuvveti 25834,63 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,75$, en büyük zımba kuvveti 24505,38 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,75$, en büyük zımba kuvveti 24269,94 N ve kalıp yüzey açısı

$\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,75$, en büyük zımba kuvveti 25015,5 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.22. 250 °C ve 3600 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$



Şekil 5.23. T=250 °C sıcaklık ve 3600 N BPK sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi

Şekiller birlikte değerlendirildiğinde sabit sıcaklık ve baskı plakası kuvveti şartlarında yapılan deneylerde zımba kuvvetinin artan kalıp açısı ile azaldığı görülmektedir. En düşük zımba kuvvetinin $\alpha=10^\circ$ kalıpta, en büyük zımba kuvvetinin ise $\alpha=0^\circ$ kalıpta elde edildiği görülmektedir. Bunun en büyük sebebinin kalıp açısının artışına bağlı olarak eksenel kuvvette bir artışın olması gösterilebilir[103]. Kalıp açısı arttıkça

ütüleme kuvvetinin de önemli ölçüde düştüğü tespit edilmiştir. Bu kuvvetin düşmesi kalıp açısına bağlı olarak malzeme akışının kalıp boşluğuna kolay bir şekilde akması ile açıklanabilir.

25 C°’de $\beta=2,14$ olarak elde edilen çekme oranı kalıp açısının artması ile $\beta=2,17$ ’ye çıkartılabilmektedir. 100 C°’de yapılan deneylerde de elde edilen sonuçlar 25 C°’de yapılan deneylerle aynıdır. Sıcaklık 175 C°’ye çıktığında çekme oranı $\beta=2,35$ olarak elde edilmiş ve bu değer bütün kalıp açılarında aynı kalmıştır. 250 C°’de yapılan deneylerde ise $\alpha=0^\circ$ için $\beta=2,75$ elde edilirken $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ kalıplarla $\beta=2,80$ ’e çıkartılabilmektedir. Sonuçlarından görüldüğü gibi kalıp geometrisinin LÇO üzerindeki etkisi çok olmamakla birlikte Al-Mg alaşımlarının LÇO’sunu etkileyen en önemli parametrenin sıcaklık olduğu belirlenmiştir. 25 C°’de $\beta=2,14$ olan çekme oranı 250 C°’de $\beta=2,80$ olarak elde edilmiş ve LÇO’da %30,8 oranında artış sağlanmıştır.

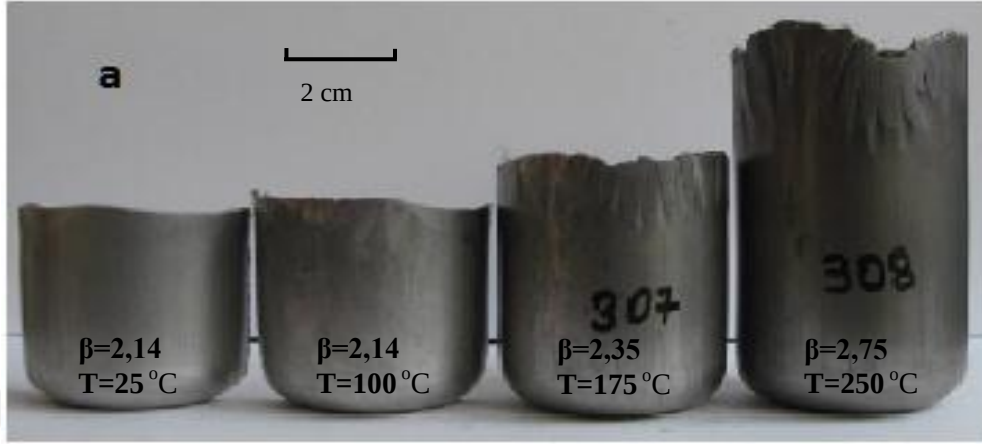
5.1.2. Sıcaklığın Çekme Oranı Üzerine Etkisi

Son yıllarda, hafif ve dayanıklı malzemelerin kullanımları birçok alanda giderek artmaktadır. Bu tür alaşımların oda sıcaklığında şekillendirilebilirlikleri, mikroyapıları nedeniyle çelik sac malzemelere göre daha düşüktür. Bu alaşımların şekillendirilmelerinde sıcaklığın önemli bir etkisi vardır. Sıcaklığın çekme oranı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla deneyler 4 farklı sıcaklıkta (25 °C, 100 °C, 175 °C, 250 °C) yapılmıştır.

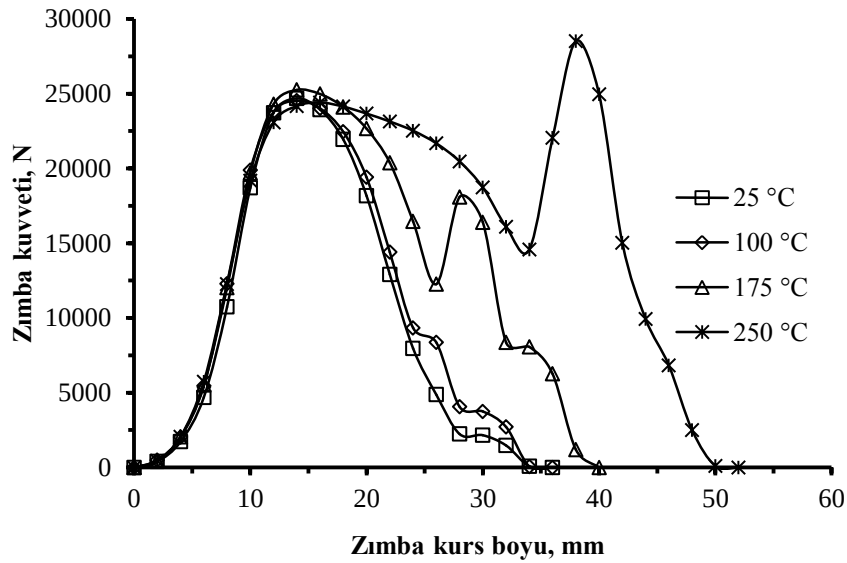
$\alpha=0^\circ$ kalıp açısı ve 1200 N baskı plakası kuvveti ve 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti 24681,96 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti 24525 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25250,94 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,75$ ve en büyük zımba kuvveti 24410,42 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.24’de 1200 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ kalıp için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri ve Şekil 5.25’ de ise deney esnasında ölçülen zımba kuvveti değişimleri verilmiştir.

Şekil 5.24’de, sıcaklığın artması ile limit çekme oranının da arttığı görülmektedir. Ancak sıcaklığa bağlı olarak LÇO arttıkça BPK’nin yetersiz olduğu ve malzeme akışının düzensiz olmasından dolayı kap üst kısımlarında buruşmalar meydana gelmiştir. Şekil 2.25’de ise sıcaklık artışına bağlı olarak zımba kuvvetinin düştüğü ancak ütüleme kuvvetinin de önemli miktarda arttığı görülmektedir. Zımba kuvvetindeki azalmanın sıcaklık etkisi ile malzemenin akma dayanımını düşürmesinden, ütüleme kuvvetindeki

artışın ise BPK'nin yetersizliği ve düzensiz akma sonucu kap ağızlarına doğru malzeme yığılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



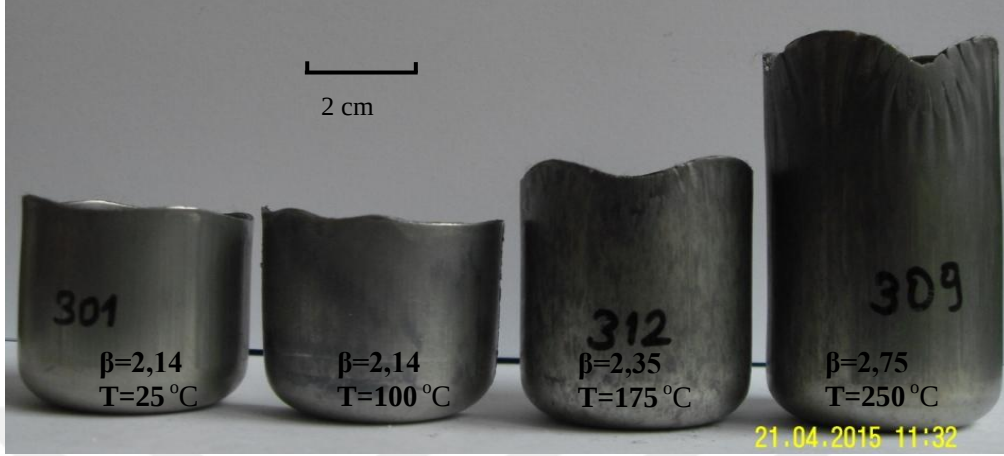
Şekil 5.24. 1200 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler



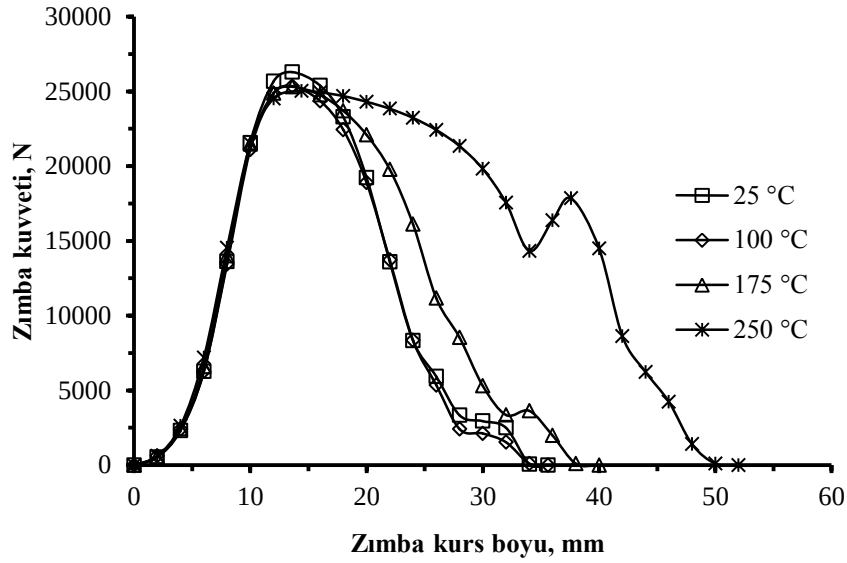
Şekil 5.25. 1200 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zimba kuvvetleri değişimi

Baskı plakası kuvveti 2400 N olarak uygulandığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zimba kuvveti 26290,8 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zimba kuvveti 24976,26 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zimba kuvveti 25309,8 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,75$ ve en büyük zimba kuvveti 25024,92 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.26'da 2400 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı

için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri ve Şekil 5.27’ de ise deney esnasında ölçülen zımba kuvveti değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.26. 2400 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler

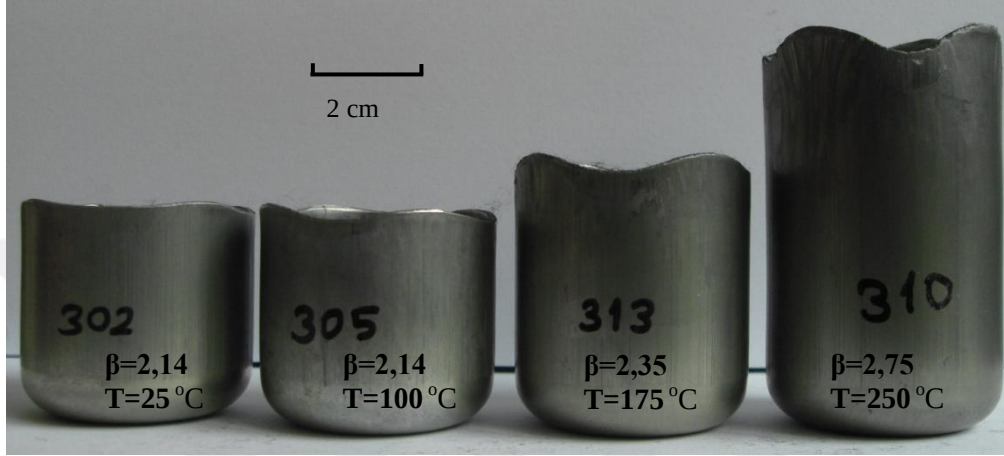


Şekil 5.27. 2400 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi

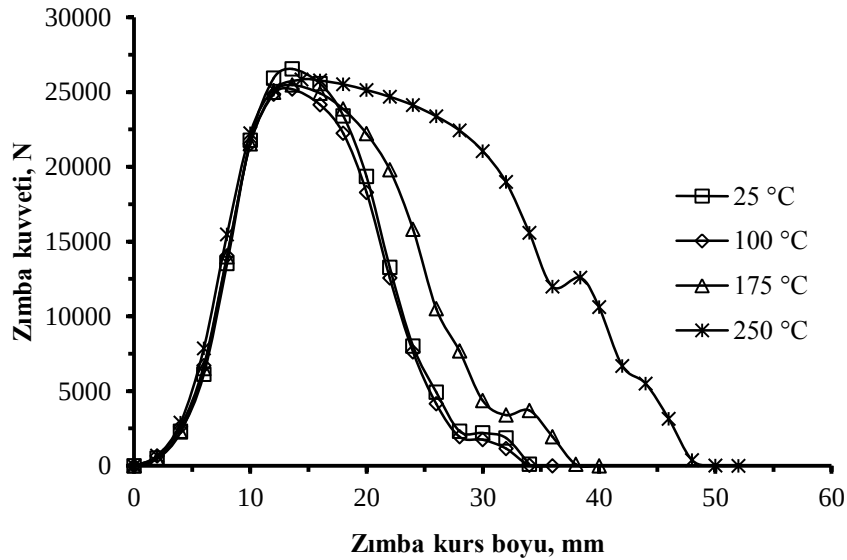
Şekil 5.26’dan, sıcaklığının artması ile limit çekme oranının arttığı ve Şekil 5.27’den sıcaklığın artmasıyla zımba kuvvetinin ise düştüğü görülmektedir. Şekiller birlikte değerlendirildiğinde BPK’nin artması ile buruşmaların azalması sonucu ütüleme kuvvetinin 1200 N baskı plakası kuvvetinde şekillendirilen numunelere nazaran önemli ölçüde düştüğü ancak BPK’nin yetersizliği nedeniyle kap ağzında buruşmaların olduğu görülmektedir.

Baskı plakası kuvveti 3600 N olarak uygulandığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti 26545,86 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve

en büyük zımba kuvveti 25192,08 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25466,75 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,75$ ve en büyük zımba kuvveti 25834,63 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.28’de 3600 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri ve Şekil 5.29’ da ise deney esnasında ölçülen zımba kuvveti değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.28. 3600 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler



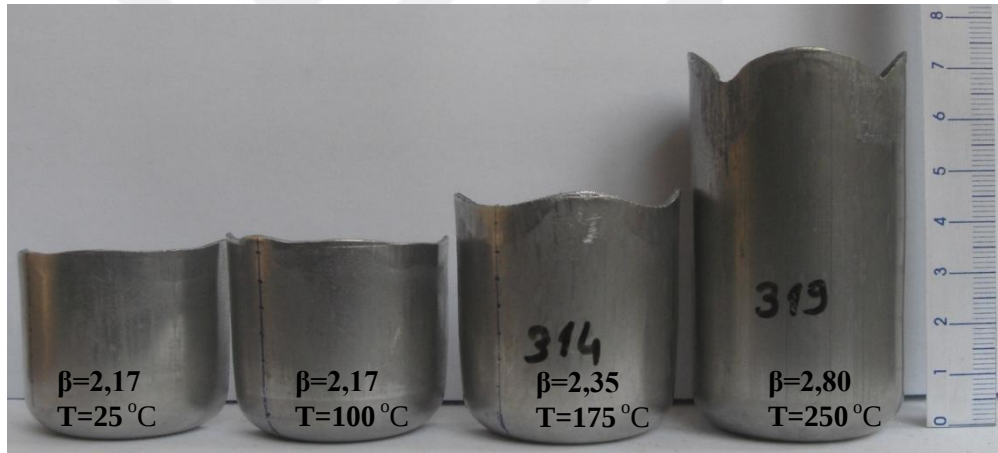
Şekil 5.29. 3600 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvvetleri değişimi

Şekillerden, sıcaklığının artması ile limit çekme oranının da arttığı ve zımba kuvvetinin düştüğü görülmektedir. Şekiller birlikte ele alındığında BPK’nin 3600 N çıkması ile buruşmaların oldukça azaldığı buna bağlı olarak da ütüleme kuvvetinin de

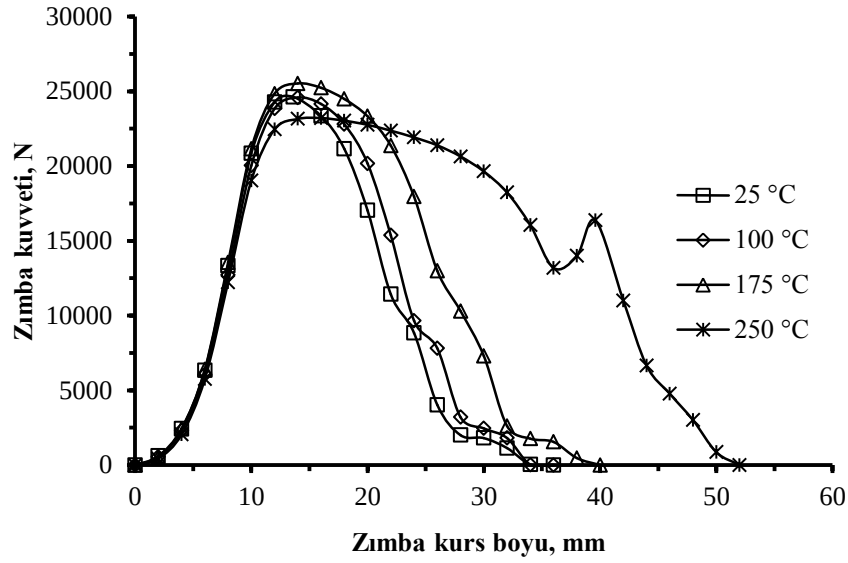
önemli oranda düştüğü görülmektedir. Bu durum BPK kuvvetinin seçiminin elde edilecek kapların kalitesi ve kullanılabilirlikleri açısından önemli olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, $\alpha=0^\circ$ açılı kalıplarla yapılan deneylerde oda sıcaklığında $\beta=2,14$ olan limit çekme oranı 250°C sıcaklıkta $\beta=2,75$ 'e çıkarılarak %28,5 artış sağlanmıştır. Ancak LÇO arttıkça kaplardaki hasar oranının da arttığı görülmüştür.

$\alpha=5^\circ$ kalıp açısı ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde ve 25°C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24623,1 N; 100°C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24583,86 N; 175°C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25525,62 N; 250°C için limit çekme oranı $\beta=2,80$ ve en büyük zımba kuvveti 23210,46 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.30'da 1200 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri ve Şekil 5.31' de ise deney esnasında ölçülen zımba kuvveti değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.30. 1200 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler

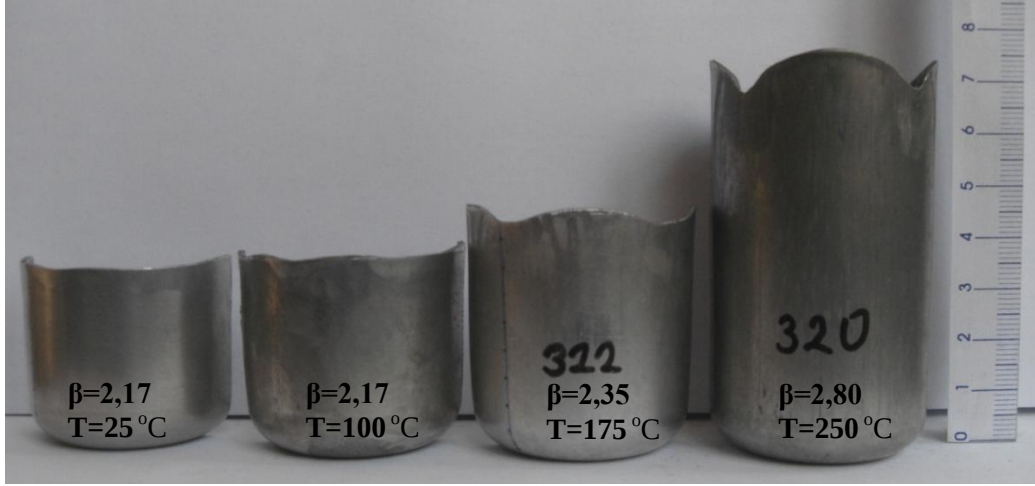


Şekil 5.31. 1200 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri

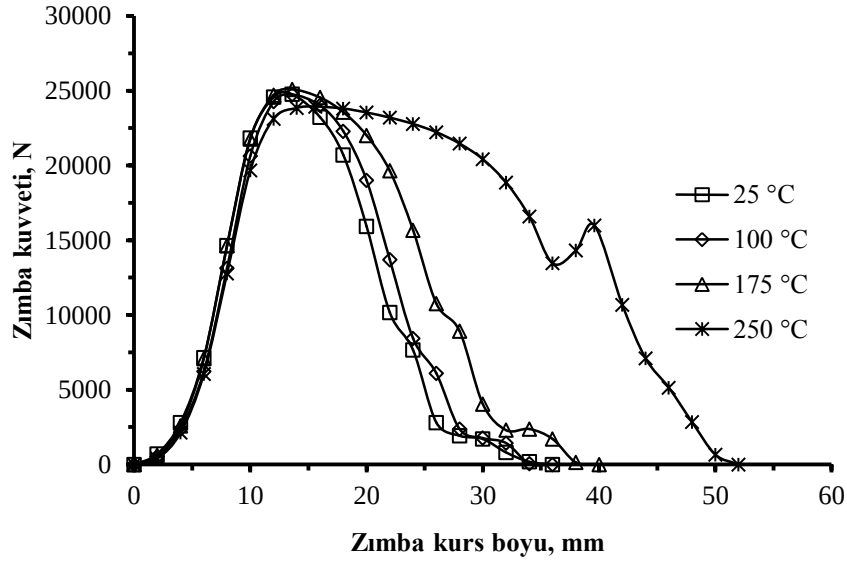
Şekil 5.30'da sıcaklığın artması ile limit çekme oranının da arttığı, $\alpha=0^\circ$ 'de elde edilen numunelere nazaran buruşuklukların ortadan kalktığı, Şekil 5.31'de ise ütüleme kuvvetinin önemli ölçüde düştüğü görülmektedir. Bu durum sıcaklığın yanı sıra kalıp açısının da malzeme akışını kolaylaştırması ile açıklanabilir. Şekil 5.24 ile kıyaslandığında aynı BPK'da hatasız kapların çekildiği ve LÇO'nun $\beta=2,80$ 'e çıktığı görülmüştür. Düşük BPK'lerinde hasarsız kapların çekilmesi ihtiyaç duyulan donanımın ekonomikliği açısından da oldukça önemlidir. Bu sonuçlar, buruşmaların önlenmesi için ya BPK'nin belli bir değere kadar artırılması gerektiğini ya da kalıp geometrisi üzerinde düzenleme yapılması gerektiğini göstermiştir.

Baskı plakası kuvveti 2400 N olarak uygulandığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24760,44 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24740,82 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25093,98 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,80$ ve en büyük zımba kuvveti 24093,75 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.32'de 2400 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri ve Şekil 5.33' de ise deney esnasında ölçülen zımba kuvveti verilmiştir.

Şekilden sıcaklık artışı ile birlikte LÇO'nun artmasına karşın zımba kuvvetinin düştüğü görülmektedir. Şekillendirme esnasında numunenin ısıtma süresinin ve şekillendirme anındaki sıcaklık dağılımının oldukça önemli olduğunu dolayısı ile kurulacak deney düzeneğinin hassasiyetinin önemini göstermektedir.



Şekil 5.32. 2400 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler

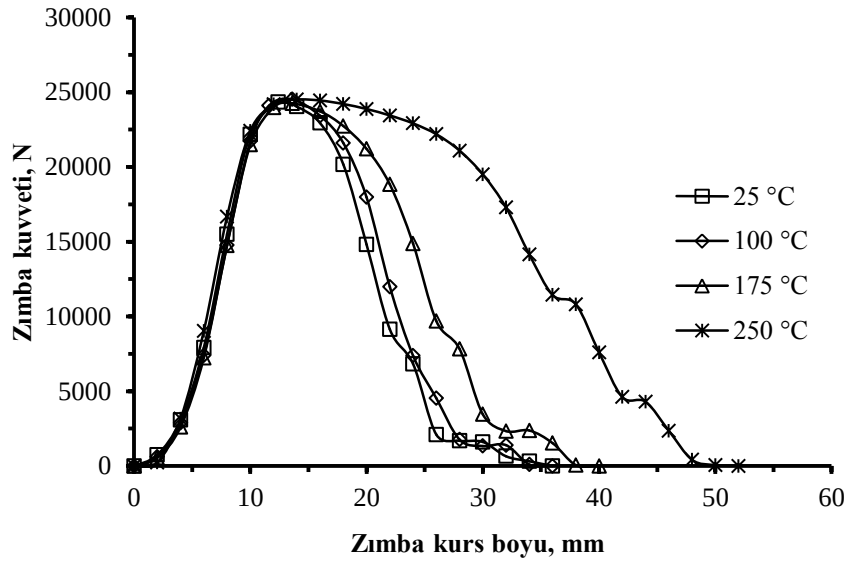


Şekil 5.33. 2400 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri

Baskı plakası kuvveti 3600 N olarak uygulandığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24328,8 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24525 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 24250,32 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,75$ ve en büyük zımba kuvveti 24426,9 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.34’de 3600 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri ve Şekil 5.35’ de ise deney esnasında ölçülen zımba kuvveti değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.34. 3600 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler



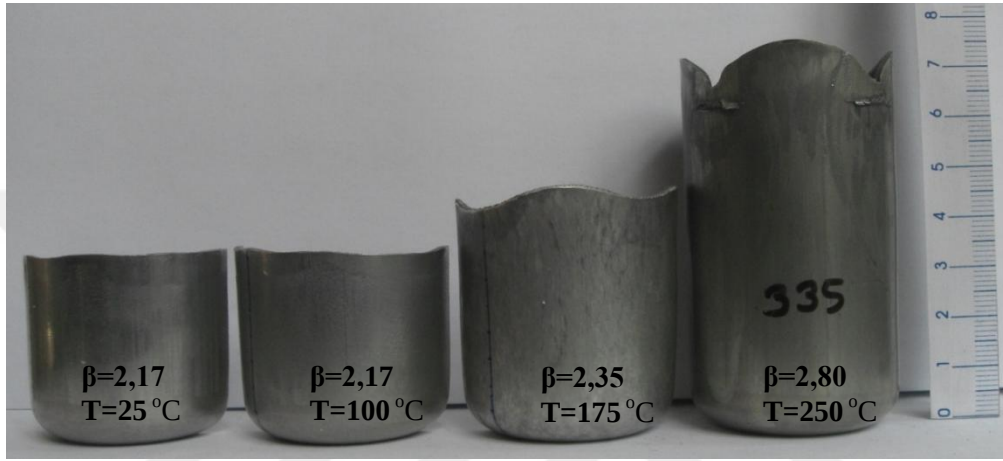
Şekil 5.35. 3600 N BPK ve $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri

$\alpha=5^\circ$ ve 3600 N baskı plakası kuvvetinde yapılan deneylerde LÇO'nun $\beta=2,80$ 'den $\beta=2,75$ 'e düştüğü görülmüştür. Bu durum baskı plakası kuvvetinin ve yüksek sıcaklıkta sürtünme katsayısının artmasına bağlı olarak malzeme akışının zorlaşması ile açıklanabilir. Şekil 5.35'de ise BPK'deki artış ile çekilen kabın ağız kısımlarında yığılmaların azalması nedeni ile ütüleme kuvvetinin önemli ölçüde düştüğü görülmektedir.

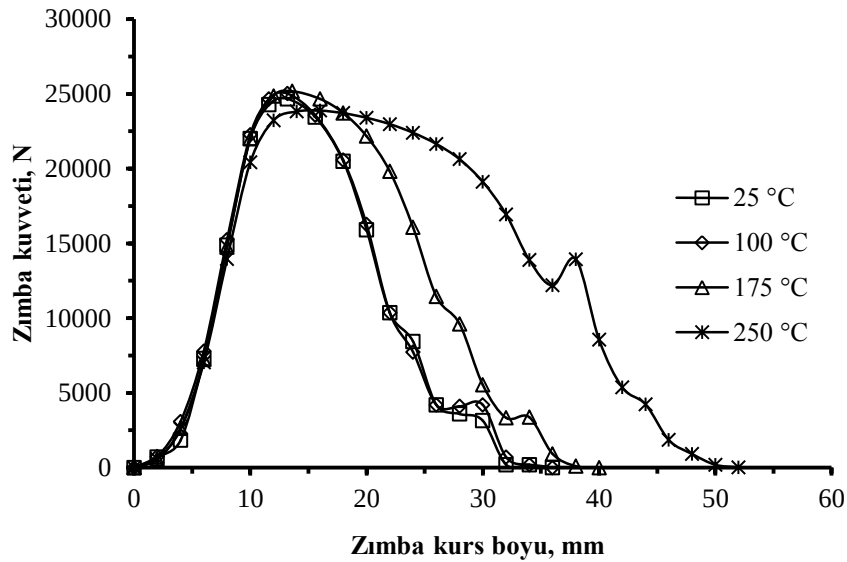
$\alpha=10^\circ$ kalıp açısı, 1200 N baskı plakası kuvvetinde yapıldığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24662,34 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 25015,5 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25172,46 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,80$ ve en büyük zımba kuvveti 23880,68 N olarak elde edilmiştir. 1200 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ kalıp açısı için

şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri Şekil 5.36'da, ve zımba kuvveti değişimleri de Şekil 5.37'de verilmiştir.

Şekiller incelendiğinde LÇO'nun $\beta=2,17$ 'den $\beta=2,80$ 'e çıktığı ve zımba kuvvetinin düştüğü, düşük baskı plakası kuvveti nedeni ile en belirgin ütüleme kuvvetinin $\beta=2,80$ LÇO'na sahip numunede olduğu, ayrıca kap yüksekliği ve sıcaklık arttıkça kaplardaki kulaklanmaların ve kulak yüksekliğinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir.



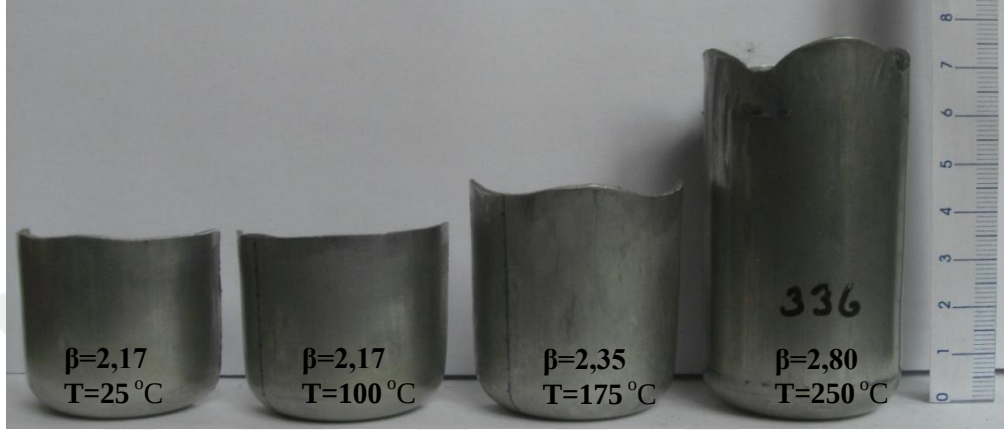
Şekil 5.36. 1200 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler



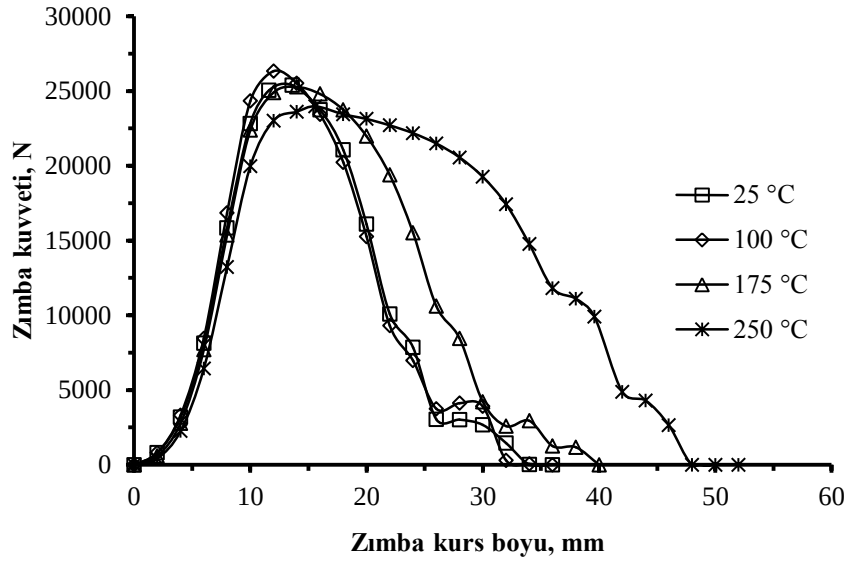
Şekil 5.37. 1200 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri

Baskı plakası kuvveti 2400 N olarak uygulandığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 25388,28 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 26330,04 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük

zımba kuvveti 25270,56 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,80$ ve en büyük zımba kuvveti 23975,64 N olarak elde edilmiştir. 2400 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ kalıp açısı için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri Şekil 5.38’de ve zımba kuvveti değişimleri de Şekil 5.39’da verilmiştir.



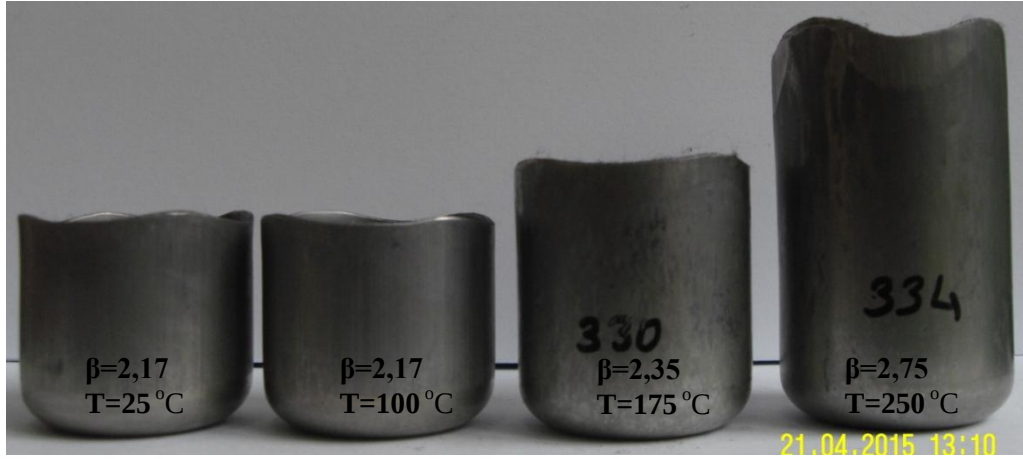
Şekil 5.38. 2400 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler



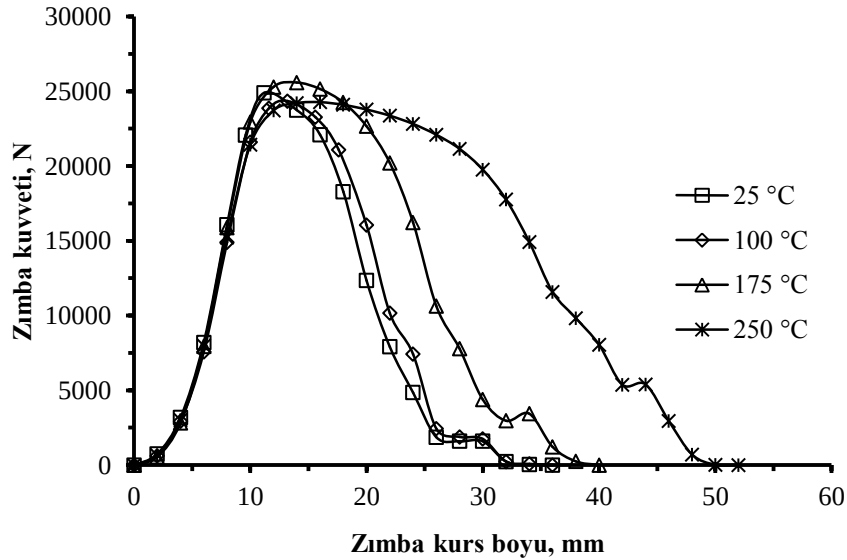
Şekil 5.39. 2400 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri

Baskı plakası kuvveti 3600 kN olarak uygulandığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24897,78 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24348,42 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25584,48 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,75$ ve en büyük zımba kuvveti 24269,94 N olarak elde edilmiştir. 3600 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ kalıp açısı için

şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri Şekil 5.40'da ve zımba kuvveti değişimleri de Şekil 5.41'de verilmiştir.



Şekil 5.40. 3600 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler

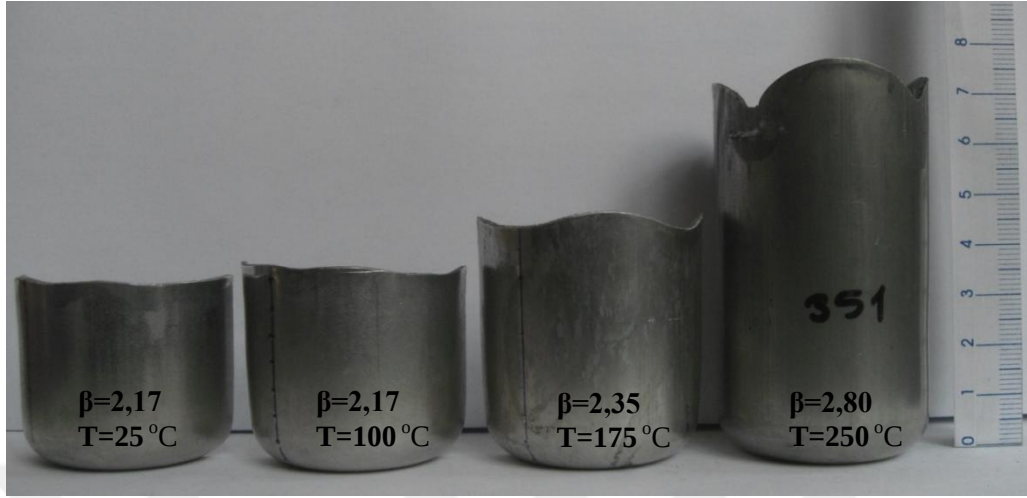


Şekil 5.41. 3600 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri

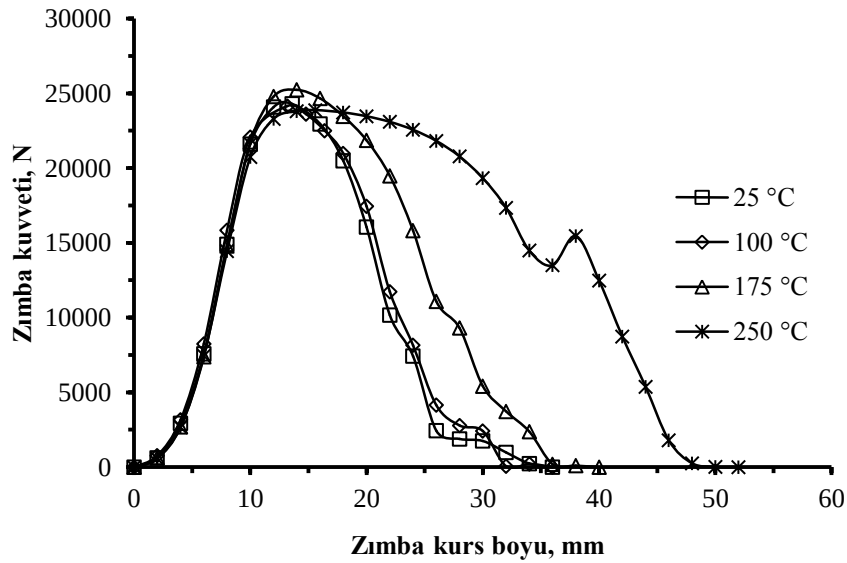
Şekil 5.40 incelendiğinde, baskı plakası kuvvetinin 3600 N çıkması sonucu LÇO'nun $\beta=2,80$ 'den $\beta=2,75$ 'e düştüğü görülmüştür. Yine baskı plakası kuvvetindeki artış kap ağzındaki buruşmaları ve buna bağlı olarak ütüleme kuvvetinin oluşumunu önlemiştir.

Deneyler, $\alpha=15^\circ$ kalıp açısı ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde yapıldığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24289,56 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24152,22 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 25231,32 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,80$ ve en büyük zımba kuvveti 23210,46 N olarak elde edilmiştir. 1200 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ kalıp

açısı için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri Şekil 5.42’de ve zımba kuvveti değişimleri de Şekil 5.43’de verilmiştir.

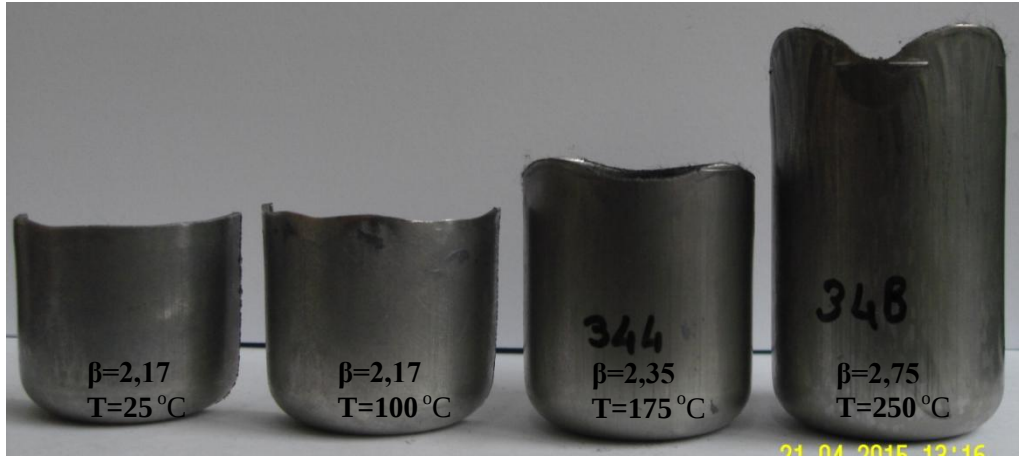


Şekil 5.42. 1200 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler

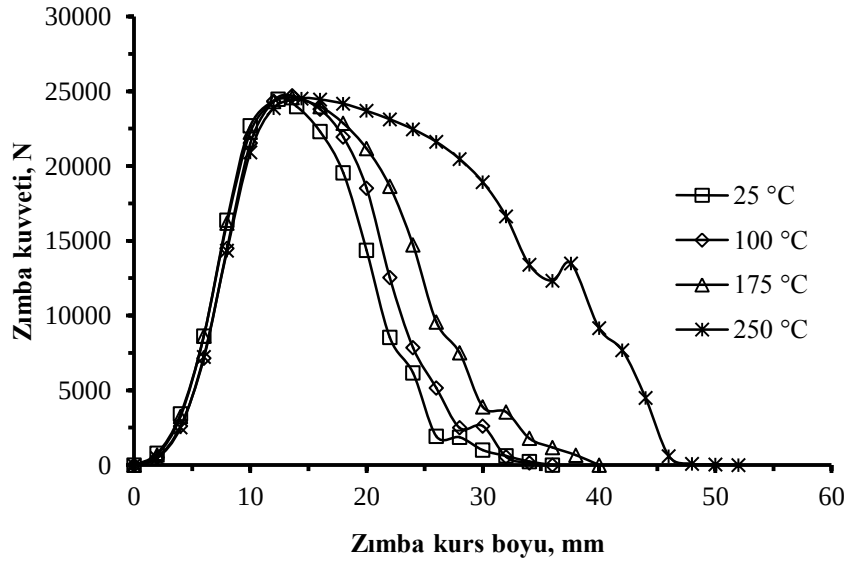


Şekil 5.43. 1200 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri

Baskı plakası kuvveti 2400 N olarak uygulandığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24466,14 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24701,58 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 24564,24 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,75$ ve en büyük zımba kuvveti 24514,69 N olarak elde edilmiştir. 2400 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ kalıp açısı için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri Şekil 5.44’de ve zımba kuvveti değişimleri de Şekil 5.45’de verilmiştir.

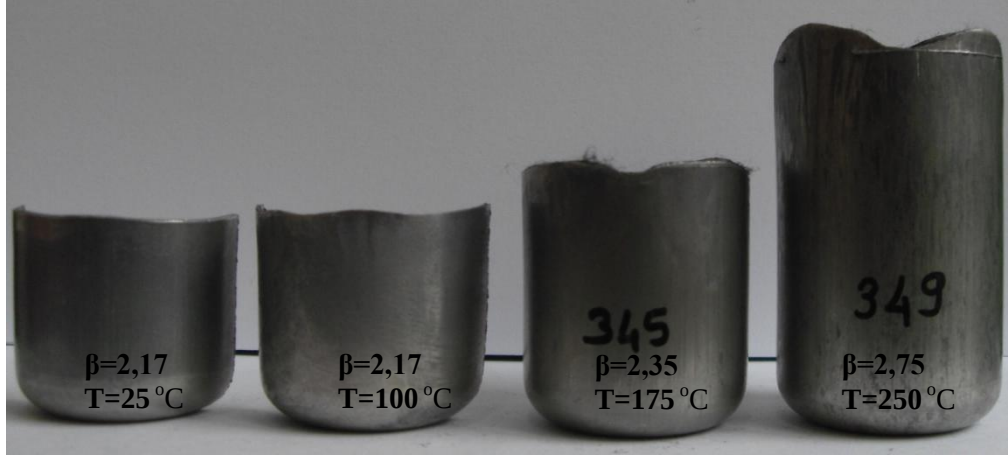


Şekil 5.44. 2400 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler

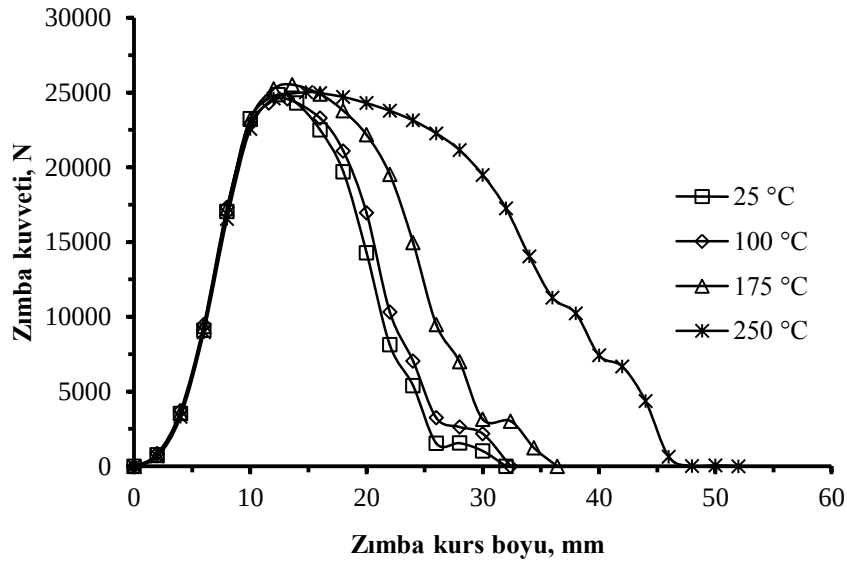


Şekil 5.45. 2400 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zımba kuvveti değişimleri

Baskı plakası kuvveti 3600 N olarak uygulandığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24858,54 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24564,24 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 2525,62 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,75$ ve en büyük zımba kuvveti 25015,5 N olarak elde edilmiştir. 3600 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ kalıp açısı için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen çekme numuneleri Şekil 5.46'de ve zımba kuvveti değişimleri de Şekil 5.47'de verilmiştir.



Şekil 5.46. 3600 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler



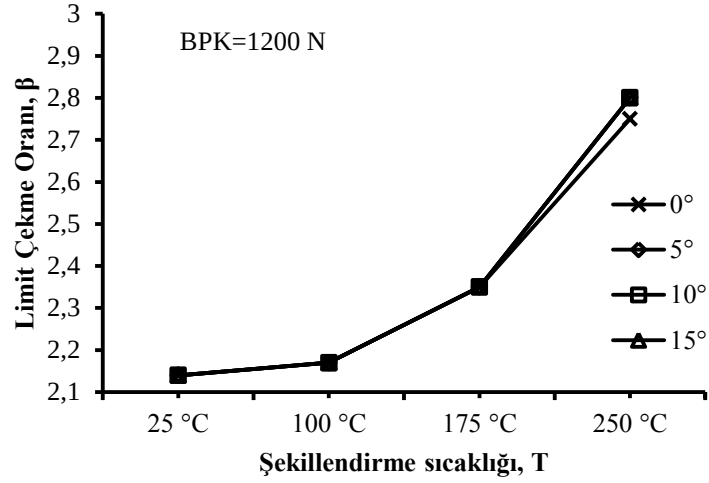
Şekil 5.47. 3600 N BPK ve $\alpha=15^\circ$ kalıp açısı sonucundaki zimba kuvveti değişimleri

Tablo 5.1’de kalıp açısı ve şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen limit çekme oranları verilmiştir. Şekil 5.48’de ise şekillendirme sıcaklığı ve kalıp açısının LÇO üzerindeki etkileri görülmektedir. Tüm aç değeri için, sıcaklık artışına bağlı olarak LÇO da artmaktadır. Özellikle 100 °C sıcaklıktan sonra daha net görülmekte ve bu artış, sıcaklık etkisi ile malzemenin akma mukavemetinin azalması ve şekillendirme kabiliyetinin artmasıyla ilişkilendirilebilir. Boogaard, AA 5754 alaşımının ılık derin çekilebilirliği üzerine yapmış olduğu çalışmada, oda sıcaklığında 2,1 olan LÇO’yu 2,6’ya, çıkarabilmiştir [96]. Bu çalışmada ise $\alpha=0^\circ$ kalıpla, sıcaklık değerinin oda sıcaklığından en yüksek seviyeye (250 °C) çıkartılmasıyla $\beta=2,14$ değerinden $\beta=2,75$ değerine yükselmektedir. Bu artış yaklaşık % 28,5’dir. Kalıp açısının 0° ’den farklı olduğu tüm

değerlerde ise $\beta=2.17$ 'den $\beta=2.80$ değerine çıkmaktadır. Bu sonuçlar derin çekme işleminde kalıp tasarımının oldukça önemli olduğunu bir kez daha göstermiştir.

Tablo 5.1. Kalıp açısı ve şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen LÇO değerleri

Sıcaklık, T	Kalıp yüzey açısı, α			
	0°	5°	10°	15°
25 °C	2,14	2,14	2,14	2,14
100 °C	2,17	2,17	2,17	2,17
175 °C	2,35	2,35	2,35	2,35
250 °C	2,75	2,80	2,80	2,80



Şekil 5.48. α ve T'nin β üzerindeki etkileri

5.2. Et Kalınlığı Ölçüm Sonuçları

Derin çekme işlemi esnasında çekilen kap üzerinde birçok gerilmeler meydana gelmekte ve kabın et kalınlığı değişimini doğrudan etkilemektedirler. Bundan dolayı derin çekme esnasında dikkat edilmesi gereken hususlardan biri de et kalınlığı değişimidir. Çekme işleminin başarısı et kalınlığının değişiminin istenilen değerlerde kalmasına bağlıdır. Kap cidarlarındaki özellikle köşe radyüslerindeki et kalınlığı değişimi iş parçası kalitesini doğrudan etkilemektedir. Et kalınlığı değişimi, kalıp geometrisi, baskı plakası kuvveti, kalıp radyüsleri, yağlayıcı, şekillendirme sıcaklığı, şekil değiştirme hızı ve levha yüzeyindeki sürtünme dağılımının düzenli olup olmaması gibi parametrelerden önemli ölçüde etkilenmektedir[1,18,19]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde kabın taban bölgesinde önemli bir değişimin olmadığı, radyüs bölgelerinde incelmelerin ve kap duvarının üst kısımlarında ise kalınlaşmaların olduğu tespit edilmiştir.

DeneySEL çalışmalardan elde edilen kapların kalınlık değişimlerinin ölçümleri için deney numunesi hassas bir şekilde boydan boya kesilerek hadde doğrultusunda 5 mm aralıklarla markalanmıştır. Kesilmiş durumda ölçüm noktalarının gösterildiği numune Şekil 5.49’da, QLR digit marka 10^{-4} mm hassasiyetindeki dijital mikrometre ile belirlenen noktaların et kalınlıklarının ölçülmesi ise Şekil 5.50’de verilmiştir.



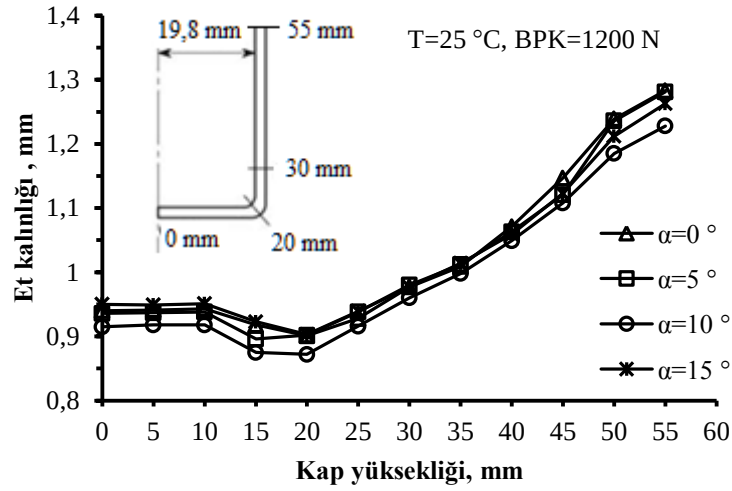
Şekil 5.49. Et kalınlığı ölçümü için hazırlanan numune



Şekil 5.50. Et kalınlıklarının ölçülmesi

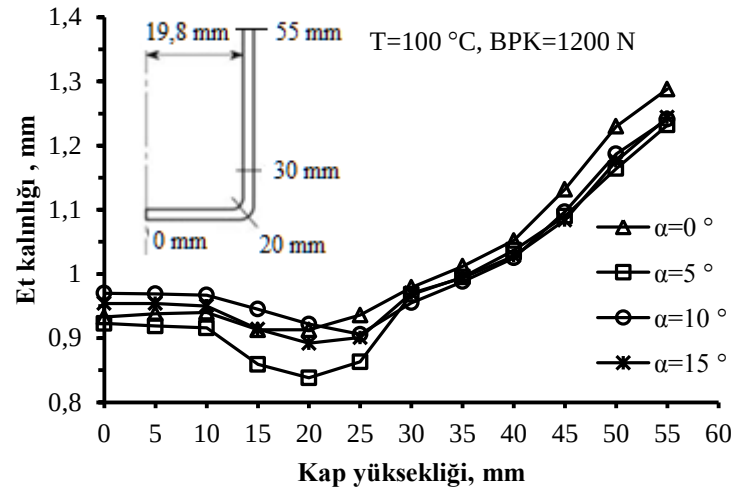
5.2.1. Kalıp Açısının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Şekil 5.51’de 25 °C’de, $\beta=2,14$ ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α ’nın haddeleme yönü boyunca et kalınlığı değişimi üzerindeki etkisi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi 0-15 mm arasındaki bölgede et kalınlığının düştüğü ve yaklaşık olarak 0,850-0,950 mm aralığında olduğu, çekilen sac kalınlığının ortalama %10 oranında azaldığı belirlenmiştir. 15 mm’den sonra kap üst bölgelerine doğru et kalınlığı kademeli olarak arttığı, 32 mm’den sonra ise kalınlık değerinin sac malzeme kalınlığından fazla olduğu tespit edilmiştir. Kalınlıktaki bu artış ortalama %22’dir. α ’nın bütün değerleri için kalınlıktaki değişim benzer eğilim göstermiştir.



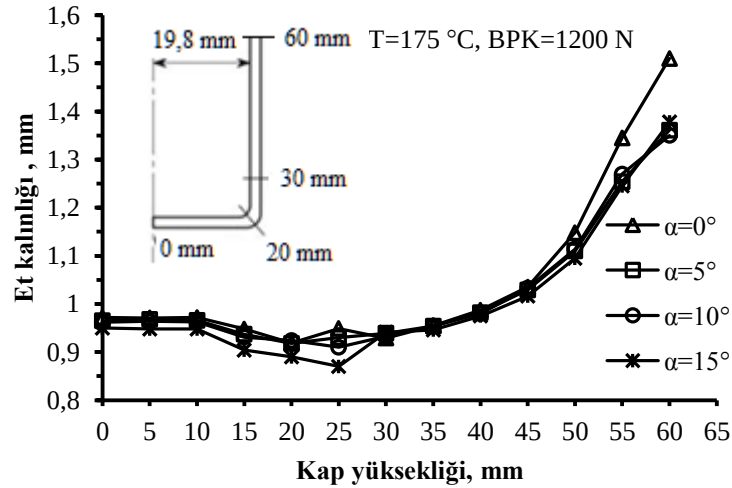
Şekil 5.51. $\beta=2,14$ için 25 °C’de α ’nın et kalınlığı üzerindeki etkisi

Şekil 5.52’de 100 °C, $\beta=2,14$ ve 1200 N baskı plakası kuvveti değerlerinde α ’nın haddeleme yönü boyunca et kalınlığı değişimine etkisi verilmiştir. Şekil 5.52 ve Şekil 5.51’den görüldüğü gibi $\beta=2,14$ ve 25 °C ile 100 °C’de numune et kalınlıkları değişimi yaklaşık olarak aynıdır. Ancak sıcaklık 100 °C’ye çıktığında kap köşesindeki incelme maksimum değerine ulaşmıştır. Bu noktadaki incelme yaklaşık %17 ile 5°’lik kalıpta görülmüştür. Bunun PLC(Portevin-Le Chatelier) etkisi ile malzeme akışındaki düzensizliğin bir sonucu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.52. $\beta=2,14$ için 100 °C'de α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi

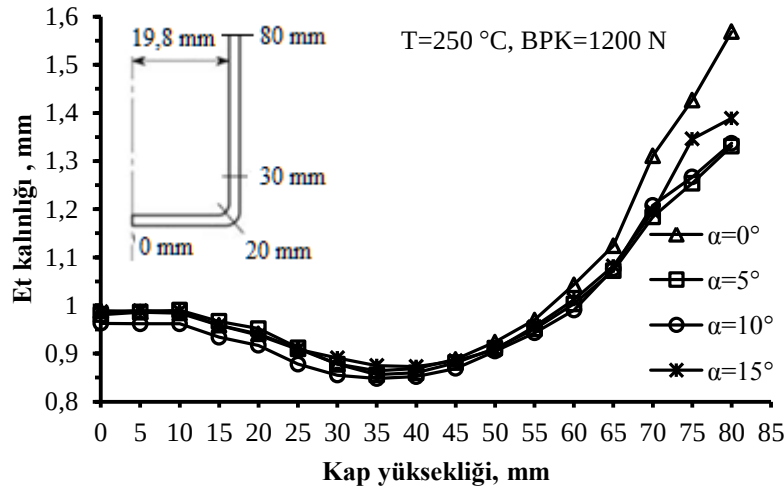
Şekil 5.53'de 175 °C'de, $\beta=2,35$ ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α 'nın haddeleme yönü boyunca et kalınlığı değişimine etkisi verilmiştir. Sıcaklık artışının kap tabanındaki incelmelere olumlu bir etki yaptığı, ancak kap yüksekliğinin artması ile malzeme kalınlık artışının % 43 gibi önemli bir artış gösterdiği, bu artış değerinin $\alpha=0^\circ$ kalıpta görüldüğü tespit edilmiştir. Bu durum numune ağızlarında malzeme akışının zorlaşması neticesinde malzeme yığılmalarının artmasının bir sonucu olarak açıklanabilir.



Şekil 5.53. $\beta=2,35$ için 175 °C'de α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi

Şekil 5.54'de 250 °C'de, $\beta=2,75$ ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α 'nın haddeleme yönü boyunca et kalınlığı değişimine etkisi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi 0-15 mm aralığında malzemem kalınlığında önemli bir azalmanın olmadığı, %4 ile sınırlı

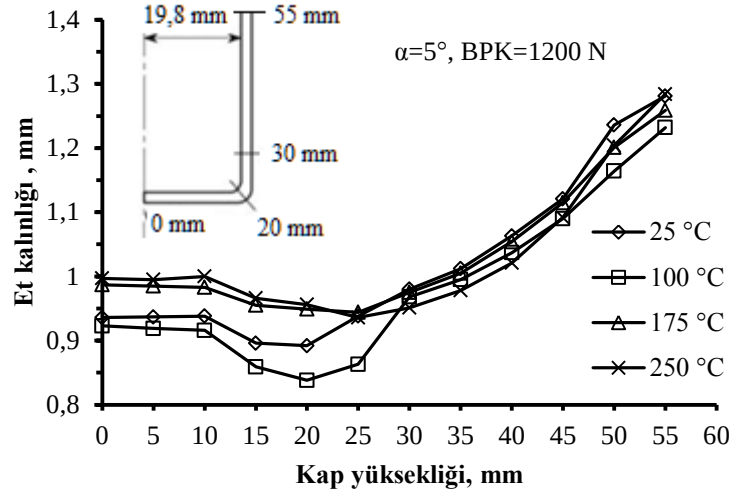
kaldığı belirlenmiştir. Bu değerden sonra yaklaşık 35-40 mm aralığına kadar incelmenin devam ettiği ve 0,870 mm'ye düştüğü görülmüştür. Bu noktadan sonra kap yüksekliğindeki artışa bağlı olarak kalınlık değeri de kademeli olarak artmış ve 55-60 mm aralığında sac kalınlığına eşit olduğu tespit edilmiştir. Bu değerden sonra kalınlık sac kalınlığının üzerine çıkmış, $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı değerinde %56'lık artışla 1,560 mm değere ulaşmış, diğer tüm kalıp açılarında ise yaklaşık kalıp boşluğuna eşit olduğu görülmüştür.



Şekil 5.54. $\beta=2,75$ için 250 °C'de α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi

Şekil 5.51-5.54 birlikte değerlendirildiğinde α 'nın bütün değerleri için et kalınlığının kap yüksekliği boyunca değişimi benzer eğilim göstermektedir. Sıcaklıktaki artışa bağlı olarak, kalıp açısının et kalınlığı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Bu etki özellikle kapların üst bölgelerinde daha fazladır. Bu durumun artan açı değerleriyle birlikte malzemenin kalıp boşluğuna akışının yüksek sıcaklıkta daha kolay olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, sıcaklık arttıkça kalıp açısına bağlı olarak kabın taban kısmında ve radyüs bölgelerinde önemli bir değişimin olmadığı, kap duvarlarının üst kısımlarında ise açı artışına bağlı olarak kalınlaşmaların azaldığı, ayrıca sıcaklık arttıkça kalıp açısına bağlı olarak kalınlık dağılımlarının daha düzenli olduğu tespit edilmiştir.

5.2.2. Şekillendirme Sıcaklığının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

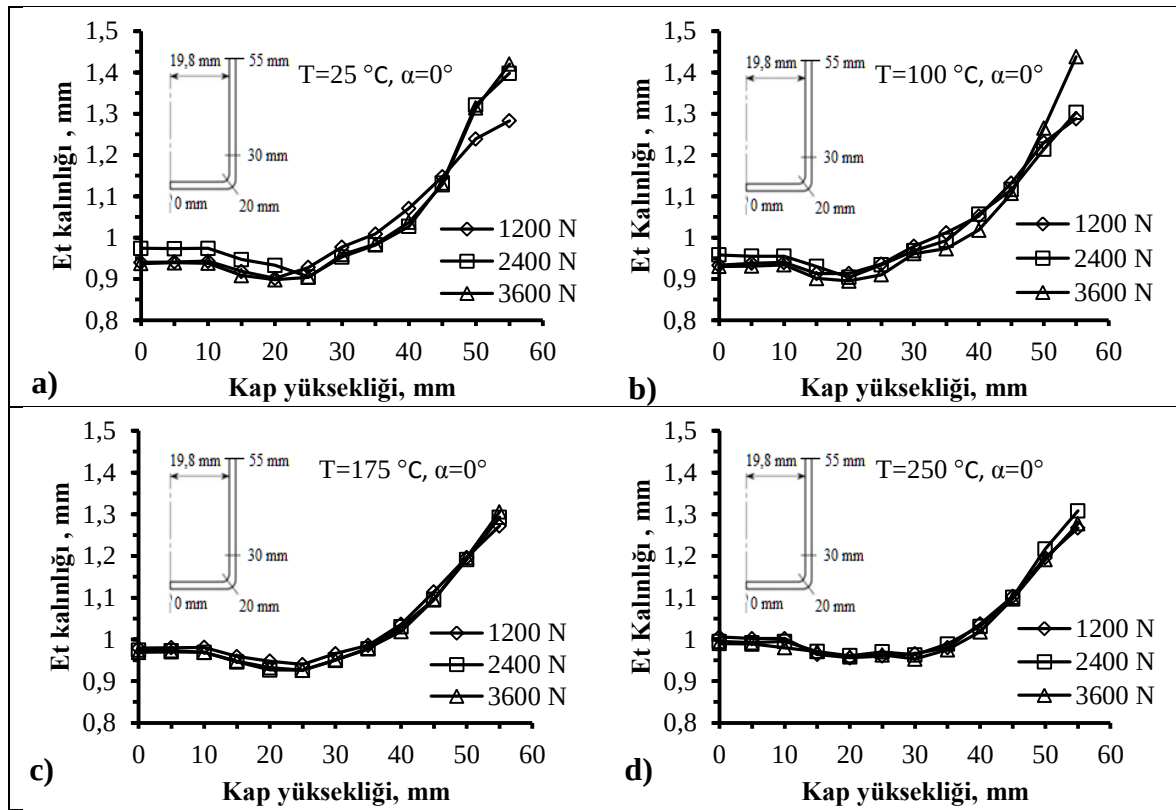


Şekil 5.55’de, $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı ve 1200 N baskı plakası kuvveti değerlerinde şekillendirme sıcaklığının et kalınlığı değişimi üzerindeki etkisi verilmiştir. Kalınlıkta 0-10 mm aralığında önemli bir değişimin olmadığı, bu aralıktan sonra 20-25 mm aralığına kadar incelmelerin devam ettiği, 25 mm’den sonra kalınlıkta önemli bir artışın olduğu görülmektedir. 25 °C sıcaklıkta kap merkezindeki kalınlık 0,936 mm’dir. Şekillendirme sıcaklığı 250 °C’ye çıkarıldığında merkezdeki kalınlık 0,997 mm olarak ölçülmüştür. Tabandaki kalınlık değişimi yaklaşık %6’dır. Tüm sıcaklık değerleri için en büyük incelmenin kap köşelerinde veya hemen üzerinde olduğu görülmektedir. 100 °C’de 0,840 mm’ye düşen kalınlık değeri 250 °C’de 0,940 mm olarak ölçülmüştür. Kap üst kısımlarına doğru çıkıldıkça kalınlık değişiminin tüm sıcaklık değerleri için sınırlı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak sıcaklığın et kalınlığını etkileyen önemli bir parametre olduğu söylenebilir.

5.2.3. Baskı Plakası Kuvvetinin(BPK) Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Şekil 5.56’da $R=8$ mm, $\beta =2,14$ ve $\alpha=0^\circ$ değerlerinde ve farklı şekillendirme sıcaklıklarında BPK’nın et kalınlığı üzerindeki etkisinin değişimi görülmektedir. Kalınlık dağılımının homojen olması açısından sıcaklığın önemli bir faktör olduğu görülmektedir. Şekil 5.56.a ve b’de, farklı BPK’lerinde 25 °C ve 100 °C’de yapılan deneylere ait kalınlık değişimlerini göstermektedir. a ve b’deki kalınlık değişimleri benzer eğilim

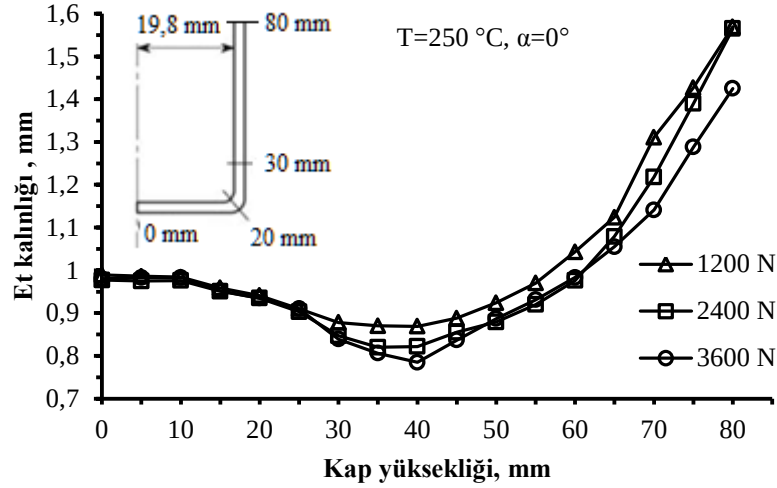
göstermektedir. Kabin yüksekliği arttıkça üst kısımlara doğru BPK'nin artmasına bağlı olarak malzeme yığılmasından dolayı et kalınlığının da arttığı görülmektedir. Ancak, 175 °C ve 250 °C 'de ise hem kap tabanı hem de kabin üst kısımlarındaki kalınlık değişiminin daha homojen hale geldiği, BPK'nin önemli bir etkisinin olmadığı ve bütün BPK'lerinde kalınlık dağılımının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bu durumun sıcaklık etkisi ile deformasyon sertleşmesinin ortadan kalkmasına bağlı olarak dislokasyon hareketlerinin kolaylaşması ve buna bağlı olarak da malzeme akışının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.56. $\beta=2,14$ için BPK'nin sıcaklığa bağlı olarak et kalınlığı üzerindeki etkisi

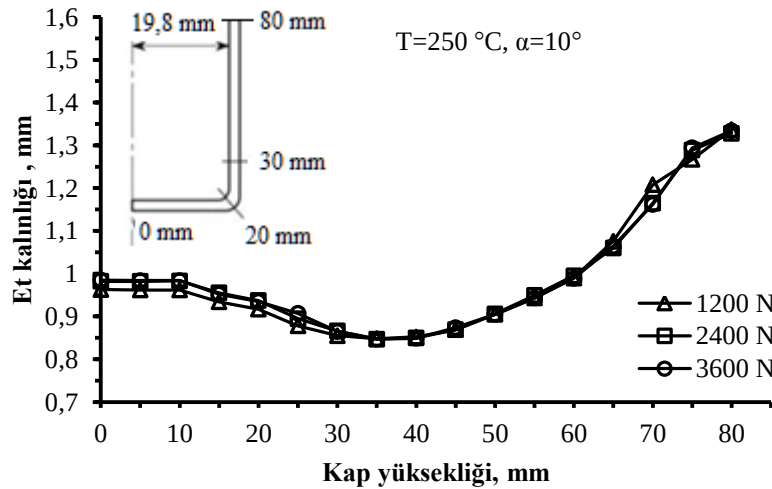
Şekil 5.57'de T=250 °C, $\alpha=0^\circ$, $\beta=2,75$ şartlarında yapılan deneylerde BPK'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilden, 25 mm'ye kadar tüm baskı plakası kuvvetlerinde kalınlık değişimi benzer eğilim göstermiş, bu noktadan sonra BPK etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir. En düşük et kalınlığı, sırasıyla 1200 N; 2400 N ve 3600 N BPK için 0,864 mm, 0,819 mm ve 0,785 mm olarak ölçülmüştür. Baskı plakası kuvvetinin artmasıyla, malzeme-kalıp arasındaki radyal gerilmeler artmakta, artan radyal gerilmeler sürtünme kuvvetlerini artırmaktadır. Sürtünme kuvvetinin artması, malzemede

daha yüksek çekme gerilmelerinin oluşmasına yol açmakta ve bu nedenle daha fazla incelme meydana gelmektedir. Kap yüksekliği arttıkça, düşük BPK'tinde et kalınlığının daha da arttığı görülmektedir. Bu durum ise sıcaklık etkisi ile LÇO'daki artışa bağlı olarak kap üst kısımlarında malzeme yığılmalarının artması ve BPK'nin yeterli olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.57. $\beta=2,75$ için, 250°C ve $\alpha=0^\circ$ 'de BPK'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi

Şekil 5.58'de $T=250^\circ\text{C}$, $\alpha=10^\circ$, $\beta=2,75$ şartlarında yapılan deneylerde BPK'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi kalıp açısı $\alpha=10^\circ$ olduğunda BPK'nin et kalınlığı değişimine önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu durum sıcaklığın etkisi ile kalıp açısının malzeme akışını kolaylaştırması ile açıklanabilir.



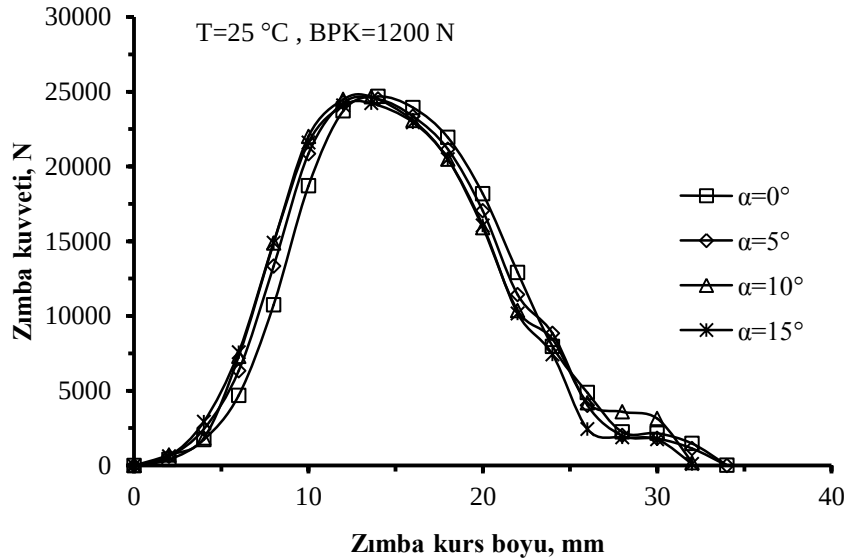
Şekil 5.58. $\beta=2,75$ için, 250°C ve $\alpha=10^\circ$ 'de BPK'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi

Şekil 5.57 ve 5.58 birlikte değerlendirildiğinde özellikle kap duvarlarındaki kalınlık değişimine kalıp açısının önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. $\alpha=0^\circ$ 'de en düşük et kalınlığı 1200 N kuvvet için 0,870 mm, 2400 N kuvvet için 0,820 mm ve 3600 N baskı plakası kuvveti için ise 0,785 mm'dir. Şekillendirme sıcaklığının et kalınlığı üzerindeki etkisinin değişimi yaklaşık %11'dir. Ancak $\alpha=10^\circ$ 'de bütün baskı plakası kuvvetleri için bu değer sırası ile 0,848 mm, 0,847 mm ve 0,847 mm olarak ölçülmüştür. Bu durumda ise değişim %0,1'dir. Şekillerden görüldüğü gibi çekme oranı önemli ölçüde artmasına rağmen açısız kalıplarla elde edilen numunelerdeki kalınlık değişimine BPK'nin önemli bir etkisinin olduğu, ancak açılı kalıplarla yapılan deneylerde ise BPK'nin önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Kalıp açısının, BPK'nin et kalınlığı üzerindeki olumsuz etkisini azalttığı söylenebilir. Ayrıca kap ağızlarındaki kalınlık değişiminin, açısız kalıplarla yapılan deneylerdeki yığılma artışından dolayı açılı kalıplara göre oldukça fazla olduğu tespit edilmiştir.

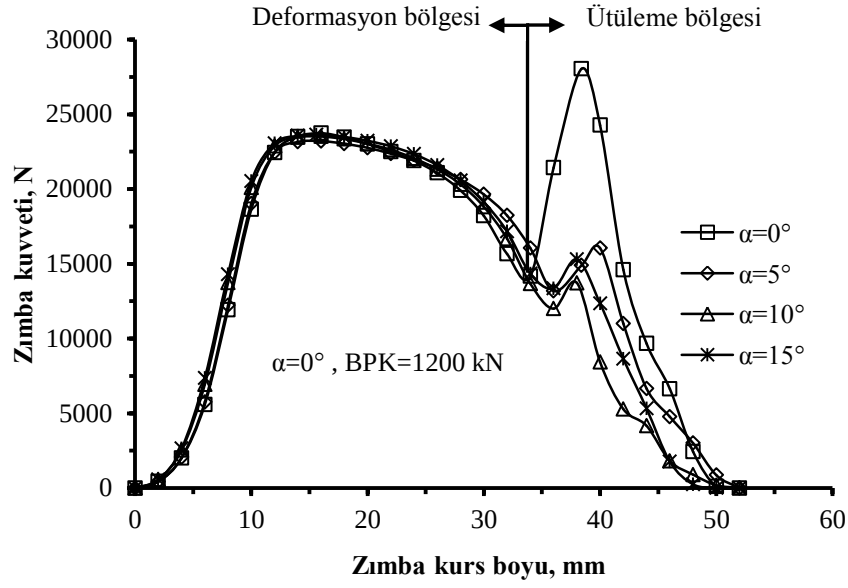
5.3. Zimba Kuvveti Ölçüm Sonuçları

Zimba ile sac malzeme arasındaki temas sonucu sürtünmenin artması ile gerilme artar. Zımbanın deformasyona devam etmesi ile gerilme de o oranda artmaya devam eder. Gerilmedeki bu artış kalınlığın önemli ölçüde azalmasına ve kabın aşırı deformasyona uğramasına neden olur. Bundan dolayı seçilen deney parametreleri şekillendirme esnasındaki zimba kuvvetini önemli ölçüde etkiler.

Şekil 5.59'da, 25 °C'de kalıp açısının zimba kuvvetine etkisinin değişimi verilmiştir. Bütün açı değerleri için zimba kuvvetinde önemli bir değişimin olmadığı görülmektedir. Şekil 5.60'da ise 250 °C sıcaklık için zimba kuvvetindeki değişim verilmiştir. Şekil 5.60 incelendiğinde, eğilim çizgilerinde iki adet tepe noktası olduğu görülmektedir. Birinci nokta kesit daralmasının başlangıç noktasını, ikinci nokta ise yetersiz baskı plakası kuvvetinden dolayı çekilen sac malzemenin kenarında oluşan ondülasyonların kalıp boşluğuna sıkışmasından kaynaklanan kuvvet artışını göstermektedir. Zimba kuvveti değerinde önemli bir değişim olmamasına karşın en büyük zimba kuvveti ve özellikle de ütüleme kuvvetinin $\alpha=0^\circ$ kalıpla yapılan deneyde, en düşük değer ise $\alpha=10^\circ$ kalıpta görülmektedir. Bu durum, kalıp açısının malzeme akışını kolaylaştırması sonucunda malzeme yığılmasının azalması ile açıklanabilir.

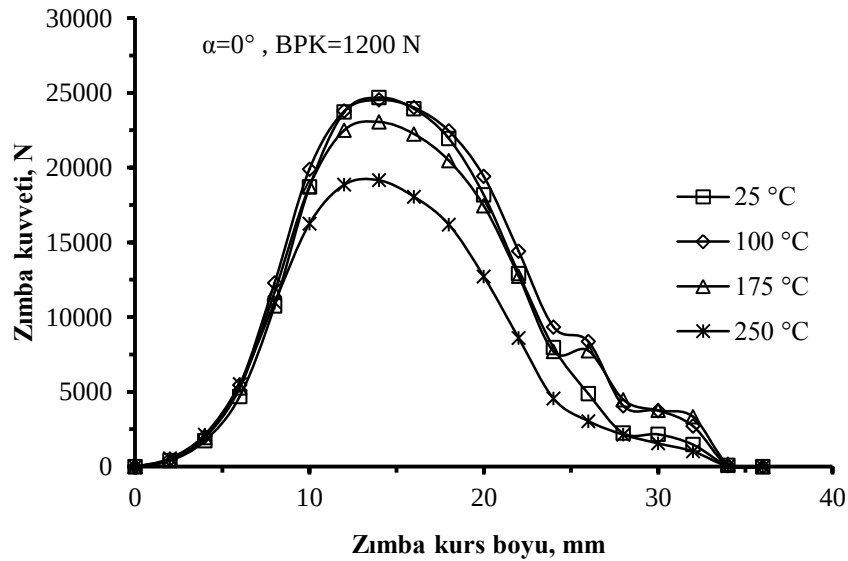


Şekil 5.59. $\beta=2,14$ için 25 °C'de kalıp açısının zimba kuvvetine olan etkisi

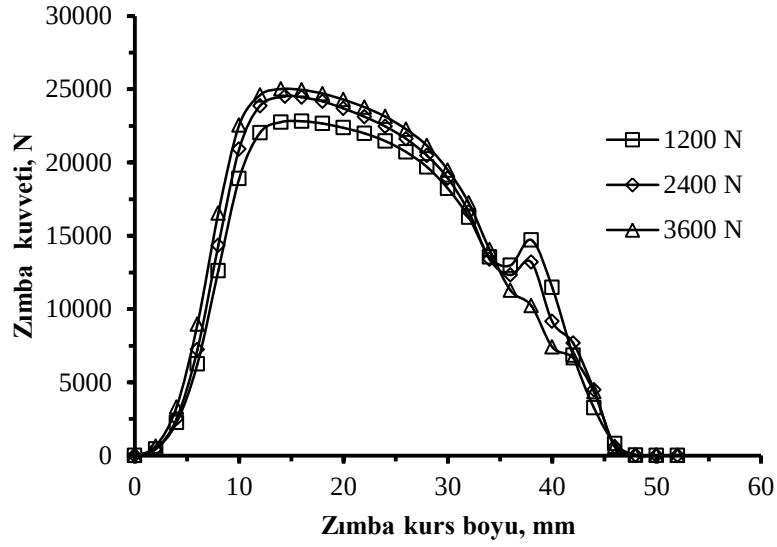


Şekil 5.60. $\beta=2,75$ için $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kalıp açısının zımba kuvvetine olan etkisi

Şekil 5.61'de zımba kuvvetinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi verilmiştir. Zımba kuvvetinin $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $24681,96\text{ N}$ iken $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $19149,12\text{ N}$ değerine düştüğü, böylece değişimin %22,4 olduğu bulunmuştur. Buradan sıcaklığın zımba kuvvetini etkileyen önemli bir parametre olduğu görülmektedir. Şekil 5.62'de ise zımba kuvvetinin baskı plakası kuvveti ile değişimi verilmiştir. BPK'nin artması ile zımba kuvvetinin arttığı, ütülleme kuvvetinin ise düştüğü görülmektedir. $\beta=2,75$ için $\alpha=15^{\circ}$ ve $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yapılan deneylerde zımba kuvveti sırasıyla, 1200 N ; 2400 N ve 3600 N BPK için $22837,68\text{ N}$, $24514,69\text{ N}$ ve $25015,50\text{ N}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.61. $\beta=2,14$ için zımba kuvvetinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi



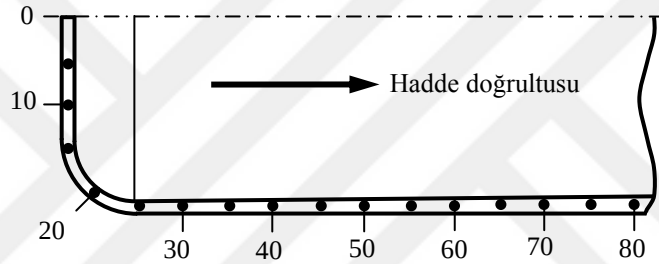
Şekil 5.62. $\beta=2,75$ için zımba kuvvetinin BPK'ne bağlı olarak değişimi

Şekil 5.59'da $\beta=2,14$ için en büyük zımba kuvveti 24681,96 N ve en küçük zımba kuvveti 24289,56 N, Şekil 5.60'da $\beta=2,75$ için en büyük zımba kuvveti 23732,32 N ve en küçük zımba kuvveti 23220,86 N, Şekil 5.61'de en büyük zımba kuvveti 24681,96 N ve en küçük zımba kuvveti 19149,12 N, Şekil 5.62'de ise en büyük zımba kuvveti 25015,50 N ve en küçük zımba kuvveti 22837,68 N olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, zımba kuvvetini etkileyen en önemli faktörün şekillendirme sıcaklığı, ikinci olarak baskı plakası kuvveti ve son olarak ise kalıp açısının olduğunu göstermiştir.

5.4. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Metallerin şekillendirilmesini etkileyen birçok önemli faktör vardır. Bu faktörlerden biri deformasyon sertleşmesidir[104]. Malzemenin şekillendirilmesi esnasında meydana gelen deformasyon sertleşmesi kabın kalıp boşluğuna akışını, zımba kuvvetini, kaptaki kalınlık değişimlerini ve kaptaki gerilmeleri doğrudan etkiler.

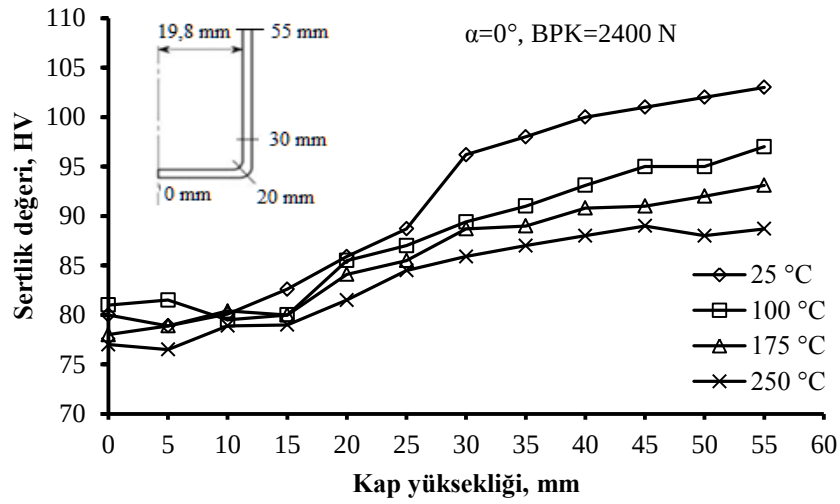
Çekilen kapların sertlik dağılımı ölçümü, Emcotest DuraScan mikrosertlik cihazı ile Şekil 5.63’de görüldüğü gibi hadde doğrultusu boyunca kesilen ve bakalit içerisine alınan numune üzerinden 5 mm aralıklarla 200 gr yük uygulanarak(HV0.2) yapılmıştır. Derin çekme işlemi uygulanmadan ısıtılmış sacın ortalama sertliği 61,7 HV olarak ölçülmüştür.



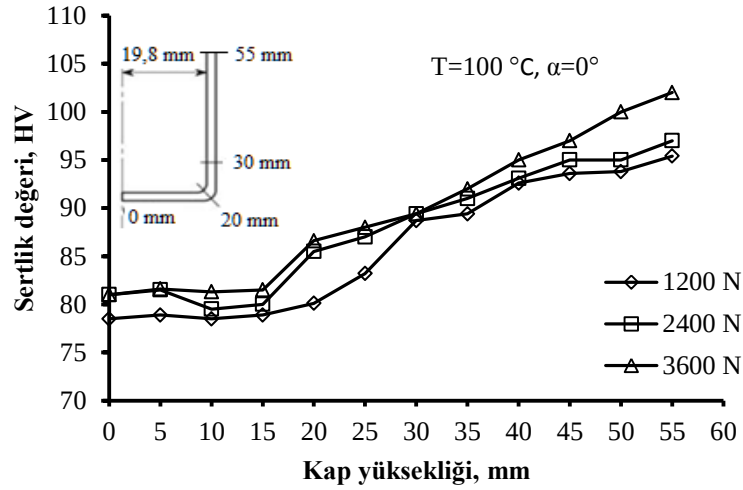
Şekil 5.63. Numunenin mikrosertlik ölçüm şeması

Şekil 6.64’de sıcaklığın kap duvarlarındaki sertlik dağılımı üzerindeki etkisi verilmiştir. Şekilden en düşük sertlik değerinin kap tabanında olduğu, kap ağzına doğru çıkıldıkça sertlik değerinin arttığı görülmektedir. En fazla plastik deformasyona uğrayan bölge kap ağız bölgesi olduğu için deformasyon sertleşmesinden dolayı kaptaki en yüksek gerilme değeri ve sertlik de burada oluşmaktadır. Ayrıca şekilden, sıcaklık arttıkça sertlik değerinin düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi ise sıcaklığın malzemenin mukavemetini düşürerek şekillendirmeyi kolaylaştırmasıdır. En yüksek sertlik değeri 25 °C’de 103 HV ölçülmüş ve diğer sertlik değerleri sırasıyla 100 °C’de 97 HV, 175 °C’de 93,1 HV ve 250 °C’de 88,7 HV olarak ölçülmüştür.

Şekil 5.65’de ise sertlik değerinin baskı plakası kuvveti ile değişimi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi en yüksek sertlik değeri baskı plakası kuvvetine bağlı olarak kap ağız bölgesinde ve en büyük sertlik de 3600 N baskı plakası kuvveti uygulandığında meydana gelmiştir.



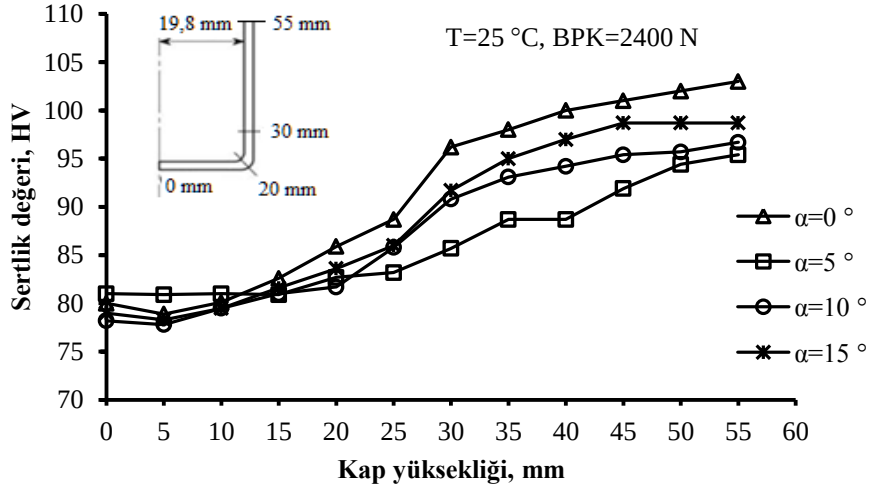
Şekil 5.64. $\beta=2,14$ için sıcaklığının sertlik dağılımı üzerindeki etkisi



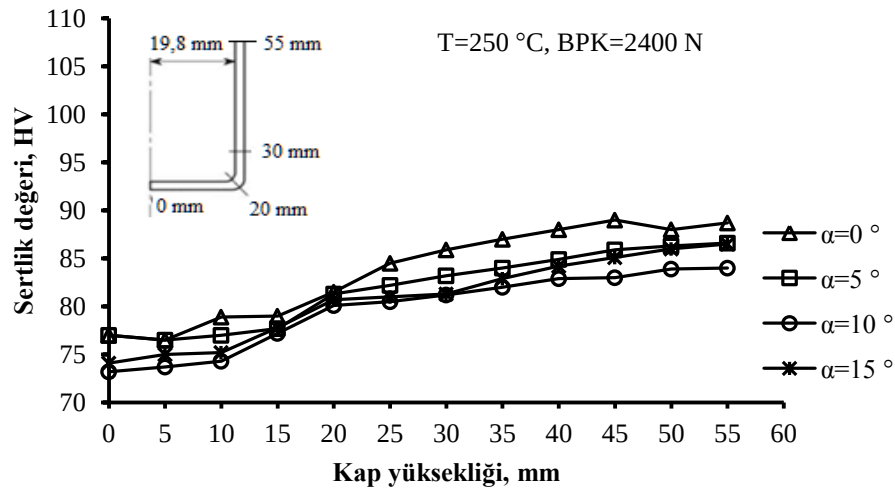
Şekil 5.65. $\beta=2,14$ için BPK'nin sertlik dağılımı üzerindeki etkisi

Şekil 5.66 ve 5.67'de sırası ile 25 °C ve 250 °C'de kalıp açısının sertlik dağılımı üzerindeki etkisi verilmiştir. Şekiller birlikte değerlendirildiğinde kap tabanından kap ağzına doğru çıkıldıkça sertlik değerlerinin arttığı, Şekil 5.66'da en düşük sertlik değerinin $\alpha=5^\circ$ kalıpta en yüksek sertlik değerinin ise $\alpha=0^\circ$ kalıpta elde edildiği tespit edilmiştir. Şekil 5.67'de ise sıcaklık 250°C'ye çıktığında tüm kalıp açıları için değişim aralığının birbirine yaklaştığı, çok önemli bir farkın olmadığı görülmektedir. 250°C'de en yüksek sertlik değerinin açısız kalıplarda ölçüldüğü belirlenmiştir. Buradan kabın sertlik dağılımına kalıp açısının olumlu etkisinin olduğu söylenebilir. Bu durum kalıp açısının

malzeme akışını kolaylaşması sonucunda deformasyon sertleşmesinin azalması ile açıklanabilir.

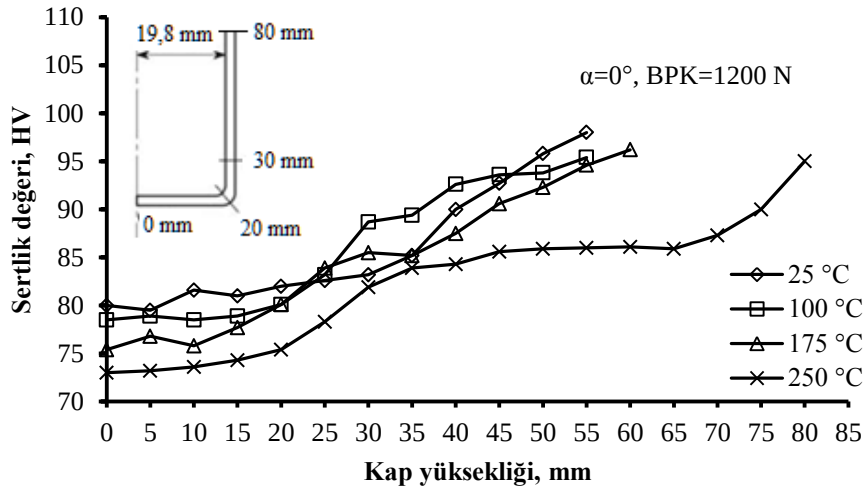


Şekil 5.66. $\beta=2,14$ için kalıp açısının(α) oda sıcaklığında sertlik dağılımı üzerindeki etkisi



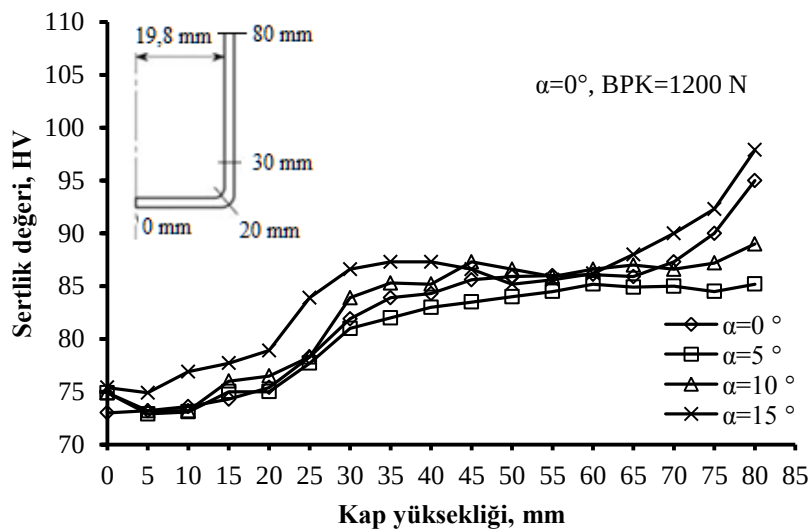
Şekil 5.67. $\beta=2,14$ için kalıp açısının(α) 250°C'de sertlik dağılımı üzerindeki etkisi

Şekil 5.68'de farklı çekme oranları sonucu 25°C'de $\beta=2,14$, 100°C'de $\beta=2,17$, 175°C'de $\beta=2,35$ ve 250°C'de $\beta=2,75$ olarak elde edilen kaplardaki sertlik dağılımı değerleri verilmiştir. En yüksek sertlik değerleri 25°C'de 98 HV, 100°C'de 95,4 HV, 175°C'de 96,2 HV ve 250°C'de 95 HV olarak elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi LÇO $\beta=2,14$ 'den $\beta=2,75$ 'e çıkmasına rağmen sertlik değeri sıcaklığın etkisi ile değişmemiş aksine azalmıştır.



Şekil 5.68. Farklı LÇO ve sıcaklık değerleri sonucu elde edilen kaplardaki sertlik dağılımı

Şekil 6.69’da 250°C’de $\beta=2,75$ çekme oranına sahip kaplar için kalıp açısının sertlik dağılımı üzerindeki etkisi verilmiştir. Şekiller incelendiğinde kap tabanından kap ağzına doğru çıkıldıkça sertlik değerlerinin arttığı, en düşük sertlik dağılımının $\alpha=5^\circ$ ’lık kalıpta, en yüksek sertlik dağılımının ise $\alpha=15^\circ$ ’lık kalıpta elde edildiği görülmektedir. Sertliğin, kap ağzına doğru malzeme yığılmalarının deformasyon sertleşmelerini beraberinde getirmesinden dolayı arttığı, elde edilen kaplar ve sertlik ölçüm sonuçlarından kalıp açısının malzeme akışını kolaylaştırması neticesinde yığılmaların önlenmesi ve dolayısı ile de sertliğin azalmasına yol açtığı söylenebilir.



Şekil 5.69. $\beta=2,75$ için kalıp açısının(α) 250°C’de sertlik dağılımı üzerindeki etkisi

Şekil 5.64’de en yüksek sertlik değeri $\beta=2,14$ için $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de 103 HV ve en düşük sertlik değeri $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de 88,7 HV, Şekil 5.65’de en yüksek sertlik değeri 3600 N’da 102 HV ve en düşük sertlik değeri 1200 N’da 95,4 HV, Şekil 5.66’da en yüksek sertlik değeri $\alpha=0^{\circ}$ ’de 103 HV ve en düşük sertlik değeri $\alpha=5^{\circ}$ ’de 95,4 HV, Şekil 5.67’de en yüksek sertlik değeri $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ için $\alpha=0^{\circ}$ ’de 88,7 HV ve en düşük sertlik değeri $\alpha=10^{\circ}$ ’de 84 HV, Şekil 5.68’de en yüksek sertlik değeri $\beta=2,14$ için $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de 98 HV ve en düşük sertlik değeri $\beta=2,75$ için $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de 95 HV, Şekil 5.69’da en yüksek sertlik değeri $\beta=2,75$ için $\alpha=15^{\circ}$ ’de 97,9 HV ve en düşük sertlik değeri $\alpha=5^{\circ}$ ’de 85,2 HV olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak üretilen kaplarda deformasyon sonucu oluşan sertlik dağılımı kaplardaki gerilme dağılımı hakkında önemli bilgiler vermektedir. Çekilen kaplar üzerindeki bu gerilmeler şekillendirilen parçaların ömrünü, tokluğunu, çatlak oluşum direncini, manyetik özelliklerini ve korozyon direncini etkiler. Şekillendirilen kaplar üzerindeki gerilme değerleri ne kadar düşük olursa kullanım ömrü de o kadar uzun olur. Yapılan çalışma neticesinde sertliği etkileyen parametreler; sıcaklık, kalıp açısı ve baskı plakası kuvvet olarak sıralanabilir.

5.5. Deney Parametrelerinin Kap Hasarları Üzerindeki Etkisi

Yapılan deneyler sonucunda çekilen kapların üst kısımlarında buruşma ve kulaklanma, taban kısımlarında ise yırtılma ve çatlak şeklinde hasarların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bilindiği gibi, ilkel parça çapı büyüdükçe sacı plastik deformasyona uğratmak için gerekli zimba kuvveti artmaktadır. Zimba kuvvetinin artması, derin çekme esnasında oluşan gerilmelerin artmasına yol açmaktadır. Bu nedenle derin çekme esnasında oluşan daha büyük çekme gerilmelerine mukavemet gösteremeyen iş parçasında yırtılmalar meydana gelmekte ve işlem başarısızlıkla sonuçlanmaktadır[1].

Sıcaklık etkisi altında yapılan metal şekillendirme önemli derecede sıcaklık dağılımı ile ilişkilidir. Numunenin tüm yüzey alanına yayılmış üniform bir sıcaklık dağılımı, kaplarda yırtılmalara yol açmaktadır. Bunu engellemek amacıyla, hem zimba ve numune arasındaki temas bölgesi hem de zimbanın kendisi soğutulmuştur. Soğutma işleminin yırtılma hasarlarını önemli derecede azalttığı tespit edilmiştir. Şekil 5.70.a'da üniform ısıtma(zimbanın ve kabın soğutulmaması) ile yapılan deney sonucunda elde edilen yırtılan kap, b'de ise baskı plakası kuvvetinin yetersizliği neticesinde kap ağzında buruşmaların meydana gelişi ve sonrasında da kap radyüs bölgesinin üzerinde yırtılmanın meydana geldiği bir kap görünmektedir.



Şekil 5.70. Çekilen kaplarda oluşan yırtılma(a) ve buruşma(b) hataları

BPK'nin düşük olduğu durumlarda ondülasyonların artmasından dolayı kabın üst kısımlarında aşırı buruşmalar meydana gelmektedir. Bu da, kap hasarına yol açtığından kabın kullanılabilirliğini önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. Şekil 5.71'de kalıp açısına bağlı olarak 250 °C sabit sıcaklık ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde çekilen numuneler verilmiştir. Şekilde, kap üst kısımlarındaki buruşmanın, kalıp açısı $\alpha=0^\circ$ iken oldukça fazla

olduğu, $\alpha=5^\circ$ 'de ve $\alpha=10^\circ$ 'de ortadan kalktığı ancak kalıp açısı $\alpha=15^\circ$ olduğunda yeniden oluğuğu görölmektedir. Buradan belli bir açıdan sonra açının bir öneminin kalmadığı görölmektedir.



Şekil 5.71. $\beta=2,75$ için 250°C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde elde edilen numuneler, a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$

5.6. Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi

Varyans analizinde amaç, incelenen faktörlerin deney çıktılarının ne derece etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişikliğe yol açtıklarını ortaya koymaktır. Varyans analizi, toplam varyasyonu bileşenlerine ayıran matematiksel bir yöntemdir ve serbestlik derecesi, karelerin toplamı, ortalama kareler vb. gibi niceliklerin hesaplanması için kullanılmaktadır.

Toplam varyasyonun üç tane bileşeni vardır. Bunlar;

- Kalite değişkenini etkileyen faktörlere göre varyasyon
- Kalite değişkenlerinin etkileşimlerine göre varyasyon
- Hataya göre varyasyondur.

Deneyler yapıp veriler elde edildikten ve varyanslar hesaplandıktan sonra hangi faktörlerin önemli bir etkiye sahip olduğunu görmek için F testi uygulanır. Standart F testi uygulanırken; hataların eşit sapmalarla normal dağıldığı ve bağımsız olduğu varsayılmaktadır. F testi varsayımları yerine getirilmediği takdirde hesaplanan parametrelerin önem derecesi doğru sonuçlar vermeyebilir. Bununla birlikte standart F testinin varsayımlarından sapmalara karşı duyarsız olması nedeniyle bazı varsayımları sağlamasa da kullanılabileceği belirtilmektedir [105].

Hesaplamalar sonucu bulunan F değeri eğer;

- F_{tablo} değerinden büyükse, yığın için ortalama değeri etkileyeceği düşünülür.
- F_{tablo} değerinden küçükse, ortalama değer üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı düşünülür.

F testinin bir diğer sınırlandırması da sadece α riskini göz önüne almasıdır, α riski; bir faktörün performans karakteristiği üzerindeki etkisinin büyük olmadığı halde önemli olduğuna karar verilmesi riskidir. F testi uygulanırken başka bir risk olan β riski dikkate alınmamaktadır. β riski; bazı faktörlerin etkisi önemli olduğu halde önemli olmadığına karar verilmesidir. Deneyden sonra dikkate alınmayan önemsiz bir faktör β hatasının düzeltilmesini zorlaştırır. Oysa önemsiz bir faktör deneyin sonraki aşamalarında elemine edilebileceğinden α hatası düzeltilebilir. Deneyde gözlenen her bir önemli faktör ve etkileşime yüklenen toplam varyasyon oranı katkı yüzdesi ile yansıtılır. Katkı yüzdesi, her bir önemli faktörün kareleri toplamının bir fonksiyonudur ve varyasyonu azaltmada faktör veya etkileşimin gücünü gösterir. Eğer faktör ve etkileşim seviyeleri tam manasıyla kontrol edilebilirse, toplam varyasyon katkı yüzdesi ile belirlenen miktarda azaltılabilir [106].

Tez çalışmasında bu hesaplamaların tamamı Minitab R17 paket programı vasıtasıyla yapılmıştır.

İstatistiksel çalışmada kalıp açısı, şekillendirme sıcaklığı ve baskı plakası kuvveti parametreleri incelenmiştir. Bu parametreler derin çekme işleminde etkili olan ve operatör tarafından değiştirilebilen parametrelerdir. Çekme işlemini gerçekleştiren operatörün işlem esnasında kontrol altında tutabileceği etkenleri optimize etmek en akılcı yaklaşım olarak görülmektedir.

Analizlerde elde edilen deneysel değerler ve istenilen değerler arasındaki sapmaları hesaplamak için bir kayıp fonksiyonu (loss function) tanımlanmaktadır. Taguchi yönteminde bu kayıp fonksiyonu performans karakteristiğini ölçmek için kullanılır. Kayıp fonksiyonu, S/N oranına dönüştürülür ki burada S/N oranı, süreç değişkenliğinin bir ölçüsüdür. Taguchi'ye göre S/N oranı kullanılarak sürecin optimize edilmesi sağlanır. Genellikle, S/N oranının analizinde üç çeşit performans karakteristiği kullanılmaktadır. Bunlar; daha düşük–daha iyidir, daha yüksek–daha iyidir ve ortalama–daha iyidir şeklinde tanımlanmaktadır. İşlemden elde edilmek istenen duruma göre bu performanslardan bir tanesi seçilmektedir. Hangi S/N oranı değerlendirilmede kullanılırsa kullanılsın, sonuç olarak karşımıza çıkan değerlerde daha büyük olan S/N oranı daha iyi deney sonucunu ifade eder. S/N oranlarının belirlenmesinde her bir durum için aşağıdaki farklı formüller kullanılır.

Ortalama en iyidir

$$S/N_{NB} = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s_y^2} \right) \quad (5.1)$$

Daha yüksek daha iyidir (maksimize)

$$S/N_{LB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5.2)$$

Daha düşük daha iyidir (minimize)

$$S/N_{LB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5.3)$$

Burada, $\bar{y}$, ölçülen değerlerin ortalaması; s_y^2 , y 'nin varyansı; n , deney sayısı ve y ' de ölçülen değerdir. Yukarıdaki kategorilerin hepsi için, elde edilen S/N oranının yüksek

olması, performansın da o kadar yüksek olması demektir. Dolayısıyla, işleme parametrelerinin optimum seviyeleri aynı zamanda en yüksek S/N oranının olduğu durumdur [107].

Tablo 5.2’de ortalama S/N oranlarının belirlenmesinde kullanılan derin çekme parametreleri ile bunların faktör seviyeleri verilmiştir. Burada kalıp açısı ve şekillendirme sıcaklığı için dört seviyesi, baskı plakası kuvveti için ise üç seviyesi belirlenmiştir.

Tablo 5.2. Derin çekme parametre ve seviyeleri

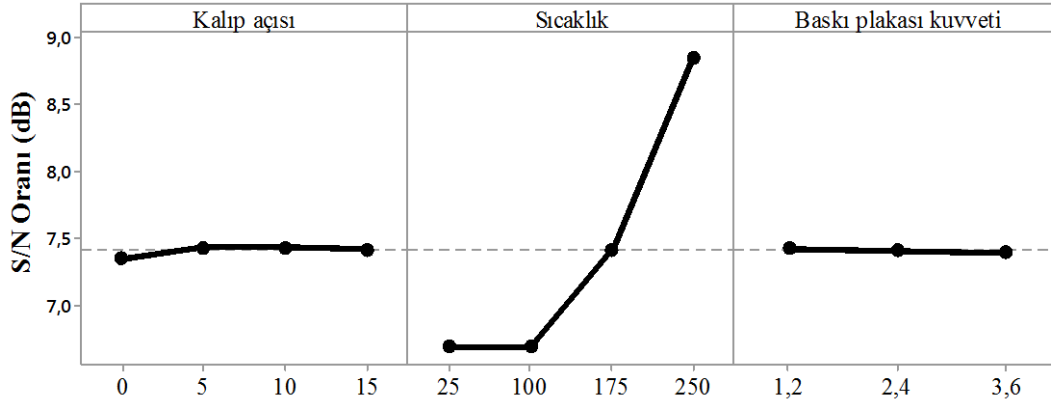
Seviyeler	Faktörler		
	Kalıp açısı α (°)	Sıcaklık T (°C)	Baskı plakası kuvveti BPK (N)
1	0	25	1200
2	5	100	2400
3	10	175	3600
4	15	250	-

Tablo 5.3’de limit çekme oranına etki eden derin çekme parametrelerinin ortalama S/N oranları verilmiştir. Burada kalıp açısı faktörünün üçüncü, sıcaklık faktörünün dördüncü ve baskı plakası kuvveti faktörünün ise birinci seviyelerinin en yüksek değere sahip oldukları görülmektedir. Limit çekme oranına etki eden faktörlerin optimum değerleri sırasıyla kalıp açısı için $\alpha=10^\circ$, şekillendirme sıcaklığı için 250°C ve baskı plakası kuvveti için 1200 N olduğu söylenebilir.

Tablo 5.3. Limit çekme oranı için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları

Sembol	Deney Parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
α	Kalıp açısı	7,356	7,442	7,443*	7,430
T	Sıcaklık	6,699	6,699	7,421	8,852*
BPK	Baskı plakası kuvveti	7,431*	7,421	7,401	-
*: Optimum seviye					

Tablo 5.3’e bağlı olarak oluşturulan Şekil 5.72’deki grafikler incelendiğinde bu durum daha net olarak görülebilmektedir. Özellikle sıcaklık grafiğinde 100°C ’den 175°C ’ye ve 175°C ’den 250°C ’ye geçerken grafiğin eğiminin oldukça dik olduğu, en yüksek değer ise 250°C olduğu görülmektedir.



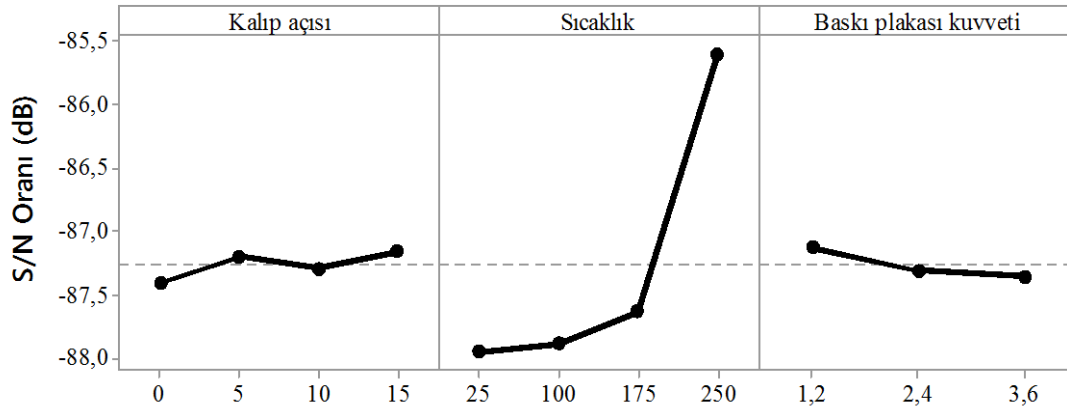
Şekil 5.72. Limit çekme oranı için S/N grafikleri

Tablo 5.4’de derin çekme faktörlerine bağlı olarak elde edilen en büyük zımba kuvveti için ortalama S/N oranları verilmiştir. Tablo değerleri incelendiğinde kalıp açısı ve sıcaklık faktörünün dördüncü, baskı plakası kuvveti faktörünün ise birinci seviyelerinin en yüksek değere sahip oldukları görülmektedir. Böylece optimum derin çekme faktör seviyeleri olarak açı için $\alpha=15^\circ$, sıcaklık için 250°C ve baskı plakası kuvveti için ise 1200 N değerleri tercih edilmelidir.

Tablo 5.4. Zımba kuvveti için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları

Sembol	Deney Parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
α	Kalıp açısı	-87,41	-87,20	-87,29	-87,16*
T	Sıcaklık	-87,95	-87,89	-87,64	-85,59*
BPK	Baskı plakası kuvveti	-87,13*	-87,31	-87,36	-
*: Optimum seviye					

Şekil 5.73 dikkate alındığında derin çekme faktör seviyelerine bağlı olarak oluşturulan ortalama S/N oranları grafikleri görülmektedir. Şekilden kalıp açısının artmasıyla birlikte $\alpha=15^\circ$ ’de S/N’nin en büyük olduğu gözlenmektedir. Sıcaklık grafiğinde ise en hızlı artış 175°C ’den 250°C ’ye geçişte olduğu görülmüştür. Baskı plakası kuvveti için ise en büyük S/N oranına 1200 N’da ulaşılmıştır.



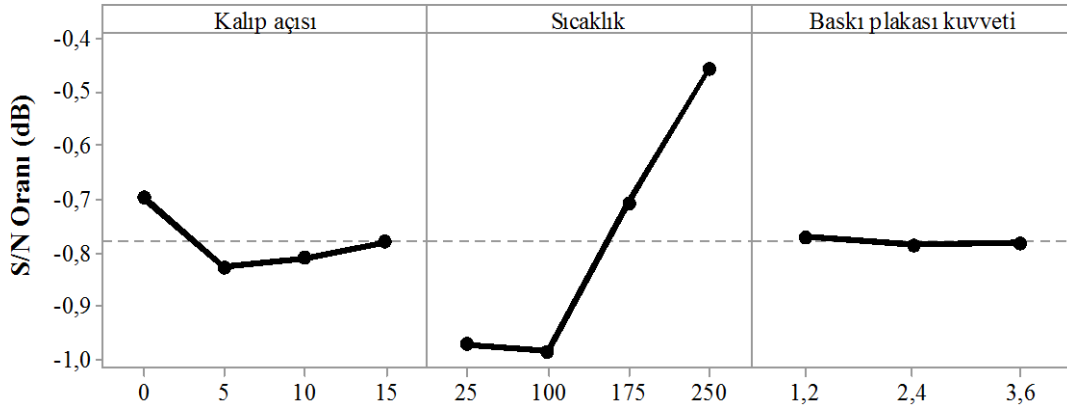
Şekil 5.73. Zımba kuvveti için S/N grafikleri

Tablo 5.5’de derin çekme faktörlerinin et kalınlığı üzerindeki optimum seviyeleri verilmiştir. Burada optimum seviyeler olarak kalıp açısının birinci, sıcaklığın dördüncü ve baskı plakası kuvvetinin ise birinci seviyesinin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla optimum işlem performansı için optimum faktör değerleri sırasıyla $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı, 250°C sıcaklık ve 1200 N baskı plakası kuvvetidir.

Tablo 5.5. Et kalınlığı için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları

Sembol	Deney Parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
α	Kalıp açısı	-0,6971*	-0,8272	-0,8100	-0,7791
T	Sıcaklık	-0,9715	-0,9838	-0,7054	-0,4528*
BPK	Baskı plakası kuvveti	-0,7702*	-0,7841	-0,7808	-
*: Optimum seviye					

Şekil 5.74 incelendiğinde açının belirli bir eğiliminin olmamasına rağmen 0° en büyük olduğu görülmektedir. Sıcaklığın artması ile özellikle 100°C ’den sonra S/N oranlarının giderek arttığı ve dolayısıyla 250°C bitiş sıcaklığında en büyük değere ulaşmıştır. Baskı plakası kuvveti grafiği ise kısmen aşağı yönlü bir değişim göstermiş, ancak 1200 N olan başlangıç değerinde en büyük olmuştur.



Şekil 5.74. Et kalınlığı için S/N grafikleri

Varyans analizinin (ANOVA) amacı, limit çekme oranı, zımba kuvveti ve et kalınlığına etkisi olan derin çekme parametrelerinin etkinlik derecelerinin saptanmasıdır. Derin çekme parametrelerinin etkisi, ANOVA'ya dayanarak istatistiksel olarak elde edilmiştir. Analizler %95 güvenilirlik aralığında (confidence interval of 95 %) gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.6–5.7 derin çekme işlemine ait ANOVA tablosu sonuçlarını ve bu tablolardaki son sütun; ilgili faktörün toplam varyasyona oranını göstermektedir. Ayrıca bu sütundan faydalanılarak faktörlerin etkinlik dereceleri yüzdelik oranlar olarak tayin edilmiştir. Bu sütunlara bakılarak hangi faktörün gerçekleştirilen işleme etkisinin ne derece etki ettiği söylenebilir. Sıcaklık % 99,62'lik oranla derin çekmede limit çekme oranına en fazla etki eden faktördür. Diğer parametrelerin etkisi neredeyse hiç yoktur.

Tablo 5.6. Limit çekme oranı için ANOVA sonuçları

Çekme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	F değeri	% Dağılım
Kalıp açısı	3	0,00447	0,001491	0,02	0,15
Sıcaklık	3	2,96266	0,987552	3831,21	99,62
Baskı plakası kuvveti	2	0,00073	0,000365	0,01	0,02
Hata	47	0,006245	0,000198	-	0,21
Toplam	55	2,974105	-	-	100

Tablo 5.7'de derin çekme parametrelerinin zımba kuvveti üzerine olan etkilerine ait ANOVA sonuçları görülmektedir. Buradaki % dağılım sütunu göz önüne alındığında sıcaklığın yukarıdakine benzer şekilde % 93,79'luk oranla derin çekmede zımba kuvvetine en fazla etki eden faktör olduğu görülmektedir. Diğer faktörlerden etkinlik derecesi

bakımından baskı plakası kuvveti %1,20'lik oranla ikinci ve kalıp açısı ise % 1,00'lik oranla üçüncü sırada yer almaktadır.

Tablo 5.7. Zımba kuvveti için ANOVA sonuçları

Çekme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	F değeri	% Dağılım
Kalıp açısı	3	3047637	1015879	0,15	1,00
Sıcaklık	3	286149607	95383202	221,42	93,79
Baskı plakası kuvveti	2	3646883	1823442	0,27	1,20
Hata	47	12234352	4078117	-	4,01
Toplam	55	305078479	-	-	100

Derin çekme parametrelerinin et kalınlığı üzerindeki etkisini ifade eden Tablo 5.8'de % dağılım sütununda diğer iki ANOVA tablosuna benzer eğilim göstermiş ancak etkinlik değeri %66,04' e düşmüştür. Diğer iki parametreden kalıp açısı % 3,30 ve baskı plakası kuvveti % 0,06 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.8. Et kalınlığı için ANOVA sonuçları

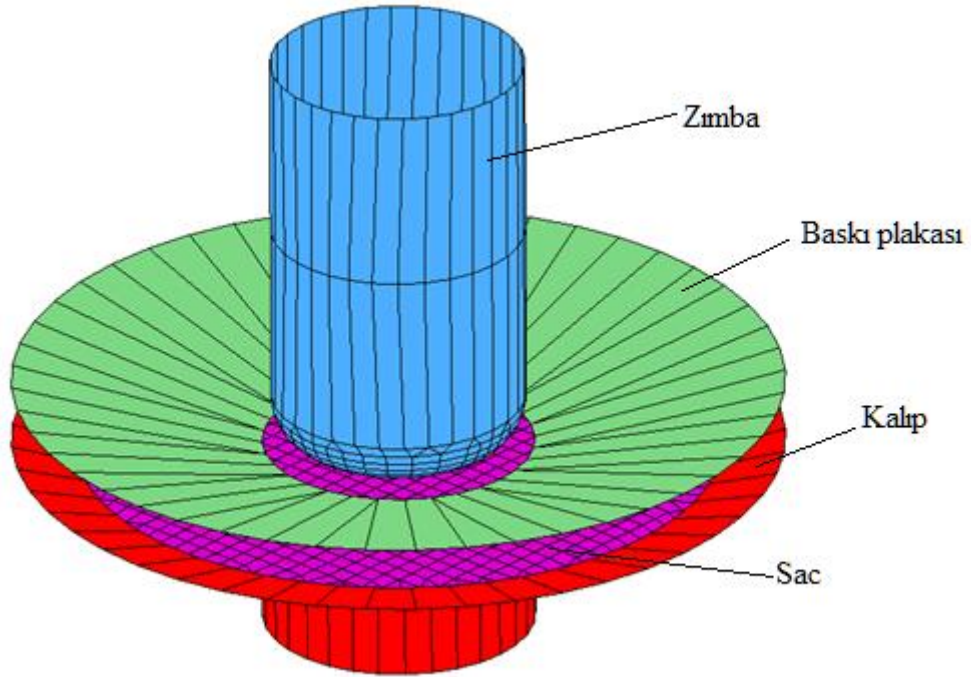
Çekme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	F değeri	% Dağılım
Kalıp açısı	3	0,001274	0,000425	0,50	3,30
Sıcaklık	3	0,02548	0,008492	28,52	66,04
Baskı plakası kuvveti	2	0,000023	0,000011	0,01	0,06
Hata	47	0,01180	0,003934	-	30,6
Toplam	55	0,038577	-	-	100

6. SONLU ELEMANLAR METODU İLE SAYISAL ANALİZ

Bu bölümde, sonlu elemanlar metodu ile açılı kalıplarla ılık derin çekilmiş silindirik kapların modellemesi yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu; otomotiv, bina, uçak, köprülerdeki ısı akışı, akışkan hareketi, manyetik akı vb. uygulamalarda karşılaşılan problemlerin çözümünü kolaylaştıran ve gerçeğe çok yakın çözümler veren bir sayısal analiz yöntemidir. Çoğunlukla günlük hayatta pratik uygulamalarda kullanılır.

Sonlu elemanlar metodunda deneylerde kullanılan kalıba ait bütün geometrik özellikler (kalıp açılı ve sıcaklık değerleri) ve yüklemeler (zımba hızı ve baskı plakası kuvveti) dikkate alınarak her bir parametre için ayrı çözümler oluşturulmuştur.

Kalıp sıcaklık değerleri, kalıp açılı ve baskı plakası açılı için eta/Dynaform programından elde edilen çözümlerin sonlu elemanlar sistemi Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Kalıp modelinin sonlu elemanlar sistemi

6.1. Limit Çekme Oranı (LÇO) Sonuçları

6.1.1. Kalıp Açısının Çekme Oranına Etkisi

Bu bölümde, 25 °C, 100 °C, 175 °C ve 250 °C sıcaklıklar için baskı plakası kuvveti (BPK) ve kalıp açısının (α) değişimi sonucu elde edilen limit çekme oranları (β) değerlendirilmiştir.

Deneyler, 25 °C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde yapıldığında, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 23697 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 23860 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 23920 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 23833 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.2. 25 °C ve 1200 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$

25 °C'de çekilen numunelerin limit çekme oranlarına kalıp açısının etkisinin oldukça sınırlı olduğu, deneysel sonuçlara benzer bir şekilde kalıp açısı ve baskı plakası kuvvetinin artması ile buruşmaların azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, artan kalıp açısı ile radyal kuvvetlerin azalması ve buna bağlı olarak da malzeme akışının kolaylaşması ile açıklanabilir.

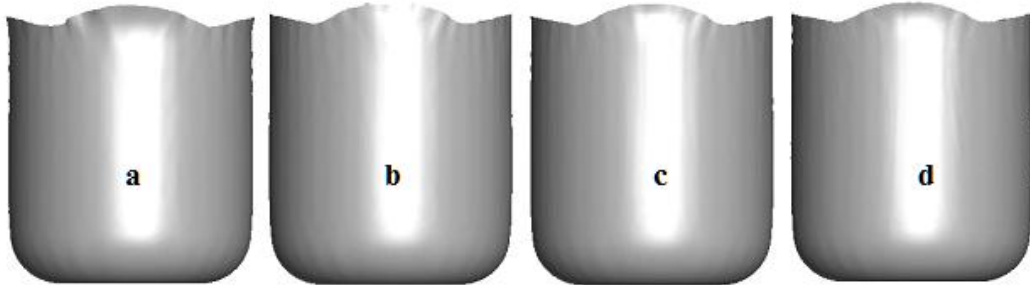
100 °C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 25876,1 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24702,5 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24851,90 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24746,7 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.3. 100°C ve 1200 N BPK'ne ait numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$

Kalıp açısının LÇO'na olan etkisinin oldukça sınırlı kaldığı görülmüştür. 100 °C'de yapılan analizlerin LÇO değerleri ve elde edilen en büyük zımba kuvvetleri deneysel sonuçları ile büyük oranda benzerlik göstermiştir.

175 °C ve 1200 N baskı plakası kuvveti için, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 21578,3 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 20543,5 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 20587,7 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 20512 N olarak elde edilmiştir.

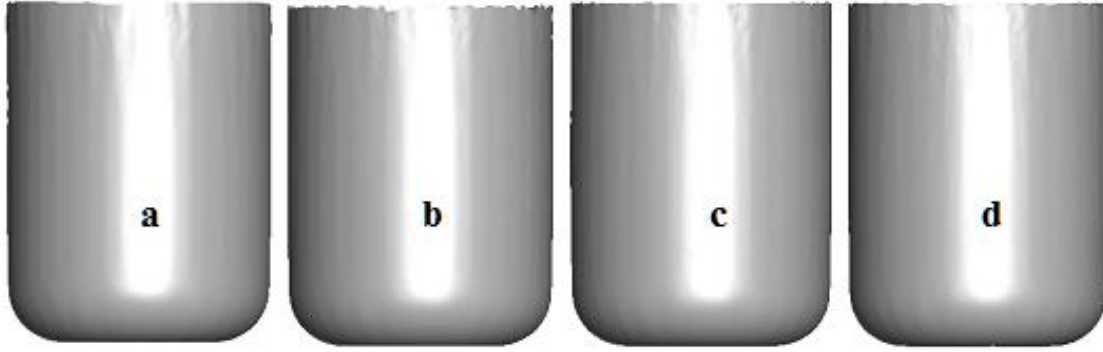


Şekil 6.4. 175 °C ve 1200 N BPK sonucunda elde edilen numuneler a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$

Şekil 6.4'de, 175 °C ve 1200 N, BPK şartlarında farklı kalıp açılarında sayısal analiz sonucunda elde edilen çekme numuneler verilmiştir. Farklı kalıp açıları sonucunda elde edilen numunelerin LÇO'nı aynı ve $\beta=2,35$ olarak elde edilmiştir. Yine zımba kuvveti sonuçlarına bakıldığında da en büyük zımba kuvveti açısız kalıplarla yapılan analizler sonucunda çıkmıştır.

250 °C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde, kalıp yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,53$ ve en büyük zımba kuvveti 19050,7 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,53$ ve en büyük zımba kuvveti 19028,5 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=10^\circ$

için limit çekme oranı $\beta=2,53$ ve en büyük zımba kuvveti 18964,6 N; kalıp yüzey açısı $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,53$ ve en büyük zımba kuvveti 18946,9 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.5. 250 °C ve 1200 N BPK sonucunda elde edilen numuneler **a)** $\alpha=0^\circ$ **b)** $\alpha=5^\circ$ **c)** $\alpha=10^\circ$ **d)** $\alpha=15^\circ$

Şekil 6.5’de, ise 250 C° sıcaklıkta analiz yapılarak elde edilen kaplar verilmiştir. Bu sonuçlar, deneysel sonuçlarla mukayese edildiğinde önemli bir fark olduğu ortaya çıkmaktadır. Deneysel sonuçlarda $\beta=2,80$ oranına ulaşılabilmişken analiz sonuçlarında ancak $\beta=2,53$ oranına ulaşılabilmıştır. Bunun en büyük nedeni, zımba ve sacın birbiri ile temas noktasının soğutulması işleminin analiz ortamında gerçekleştirilememiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, analiz programından elde edilen limit çekme oranı, en büyük zımba kuvveti, oluşan buruşmalar ve kulaklanmaların deneysel çalışma sonuçları ile büyük oranda benzerlik gösterdiği ve analiz programından elde edilen sonuçların teorik olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

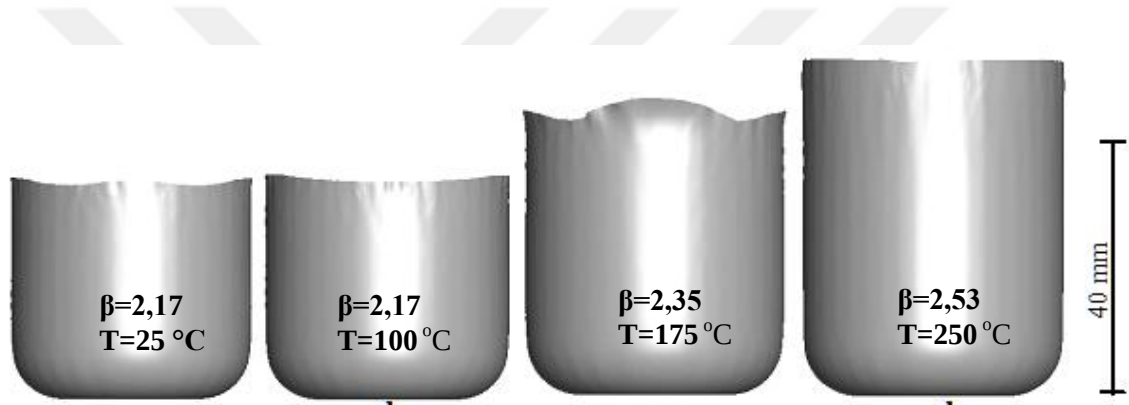
6.1.2. Sıcaklığın Çekme Oranı Üzerine Etkisi

Son yıllarda, hafif ve dayanıklı malzemelerin birçok alanda kullanımları giderek artmaktadır. Ancak bu tür alaşımların oda sıcaklığında şekillendirilebilmeleri, mikroyapıları nedeniyle çelik sac malzemelere göre daha düşüktür. Bu alaşımların şekillendirilmelerinde sıcaklığın önemli bir etkisi vardır. Sıcaklığın çekme oranı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 4 farklı sıcaklıkta analizler yapılmıştır.

Deneyler, $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde yapıldığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 23697N; 100 °C için limit çekme

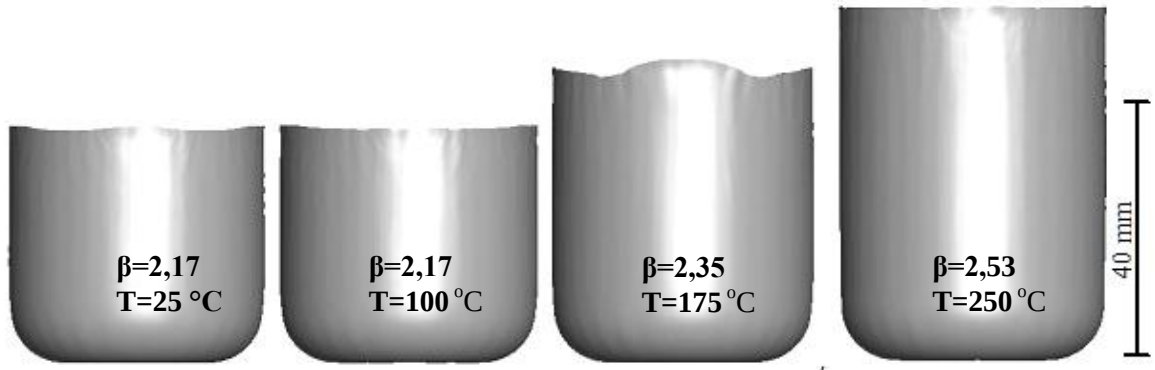
oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 25876,1 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 21578,3 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,53$ ve en büyük zımba kuvveti 19050,7 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.6'da 1200 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ kalıp için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak analiz sonuçlarından elde edilen kaplar verilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça çekme oranı da artmış, en fazla $\beta=2,53$ olarak tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen kaplarda da, deneysel çalışmalarda olduğu gibi malzeme akışının düzensiz olmasının ve baskı plakası kuvvetinin yetersiz olmasından dolayı kap üst kısımlarında buruşmaların meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 6.6. 1200 N BPK ve $\alpha=0^\circ$ deneylerinden elde edilen numuneler

Deneyler, $\alpha=10^\circ$ kalıp açısı ve 3600 N baskı plakası kuvvetinde yapıldığında, 25 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 24200 N; 100 °C için limit çekme oranı $\beta=2,17$ ve en büyük zımba kuvveti 25124,3 N; 175 °C için limit çekme oranı $\beta=2,35$ ve en büyük zımba kuvveti 20805,2 N; 250 °C için limit çekme oranı $\beta=2,53$ ve en büyük zımba kuvveti 19139,4 N olarak elde edilmiştir. 3600 N BPK ve $\alpha=10^\circ$ kalıp açısı için şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak analiz sonuçlarından elde edilen kaplar Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7. 3600 N BPK ve $\alpha=10^{\circ}$ deneylerinden elde edilen numuneler

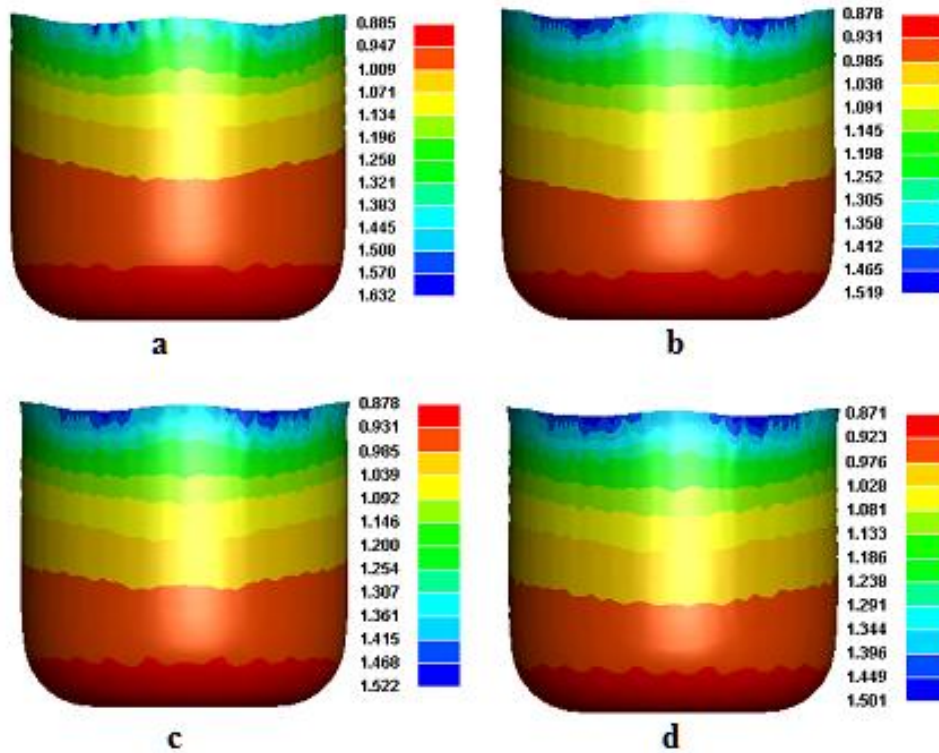
Şekil 6.6'da, $\alpha=0^{\circ}$ kalıp açısı ve 1200 N baskı plakası kuvveti için en düşük LÇO'nı $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $\beta=2,17$ ve zımba kuvveti 23697 N, en büyük LÇO'nı $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $\beta=2,53$ ve zımba kuvveti 19050,7 N; Şekil 6.7'de, $\alpha=10^{\circ}$ kalıp açısı ve 3600 N baskı plakası kuvveti için en düşük LÇO'nı $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $\beta=2,17$ ve zımba kuvveti 24200 N, en büyük LÇO'nı $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $\beta=2,53$ ve zımba kuvveti 20805,2 N olarak elde edilmiştir. Şekillerden, sıcaklık arttıkça çekme oranının arttığı, zımba kuvvetinin de düştüğü görülmektedir. Tüm bu sonuçlar derin çekme işleminde kalıp tasarımının ve bu tasarımın analiz ortamına aktarılmasının ve malzeme özelliklerinin eksiksiz tanımlanmasının ne kadar önemli olduğunu bir kez daha göstermiştir.

6.2. Et Kalınlığı Ölçüm Sonuçları

Derin çekme işleminde et kalınlığının kontrolü, ürün kalitesini doğrudan etkilediği gibi, üretilen parçanın ölçü tamlığı açısından da son derece önemlidir.

Derin çekme işlemleri sırasında şekillendirilen iş parçası üzerinde birçok gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmelerden dolayı iş parçasının et kalınlığı değişmektedir. Şekillendirme sıcaklığı, kalıp açısı, BPK ve zımba/kalıp radyüsü gibi parametrelerin et kalınlığı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Yapılan analizlerde çekilen kabın taban kısmında et kalınlığı değişiminin çok olmadığı, zımba radyüsü ve bu bölgeye yakın kısımlarda incelmelerin olduğu, kap duvarının üst kısmında ise kalınlaşma meydana geldiği belirlenmiştir.

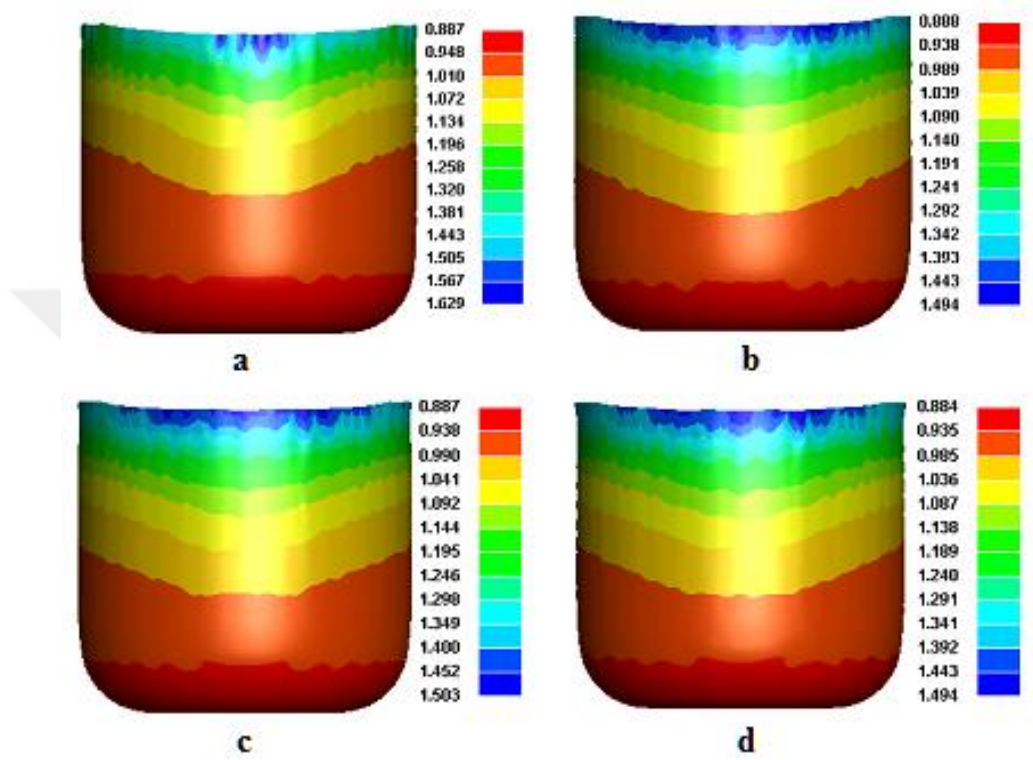
6.2.1. Kalıp Açısının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi



Şekil 6.8. $\beta=2,17$ için $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi
a) $\alpha=0^{\circ}$ b) $\alpha=5^{\circ}$ c) $\alpha=10^{\circ}$ d) $\alpha=15^{\circ}$

Şekil 6.8'de $\beta=2,17$ için $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α 'nın kaplardaki et kalınlığı üzerindeki etkisinin analiz sonuçları verilmiştir. Analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi en kritik bölge kabın radyüs bölgesidir. Kabın kritik

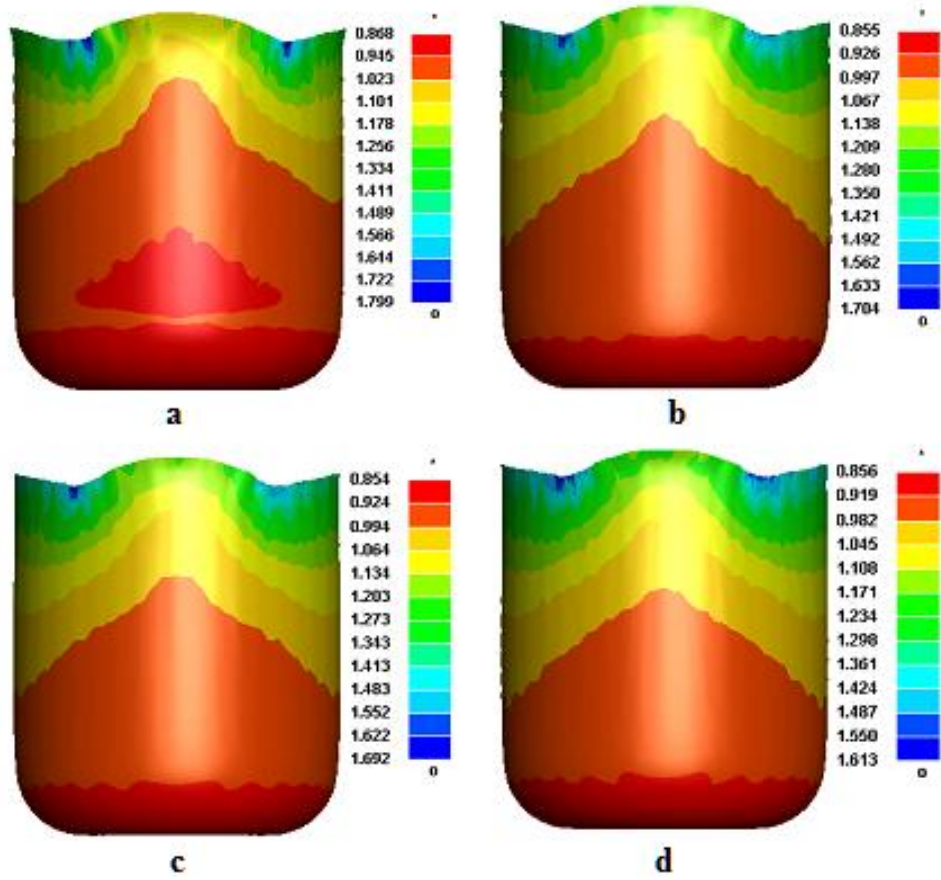
bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur. Kalıp açısı arttıkça kalınlık dağılımının daha homojen hale geldiği, kap üst bölgesine doğru kalınlığın azaldığı görülmektedir. Kap tabanındaki kalınlık değişiminin 0,894-0,932 mm aralığında olduğu görülmüştür.



Şekil 6.9. $\beta=2,17$ için 100 °C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$

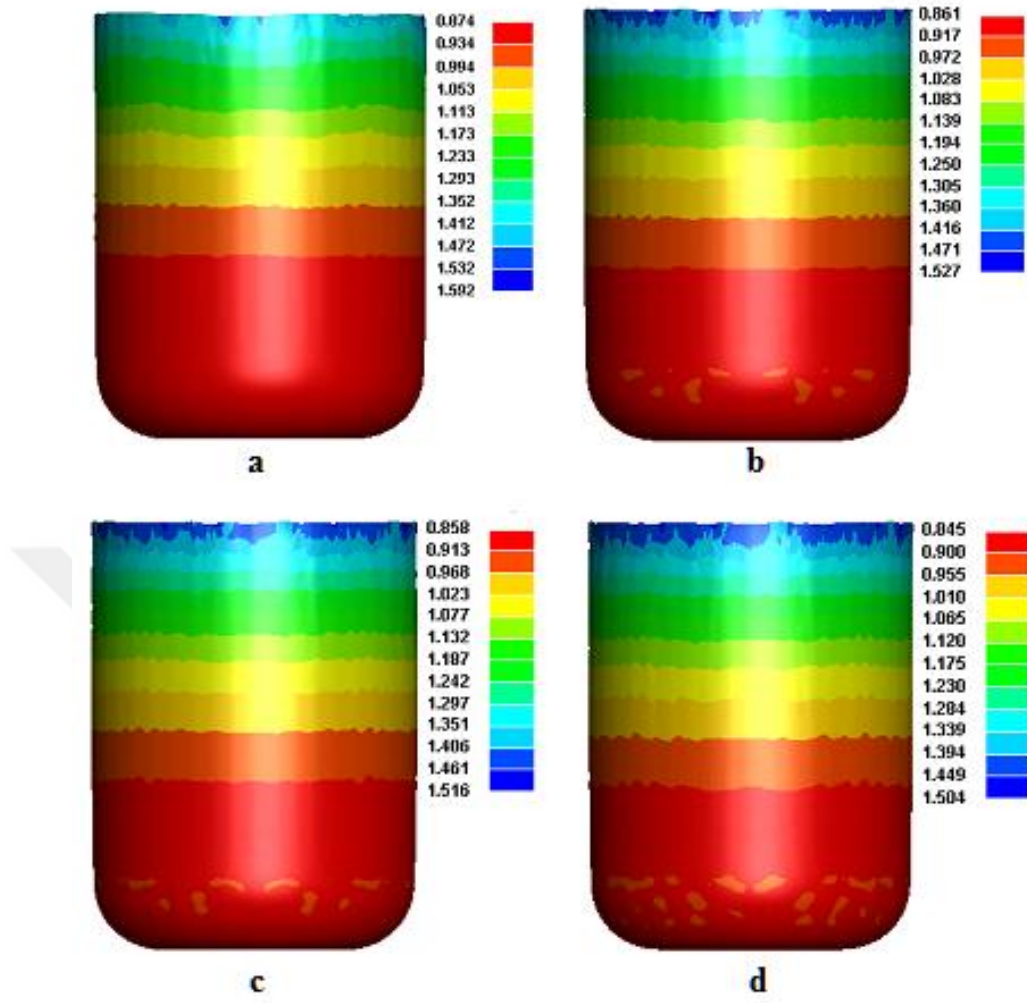
Şekil 6.9'da 100 °C, $\beta=2,17$ ve 1200 N baskı plakası kuvveti için α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisinin analiz sonuçları verilmiştir. Kritik bölgedeki et kalınlığı sırası ile 0,887, 0,888, 0,887 ve 0,884 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı ise sırası ile 1,629, 1,494, 1,503 ve 1,494 mm'dir. Kabın alt tabanından ağız kısmına doğru çıktıkça bir kalınlık artışının olduğu görülmektedir.

Şekil 6,10'da 175 °C, $\beta=2,35$ ve 1200 N baskı plakası kuvveti için α 'nın et kalınlığı değişimine etkisi verilmiştir. Şekilden, en önemli kalınlık değişiminin $\alpha=0^\circ$ kalıpta olduğu belirlenmiştir. Bu durum açısız kalıpla elde edilen numunelerin ağız bölgesinde malzeme akışının zorlaşması sonucu yığılmaların olmasından kaynaklanmaktadır. En fazla incelmelerin çekme gerilmelerinin arttığı zımba radyüsü bölgesinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.10. $\beta=2,35$ için 175°C ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$

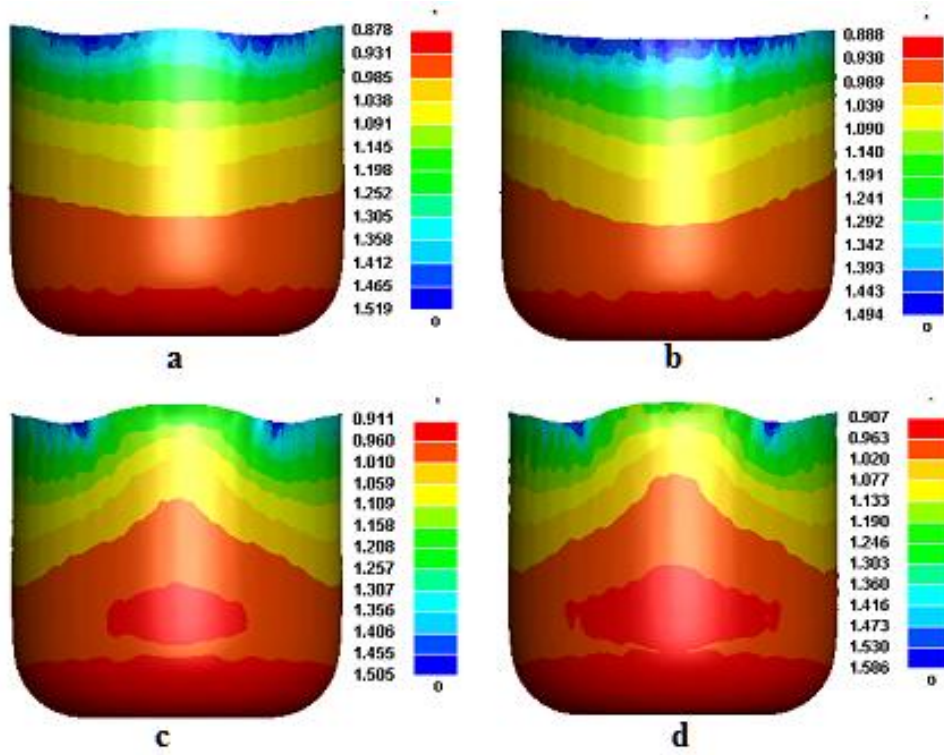
Şekil 6.11'de 250°C , $\beta=2,53$ LÇÖ ve 1200 N baskı plakası kuvveti değerlerinde α 'nın et kalınlığı değişimine etkisi verilmiştir. Kap tabanının $0,931\text{ mm}$ 'ye düştüğü ve değişimin %7 ile sınırlı kaldığı belirlenmiştir. En kritik bölgenin radyüs bölgesi olduğu, $\alpha=0^\circ$ 'de elde edilen kaptaki en küçük kalınlık değeri $0,868\text{ mm}$ iken, $\alpha=5^\circ$ için bu değer $0,855\text{ mm}$, $\alpha=10^\circ$ için $0,854\text{ mm}$ değerinde ve $\alpha=15^\circ$ ise $0,856\text{ mm}$ olduğu tespit edilmiştir. Yine kalıp açısı arttıkça kap ağız bölgesine doğru kalınlığın giderek azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.11. $\beta=2,53$ için $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 1200 N baskı plakası kuvvetinde α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi a) $\alpha=0^{\circ}$ b) $\alpha=5^{\circ}$ c) $\alpha=10^{\circ}$ d) $\alpha=15^{\circ}$

6.2.2. Şekillendirme Sıcaklığının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

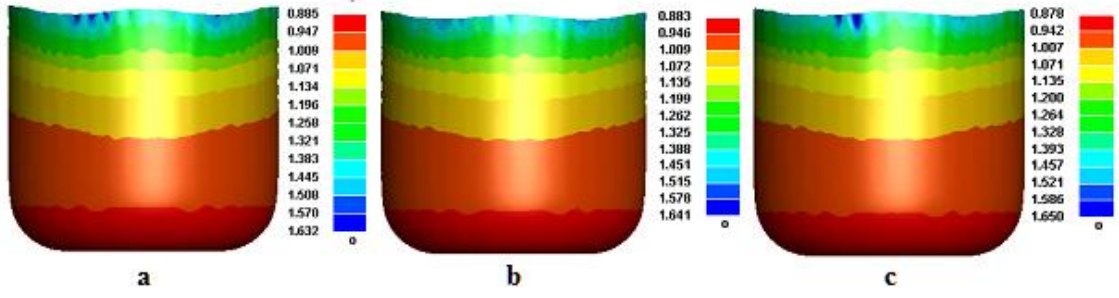
Şekil 6.12'de, kalıp açısı $\alpha=5^{\circ}$ ve 1200 N baskı plakası kuvveti için şekillendirme sıcaklığının et kalınlığı üzerindeki etkisinin analiz sonuçları verilmiştir. Analiz sonuçlarından, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık için kap merkezindeki kalınlık $0,914\text{ mm}$ iken şekillendirme sıcaklığı $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkarıldığında kap merkezindeki kalınlık $0,968\text{ mm}$ olarak ölçülmüştür. Bütün sıcaklık değerleri için en büyük incelmeyi kap köşelerinde veya hemen üzerinde olduğu görülmektedir. $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $0,878\text{ mm}$ 'ye düşen kalınlık değeri, $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $0,907\text{ mm}$ 'ye düşmüştür. Kap ağız kısımlarına doğru çıkıldıkça kalınlık değişiminin bütün sıcaklık değerleri için çok değişmediği görülmektedir. Sonuç olarak sıcaklığın et kalınlığını oldukça etkileyen önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir.



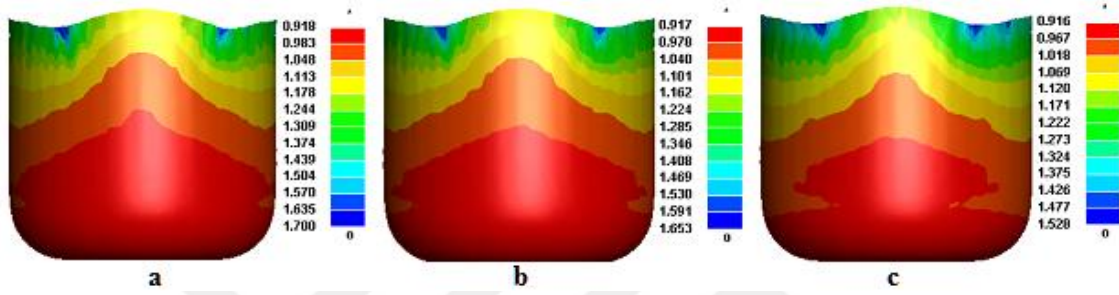
Şekil 6.12. $\beta=2,17$ için $\alpha=5^\circ$ kalıp açısı ve 1200 N baskı plakası kuvveti şartlarında şekillendirme sıcaklığının et kalınlığı üzerindeki etkisi a)25°C b)100°C c)175°C d)250°C

6.2.3. Baskı Plakası Kuvvetinin(BPK) Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Şekil 6.13’de 25 °C, R=8 mm sabit $\beta=2,17$ ve $\alpha=0^\circ$ şartlarında BPK’nın et kalınlığı üzerindeki etkisinin değişimi görülmektedir. Oda sıcaklığında yapılan analiz sonuçlarında baskı plakası kuvvetinin artması ile et kalınlığında önemli bir değişimin olmadığı görülmektedir. Şekil 6.14’de ise 250 °C’de yapılan analiz sonuçları verilmiştir. Burada baskı plakası kuvvetinin artması ile kap ağzına doğru kalınlığın önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bu durum, sıcaklığında etkisi ile kalıp açısının malzeme akışını kolaylaştırması ve baskı kuvvetindeki artışla birlikte malzeme yığılmasını önlemesi ile açıklanabilir.

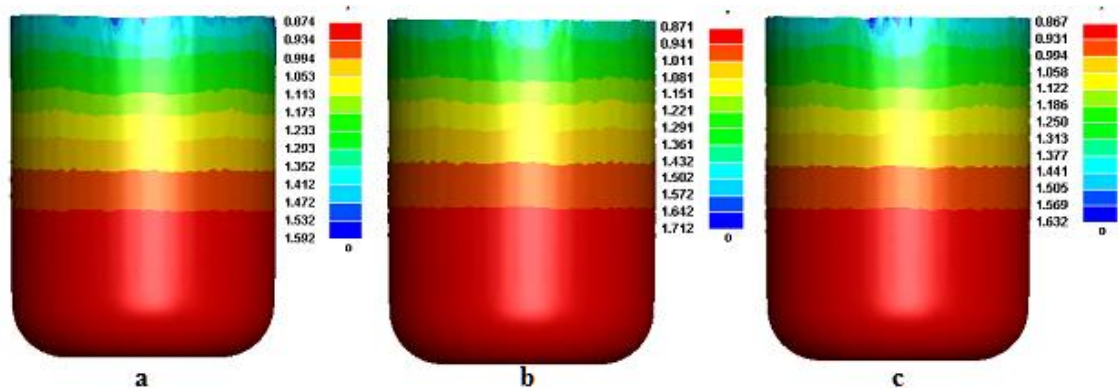


Şekil 6.13. $\beta=2,17$ için BPK'nin sıcaklığa bağlı olarak et kalınlığı üzerindeki etkisi ($T=25^\circ\text{C}$, $\alpha=0^\circ$)
a)1200 N b)2400 N c)3600 N



Şekil 6.14. $\beta=2,17$ için BPK'nin sıcaklığa bağlı olarak et kalınlığı üzerindeki etkisi ($T=250^\circ\text{C}$, $\alpha=0^\circ$)
a)1200 N b)2400 N c)3600 N

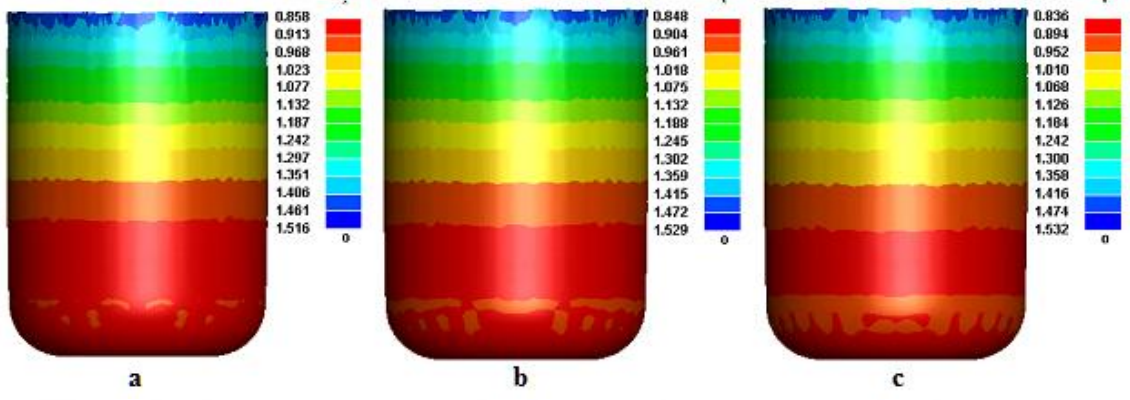
Şekil 6.15’de 250°C , $\alpha=0^\circ$, $\beta=2,53$ şartlarında yapılan deneylerde üç farklı baskı plakası kuvveti için et kalınlığı dağılımı birlikte verilmiştir. Kaplardaki en düşük et kalınlığı sırası ile 1200 N için 0,874 mm, 2400 N için 0,871 mm ve 3600 N için 0,867 mm olarak bulunmuştur. Kap radyüs bölgesinden kap ağzına doğru çıkıldıkça bir kalınlık artışı söz konusudur.



Şekil 6.15. $\beta=2,53$ için BPK'nin, 250°C ve $\alpha=0^\circ$ 'ye bağlı olarak et kalınlığı üzerindeki etkisi a)1200 N
b)2400 N c)3600 N

Şekil 6.16’da ise 250°C , $\alpha=10^\circ$, $\beta=2,53$ şartlarında yapılan deneylerde BPK'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi $\alpha=10^\circ$ açıya sahip

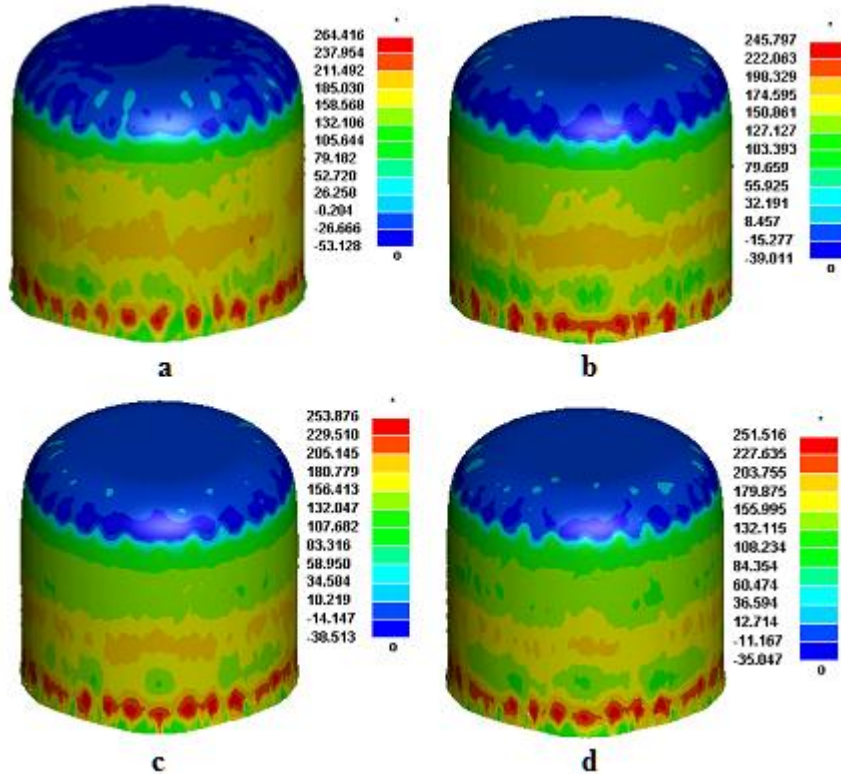
kalıpla elde edilen kaplardaki en düşük kalınlık 3600 N baskı plakası kuvvetinde 0,836 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 6.16. $\beta=2,53$ için BPK'nin, 250°C ve $\alpha=10^{\circ}$ 'ye bağlı olarak et kalınlığı üzerindeki etkisi **a)**1200 N **b)**2400 N **c)**3600 N

6.3. Kaplardaki Gerilme Dağılımı Sonuçları

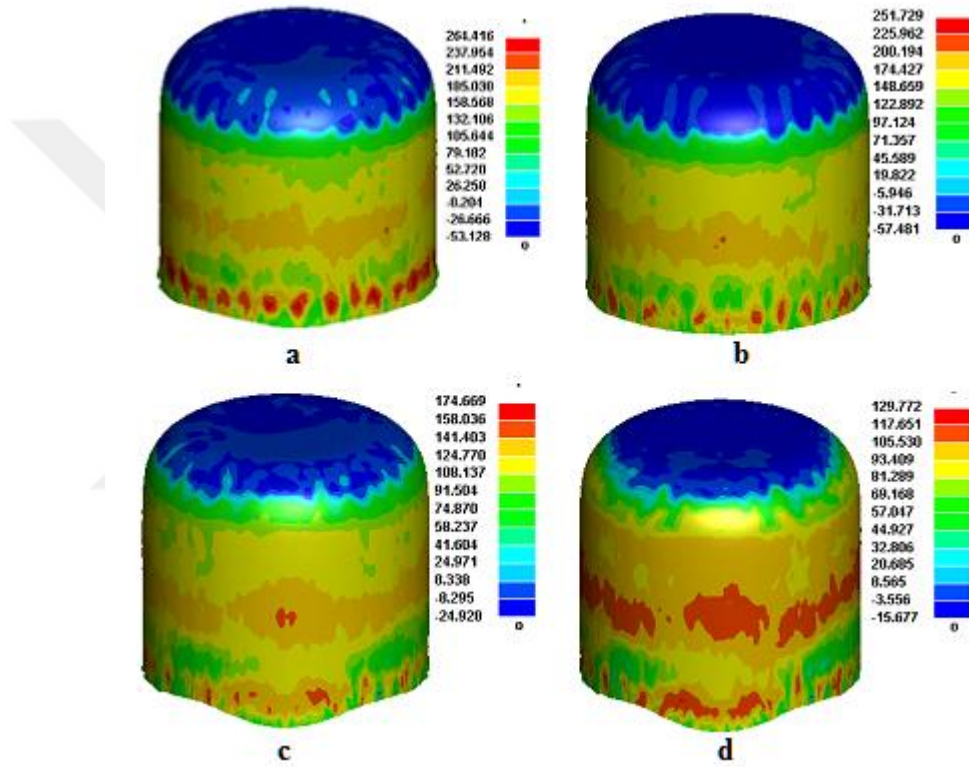
Şekil 6.17’de, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen numunelerde kalıp açısının gerilme dağılımına etkisi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi en yüksek gerilme 264,416 MPa ile $\alpha=0^\circ$ kalıp ve en düşük gerilme ise 245,797 MPa ile $\alpha=5^\circ$ kalıpla elde edilen numunelerde elde edilmiştir. En yüksek gerilmeler elde edilen bütün numunelerin kap ağzına yakın bölgelerinde oluşmaktadır. Bu durum bu bölgedeki malzeme yığılmaları ile açıklanabilir. Bu malzeme yığılması doğrudan kaptaki teğetsel gerilmeleri etkiler. Bu teğetsel gerilmeler ise geri yaylanma, şekillendirilen parçaların ömrü, tokluğu, çatlak oluşum direnci, manyetik özellikleri ve korozyon direnci üzerinde önemli bir rol oynar[3,12]. Deneysel ve analiz çalışmalarında en büyük kalınlık değişimleri açısız kalıplarda elde edilmiştir. Kalıp açısının malzeme akışını kolaylaştırması neticesinde kaptaki kalınlık dağılımına olumlu bir etkisinin olduğu ve buna bağlı olarak ta gerilme dağılımının düştüğü görülmüştür.



Şekil 6.17. 3600 N ve 25°C sıcaklık şartlarında kalıp açısının gerilme dağılımına etkisi(MPa) a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=5^\circ$ c) $\alpha=10^\circ$ d) $\alpha=15^\circ$

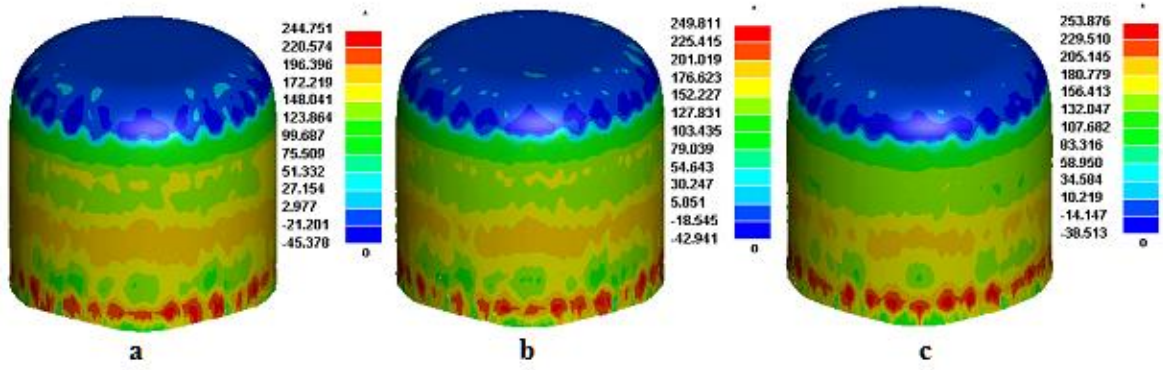
Analizlerle elde edilen numunelerde meydana gelen gerilme dağılımı üzerine şekillendirme sıcaklığının etkisi Şekil 6.18’de verilmiştir. Analizler $\alpha=0^\circ$ kalıp açısı ve

3600 N baskı plakası kuvvetinde yapılmışlardır. Analiz sonuçlarında, en büyük gerilme 25 °C’de 264,416 MPa, en düşük gerilme de 250 °C’de 129,772 MPa olarak elde edilmiştir. Bu azalmanın sıcaklık etkisi ile malzeme mukavemetinin ve deformasyon sertleşmesinin önemli ölçüde düşmesi ve buna bağlı olarak da malzeme akışının kolaylaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak sıcaklığın şekillendirilen kaptaki gerilme dağılımını etkileyen önemli bir parametre olduğu söylenebilir. Benzer sonuçlar H. Laurent ve arkadaşları tarafından da elde edilmiştir.



Şekil 6.18. 3600 N ve $\alpha=0^\circ$ şartlarında sıcaklığın gerilme dağılımına etkisi(MPa) **a)**25°C **b)**100°C **c)**175°C **d)**250°C

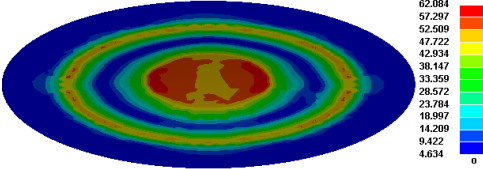
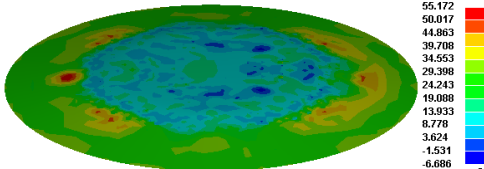
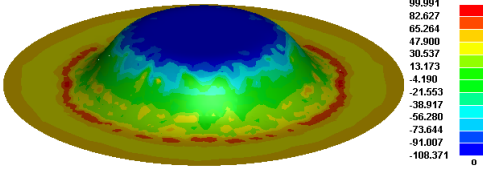
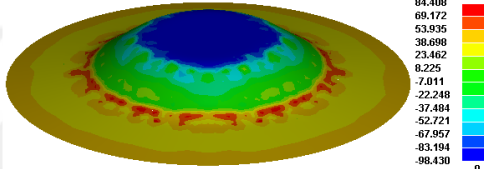
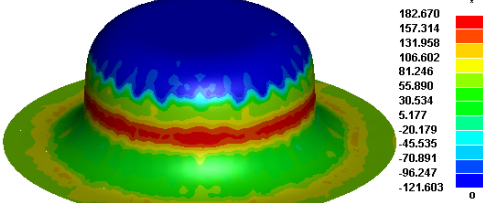
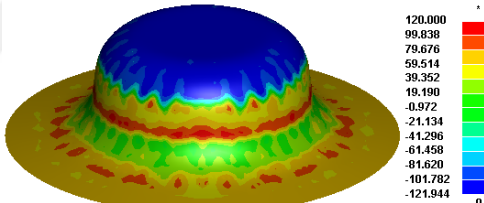
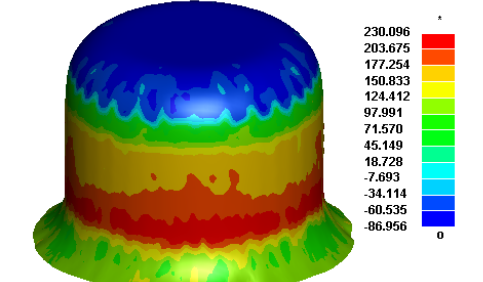
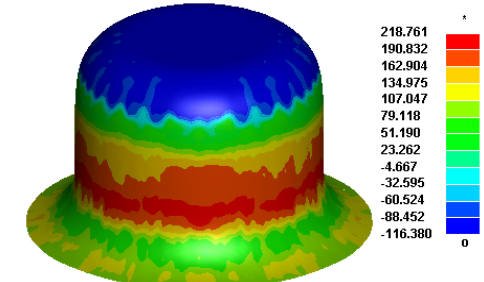
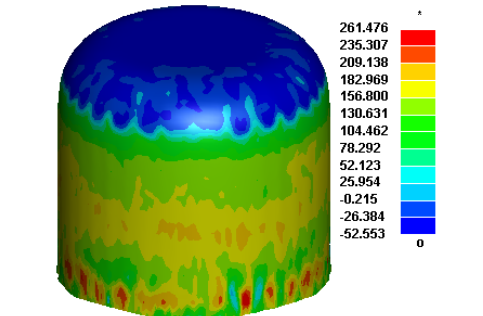
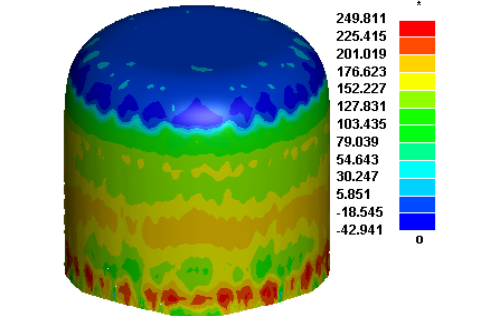
Baskı plakası kuvvetinin elde edilen numunelerde meydana gelen gerilme dağılımına etkisi Şekil 6.19’da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde baskı plakası kuvvetinin etkisinin giderek arttığı görülmektedir. Malzeme üzerine uygulanan baskı plakası kuvveti zımba kuvvetini de arttırdığından deformasyon sertleşmesindeki artış nedeni ile kaptaki gerilme de artmaktadır. 25 °C ve $\alpha=10^\circ$ ’de yapılan analizlerde baskı plakası kuvvetleri ve gerilmeler sırası ile; 1200 N’da 244,751 MPa, 2400 N’da 249,811 MPa ve 3600 N’da ise 253,876 MPa olarak elde edilmişlerdir.



Şekil 6.19. 25°C ve $\alpha=10^\circ$ şartlarında baskı plakası kuvvetinin gerilme dağılımına etkisi(MPa) **a)**1200 N **b)**2400 N **c)**3600 N

Zımba kurs mesafesine bağlı olarak sayısal analiz metodu ile elde edilen numunelerde meydana gelen gerilmelerin değişimi Tablo 6.1’de verilmiştir. Kurs boyunun artması ile birlikte kalıp içerisine çekilen malzeme miktarının artmasından dolayı kap kenarlarında meydana gelen gerilmelerin kurs boyuna bağlı olarak giderek arttığı görülmüştür. Malzeme miktarındaki artış, yığılmalara ve dolayısıyla daha fazla çekme kuvvetine yol açmaktadır. 25°C ve 2400 N baskı plakası kuvvetinde $\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$ için zımba kurs mesafesi değişiminde oluşan gerilme dağılımları karşılaştırıldığında, kurs mesafesinin her durumu için $\alpha=10^\circ$ ’lik kalıpla elde edilen numunelerde meydana gelen gerilme değerlerinin $\alpha=0^\circ$ ’lik kalıpla elde edilen numunelerde meydana gelen gerilme değerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, kalıp açısının kaplardaki gerilmeleri azalttığı söylenebilir.

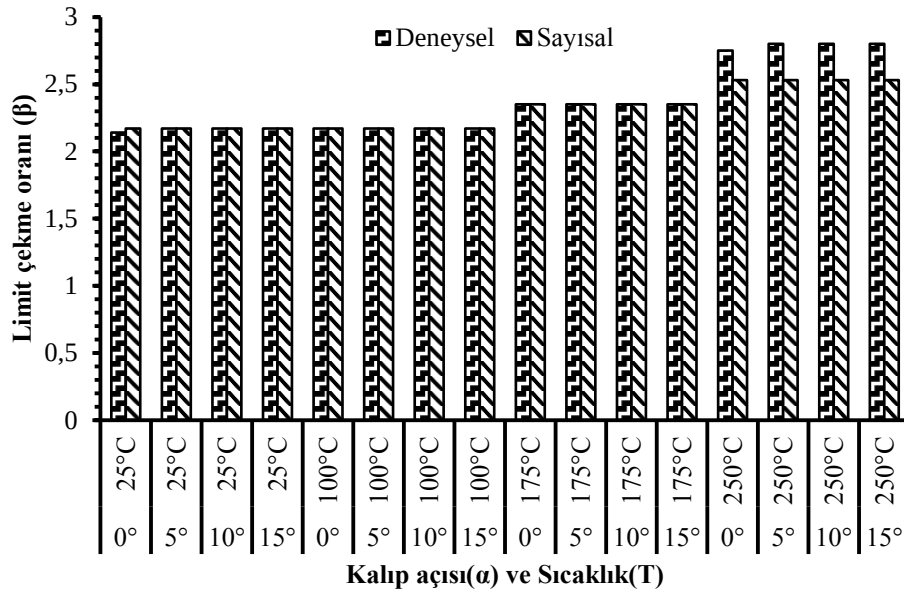
Tablo 6.1. Zimba kurs mesafesi boyunca gerilme dağılımı (BPK=2400 N ve T=25°C)

Zimba kurs mesafesi (mm)	Kalıp açısı	
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=10^\circ$
2	 62.084 57.297 52.509 47.722 42.934 38.147 33.359 28.572 23.784 18.997 14.209 9.422 4.634 0	 55.172 50.017 44.863 39.708 34.553 29.398 24.243 19.088 13.933 8.778 3.624 -1.531 -6.686 0
12	 99.991 82.627 65.264 47.900 30.537 13.173 -4.190 -21.553 -38.917 -56.280 -73.644 -91.007 -108.371 0	 84.408 69.172 53.935 38.698 23.462 8.225 -7.011 -22.248 -37.484 -52.721 -67.957 -83.194 -98.430 0
24	 182.670 157.314 131.958 106.602 81.246 55.890 30.534 5.177 -20.179 -45.535 -70.891 -96.247 -121.603 0	 120.000 99.838 79.676 59.514 39.352 19.190 -0.972 -21.134 -41.296 -61.458 -81.620 -101.782 -121.944 0
36	 230.096 203.675 177.254 150.833 124.412 97.991 71.570 45.149 18.728 -7.693 -34.114 -60.535 -86.956 0	 218.761 190.832 162.904 134.975 107.047 79.118 51.190 23.262 -4.667 -32.595 -60.524 -88.452 -116.380 0
50	 261.476 235.307 209.138 182.969 156.800 130.631 104.462 78.292 52.123 25.954 -0.215 -26.384 -52.553 0	 249.811 225.415 201.019 176.623 152.227 127.831 103.435 79.039 54.643 30.247 5.851 -18.545 -42.941 0

6.4. Sayısal Analiz Sonuçlarının Deneysel Çalışma Sonuçları ile Karşılaştırılması

Bu bölümde açılı derin çekme kalıpları için sayısal analiz programından ve deneysel çalışma sonucundan elde edilen çekme oranlarının ve zımba kuvvetlerinin karşılaştırmaları her bir kaskı plakası kuvveti için grafikler halinde verilmiştir.

Şekil 6.20’de BPK=1200 N için sayısal olarak elde edilmiş çekme oranlarının deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.

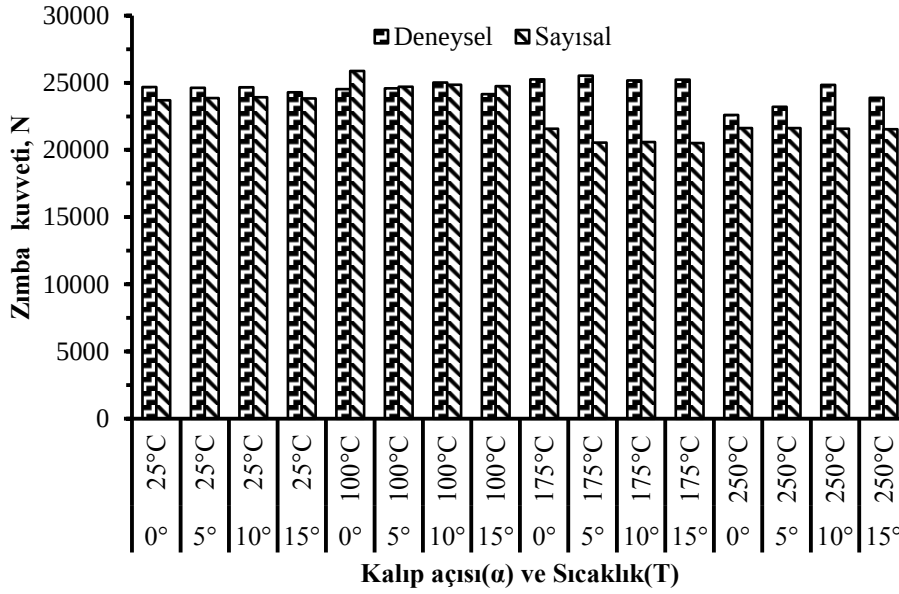


Şekil 6.20. 1200 N baskı plakası kuvvetinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen limit çekme oranlarının değişimi

Şekil 6.20’de görüldüğü gibi sayısal analizde en düşük limit çekme oranı 25°C ve 100°C’de bütün açılar için $\beta=2,17$ ve en büyük limit çekme oranı ise 250°C’de bütün kalıp açıları için $\beta=2,53$ olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yakın olduğu, en büyük fark 250°C’de %10,67 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar α ’nın artışının sayısal analizde limit çekme oranına bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Baskı plakası kuvveti 2400 N ve 3600 N olduğunda da sayısal olarak 1200 N baskı plakası kuvvetinde elde edilen limit çekme oranının değişmediği tespit edilmiştir.

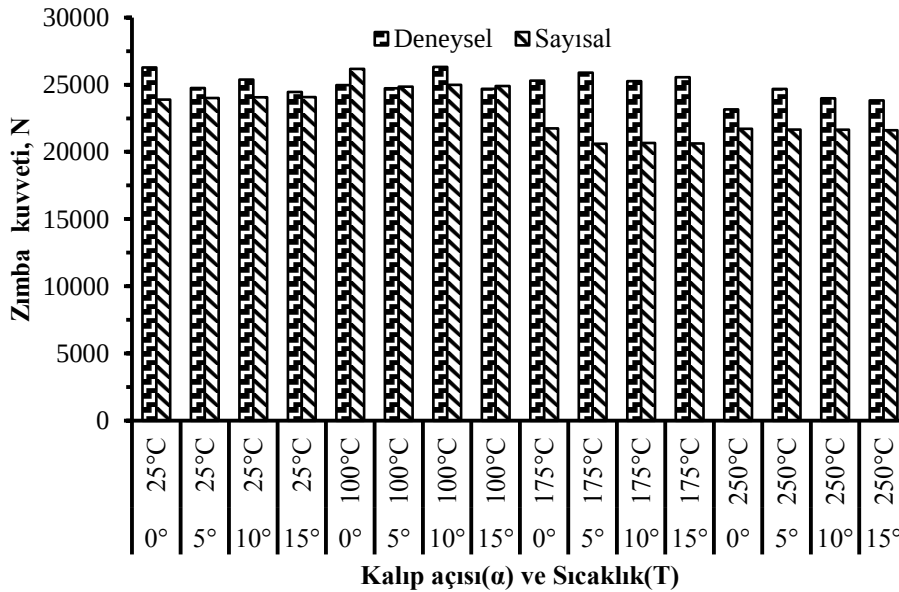
Şekil 6.21’de BPK=1200 N için sayısal analiz sonucu elde edilmiş zımba kuvvetlerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.21’de görüldüğü gibi sayısal analiz sonucu en düşük zımba kuvveti $\alpha=5^\circ$, 175°C için 20543,5 N, en büyük zımba kuvveti ise $\alpha=0^\circ$, 100°C için 25876,1 N olarak elde edilmiştir. Sayısal

analiz ve deneysel çalışma sonuçlarının bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında zaman en büyük fark $\alpha=5^\circ$, 175°C için %19,51, en az fark ise $\alpha=5^\circ$, 100°C için %0,48 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.21. 1200 N baskı plakası kuvvetinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen zımba kuvvetlerinin değişimi

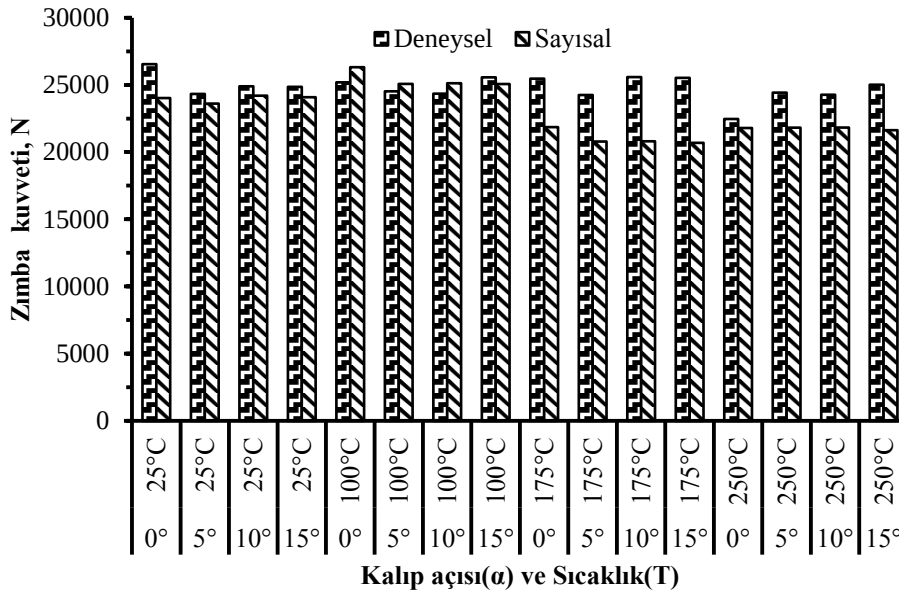
Şekil 6.22’de BPK=2400 N için sayısal analiz sonucu elde edilmiş zımba kuvvetlerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.22. 2400 N baskı plakası kuvvetinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen zımba kuvvetlerinin değişimi

Şekil 6.22’de görüldüğü gibi sayısal analiz sonucu en düşük zımba kuvveti $\alpha=5^\circ$, 175°C için 20613,2 N, en büyük zımba kuvveti ise $\alpha=0^\circ$, 100°C için 26183 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman en büyük fark $\alpha=10^\circ$, 175°C için %18,20, en az fark ise $\alpha=15^\circ$, 100°C için % 0,008 olarak elde edilmiştir.

Şekil 6.23’de BPK=3600 N için sayısal analiz sonucu elde edilmiş zımba kuvvetlerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.23. 3600 N baskı plakası kuvvetinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen zımba kuvvetlerinin değişimi

Şekil 6.23’den görüldüğü gibi sayısal analiz sonucu en düşük zımba kuvveti $\alpha=15^\circ$, 175°C için 20691,7 N, en büyük zımba kuvveti ise $\alpha=0^\circ$, 100°C için 26319,6 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman en büyük fark $\alpha=10^\circ$, 175°C için % 18,68, en az fark ise $\alpha=15^\circ$, 100°C için % 1,94 olarak elde edilmiştir.

Sayısal sonuçlar, analiz ortamındaki deney tasarımının iyi yapılması, malzeme özelliklerinin iyi tanımlanması ve gerçek deney şartlarının analiz ortamına yakın olarak aktarılmasının elde edilen sonuçları önemli derecede etkilediğini göstermiştir. Yapılan deneysel ve sayısal analiz sonuçları sıcaklık arttıkça zımba kuvvetin düştüğünü limit çekme oranının ise arttığını göstermiştir.

7. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Son yıllarda, hafif ve dayanıklı malzemelerin kullanımları birçok alanda giderek artmaktadır. Al-Mg alaşımları sahip oldukları yüksek süneklik ve dayanıklılık, iyi kaynak edilebilirlik ve düşük yoğunluk gibi özelliklerinden dolayı endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmada, ılık derin çekme yönteminde limit çekme oranı üzerinde etkili olan parametreler deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde 1 mm kalınlığında EN AW-5754-H111 (AlMg3) sac malzeme kullanılmıştır. Numuneler en yumuşak form olan “O” formuna getirilmek üzere 380 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle tavlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, n limit çekme oranı, zımba kuvveti, et kalınlığı ve kabın sertliğine etki eden parametreler; şekillendirme sıcaklığı, baskı plakası kuvveti ve dişi kalıp/baskı plakası yüzeylerine verilen açılardır. Bu parametrelerin farklı seviyeleri derin çekme işlemine uygulanarak elde edilen kabın optimum olduğu durumdaki parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Deneysel sonuçlar istatistiksel olarak da analiz edilerek parametre etkinlikleri ve optimum seviyeleri belirlenmiştir. Çalışma aynı zamanda, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayarda analiz edilmiştir. Analiz programından elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

7.1. Genel Sonuçlar

Limit çekme oranını etkileyen en önemli faktörün sıcaklık olduğu, kalıp açısı ve baskı plakası kuvvetinin etkisinin ise çok sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Açısız kalıplarla 25 °C’de yapılan deneylerle $\beta=2,14$ olan çekme oranı 250 °C’de $\beta=2,75$ ’e, açılı kalıplarla ise bu oran $\beta=2,17$ ’den $\beta=2,80$ ’e kadar çıkmıştır. Baskı plakası kuvvetlerinin LÇO’na önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Kalıp yüzeylerine verilen açılı malzeme akışının daha da kolaylaştırmış ve çekme işlemini olumlu yönde etkilemiştir. Özellikle açısız kalıplarla düşük baskı plakası kuvvetinde (1200 N) yapılan deneylerde LÇO arttıkça kap ağızlarındaki buruşmaların da önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Kalıp yüzeylerine açılı verilerek yapılan deneylerde ise buruşmaların ortadan kalktığı ancak 15° kalıpta buruşmaların yeniden oluştuğu görülmüştür. İdeal kalıp açısının 5°-10° arasında olduğu sonucuna varılmıştır. Kabın

kullanılabilirlik yüksekliğinin buruşmalardan dolayı yaklaşık %25 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Kap cidarındaki kalınlık dağılımının sıcaklık artışı ile daha homojen hale geldiği, kalıp yüzey açısının etkisi ile kap tabanı ve köşesindeki incelmelerin azaldığı, kap duvarı boyunca ise kalınlaşmaların düştüğü belirlenmiştir. Kabin yüksekliği arttıkça BPK'nin artışına bağlı olarak malzeme yığılmasından dolayı kabin üst kısımlarına doğru et kalınlığının arttığı görülmüştür.

Zimba kuvvetinde bütün aç değeri için önemli bir değişimin olmadığı ancak kalıp açısının artması ile özellikle ütüleme kuvvetinin önemli oranda düştüğü görülmüştür. Sıcaklığın zimba kuvvetini etkileyen önemli bir parametre olduğu, zimba kuvvetinin, 25°C'de 24681,96 N iken 250°C'de 19149,12 N değerine düştüğü, böylece değişimin %22,41 olduğu bulunmuştur. Yine BPK'nin artması ile deformasyon kuvvetinin arttığı ancak ütüleme kuvvetinin ise nispeten düştüğü belirlenmiştir.

En düşük sertlik değerinin kap tabanında olduğu, kap ağzına doğru çıkıldıkça sertlik değerinin arttığı görülmüştür. En fazla plastik deformasyona uğrayan bölge kap ağzı olduğu için deformasyon sertleşmesinden dolayı en yüksek gerilme değeri ve sertlik de burada oluşmaktadır. Yine sıcaklık arttıkça sertlik değerinin düştüğü görülmektedir. En yüksek sertlik değeri 25°C'de 103 HV, 100°C'de 97 HV, 175°C'de 93,1 HV ve 250°C'de 88,7 HV olarak ölçülmüştür. En düşük sertlik değişimi $\alpha=5^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$ kalıpla elde edilirken en yüksek sertlik değişimi ise $\alpha=0^\circ$ kalıpta elde edilmiştir. Baskı plakası kuvvetinin artması ile sertlik değerinin de arttığı tespit edilmiştir.

LÇO'yu belirlemek için yapılan deneylerde zımbanın ve zimba ile sac malzeme temas noktasının soğutulması durumunda başarı sağlanmış, soğutulmadığı durumlarda ise çekilen kaplarda yırtılmalar olmuş, başarı sağlanamamıştır. Bu durum, özellikle oda sıcaklığında çekilebilirliği zor olan alaşımlar için, etkili bir deney düzeneğinin kurulması ve gelişen teknolojik ihtiyaçlara göre geliştirilmesi gerektiğini göstermiştir.

Sonlu elemanlar analizleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, et kalınlığı değişimi ve zimba kuvveti sonuçlarında önemli benzerlik olduğu görülmüş. Ancak analizlerinde en fazla $\beta=2,53$ çekme oranına ulaşılabilmektedir. Deneysel çalışmalarda elde edilen $\beta=2,80$ oranına sahip kapların çekilmesi için kurulan deney simülasyonunda sacın flanş bölgesinin ısıtılması ve zimba ile sacın temas bölgesinin soğutulması işleminin yapılamamasından dolayı analiz sonuçları başarılı olamamıştır. Yapılan analiz sonuçlarından, özellikle sac malzeme özelliklerinin doğru tanımlanması ve deney tasarımının

doğru kurulması analiz programının çözümleme hassasiyetini ve analiz sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, kalıp ve baskı plakası yüzeylerine açılı vererek yapılan ılık derin çekme işleminin limit çekme oranı, et kalınlığı, zımba kuvveti ve kalın sertlik dağılımı üzerinde olumlu etkilerinin olduğu, deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir.

ANOVA sonuçlarına göre, parametrelerin etkinlik oranları dikkate alındığında limit çekme oranı, et kalınlığı ve zımba kuvveti için en etkin parametrenin şekillendirme sıcaklığı olduğu saptanmıştır. Sıcaklığın limit çekme oranını %99,62, zımba kuvvetini %93,79 ve et kalınlığının ise %66,04 oranında etkilediği belirlenmiştir. Kalıp açısının en fazla et kalınlığı üzerinde etkili olduğu saptanmıştır.

Deneysel parametrelerin optimum değerlerini saptamak amacıyla gerçekleştirilen Taguchi analizi sonuçlarına göre S/N eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler neticesinde optimum limit çekme oranı için olması gereken parametre konfigürasyonu; $\alpha=10^\circ$, 250°C ve 1200 N olarak tespit edilmiştir. Optimum zımba kuvveti için gerekli parametre konfigürasyonu; $\alpha=15^\circ$, 250°C ve 1200 N olarak belirlenmiştir. Et kalınlığı için olan konfigürasyon ise $\alpha=0^\circ$, 250°C ve 1200 N olduğu saptanmıştır.

7.2. Öneriler

Yapılan bu tez çalışmasının devamı olabilecek nitelikteki çalışmalar şu şekilde sıralanabilir;

Açılı kalıplarla ılık derin çekme işleminde çekme hızının ve çekme boşluğunun derin çekmeye olan etkileri araştırılabilir.

Farklı demir dışı ve demirli malzemelerin hadde yönünün derin çekilebilirliğe etkisi açılı kalıp kullanılarak araştırılabilir.

Şekillendirilen malzemelerin tane boyutunun etkileri araştırılabilir.

Farklı yağlayıcı türleri kullanarak yağlayıcının kalınlık değişimi, zımba kuvveti vb. etkileri araştırılabilir.

Farklı zımba geometrisine sahip kapların şekillendirilmesi üzerine kalıp açısı ve sıcaklığın etkileri çalışılabilir.

Otomotiv ve havacılık endüstrisinde kullanılan (prototip olmayan) gerçek bir parça üzerinde açılı kalıplarla ılık derin çekme uygulaması yapılabilir.

Kalıp elemanları üzerinde sıcaklığında etkisi ile oluşabilecek aşınmalar ve bu aşınma oranları belirlenebilir.

Kalıp açısı ve sıcaklığın üretilen kaplar üzerindeki gerilmelere ve geri yaylanmaya etkileri araştırılabilir.

Çekme esnasında baskı plakası kuvveti ve zımba hızı değiştirilebilir bir sistem kurarak çalışma daha da kapsamlı hale getirilebilir.

Çekme işleminde sürtünmeden etkilenen bölgelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin çekme işlemine etkileri ve sürtünme etkisinin azaltılması için yüzey kaplama yöntemleri kullanılarak çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Ünal, E.**, 2011. Kare Kesitli Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi ve Radyüsünün Çekme Oranına Etkisinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [2] **Erdin, M. E., Aykul, H. ve Tunahoğlu, Ş.**, 2005. Forming of High Strength/Low Formability Matal Sheets at Elevated Temperatures, *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 10, No. 3, pp 331-340.
- [3] **Laurent, H., Coër, J., Manach, P.Y., Oliveira, M.C., Menezes, L.F.**, 2015. Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al–Mg alloy, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 93, Pages 59-72.
- [4] **Afshin, E., Kadkhodayan, M.**, 2015. An experimental investigation into the warm deep-drawing process on laminated sheets under various grain sizes, *Materials & Design*, Volume 87, Pages 25-35.
- [5] **Lade, J., Banoth, B. N., Gupta, A.K., Singh, S. K.**, 2014. Metallurgical Studies of Austenitic Stainless Steel 304 under Warm Deep Drawing, *Journal of Iron and Steel Research*, Volume 21, Issue 12, Pages 1147-1151.
- [6] **Ghosh, M., Miroux, A., Werkhoven, R.J., Bolt, P.J., Kestens, L.A.I.**, 2014. Warm deep-drawing and post drawing analysis of two Al–Mg–Si alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 214, Issue 4,, Pages 756-766.
- [7] **Lade, J., Banoth, B. N., Gupta, A.K., Singh, S. K.**, 2015. Finite Element Simulation Studies of AISI 304 for Deep Drawing at Various Temperatures, *Materials Today: Proceedings*, Volume 2, Issues 4–5, Pages 1978-1986.
- [8] **Ma, W., Wang, B., Fu, L., Zhou, J., Huang, M.**, 2015. Effect of friction coefficient in deep drawing of AA6111 sheet at elevated temperatures, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Volume 25, Issue 7, Pages 2342-2351.
- [9] **Kotkunde, N., Deole, A. D., Gupta, A. K., Singh, S.K.**, 2014. Experimental and numerical investigation of anisotropic yield criteria for warm deep drawing of Ti–6Al–4V alloy, *Materials & Design*, Volume 63, Pages 336-344.
- [10] **Tari, D. G., Worswick, M. J., Winkler, S.**, 2013. Experimentan of deep drawing of AZ31B magnesiun alloy sheet under thermal conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, Issue 8, Pages 1337-1347.

- [11] **Çavuşoğlu, O., Gürün, H.,** 2014. Deformasyon hızının DP600 ve DP780 sac malzemelerin mekanik özelliklerine ve derin çekme işlemine etkilerinin incelenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 29, No 4, 777-784.
- [12] **Laurent, H., Coër, J., Grèze, R., Manach, P. Y., Andrade-Campos, A. Oliveira, M. C., and Menezes, L. F.,** 2011. Mechanical Behaviour and Springback Study of an Aluminium Alloy in Warm Forming Conditions, *International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering*.
- [13] **Şen, N., Kurgan, N.,** 2016. Improving deep drawability of HC300LA sheet metal by warm forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 82, Issue 5, pp 985-995.
- [14] **Ethiraj, N., Senthilkumar, V. S.,** 2010. Experimental Investigation on Warm Deep Drawing of Stainless Steel AISI 304, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 26-28, pp 436-442.
- [15] **Palumbo, G., Sorgenta, D., Tricarico, L., Zhang, S. H. and Zheng, W. T.,** 2006. Numerical and Experimental Analysis of the Warm Deep Drawing Process for Mg Alloys, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol 14, Issue 1-2.
- [16] **Takuda, H., Mori, K., Masachika, T., Yamazaki, E. and Watanabe, Y.,** 2003. Finite Element Analysis of the Formability of an Austenitic Stainless Steel Sheet in Warm Deep Drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144 , pp. 242–248.
- [17] **Palumbo, G. and Tricarico, L.,** 2007. Numerical and experimental investigations on the Warm Deep Drawing process of circular aluminum alloy specimens, *Journal of Materials Processing Technology*, 184, pp. 115–123.
- [18] **Swadesh, K. S., Amit, K. G., and Mahesh, K.,** 2010. A Study on the Extent of Ironing of EDD Steel at Elevated Temperature, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 3, pp. 73–79.
- [19] **Shoichiro, Y., Hisashi, N., Hirokuni, Y. and Ken-ichi, M.,** 2003. Formability Enhancement in Magnesium Alloy Stamping Using A Local Heating and Cooling Technique: Circular Cup Deep Drawing Process, *Journal of Materials Processing Technology* 142, pp. 609–613.
- [20] **Palumbo, G., Sorgenta, D., Tricarico, L., Zhang, S. H. and Zheng, W. T.,** 2007. Numerical And Experimental Investigations on The Effect of the Heating Strategy and the Punch Speed on the Warm Deep Drawing of Magnesium Alloy AZ31, *Journal of Materials Processing Technology* 191, pp. 342–346.
- [21] **Ren, L. M., Zhang, S. H., Palumbo, G., Sorgente, D. and Tricarico, L.,** 2009. Numerical Simulation on Warm Deep Drawing of Magnesium Alloy AZ31 Sheets, *Materials Science and Engineering A*, 499, 40–44.

- [22] Savaş, V. and Seçgin, Ö., 2007. A new type of deep drawing die design and experimental results, *Materials and Design*, 28, 1330–1333.
- [23] Özek, C. and Bal, M., 2009. The Effect of Die/Blank Holder and Punch Radiuses on Limit Drawing Ratio in Angular Deep-Drawing Dies, *Int J Adv. Manuf. Technology*, 40, 1077–1083.
- [24] Lin, J., Zhao, S. D., Zhang, Z. Y. and Wang, Z. W., 2009. Deep Drawing Using a Novel Hydromechanical Tooling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 73–80.
- [25] Herrera, C., Lima, N. B., Filho, A. F., Plaut, R. L. and Padilha, A. F., 2009. Texture and Mechanical Properties Evolution of a Deep Drawing Medium Carbon Steel During Cold Rolling and Subsequent Recrystallization, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 3518–3524.
- [26] Van den Boscha, M. J., Schreurs, P. J. G. and Geers, M. G. D., 2009. On The Prediction of Delamination During Deep-Drawing of Polymer Coated Metal Sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 297–302.
- [27] Plaut, R. L., Padilha, A. F., Lima, N. B., Herrera, C., Filho, A. F. and Yoshimura, L. H., 2009. Medium Carbon Steel Deep Drawing: A Study On The Evolution of Mechanical Properties, Texture and Simulations, From Cold Rolling to The End Product, *Materials Science and Engineering A*, 499, 337–341.
- [28] Roizarda, X., Pothier, J. M., Hihn, J. Y. and Monteil, G., 2009. Experimental Device for Tribological Measurement Aspects in Deep Drawing Process, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1220–1230.
- [29] Sivasankaran, S., Narayanasamy, R., Jeyapaul, R. and Loganathan, C., 2009. Modelling of Wrinkling in Deep Drawing of Different Grades of Annealed Commercially Pure Aluminum Sheets When Drawn Through a Conical Die Using Artificial Neural Network, *Materials and Design*, 30, 3193–3205.
- [30] Lang, L., Li, T., An, D., Chi, C., Nielsen, K. B. and Danckert, J., 2009. Investigation into Hydromechanical Deep Drawing of Aluminum Alloy—Complicated Components in Aircraft Manufacturing, *Materials Science and Engineering A*, 499, 320–324.
- [31] Lin, C. T. and Kwan, C. T., 2009. Application of Abductive Network and FEM to Predict The Optimal Blank Contour of An Elliptic Cylindrical Cup From Deep Drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1351–1361.
- [32] Padmanabhana, R., Oliveira, M. C., Baptista, A. J., Alves, J. L. and Menezes, L. F., 2009. Blank Design for Deep Drawn Parts Using Parametric NURBS Surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 2402–2411.

- [33] **Bastos, A. C. and Simões, A. M. P.,** 2009. Effect of Deep Drawing on The Performance of Coil-Coatings Assessed by Electrochemical Techniques, *Progress in Organic Coatings*, 65, 295-303.
- [34] **Hwang, B. C., Han, S. M., Bae, W. B. and Kim, C.,** 2009. Development of an automated progressive design system with multiple processes (piercing, bending, and deep drawing) for manufacturing products, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 644–653.
- [35] **Le Port, A., Toussaint, F. and Arrieux, R.,** 2009. Finite element study and sensitive analysis of the deep-drawing formability of commercially pure titanium, *International Journal of Material Forming*, 2, 121–129.
- [36] **Delucchi, M., Barbucci, A., Ricotti, R. and Cerisola, G.,** 2009. Quantitative evaluation of oxide impurities in bright annealed stainless steels for deep drawing, *Journal of Applied Electrochemistry*, 39, 2251–2255.
- [37] **Vollertsen, F., Niehoff, H. S. and Wielage, H.,** 2009. On the acting pressure in laser deep drawing, *Production Engineering*, 3, 1–8.
- [38] **Saxena, R. K. and Dixit, P. M.,** 2009. Finite element simulation of earing defect in deep drawing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45, 219–233.
- [39] **Yang, T. S.,** 2008. Finite Element Analysis of Square Cup Deep Drawing of Pure Titanium Metal Sheet at Elevated, *Advanced Design and Manufacture to Gain a Competitive Edge*, pp. 33–42, Eds. Yan, X., Jiang, C. and Eynard, B., Springer – Verlag, London.
- [40] **Padmanabhan, R., Oliveira, M. C. and Menezes, L. F.,** 2008. Deep Drawing of Aluminum–Steel Tailor-Welded Blanks, *Materials and Design*, 29, 154–160.
- [41] **Luo, Y., Luckey, S. G., Friedman, P. A. and Peng, Y.,** 2008. Development of an Advanced Superplastic Forming Process Utilizing a Mechanical Pre-forming Operation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 1509–1518.
- [42] **Daxin, E. Mizuno, T. and Li, Z.,** 2008. Stress Analysis of Rectangular Cup Drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 205, 469–476.
- [43] **Khelifa, M. and Oudjene, M.,** 2008. Numerical Damage Prediction in Deep-Drawing of Sheet Metals, *Journal of Materials Processing Technology*, 200, 71–76.
- [44] **Zhang, Z., Zhao, S. and Zhang, Y.,** 2008. A Novel Response Variable for Finite Element Simulation of Hydro-Mechanical Deep Drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 208, 85–89.

- [45] **Demirci, H. I., Esner, C. and Yasar, M.,** 2008. Effect of The Blank Holder Force on Drawing of Aluminum Alloy Square Cup: Theoretical and Experimental Investigation, *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 152–160.
- [46] **Park, D. H. and Yarlagaadda, P. K. D. V.,** 2008. Effects of Punch Load for Elliptical Deep Drawing Product of Automotive Parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35, 814–820.
- [47] **Oliveira, M.C., Alves, J. L. and Menezes, L. F.,** 2008. Algorithms and Strategies for Treatment of Large Deformation Frictional Contact in the Numerical Simulation of Deep Drawing Process, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 15, 113–162.
- [48] **Sattari, H., Sedaghati, R. and Ganesan, R.,** 2007. Analysis and design optimization of deep drawing process Part II Optimization,, *Journals of Materials Processing Technology*, 184, 84-92.
- [49] **Gavas, M. and Izciler, M.,** 2007. Effect of Blank Holder Gap on Deep Drawing of Square Cups, *Materials and Design*, 28, 1641–1646.
- [50] **Lee, Y. S., Kim, M C., Kim, S. W., Kwon,Y. N., Choi, S. W. and Lee, J. H.,** 2007. Experimental and Analytical Studies for Forming Limit of AZ31 Alloy on Warm Sheet Metal Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 187–188, 103–107.
- [51] **Karalı, M.,** 2007. Derin Sac Çekme İşleminde Kalıp Boşluğunun Cidar Kalınlık Değişimine Etkilerinin Sonlu Elemanlar Analizi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 55–60.
- [52] **Gavas, M. and Izciler, M.,** 2006. Design and Application of Blank Holder System with Spiral Spring in Deep Drawing of Square Cups, *Journal of Materials Processing Technology*, 171, 274–282.
- [53] **Wei, Z., Zhang, Z. L. and Dong, X. H.,** 2006. Deep Drawing of Rectangle Parts Using Variable Blank Holder Force, *Int J Adv Manuf Technol*, 29, 885–889.
- [54] **Yuqi, L., Jincheng, W. and Ping, H.,** 2002. A Finite Element Analysis of The Flange Earrings of Strong Anisotropic Sheet Metals in Deep Drawing Processes, *Acta Mechanica Sinica (English Series)*, 18, 82–91.
- [55] **Menezes, L. F. and Teodosiu, C.,** 2000. Three-Dimensional Numerical Simulation of The Deep-Drawing Process Using Solid Finite Elements, *Journal of Materials Processing Technology*, 97, 100–106.
- [56] **Zimniak, Z.,** 2000. Implementation of The Forming Limit Stress Diagram in FEM Simulations, *Journal of Materials Processing Technology*, 106, 261-266.
- [57] **Marumo, Y., Saiki, H. and Mori, T.,** 1999. Combined Effects of Strain Hardening Characteristics and Tool Geometry on The Deep-Drawability of Square

Aluminum Cups, *Journal of Materials Processing Technology*, 89–90, 30–36.

- [58] **Marumo, Y. and Saiki, H.**, 1998. Evaluation of The Forming Limit of Aluminum Square Cups, *Journal of Materials Processing Technology*, 80–81, 427–432.
- [59] **Gea, H. C. and Ramamurthy, R.**, 1998. Blank Design Optimization on Deep Drawing of Square Shells, *IIE Transactions*, 30, 913–921.
- [60] **Mamalis, A. G., Manolakos, D. E. and Baldoukas, A. K.**, 1997. Simulation of Sheet Metal Forming Using Explicit Finite Element Techniques: Effect of Material and Forming Characteristics Part 2. Deep-Drawing of Square Cups, *Journal of Materials Processing Technology*, 72, 110–116.
- [61] **Kuwabara, T. and Si, W.**, 1997. PC-Based Blank Design System for Deep-Drawing Irregularly Shaped Prismatic Shells with Arbitrarily Shaped Flange, *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 89–94.
- [62] **Koga, N. and Paisarn, R.**, 2003. Effects of Tool Radius on Formability During Deep Drawing of AZ31 Magnesium Alloy Sheets, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 53, No.4, 152–156.
- [63] **Gavas, M. ve Küçükrendeci, İ.**, 2004. Alüminyum Kare Kabın Derin Çekilmesinde Taslak Malzeme Şekillerinin Değerlendirilmesi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4, 185–200.
- [64] **Çapan, L.**, 2010. Metallere Plastik Şekil Verme, *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul.
- [65] **Kayalı, E.S., Çimenoglu, H.**, 1995. Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları, *Bilim Teknik Yayınevi*, İstanbul.
- [66] **Güneş, A.T.**, 2002. Pres İşleri Tekniği Cilt 2, *Makine Mühendisleri Odası*, Ankara.
- [67] **Topaç, M. M.**, 2003. Karbonlu Çeliklerde Derin Çekmeye Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- [68] **Demiray, K.**, 2006. Al 1050 Malzemesinin Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
- [69] **Seçkin, Ö.**, 2005. DKP Sac Çeliğinin Derin Çekilmesinde Matris Yüzey Açık Değişiminin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- [70] **Uzun, İ., ve Erişkin, Y.**, 2002. Sac Metal Kalıpcılığı, *Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları*, Ankara.
- [71] **T.C. Milli Eğitim Bakanlığı**, 2006. Makine Teknolojisi, *Çekme Kalıpları-I*, Ankara.

- [72] **Tschaetsch, H.**, 2006. Metal Forming Practise, *Processes–Machines–Tools*, Springer, Germany.
- [73] **Ataşimşek, S.**, 1977. Kesme, Delme ve Biçimlendirme Kalıpları, Bursa.
- [74] **Gunnarsson, L., Asnafi, N. and Schedin E.**, 1998. In-process control of blank holder force in axi-symmetric deep drawing with degressive gas springs, *Journal of Materials Processing Technology*, 73, 89-96
- [75] **Altan, T.**, 1998. Metal Forming Handbook, *Schuler Springer – Verlag Berlin Heidelberg*, Germany.
- [76] **Özçelik, G.**, 2008. Derin Çekme İşleminin Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- [77] **Gürün, H.**, 2008. Derin Çekme Kalıplarındaki Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Bulanık Mantık İle Tahmini, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- [78] **Aytaç, F.**, 2007. Matris Açılı Derin Çekme Kalıplarında Alüminyumun Derin Çekilmesinde Açık Değişiminin Çekme Oranı Üzerine Etkisinin Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- [79] **Schey, J. A.**, 2000. Introduction to Manufacturing Processes, New York: *McGraw Hill Companies Inc.*
- [80] **Ay, İ.**, İmalat Yöntemleri-II ders notları, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- [81] **Çapan L.**, 1979. Derin Çekmede Allotropi, Doçentlik Tezi, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi.
- [82] **Simith, A. D.**, 1990. “Die Design Handbook”, *Society of Manufacturing Engineers*, Michigan, 10,1-12,43.
- [83] **Erişkin, Y.**, 1986. Uygulamalı Sac Metal Kalıp Konstrüksiyonu, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları*, Ankara.
- [84] **Schumann, M. L. and Simoes, D.**, 2001. Choosing a Lubricant for Deep Drawing, www.thefabricator.com.
- [85] **Romanowski W. P.**, Handbuch der Stanzertechnik VEB Verlag Technik/ Berlin.
- [86] **Savaşkan, T.**, 2009. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, *Celepler Matbaacılık*, Trabzon.
- [87] **Yiğit, O., Dilmeç, M., Halkacı, S.**, 2008. Tabaka Kaldırma Yöntemi ile Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması, *Mühendis ve Makine*, Cilt 49, Sayı 579.

- [88] **Özdemir, M., Gökmeşe, H., Dilipak, H. ve Yılmaz, V.,** 2014. Farklı ısıtma işlemlerinin 16Mo₃ (1.5415) sac malzemesinin ileri-geri esneme miktarına etkisinin deneysel ve mikroyapısal olarak incelenmesi, *2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering And Science*.
- [89] <http://www.biomed.com/femmu/analiz/fem/seynedir.htm> Sonlu Elemanlar Yöntemi. 25 Aralık 2010.
- [90] **Kırlı, O.,** 2003. Derin Çekme İle Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Non-Linear Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- [91] **Yaşar, M.,** 2001. Yüksek hızda şekillendirilen alüminyum alaşımlarında oluşan deformasyon incelenmesi, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [92] **Karalı, M.,** 2005. Derin sac çekme işleminde pot çemberi baskısının kontrolünün cidar kalınlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [93] <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Explicit+Dynamics/ANSYS+Explicit+STR#/1/12> Beverage Container. 11 Kasım 2010.
- [94] eta/DYNAFORM, User's Manual, Version 5.9, 2013.
- [95] **Demiray, K.,** 2006. Al 1050 Malzemesinin Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
- [96] **van den Boogaard, A.,** 2002. Thermally enhanced forming of aluminium sheet - Modelling and experiments, Ph. D. thesis, University of Twente.
- [97] **Demeri, M.Y., Lou M., Saran, M.J.,** 2000. A benchmark test for springback simulation in sheet metal forming, *Society of Automotive Engineers, Inc.*, vol. 01-2657.
- [98] **Laurent, H., Coër, J., Grèze, R., Manach, P.Y., Andrade-Campos, A., Oliveira, M.C., and Menezes, L.F.,** 2011. Mechanical Behaviour and Springback Study of an Aluminium Alloy in Warm Forming Conditions, *International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering*.
- [99] **Laurent, H., Grèze, R., Oliveira, M.C., Menezes, L.F., Manach, P.Y., Alves, J.L.,** 2010. Numerical study of springback using the split-ring test for an AA5754 aluminum alloy. *Finite Elements in Analysis and Design*, 46, 751-759.
- [100] **Halim, H., Wilkinson, D.S., and Niewczas, M.,** 2007. The Portevin-Le Chatelier (PLC) Effect and Shear Band Formation in an AA5754 Alloy. *Acta Mater.*, 55, p 4151-4160.

- [101] **Vasco Manuel Neto Simões**, 2012. Analysis of the influence of process parameters in the deep drawing of a cylindrical cup, Université de Bretagne-Sud, Master thesis.
- [102] **Larsson, L.**, 2005. Warm Sheet Metal Forming with Localized In-Tool Induction Heating, Lund University, Sweden
- [103] **Savaş, V. ve Seçgin, Ö.**, 2010. An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die, *Int J Mater Form* (2010) 3:209–213.
- [104] **M. Cotterell, J. Schambergerova, J. Ziegelheim**, 2002. Dependence of micro-hardness on deformation of deep-drawing steel sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 124, Issue 3, Pages 293–296.
- [105] **Demirci, H. I., Esner, C. and Yasar, M.**, 2008. Effect of The Blank Holder Force on Drawing of Aluminum Alloy Square Cup: Theoretical and Experimental Investigation, *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 152–160.
- [106] **Saha, S., Pal, S. and Albright, J. A.**, 1982. Surgical drilling: design and performance of an improved drill, *J. Biomechanic Eng.*, 104, 245 – 252.
- [107] **Hasçalık, A. and Çaydaş, U.**, 2008. Optimization of turning parameters for surface roughness and tool life based on the Taguchi method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38, 896 – 903.
- [108] **Abedrabbo, N., Pourboghrat, F. and Carsley, J.**, 2006. Forming of Aluminum Alloys at Elevated Temperatures - Part 2: Numerical Modeling and Experimental Verification, *Int. J. Plast.*, 22, p 342-373.
- [109] **Panicker, S.S., Singh, H.G., Panda, S.K., and Dashwood, R.**, 2015. Characterization of Tensile Properties, Limiting Strains, and Deep Drawing Behavior of AA5754-H22 Sheet at Elevated Temperature, *JMEPEG* 24:4267–4282, DOI: 10.1007/s11665-015-1740-6.
- [110] **Dutton, T., Mohamed, M., Lin, J.**, 2012. Simulation of Warm Forming of Aluminium AA5754 for Automotive Panels, 12th *International LS-DYNA User Conference*.

ÖZGEÇMİŞ

01/01/1981 tarihinde Taşlıçay'da doğan Vedat TAŞDEMİR ilk, orta ve lise eğitimini Aydın'da tamamladı. 1999 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Öğretmenliğini kazandı ve 2003 yılında Fakülte ve bölüm birincisi olarak başarıyla mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve 2006 yılında başarıyla tamamladı. 2007 yılının Ocak ayında Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Elbistan Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak göreve başladı. 2010 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Aynı zamanda 2015 yılında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Öğretim Görevlisi olan Vedat TAŞDEMİR, evli ve bir çocuk babasıdır.

Vedat TAŞDEMİR
ELAZIĞ-2016