

**KARE KESİTLİ KAPLARIN DERİN ÇEKİLMESİNDE
KALIP GEOMETRİSİ VE RADYÜSÜNÜN
ÇEKME ORANINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Engin ÜNAL

**Doktora Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cebeli ÖZEK
NİSAN-2011**

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

**KARE KESİTLİ KAPLARIN DERİN ÇEKİLMESİNDE KALIP GEOMETRİSİ VE
RADYÜSÜNÜN ÇEKME ORANINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

**Engin ÜNAL
(05119205)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Nisan 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 4 Mayıs 2011

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Cebeli Özek (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR (G.Ü)
Prof. Dr. Halis ÇELİK (F.Ü)
Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK (F.Ü)
Doç. Dr. Niyazi ÖZDEMİR (F.Ü)

NİSAN-2011

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesinde derin bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Cebeli ÖZEK'e sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Çalışma boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Vedat SAVAS, Sn. Öğr. Gör. Dr. Ulaş ÇAYDAŞ, Sn. Arş. Gör. Dr. Faruk KARACA ve Sn. Öğr. Gör. Dr. Onur ÖZSOLAK'a teşekkür ederim.

Bu eğitim seviyesine kadar, bana verdikleri emeklerinin karşılığını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim değerli anne ve babama ve ayrıca çalışma süresince bana katlanan ve sabreden sevgili eşim Nurten ÜNAL'a da sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasını, 1867 numaralı proje kapsamında maddi olarak destekleyen FÜBAP'a ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Atölye ve Laboratuvar çalışanlarına desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Engin ÜNAL
ELAZIĞ – 2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLOLAR LİSTESİ	XII
SEMBOLLER LİSTESİ	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. TEMEL BİLGİLER.....	11
3.1. Plastik Deformasyon	11
3.2. Derin Çekme ve Derin Çekme Mekanizması	18
3.3. İlkel Parça Boyutlarının Belirlenmesi	20
3.4. Limit Çekme Oranı.....	24
3.4.1. Silindirik Parçalar İçin Derin Çekme Adımları.....	25
3.4.2. Dikdörtgen Parçalar İçin Derin Çekme Adımları.....	26
3.5. Çekme Kuvveti.....	26
3.6. Baskı Plakası Kuvveti (BPK)	27
3.7. Kalıp Kenar Radyüsü ve Zımba Ucu Radyüsleri	28
3.8. Çekme Hızı.....	30
3.9. Çekme Boşluğu	30
3.10. Derin Çekmede Kullanılan Saclar	31
3.11. Derin Çekilme İşleminde Görülen Hatalar.....	32
3.12. Sonlu Elemanlar Metodu.....	33
3.12.1. İmplicit Yöntem.....	35
3.12.2. Eksplisit yöntem	36
3.12.3. İmplicit ve Eksplisit Yöntemlerin Karşılaştırılması	37
4. MATERYAL ve METOT	39
4.1. Çalışmanın Amacı	39
4.2. Deneysel Çalışmalar	39
4.3. Analiz Çalışmaları.....	45

5. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA	49
5.1. Matris/Baskı Plakası Açısının Çekme Oranı Üzerindeki Etkisi	50
5.2. Baskı Plakası Kuvvetinin (BPK) Çekme Oranı (β) Üzerindeki Etkisi	67
5.3. Matris/Zımba Radyüsünün (R) Çekme Oranı (β) Üzerindeki Etkisi	82
5.4. Derin Çekme Parametrelerinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	95
5.4.1. Matris/Baskı Plakası Açısının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	96
5.4.2. Baskı Plakası Kuvvetinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	98
5.4.3. Matris/Zımba Radyüsünün Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	99
5.5. İlkel Parça Çapının Kap Hasarları Üzerindeki Etkisi	100
5.6. Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi	101
6. SONLU ELEMANLAR METODU İLE SAYISAL ANALİZ	108
6.1. Matris/Baskı Plakası Açısının Çekme Oranı Üzerindeki Etkisi	109
6.2. Baskı Plakası Kuvvetinin (BPK) Çekme Oranı (β) Üzerindeki Etkisi	117
6.3. Matris/Zımba Radyüsünün (R) Çekme Oranı (β) Üzerindeki Etkisi	125
6.4. Derin Çekme Parametrelerinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	136
6.4.1. Matris/Baskı Plakası Açısının Et Kalınlığı Üzerine Etkisi	137
6.4.2. Baskı Plakası Kuvvetinin Et Kalınlığı Üzerine Etkisi	140
6.4.3. Matris/Zımba Radyüsünün Et Kalınlığı Üzerine Etkisi	143
6.5. Zımba Kurs Mesafesinin Gerilmeye Etkisi	146
6.6. Sayısal Olarak Hesaplanan Limit Çekme Oranlarının Deneysel Çalışma Sonuçları İle Karşılaştırılması	148
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	154
7.1. Genel Sonuçlar	154
7.2. Öneriler	156
KAYNAKLAR	157
ÖZGEÇMİŞ	163

ÖZET

Derin çekme yöntemiyle kare kapların elde edilmesi silindirik kaplara göre daha zor bir işlemdir. Malzemenin çevreden merkeze doğru akışı esnasında köşelerdeki malzemenin şekil değiştirmeye karşı direnci artmakta ve bunun sonucu olarak da malzemenin buruşması ile kapta kopma/yrılma şeklinde hasarlar daha fazla meydana gelmektedir. Kalıbın biçimi ve geometrisi, malzemenin mekanik özellikleri, ilkel parçanın 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, kare profilli kapların açılı derin çekme kalıplarında şekillendirilmesinde, matris/baskı plakası açısı, matris/zımba radyüsü ve baskı plakası kuvvetinin; limit çekme oranı, zımba kuvveti ve kap et kalınlıkları üzerindeki etkileri deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır. Bunun için, matris/baskı plakası açısı 0° , 5° , 10° ve 15° matris/zımba radyüsü ise 4 mm, 6 mm ve 8 mm aralıklarda işlenmiştir. Deneylerde 0,9 mm kalınlığında DIN EN 10130–1999 sac malzeme kullanılmıştır. 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. Çalışma aynı zamanda, sonlu elemanlar metodu (SEM) ile ANSYS paket programında modellenmiştir. Veriler, tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, ANSYS paket program sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, farklı açılara sahip yeni tip çekme kalıplarının, geleneksel kalıplara göre daha yüksek çekme oranları sağladığı, matris/baskı plakası açılarının artması ile limit çekme oranının 1,77 den 2,32'ye kadar arttığı ve kap et kalınlığındaki kritik incelmeye ise 0,590 mm den 0,742 mm'ye çıktığı tespit edilmiştir. SEM ile elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile elde edilen sonuçlara yakın oldukları gözlenmiştir. Deneysel sonuçlar varyans analizi (ANOVA) metodu ile istatistiksel olarak da değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kare Kap, Açılı Derin Çekme, Limit Çekme Oranı, Sonlu Elemanlar Metodu, ANOVA.

SUMMARY

Investigation of the Effect of Die Geometry and The Radius on Drawing Ratio During Deep Drawing of Square Cross-Section Cups.

It is difficult to achieve the squared shaped cups than cylindrical ones in the deep drawing method. The deformation resistance of the material at the corner regions is increased from the counter to the center direction and this result in some further damages such as wrinkling, breaking and tearing. On the other hand, the deep drawing process is directly affected by the following main factors: the shape and the geometry of the die, the mechanical properties of the material, the dimensions and geometry of the blank part, the friction and lubrication conditions between the die/material/blank holder, the blank holder force and the die cavity. Thus, it is important to choose the correct molding parameters in order to enhance the productivity.

In this study, the effects of die/blank holder angles, die/punch radii and blank holder force on the limit drawing ratio, punch force and wall thickness were investigated both experimentally and numerically in angular deep drawing of square cups. For this purpose, the die/blank holders were machined 0° , 5° , 10° and 15° ; while the die/punches were given 4 mm, 6 mm, 8 mm dimensions in radii, respectively. The DIN EN 10130–1999 sheet metal parts in 0.9 mm in thickness were used as the target material. 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 experimental results were also modeled using finite element method. ANSYS computer package program was used for this purpose. Full factorial experimental design method was used to collect the data. The ANSYS results were compared with experimental findings. Finally, it was observed that the new type's of angular deep drawing dies with different angle values gave better results than conventional dies with higher drawing ratios. The limit-drawing ratio and the wall thickness values were increased from 1,77 and 0,590 to 2,32 and 0,742, respectively. 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: Square Cups, Angular Deep Drawing, Limit Drawing Ratio, Finite Element Method, ANOVA.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1.	Temel şekil değişimi [44]; a) Basma, b) Çekme, c) Kayma.....	11
Şekil 3.2.	Derin çekme işlemi, a. Şematik, b. Perspektif [47].	18
Şekil 3.3.	Derin çekmenin mekaniği [48].	19
Şekil 3.4.	Derin çekme esnasında parçada boylamsal kısımlarda meydana gelen gerilmeler [48].	19
Şekil 3.5.	Dikdörtgen veya kare kapların köşe gerilme analizi [49].	20
Şekil 3.6.	Alan metodu ile ilkel çapın bulunması [50].	21
Şekil 3.7.	a) Dikdörtgen kabın boyutları, b) Eşit alanlı elemanlara ayrılması [51].	21
Şekil 3.8.	Doğru veya yaylar yardımıyla ilkel parça geometrisinin oluşturulması [51].	22
Şekil 3.9.	Dikdörtgen parça ile farklı dip ve kenar radyüsleri [51].	24
Şekil 3.10.	Zimba ucu ve kalıp radyüsü [46].	28
Şekil 3.11.	Derin çekme işleminde görülen çekme hataları [58].	33
Şekil 3.12.	Bir problemin sonlu elemanlar modeli [59].	34
Şekil 3.13.	Eksplisit yöntem kullanılan dinamik durumlar [63, 64].	35
Şekil 4.1.	Deneyselerde kullanılan kalıp geometrileri.....	41
Şekil 4.2.	Kare kap için ortalama zimba çapının (d_{zimba}) belirlenmesi	43
Şekil 4.3.	Deneysel çalışmaların yapıldığı pres tezgahı ve kalıp seti	44
Şekil 4.4.	Matris ve zimbaya ait ağ yapıları.....	46
Şekil 4.5.	Baskı plakası ve sac malzemeye ait ağ yapıları	46
Şekil 4.6.	Kalıp elemanlarının oluşturulması	47
Şekil 4.7.	Kalıp elemanlarının parametrelerinin belirlenmesi	48
Şekil 5.1.	Derin çekme işleminde meydana gelen gerilmeler	49
Şekil 5.2.	Dikdörtgen veya kare kaplarda oluşan gerilmeler	50
Şekil 5.3.	Derin çekmede zimba kuvveti- kurs mesafesi ilişkisi [67].	50
Şekil 5.4.	R=4 mm için, BPK=2450 N olduğunda elde edilen numuneler	51
Şekil 5.5.	R=4 mm için, BPK=2450 N olduğunda ölçülen zimba kuvvetleri.....	51
Şekil 5.6.	R=4 mm için, BPK=4900 N olduğunda elde edilen numuneler	52
Şekil 5.7.	R=4 mm için, BPK=4900 N olduğunda ölçülen zimba kuvvetleri.....	52
Şekil 5.8.	R=4 mm için, BPK=7350 N olduğunda elde edilen numuneler	53
Şekil 5.9.	R=4 mm için, BPK=7350 N olduğunda ölçülen zimba kuvvetleri.....	53
Şekil 5.10.	R=4 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen numuneler	54
Şekil 5.11.	R=4 mm için, BPK=9800 N olduğunda ölçülen zimba kuvvetleri.....	54
Şekil 5.12.	Matris/Zimba radyüsü R=4 mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi	55
Şekil 5.13.	R=6 mm için, BPK=2450 N olduğunda elde edilen numuneler	56
Şekil 5.14.	R=6 mm için, BPK=2450 N olduğunda ölçülen zimba kuvvetleri.....	56
Şekil 5.15.	R=6 mm için, BPK=4900 N olduğunda elde edilen numuneler	57
Şekil 5.16.	R=6 mm için, BPK=4900 N olduğunda ölçülen zimba kuvvetleri.....	57
Şekil 5.17.	R=6 mm için, BPK=7350 N olduğunda elde edilen numuneler	58
Şekil 5.18.	R=6 mm için, BPK=7350 N olduğunda ölçülen zimba kuvvetleri.....	59

Şekil 5.19.	R=6 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen numuneler	59
Şekil 5.20.	R=6 mm için, BPK=9800 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	60
Şekil 5.21.	Matris/Zımba radyüsü R=6 mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi	60
Şekil 5.22.	R=8 mm için, BPK=2450 N olduğunda elde edilen numuneler	61
Şekil 5.23.	R=8 mm için, BPK=2450 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	62
Şekil 5.24.	R=8 mm için, BPK=4900 N olduğunda elde edilen numuneler	62
Şekil 5.25.	R=8 mm için, BPK=4900 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	63
Şekil 5.26.	R=8 mm için, BPK=7350 N olduğunda elde edilen numuneler	63
Şekil 5.27.	R=8 mm için, BPK=7350 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	64
Şekil 5.28.	R=8 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen numuneler	65
Şekil 5.29.	R=8 mm için, BPK=9800 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	65
Şekil 5.30.	Matris/Zımba radyüsü R=8 mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi	66
Şekil 5.31.	Değişik yırtılma ve çatlakların olduğu numuneler	67
Şekil 5.32.	R=4 mm ve $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	68
Şekil 5.33.	R=4 mm ve $\alpha=0^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri	68
Şekil 5.34.	R=4 mm ve $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	69
Şekil 5.35.	R=4 mm ve $\alpha=5^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri	69
Şekil 5.36.	R=4 mm ve $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	70
Şekil 5.37.	R=4 mm ve $\alpha=10^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri	70
Şekil 5.38.	R=4 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	71
Şekil 5.39.	R=4 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	71
Şekil 5.40.	R=4 mm için Baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi	72
Şekil 5.41.	R=6 mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	72
Şekil 5.42.	R=6 mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	73
Şekil 5.43.	R=6 mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	73
Şekil 5.44.	R=6 mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	74
Şekil 5.45.	R=6 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	74
Şekil 5.46.	R=6 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	75
Şekil 5.47.	R=6 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	75
Şekil 5.48.	R=6 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	76
Şekil 5.49.	R=6 mm için baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi	76
Şekil 5.50.	R=8 mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	77
Şekil 5.51.	R=8 mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	77
Şekil 5.52.	R=8 mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	78
Şekil 5.53.	R=8 mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	78
Şekil 5.54.	R=8 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	79
Şekil 5.55.	R=8 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	79
Şekil 5.56.	R=8 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	80
Şekil 5.57.	R=8 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri.....	80
Şekil 5.58.	R=8 mm için Baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi	81
Şekil 5.59.	BPK=2450 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	82
Şekil 5.60.	BPK=2450 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	83
Şekil 5.61.	BPK=2450 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	83

Şekil 5.62.	BPK=2450 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	84
Şekil 5.63.	Baskı plakası kuvveti (BPK) 2450 N için Matris/Zimba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	84
Şekil 5.64.	BPK=4900 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	85
Şekil 5.65.	BPK=4900 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	86
Şekil 5.66.	BPK=4900 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	86
Şekil 5.67.	BPK=4900 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	87
Şekil 5.68.	Baskı plakası kuvveti (BPK) 4900 N için Matris/Zimba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	87
Şekil 5.69.	BPK=7350 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	88
Şekil 5.70.	BPK=7350 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	89
Şekil 5.71.	BPK=7350 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	89
Şekil 5.72.	BPK=7350 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	90
Şekil 5.73.	Baskı plakası kuvveti (BPK) 7350 N için Matris/Zimba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	91
Şekil 5.74.	BPK=9800 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	91
Şekil 5.75.	BPK=9800 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	92
Şekil 5.76.	BPK=9800 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	93
Şekil 5.77.	BPK=9800 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler	93
Şekil 5.78.	Baskı plakası kuvveti (BPK) 9800 N için Matris/Zimba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	94
Şekil 5.79.	Çekilen kapta oluşan ondülasyon (A) ve incelme (B) bölgeleri	94
Şekil 5.80.	Et kalınlığı ölçümü için hazırlanan numune	95
Şekil 5.81.	Et kalınlıklarının ölçülmesi.....	96
Şekil 5.82.	A – A doğrultusu boyunca α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi	97
Şekil 5.83.	B – B doğrultusu boyunca α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi.....	97
Şekil 5.84.	A – A doğrultusu boyunca BPK'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi.....	98
Şekil 5.85.	B – B doğrultusu boyunca BPK'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi	99
Şekil 5.86.	A – A doğrultusu boyunca R'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi.....	99
Şekil 5.87.	B – B doğrultusu boyunca R'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi	100
Şekil 5.88.	Değişik yırtılma ve çatlak hasarlarının olduğu numuneler	101
Şekil 5.89.	Limit çekme oranı için S/N grafikleri.....	104
Şekil 5.90.	Zimba kuvveti için S/N grafikleri.....	105
Şekil 5.91.	Et kalınlığı için S/N grafikleri.....	106
Şekil 6.1.	Kalıp modelinin sonlu elemanlar ağ sistemi.....	108
Şekil 6.2.	R=4 mm için, BPK=2450 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	109
Şekil 6.3.	R=4 mm için, BPK=4900 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	110
Şekil 6.4.	R=4 mm için, BPK=7350 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	110
Şekil 6.5.	R=4 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	111
Şekil 6.6.	Matris/Zimba radyüsü R=4 mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi	111
Şekil 6.7.	R=6 mm için, BPK=2450 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	112
Şekil 6.8.	R=6 mm için, BPK=4900 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	112
Şekil 6.9.	R=6 mm için, BPK=7350 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	113
Şekil 6.10.	R=6 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	113
Şekil 6.11.	Matris/Zimba radyüsü R=6 mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi	114
Şekil 6.12.	R=8 mm için, BPK=2450 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	115

Şekil 6.13.	R=8 mm için, BPK=4900 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	115
Şekil 6.14.	R=8 mm için, BPK=7350 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	116
Şekil 6.15.	R=8 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	116
Şekil 6.16.	Matris/Zimba radyüsü R=8 mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi	117
Şekil 6.17.	R=4 mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	118
Şekil 6.18.	R=4 mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	118
Şekil 6.19.	R=4 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	119
Şekil 6.20.	R=4 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	119
Şekil 6.21.	Matris/Zimba radyüsü R=4 mm için Baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	120
Şekil 6.22.	R=6 mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	120
Şekil 6.23.	R=6 mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	121
Şekil 6.24.	R=6 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	121
Şekil 6.25.	R=6 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	122
Şekil 6.26.	Matris/Zimba radyüsü R=6 mm için Baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	122
Şekil 6.27.	R=8 mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	123
Şekil 6.28.	R=8 mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	123
Şekil 6.29.	R=8 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	124
Şekil 6.30.	R=8 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları.....	124
Şekil 6.31.	Matris/Zimba radyüsü R=8 mm için Baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	125
Şekil 6.32.	BPK=2450 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	126
Şekil 6.33.	BPK=2450 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	126
Şekil 6.34.	BPK=2450 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	127
Şekil 6.35.	BPK=2450 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	127
Şekil 6.36.	Baskı plakası kuvveti (BPK) 2450 N için Matris/Zimba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	128
Şekil 6.37.	BPK=4900 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	129
Şekil 6.38.	BPK=4900 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	129
Şekil 6.39.	BPK=4900 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	130
Şekil 6.40.	BPK=4900 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	130
Şekil 6.41.	Baskı plakası kuvveti (BPK) 4900 N için Matris/Zimba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	131
Şekil 6.42.	BPK=7350 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	131
Şekil 6.43.	BPK=7350 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	132
Şekil 6.44.	BPK=7350 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	132
Şekil 6.45.	BPK=7350 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	133
Şekil 6.46.	Baskı plakası kuvveti (BPK) 7350 N için Matris/Zimba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	133
Şekil 6.47.	BPK=9800 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	134
Şekil 6.48.	BPK=9800 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	134
Şekil 6.49.	BPK=9800 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	135
Şekil 6.50.	BPK=9800 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları	135
Şekil 6.51.	Baskı plakası kuvveti (BPK) 9800 N için Matris/Zimba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	136

Şekil 6.52.	Matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve $BPK=4900N$).....	137
Şekil 6.53.	Matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve $BPK=4900N$).....	138
Şekil 6.54.	Matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve $BPK=4900N$).....	138
Şekil 6.55.	Matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve $BPK=4900N$).....	139
Şekil 6.56.	Matris/baskı plakası açısının değişmesiyle elde edilen et kalınlıkları dağılımı.....	140
Şekil 6.57.	Baskı plakası kuvveti 2450 N için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\alpha=5^\circ$).....	141
Şekil 6.58.	Baskı plakası kuvveti 4900 N için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\alpha=5^\circ$).....	141
Şekil 6.59.	Baskı plakası kuvveti 7350 N için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\alpha=5^\circ$).....	142
Şekil 6.60.	Baskı plakası kuvveti 9800 N için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\alpha=5^\circ$).....	142
Şekil 6.61.	Baskı plakası kuvvetinin değişmesiyle elde edilen et kalınlıkları dağılımı.....	143
Şekil 6.62.	Matris/Zimba radyüsü $R=4$ mm için et kalınlık dağılımı ($BPK=7350N$, $\alpha=10^\circ$).....	144
Şekil 6.63.	Matris/Zimba radyüsü $R=6$ mm için et kalınlık dağılımı ($BPK=7350N$, $\alpha=10^\circ$).....	144
Şekil 6.64.	Matris/Zimba radyüsü $R=6$ mm için et kalınlık dağılımı ($BPK=7350N$, $\alpha=10^\circ$).....	145
Şekil 6.65.	Kalıp radyüsü değişimi ile elde edilen et kalınlıkları dağılımı.....	145
Şekil 6.66.	$R=4$ mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen limit çekme oranlarının değişimi.....	148
Şekil 6.67.	$R=6$ mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen limit çekme oranlarının değişimi.....	149
Şekil 6.68.	$R=8$ mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen limit çekme oranlarının değişimi.....	150
Şekil 6.69.	$R=4$ mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen zimba kuvvetlerinin değişimi.....	151
Şekil 6.70.	$R=6$ mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen zimba kuvvetlerinin değişimi.....	152
Şekil 6.71.	$R=8$ mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen zimba kuvvetlerinin değişimi.....	153

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Çeşitli metallerin kristal yapısı [45].....	13
Tablo 3.2. Zimba çapı ve sac kalınlığına bağı olarak ortalama β_0 değerleri [51].	25
Tablo 3.3. Kalıp radyüsü için önerilen değerler [46].	29
Tablo 3.4. Silindirik çekmelerde malzemelerin cinsine göre çekme hızları [55].	30
Tablo 4.1. DIN EN 10130 – 1999 çelik sacının kimyasal analizi	40
Tablo 4.2. Deney numunesinin mekanik özellikleri	40
Tablo 4.3. İlkel parça çaplarına karşılık gelen limit çekme oranları	40
Tablo 4.4. Kalıp elemanlarının yüzey pürüzlülükleri	42
Tablo 4.5. Derin çekme parametreleri	42
Tablo 4.6. Analizde kullanılan sac malzeme özellikleri	46
Tablo 5.1. Derin çekme parametre ve seviyeleri	103
Tablo 5.2. Limit çekme oranı için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları	104
Tablo 5.3. Zimba kuvveti için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları	105
Tablo 5.4. Et kalınlığı için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları	106
Tablo 5.5. Limit çekme oranı için ANOVA sonuçları	107
Tablo 5.6. Zimba kuvveti için ANOVA sonuçları	107
Tablo 5.7. Et kalınlığı için ANOVA sonuçları	107
Tablo 6.1. Zimba kurs mesafesi boyunca gerilme dağılımı	147

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	: Çekme 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	: Matris/baskı plakası açısı
β	: Limit çekme oranı
E	: Elastikiyet modülü
ν	: Poisson oranı

1. GİRİŞ

Endüstriyel ürünlerin üretim zamanının düşürülmesi maliyet açısından büyük önem arz etmektedir. Üretim maliyetinin azaltılması ekonomik bir üretiminin kullanılması ile mümkündür. Seri parça imalatı açısından zaman ve ekonomiklik dikkate alındığında, sac metal kalıpcılığı imalat yöntemi işlem zamanı ve ürün kalitesi bakımından diğer imalat yöntemlerine nazaran birçok avantaj sağlamaktadır. Genellikle ev aletleri, beyaz eşya, otomotiv ve savunma sanayi gibi birçok alanda sac metal kalıpcılığı vazgeçilmez bir imalat yöntemidir. Sac metal kalıpcılığı yönteminde kesme, delme, bükme, şekil verme ve derin çekme gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, sac metal kalıpcılığı tekniğinde kullanılan yöntem ve parametrelerin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

Derin çekme yönteminde şekil verme parametreleri kesme, delme ve bükme yöntemlerindeki parametrelere göre daha karmaşıktır. Derin çekme yöntemi ile sac metal şekillendirme işleminde, sac malzeme zımbaya sarılmakta ve bu durum şekillendirme işlemini nispeten karmaşık hale getirmektedir.

Derin çekmede ürün kalitesi, kalıp boşluğu içine çekilen sacın boyutlarına bağlıdır. Burada önemli olan, malzemenin kalıp içerisine akışının kontrol edilmesidir. Bu kontrol, baskı plakası denilen kalıp elemanının ilkel parça yüzeyine belirli bir kuvvet uygulaması ile sağlanmaktadır. Bu yüzden baskı plakası kuvveti, malzemenin kalıp içerisine daha düzenli bir şekilde akmasını sağlayan önemli bir parametredir. Baskı kuvvetinin yanı sıra, zımba – matris radyüsleri, zımba kuvveti, çekilecek kabın ilkel parça geometrisi ve hadde yönü gibi faktörler derin çekme işlemi üzerinde önemli etkiye sahiptirler.

Ayrıca, derin çekmede kullanılacak malzemenin kimyasal bileşimi, mekanik özellikleri, imalat yöntemi, ısıtma işlemi ve şekillendirme sırasında uygulanan sıcaklık değerleri de çekme işlemini etkilemektedir.

İmplicit, eksplisit, tek adımlı sonlu elemanlar metotları ve birçok farklı lineer olmayan çözüm metotları, derin çekme yönteminin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar arasında, en çok kullanılan metot eksplisit analizdir. Bu metot, diğer yöntemlerden farklı olarak dinamik sonlu elemanlar ağı kullanarak kalıp simülasyonunu sağlamaktadır.

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 seçilmesine bağlıdır. Ancak, çekme işlemini etkileyen en önemli faktörlerden biri, malzemenin matris içerisine akışının kontrol altında tutulmasıdır. Bu akışın kontrolü için yapılan çalışmalar devam etmektedir.

Bu çalışmada, mevcut literatürden farklı olarak, derin çekme yönteminde matris/zimba radyüsü, baskı plakası kuvveti ve matris/baskı plakası yüzeylerine verilen açıların çekme oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerde 0,9 mm kalınlığında DIN EN 10130–1999 sac malzeme kullanılmıştır. Sac malzemenin kalıp içerisine akışını daha kolay hale getirmek için matrisin üst yüzeyine ve zimbanın alt kenarlarına 4 mm, 6 mm ve 8 mm’lik üç farklı radyüs değeri, Matris/baskı plakası yüzeylerine ise $\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ ’lik dört farklı açı değeri verilmiştir. Açı ve radyüs değerlerinin limit çekme oranı, çekilen kabın et kalınlığı ve zimba kuvveti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sac malzemenin kalıp içerisine akışının kontrolü 2450 N, 4900 N, 7350 N ve 9800N’luk baskı plakası kuvvetleri uygulanarak sağlanmıştır. Çalışma aynı zamanda, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayarda analiz edilmiş ve analizlerde ANSYS paket programı kullanılmıştır. Analiz programından elde edilen limit çekme oranları, kap et kalınlıkları ve zimba kuvvetleri sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla büyük benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, matris/baskı plakası yüzeylerine açı vermenin limit çekme oranı, et kalınlığı ve zimba kuvveti üzerinde olumlu etkilerinin olduğu, deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir.

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, deneysel ve sayısal çeşitli çalışmaların yapıldığı görülmektedir.

Savaş ve Seçkin [1], baskı plakası ile kalıp arasına 0° , $2,5^\circ$, 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 [2], dairesel kesitli kapların derin çekilmesinde, matris ve zimbaya farklı radyüsler, matris/baskı plakasına ise farklı açı değerleri verilerek radyüs ve açının limit çekme oranı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada 1 mm kalınlığında DKP37 sac malzeme kullanılmış, artan matris/zimba radyüsü ve matris/baskı plakası açı değerlerine bağlı olarak limit çekme oranının arttığı belirlenmiştir.

Lin vd. [3], basınçlı hidromekanik derin çekme kalıbı için farklı bir zimba tasarlayarak, harici bir basınç kaynağına ihtiyaç duyulmadan kalıplama basıncının bir avantaj olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Herrera vd. [4], orta karbonlu SAE 1050 çeliğinin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla soğuk haddeleme ve ısıtma işlemleri uygulamışlardır. Haddeleme sonucunda malzemede meydana gelen uzamanın %2'den az olduğu ve çekme gerilmesinin 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 vd. [5], polimer kaplı metal levhaların derin çekme işlemi esnasında tabaka kalınlığını önceden hesaplamak için sayısal bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada metal polimer ara yüzeyinin özelliğini kaybetmeden ne kadarlık bir kalınlığa erişebileceğini ve bunun kalıplama radyüsü, matris/zimba arasındaki düzleme etkisini

araştırmışlardır. Kaplama kalınlığının artmasıyla elde edilen numunenin yüzey kalitesinin bozulduğunu gözlemlemişlerdir.

Plaut vd. [6], haddelemeyle % 50 – % 80 inceltilen SAE 1050 çeliğinin ısıtılma işlemle mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini araştırmışlar, soğuk haddelemede %50 oranında inceltilen numunenin daha iyi şekillendirilebilme yeteneğinin olduğunu gözlemlemişlerdir. Optik mikroskopi ve mekanik test sonuçlarında elde edilen değerlerin sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerlerle aynı olduğunu tespit etmişlerdir.

Roizard vd. [7], derin çekme işleminde zımba – sac malzeme ve matris arasında gerçekleşen sürtünme sonucu oluşan ısı ve metal akışı olaylarını LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensörü bulunan bir potansiyometre ile ölçmüşlerdir. Yapılan ölçüm yönteminin, diğer mekanik ölçüm yöntemlerine nazaran daha doğru sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir.

Sivasankaran vd. [8], farklı sıcaklıklarda tavlama işlemine tabi tutulmuş saf alüminyum sacların buruşma ve çeşitli deformasyonlar olmadan konik biçimde derin çekilebilirliğini yapay sınır ağları yöntemi ile modellemişlerdir. Modelden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, sonuçların birbirine yakın olduğunu, bu model ile oluşan deformasyonların tahmin edilebildiğini ve ayrıca mekanik analizlerinde yapılabildiğini ifade etmişlerdir.

Lang vd. [9], alüminyum alaşımının derin çekme işlemi esnasında ilkel parça geometrisi ve kalıplama basıncını optimize etmek amacıyla deneysel bir çalışma yaparak bu sonuçları LS-DYNA 3D sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçlar arasında önemli bir uyumun olduğu sonucuna varmışlardır.

Lin ve Kwan [10], yaptıkları çalışmada eliptik bir şeklin kulaklaşma olmadan derin çekilebilirliğini, deneysel ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Teorik yöntemde, limit çekme oranı ve malzeme akış karakteristiklerini hesaba katmışlardır. Çalışma neticesinde sonuçlar karşılaştırıldığında deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyumun olduğunu belirlemişlerdir.

Padmanabhan vd. [11], kare kapların derin çekme yöntemi 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 metodun, ilkel parça geometrisini ve meydana gelecek çeşitli deformasyonları rahatlıkla hesaplayabildiğini görmüşlerdir.

Bastos ve Simões [12], yüzeyi çinko, fosfat ve organik filmle kaplanmış galvanizli çelik levhalarda derin çekme işlemi sonucu oluşan korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler karşılaştırıldığında, korozyon direncinin kaplı numunelerde daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Ren vd. [13], magnezyum alaşımının sıcak derin çekilebilirliğini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle teorik olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarını, 150°C – 250°C sıcaklık ve 6 mm/dak – 120 mm/dak zımba ilerleme hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla dikdörtgen kesitli kapların çekilebilirliğinin arttığını, deneysel ve sayısal olarak belirlemişlerdir.

Hwang vd. [14], kesme, bükme ve derin çekme olmak üzere çok amaçlı bir birleşik kalıp geliştirmişlerdir. 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 ürün 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 vd. [15], saf titanyum malzemesinin 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 sürtünme katsayısının önemli bir etkiye sahip olduğu deneysel ve sonlu eleman modeli ile elde etmişler, uygun bir limit çekme oranı belirlemişlerdir.

Delucchi vd. [16], soğuk haddelenmiş paslanmaz çeliklerin (AISI 304L ve 305) derin çekme işlemi için uygun olduğunu, haddeleme esnasında yüzeylerde oluşan oksit tabakasının çekme işlemi sırasında zımba/matris yüzeylerine zarar verdiğini ve malzemenin kalıp içerisine akışını güçleştirdiğini belirlemişlerdir. Malzeme yüzeyinde oluşan oksit parçalarını elektrolitik yöntemle kaldırarak derin çekme işleminin daha verimli hale geldiğini göstermişlerdir.

Vollertsen vd. [17], mekanik yöntemlerden farklı olarak vurumlu lazer yöntemi kullanarak mikro derin çekme deneyleri yapmışlardır. Bu yöntemde çekilecek plaka üzerine bir plazma şok dalgası göndererek çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 20

ve 50 μm kalınlıklarında saf titanyum, bakır ve paslanmaz elik plakalar kullanılmıştır. Yöntemde ayrıca enerji yoğunluğunu arttırmaksızın, bir noktaya çok sayıda vurumların gönderilmesi ile yüksek çekme miktarlarına ulaşılmıştır. Yüzeye gönderilen şok dalgasının basıncı ölçölmüş ve optimize edilmiştir. Sonuç olarak, vurumlu lazer yöntemi sonrası plakaların tek adımla şekillendirilebildiğini tespit edilmişlerdir.

Saxena ve Dixit [18], kare ve silindirik kesitli kapların derin çekilmesinde zımba geometrisi ve kalıplama parametrelerinin kulaklanmaya olan etkilerini araştırmışlardır. Kare kesitli kaplarda, kulaklanma oluşumuna düzensiz malzeme akışının yol a ıttığı tespit edilmiştir. Lagrangian yaklaşımına göre bir sonlu eleman modeli kullanılarak analizler yapılmıştır. Modelde izotropik sertleşmenin ger ekleştiği varsayılarak ve güç kanunundan faydalanılarak bazı denklemler elde edilmiştir. Bu denklemlerin çözümü için Newton Raphson tekniğini kullanmışlardır.

Yang [19], saf titanyum levhaların kare kap biçiminde farklı sıcaklıklarda derin çekme işleminin simülasyonunu yapmak ve optimum ilkel par a şeklini tasarlamak için bir çalışma yapmıştır. Çalışmada sonlu elemanlar yazılımı olan DEFORM-3D paket programını kullanmıştır. Bu programda, çeşitli parametrelere bağlı olarak basın  dağılımı ve en büyük kuvvetleri tespit etmiştir. Tasarlanan modelde daha küçük dairesel ilkel par a boyutlarının kullanılmasıyla daha düşük zımba kuvveti ile kabul edilebilir çekme oranlarının elde edildiğini belirlemiştir.

Padmanabhan vd. [20], Tailor kaynak yöntemiyle birleştirilmiş alüminyum – elik plakaların derin çekme işlemini sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişler ve baskı plakası kuvvetinin derin çekilebilirliği önemli ölçüde etilediğini görmüşlerdir.

Luo vd. [21], yaptıkları çalışmada mekanik ön şekillendirmeyi arttırmak ve maliyeti düşörmek için bir yöntem (SPF (superplastik forming) yöntemi) geliştirmişler, bu yöntem sonucunda kalıplanan malzemenin et kalınlığının arttırılabildiğini ve kalıplama zamanının ise azaltılabildiğini göstermişlerdir.

E vd. [22], analitik hesaplama, deneysel analiz ve sonlu elemanlar analizi yöntemlerini kullanarak dikdörtgen biçimli kapların derin çekilmesi işleminde meydana gelen gerilmeleri tespit ederek ayrı ayrı karşılaştırmışlardır. Her üç yöntemde de basın  dağılımının etkili olduğu görölmüş, 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 ger eğe daha yakın sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

Khelifa ve Oudjene [23], anizotropik elastoplastisite ve izotropik süneklik hasarı yöntemlerinin her ikisine dayalı etkili bir hasar modeli gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri model yardımıyla şekillendirme esnasında iş parçasındaki hasarın oluşma yerini ve zamanını tahmin etmişlerdir.

Zhang vd. [24], hidro–mekanik derin çekme yönteminde, sonlu elemanlarla elde edilen şekillendirme–limit çekme diyagramı ile tane kenarlarındaki çatlakların etkisini incelemişlerdir. Tane sınırında oluşan çatlakların ilk kez kendi çalışmalarında incelendiğini belirtmişlerdir.

Demirci vd. [25], AA5754-O alüminyum alaşımı malzemeden kare kesitli kapların derin çekme ile şekillendirilmesi esnasında baskı plakası kuvvet dağılımını incelemişlerdir. Deneysel çalışmadan ve LS-DYNA yazılımından elde edilen sonuçları karşılaştırarak %85 oranında sonuçların birbirleri ile tutarlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Park ve Yarlagadda [26], farklı asimetrik şekilli ilkel parçaların kademeli olarak derin çekilebilirliğini araştırmışlardır. Eliptik parçalarda zımba ve kalıp profil radyüslerinin ve ilkel parça geometrisinin zımba kuvveti üzerinde etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Oliveira vd. [27], bir implisit algoritması geliştirerek şekillendirme işlemindeki metal plakanın simülasyonunu optimize etmişlerdir. Çalışmada deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında, DD3IMP yazılımının önemli ölçüde doğru sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Sattari vd. [28], dikdörtgen kapların derin çekilmesinde simülasyon programları ile ürünün farklı kesitlerindeki kalınlık değişimlerini incelemişler ve incelmenin sacın en çok zımba radyüsü bölgesinde olduğunu belirlemişlerdir.

Gavas ve İzçiler [29], ETIAL-8 alüminyum levhanın kare olarak derin çekme işleminde baskı plakası boşluğunun 1 – 1,8 mm arasındaki değişimin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlar, derin çekme işleminde kare kap çekmek için uygun baskı plakası boşluğu ve oluşan hasarların tiplerini belirlemişlerdir. Baskı plakası boşluğunun 1,3 mm’den büyük olması durumunda yüzey kalitesinin düştüğü sonucuna varmışlardır.

Lee vd. [30], AZ31 alaşımının derin çekme ile şekillendirilmesi işlemlerinde limit çekme oranını deneysel ve sonlu elemanlar analizlerini kullanarak araştırmışlardır. Sıcaklığa bağlı şekillendirme limitlerini LS–Dyna programı yardımıyla tahmin etmişlerdir.

Karalı [31], derin çekme işlemi esnasında kalıp boşluğunun çekilen kap üzerindeki etkilerini MSC-Marc sonlu elemanlar programı kullanarak araştırmış ve kalıp boşluğunun derin çekme işlemi için önemli olduğunu tespit etmiştir.

Gavas ve İzciler [32], kare kapların derin çekilebilmesi için yeni tip bir baskı plakası tasarlamışlardır. Baskı plakası yüzeyine spiral kanallar açarak, yapılan deneyler neticesinde, kabın duvarlarında üniform bir kalınlık dağılımı, daha iyi malzeme akışı ve derin çekme işleminde yağlamanın etkisinin daha uzun süre devam etmesinin sağlandığını görmüşlerdir.

Wei vd. [33], derin çekme işlemi sonucu elde edilen numunelerin kalınlıklarındaki değişimleri inceleyerek levha yüzeyindeki sürtünme dağılımlarının düzenli olup olmadığını araştırmışlar, zımbanın hareket mesafesi süresince baskı plakasına gelen kuvvetleri incelemişlerdir. Kullanılan yeni tip kalıbın, kabın incelmelerini ve yüzeydeki sürtünmeyi azalttığı, baskı plakasına gelen kuvvetleri ise homojen hale getirdiği belirlenmiştir.

Yuqi vd. [34], kare kapların derin çekilmesi işleminde kap kenarlarında kulaklanma oluşumunu sonlu elemanlar yöntemiyle analiz ederek, deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar yönteminin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırılan sonuçların birbirine yakın olduğunu tespit etmişlerdir.

Menezes ve Teodosiu [35], kare kapların derin çekme işleminde gerilme ve burulmaları sayısal olarak hesaplamak için üç boyutlu sonlu elemanlar modeli üzerinde çalışmışlardır. Oluşturulan modelden ve yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların yüksek oranda tutarlı olduğunu belirlemişlerdir.

Zimmiak [36], sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çekme limit diyagramlarının oluşturulmasını amaçlayan bir çalışma yapmıştır. Basınç – gerilme arasındaki bağıntının altı elemanlı Barlat verim kriterinde boyun verme başlangıcını iyi tahmin ettiğini ve deneysel çalışma sonuçlarıyla büyük bir uyum içinde olduğu sonucuna varmıştır.

Marumo vd. [37], alüminyum malzemeden çekilen kare kaplarda, zımba köşe radyüsünün ve gerilme sertleşmesinin karakteristiklerinin çekilebilirliğe olan etkisini araştırmışlardır. Küçük radyüslerde limit çekme oranının azaldığı, büyük radyüslerde ise bu oranın artması ile birlikte kaptaki yırtılma zorlanmasının azaldığı ve yırtılmanın önlendiği belirlenmiştir.

Marumo ve Saiki [38], kare kapların derin çekme işleminde kalıp parametrelerinin (ilkel parça malzemesi, ilkel parça şekli, zımba şekli ve zımba yağlaması) kabın kalitesi, kap hasarları ve dinamik yırtılma kuvveti üzerindeki etkilerini araştırarak, derin çekme işleminde kaptaki incelmelerin azalması sağlanarak limit çekme oranının arttığını tespit etmişlerdir.

Gea ve Ramamurthy [39], kare kapların derin çekilmesi işleminde üç farklı geometride ilkel parça kullanarak, ilkel parça ölçülerinin optimizasyonunu sayısal bir yöntemle yapmışlardır. Parçaların yırtılma olmadan en büyük limit çekme oranlarını amaç fonksiyonu olarak kullanmışlar ve dairesel geometriye sahip ilkel parçalarda, limit çekme oranının en büyük olduğunu belirlemişlerdir.

Mamalis vd. [40], kaplanmış galvanizli çeliklerin kare derin çekilmesini deneysel olarak araştırarak, uygun çekme parametrelerine bağlı olarak çekilen kaplardaki hasar değişimini belirlemişlerdir. Kaplarda meydana gelen büzülme, yırtılma, alt – üst çekme limitleri, gerilme dağılımları ve deformasyon tipleri tespit edilmiştir. Elde edilen veriler lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş, sonuç olarak deneysel verilerle modelin tutarlı olduğunu gözlemişlerdir.

Kuwabara ve Si [41], düzensiz şekillere sahip kapların derin çekilmesinde optimum ilkel parça şeklini belirlemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çekme işlemi sonucunda oluşan büzülme şekilleri ile model sonuçlarının uyumlu olduğunu, malzeme karakteristiklerinin diğerlerine nazaran parça şekline etkisinin küçük olduğunu belirlemişlerdir.

Koga ve Paisarn [42], AZ31 magnezyum alaşımlı sacların ısıtılmalı kalıp ile daire ve kare kesitli olmak üzere iki farklı geometride derin çekilebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, zımba radyüsleri değiştirilerek 30 mm çapında yuvarlak ve 20x20 ölçülerinde kare kesitli kaplar çekilmiş ve optimum çekmenin 247°C sıcaklıkta kare kesitli kaplarda gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Gavas ve Küçükrendeci [43], yaptıkları çalışmada alüminyum malzemeden hazırlanan değişik şekillerdeki ilkel parçaları kare kap biçiminde derin çekerek incelemişlerdir. Çektikleri tüm parçalarda herhangi bir yırtılma ve kopma meydana gelmemiştir. Taslak malzemenin optimum olması ile hasarsız, diğer durumlarda ise kulaklanma ve dalgalanma meydana geldiği ve buna bağlı olarak maliyetin arttığı tespit edilmiştir.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, derin çekme işleminde pres kuvveti, kalıp geometrisi, çekilen malzemenin cinsi, baskı plakası kuvveti, 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 matris ile baskı plakası yüzeylerine 0°, 5°, 10° ve 15°'lik açılar verilerek malzemenin kalıp boşluğu içerisine akışının daha kolay hale gelmesi sağlanmıştır. Ayrıca malzeme akışı ve kalıp içerisindeki şekillendirme işleminin kontrolünü sağlamak için baskı plakasına 2450 N, 4900 N, 7350 N ve 9800 N'luk kuvvetler uygulanmış ve matris/zımba radyüsleri R=4 mm, R=6 mm ve R=8 mm olarak değiştirilmiştir. LÇO'nın 1,77 den 2,32 ve et kalınlığındaki incelmenin ise 0,56 mm den 0,742 mm değerine çıkması 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.

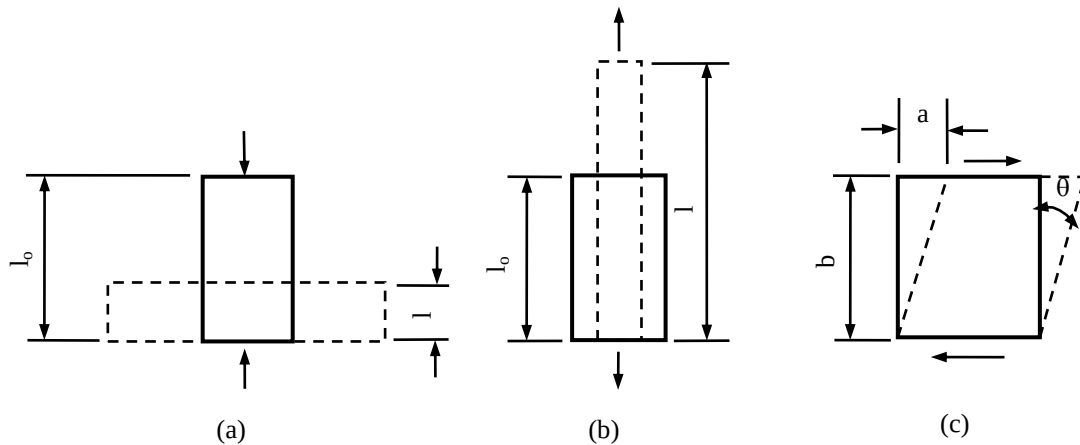
3. TEMEL BİLGİLER

3.1. Plastik Deformasyon

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

Metalik malzemelerin çoğu; karbonlu ve alaşımlı çelik, alüminyum, çinko, bakır ve bunların alaşımları plastik şekil verme yöntemleri ile işlenebilmektedir [44].

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



Şekil 3.1. Temel şekil değişimi [44]; 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 bağlı olarak tarif edilir. Basma ve çekmede birim şekil değiştirme;

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

olarak alınır. Bu ifadeden de görüldüğü gibi, birim şekil değiştirme, basmada negatif, çekmede ise pozitifdir. Kaymada ise şekil değiştirme;

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

şeklinde ifade edilir [44].

Kristalin 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});

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

mertebesinde. Burada, G , kristalin kayma elastisite 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, yapıda bulunan kristal 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 [45].

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 kristale uygulanan normal gerilme olup,

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

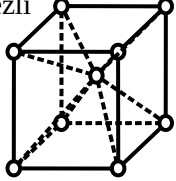
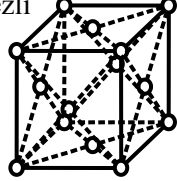
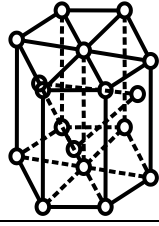
Hook kanunu olarak ifade edilir.

Bir kristalde kayma, Denklem 3.6'da hesaplanan σ kayma 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 kristallerinde plastik şekil değişiminde, $\tau_r > \tau_{kr}$ 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 [45].

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

Tablo 3.1. Çeşitli metallerin kristal yapısı [45].

Hacim merkezli kübik (HMK) 	Yüzey merkezli kübik (YMK) 	Sıkı paket hekzagonal (SPH) 
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)

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.

Metalik malzemelerin plastik deformasyon kabiliyeti, kimyasal bileşim ve metalürjik yapı tarafından kontrol edilen mekanik özelliklerin yanı sıra deformasyon koşullarına da bağlıdır [45].

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.

Mekanik işlem sırasındaki deformasyon sıcaklığının (T , °K) malzemenin ergime sıcaklığına (T_m , °K) oranı olan benzeş sıcaklığı (T/T_m) göre deformasyon işlemleri üç gruba ayrılır [45].

$T/T_m > 0,5$	ise sıcak işlem
$0,5 > T/T_m > 0,3$	ise ılık işlem
$T/T_m < 0,3$	ise soğuk işlem olarak belirlenir.

Soğuk işlem koşullarında, malzemeye uygulanan deformasyon miktarına bağlı olarak deformasyon sertleşmesi nedeniyle mukavemet artar. Deformasyon miktarının mukavemet üzerindeki etkisi;

$$\sigma_g = K \cdot \varepsilon^n \quad (3. 7)$$

şeklindeki Holloman eşitliği ile ifade edilmektedir [45].

Burada;

- σ_g : Gerçek gerilme (N/mm²),
 K : Mukavemet katsayısı (N/mm²),
 ε : Gerçek birim şekil değiştirme,
 n : Deformasyon sertleşmesi üssü dür.

Soğuk işlem etkisiyle malzemenin metalurjik yapısı, özellikle tane şekli değişikliğine uğramaktadır. Plastik deformasyon sırasında tanelerin deformasyon yönünde uzaması sonucu malzeme özellikleri yöne bağımlı hale gelir (anizotropi). Metalik malzemelerde anizotropinin kristallografik anizotropi ve mekanik fiberleşme 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 güçtür. 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 ($T > 0,5 T_m$) deformasyon hızının etkisi oldukça fazladır. Deformasyon hızının mukavemet üzerindeki etkisi;

$$\sigma = C \cdot \dot{\varepsilon}^m \quad (3.8)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir [45].

Burada,

- σ : Plastik gerilme (N/mm²),
 C : Malzeme sabiti (N/mm²),
 m : Deformasyon hızı duyarlılığı üssü,
 $\dot{\epsilon}$: Gerçek deformasyon hızı (mm/s),

olarak alınır.

Deformasyon hızının, artmasıyla malzemelerin mukavemeti artarken, sünekliği azalır. HMK metaller diğer kristal yapıları 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 [45].

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

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{d[\ln(L-L_0)]}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L} \quad (3.10)$$

Burada;

- L_0 : Numunenin deformasyon öncesi uzunluğu (mm),
 L : Numunenin deformasyon sonrası uzunluğu (mm),
 v : Pres hızı ($v = dL / dt$) (m/dk),

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

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\epsilon}}{1+e} \quad (3.11)$$

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

$$\sigma = D \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot \epsilon^n \quad (3.12)$$

şeklindeki genel bir eşitliğin kullanılması öngörülmüştür [45].

Burada;

D : Malzeme sabitidir.

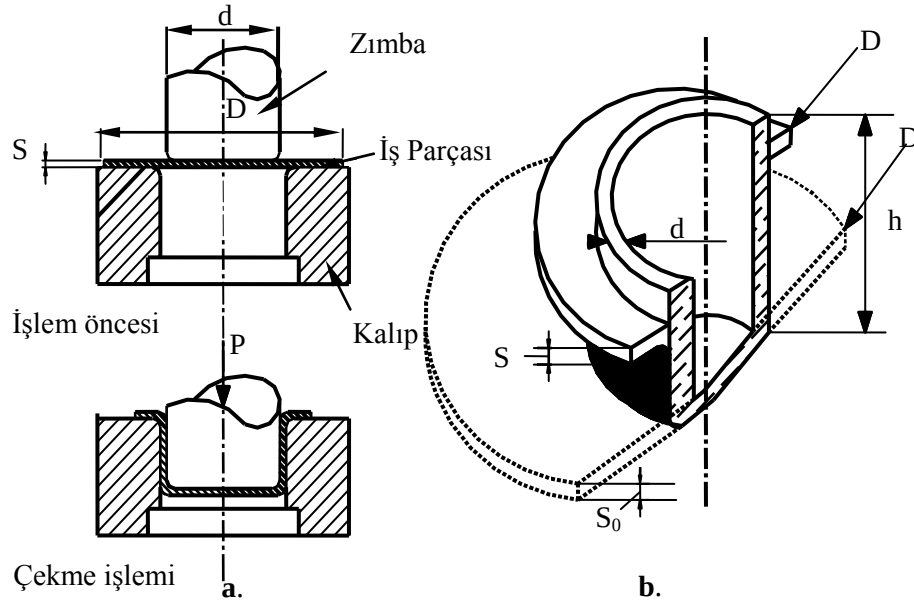
Ilık işlemin sıcak ve soğuk işleme göre bir takım avantajları vardır. Sıcak işleme göre en önemli avantajı enerji tasarrufudur. Soğuk işleme göre en önemli avantajı ise, gerçekleştirilebilen toplam deformasyon oranının soğuk işlemdekinden fazla olması, aynı zamanda soğuk işlenmiş malzeme mukavemetine yakın mukavemetlerde 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 [45].

Plastik deformasyonu gerçekleştirecek cihazda, kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünme, aşınma ve güç kaybına sebep olur. Ayrıca malzemenin deformasyon kabiliyeti, sürtünmeden olumsuz yönde etkilenir. Sürtünmeyi en aza indirmek için yağlama yapmak 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 alınır. 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 etkide 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 uğrayamadıklarında, yapılarında kalıntı gerilmeler oluşur. Kalıntı gerilmeler elastik gerilmeler olup, en fazla malzemenin akma mukavemeti değerine erişebilirler. Kalıntı gerilmeler, ısıl işlemle 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 [45].

3. 2. Derin Çekme ve Derin Çekme Mekanikği

İki boyutlu, düzlemsel geometriye sahip iş parçasının çekme kalıbı denilen elemanlar yardımıyla preste çökertilmesi sonucunda belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçalar elde edilmesi işlemine “çekme” adı verilmektedir. Çekme yardımıyla elde edilmesi düşünülen kaplar birden fazla operasyon ile de oluşturulabilirler. Birbirini takip eden ve çok sayıda çekme işleminden oluşan bu imalat yöntemi derin çekme yöntemi olarak bilinmektedir [46].

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

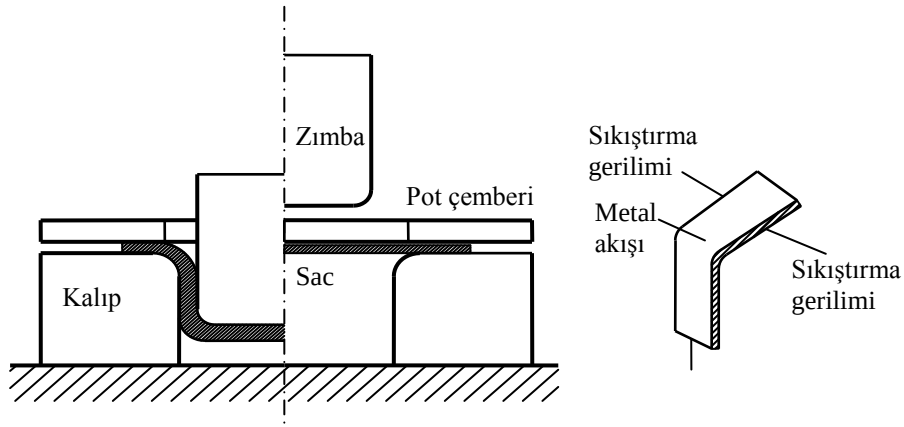


Şekil 3.2. Derin çekme işlemi, a. Şematik, b. Perspektif [47].

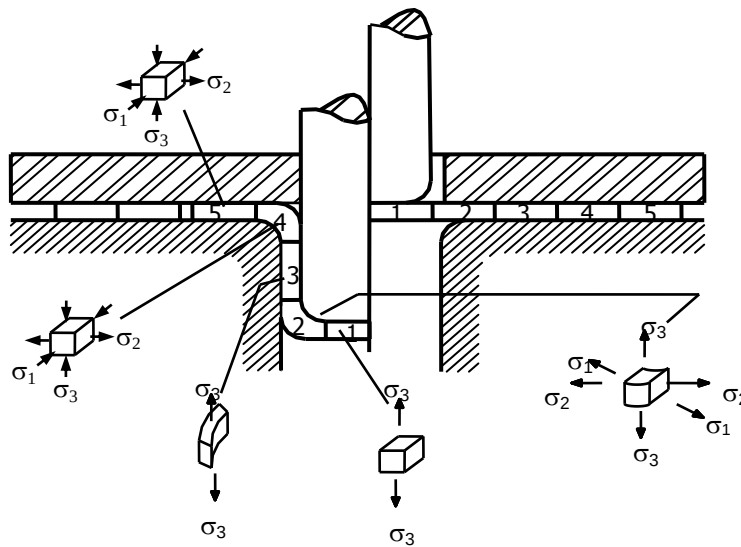
Şekilde görüldüğü gibi, başlangıçta S_0 Kalınlığı ve D başlangıç çapına sahip düzlemsel, metalik ve şekillendirilebilir bir levha, d çapındaki bir zımba yardımıyla kalıp (matris) içine çekilmek suretiyle, altı düz, silindirik bir parça haline getirilmektedir [47].

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 şekillenmeye başlayarak düşey duvarlar oluşturur. Bu olay levha yüzeyinde dairesel sıkıştırma gerilimine sebep olur. Zımbanın ilerleyen hareketi ile sac levhanın büyük bir kısmı kalıp boşluğunda küçük dairesel flanş oluşturur. Şekil 3.4'den de anlaşıldığı gibi düşey duvarlarda kalıp dibine doğru gittikçe büyüyen tek eksenli gerilmeler oluşur [48].

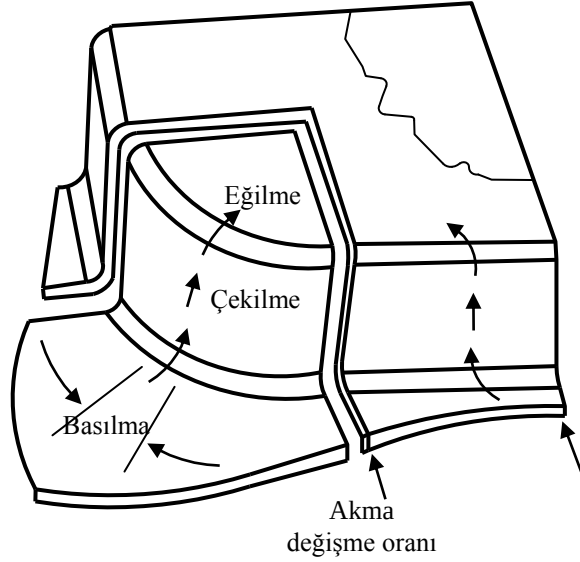


Şekil 3.3. Derin çekmenin mekaniği [48].



Şekil 3.4. Derin çekme esnasında parçada boylamsal kısımlarda meydana gelen gerilmeler [48].

Kare kapların çekilmesi esnasında, çekilen kabın köşelerinde eğilme, çekilme ve basılma gerilmeleri meydana gelir (Şekil 3.5) [49].



Şekil 3.5. Dikdörtgen veya kare kapların köşe gerilme analizi [49].

3.3. İlkel Parça Boyutlarının Belirlenmesi

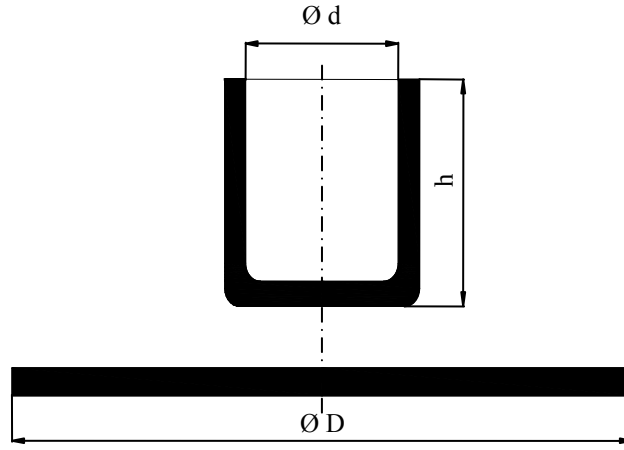
Çekme işleminin tasarımına çekme öncesi parça boyutlarının ve şeklinin belirlenmesiyle başlanmaktadır. Çekme işlemi süresince, sac malzeme eğilme, basılma ve çekilme gerilmelerine uğrar. Her plastik şekil verme işleminde olduğu gibi çekme işleminde de, çekme öncesi parça hacmiyle çekme sonrası parça hacmi eşittir [50].

Silindirik parçalar için ilkel parça boyutları belirlenirken, ilkel çapı bulunacak olan ürünün çekilmeden önceki kesit alanı, çekildikten sonraki kesit alanına eşit kabul edilerek ilkel parça çapı aşağıdaki gibi yazılır [50].

$$\frac{D^2 \cdot \pi}{4} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} + d \cdot \pi \cdot h \quad (3.13)$$

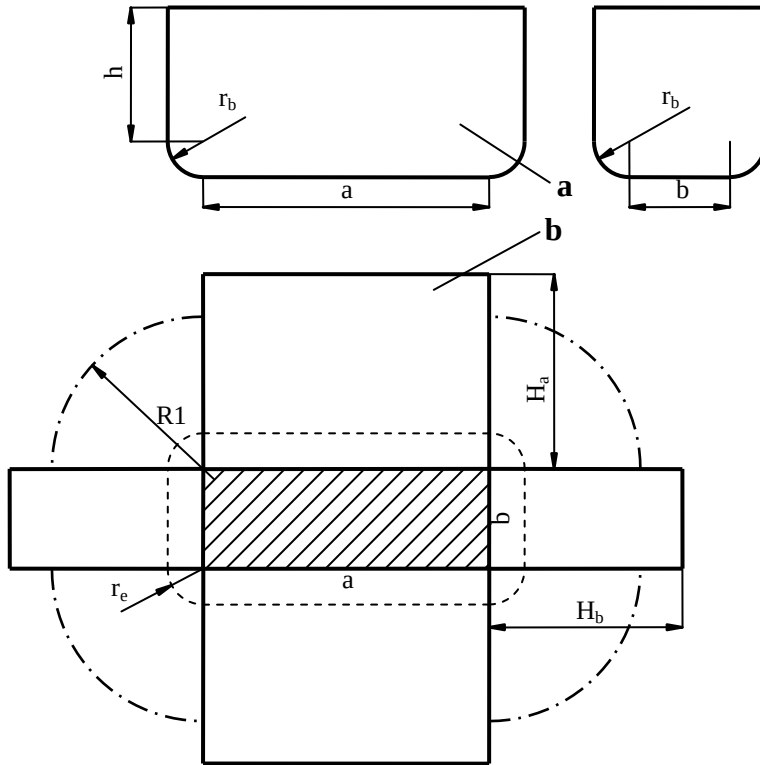
$$D = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} \quad (3.14)$$

mm olarak bulunur.



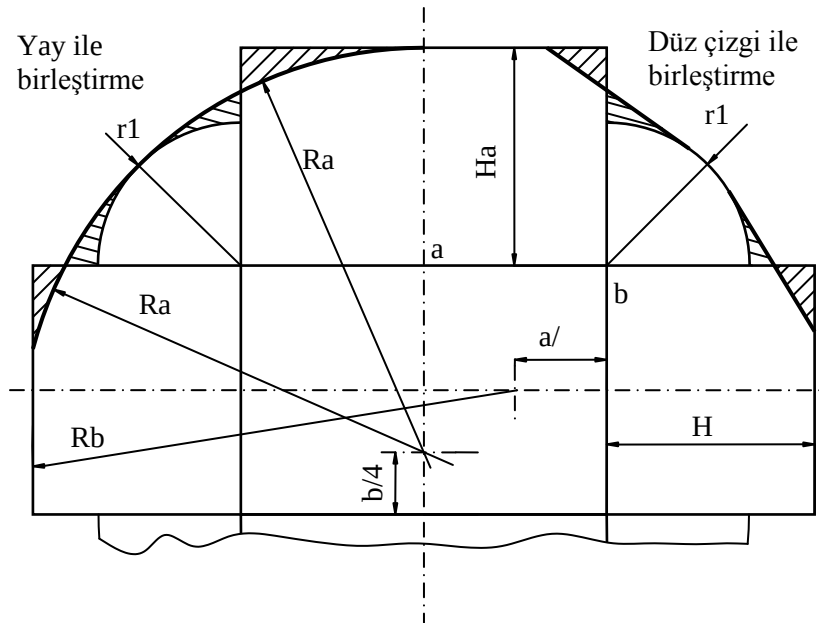
Şekil 3.6. Alan metodu ile ilkel çapın bulunması [50].

Dikdörtgen profilli derin çekme işleminde, ilkel parça boyutlarını belirlemek amacıyla elde edilecek kap eşit alana sahip elemanlara bölünür (Şekil 3.7). Bu işlem aşağıdaki gibi sıralanabilir [51].



Şekil 3.7. a) Dikdörtgen kabın boyutları, b) Eşit alanlı elemanlara ayrılması [51].

1. Kabin alt kısmına kenar uzunlukları a ve b olan radyüssüz bir dikdörtgen çizilir (Şekil 3.7b).
2. Kabin yan kenarlarındaki r_b yarıçapı taşınarak $a - b$ dikdörtgenine eklenir.
3. a kenarı H_a mesafesi kadar ve b kenarı H_b mesafesi kadar ofsetlenir.
4. Dikdörtgenin köşe noktalarından R_1 yarıçapında çeyrek daireler çizilir.
5. Daha sonra tüm keskin kenarlar kırpılır. Dikdörtgenin merkezi uzunluklarının $\frac{1}{4}$ 'ü kadar kaydırılarak elde edilen yeni kesişim noktalarından R_a ve R_b yarıçaplarında R_1 'e teğet yeni yaylar çizilir (Şekil 3.8). Eğer $a = b$ ise tam bir daire elde edilir.
6. Bu işlem basit şekilde yaylara teğet doğrular çizilerek de elde edilebilir. Ancak bu yöntemin hassasiyeti düşüktür.



Şekil 3.8. Doğru veya yaylar yardımıyla ilkel parça geometrisinin oluşturulması [51].

Yukarıda belirtilen R_1 , H_a ve H_b değerleri, kap ölçülerine bağlı olarak aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir.

$r_e = r_b = r$ olması durumunda

R tasarım radyüsü:

$$R = 1.42\sqrt{r \cdot h + r^2} \quad (3. 15)$$

Düzeltilme katsayısı x :

$$x = 0.074 \left(\frac{R}{2r} \right)^2 + 0.982 \quad (3.16)$$

$$R_1 = R \cdot x \quad (3.17)$$

$$H_a = 1.57r + h - 0.785(x^2 - 1) \frac{R^2}{a} \quad (3.18)$$

$$H_b = 1.57r + h - 0.785(x^2 - 1) \frac{R^2}{b} \quad (3.19)$$

$$a = L - 2r_e \quad (3.20)$$

$$b = B - 2r_e \quad (3.21)$$

$$h = H - r_e \quad (3.22)$$

$$r_e = r_b \quad (3.23)$$

Diğer yandan, eğer $r_e \neq r_b$ ise

R tasarım radyüsü:

$$R = \sqrt{1.012r_e^2 + 2r_e(h + 0.506r_b)} \quad (3.24)$$

Düzeltilme katsayısı x :

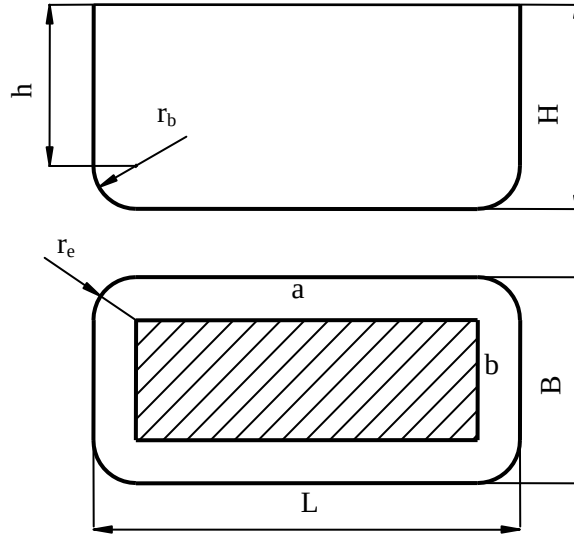
$$x = 0.074 \left(\frac{R}{2r} \right)^2 + 0.982 \quad (3.25)$$

$$R_1 = R \cdot x \quad (3.26)$$

$$H_a = 0.57r_b + h + r_e - 0.785(x^2 - 1) \frac{R^2}{a} \quad (3.27)$$

$$H_b = 0.57r_b + h + r_e - 0.785(x^2 - 1) \frac{R^2}{b} \quad (3.28)$$

olarak hesaplanır.



Şekil 3.9. Dikdörtgen parça ile farklı dip ve kenar radyüsleri [51].

3.4. Limit Çekme Oranı

Limit çekme oranı, derin çekme işleminin özel bir halidir. Tanım olarak, yırtılmadan ideal şekilde çekilebilecek en büyük dairesel iş parçası çapının, bu işlemi gerçekleştirebilmesi öngörülen zımba çapına oranı, şeklinde tarif edilir [52]. Limit çekme oranının hesaplanmasında ise;

$$\beta = \frac{D_{\max}}{d} \quad (3.29)$$

eşitliği kullanılır [47].

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. Zira iş parçasının başlangıç çapı büyüdükçe çekme işlemini gerçekleştirmek için ihtiyaç duyulan zımba kuvveti de artmaktadır. Artan

zımba kuvvetinden dolayı oluşacak bir hasar genellikle kabın yan duvar (veya cidar) kısmında ve zımba yuvarlatma yarıçapının başlangıç bölgesinde oluşmaktadır [47].

Çekilecek olan parça boyutlarına göre ilkel çap hesabı yapıldıktan sonra, ilkel parçanın hangi kademelerden geçerek istenilen ölçülerdeki parçaya dönüştürüleceği belirlenmelidir.

Çekilen malzemenin kalıcı şekil değişimine zorlanması, malzeme üzerinde değişik gerilmelerin ortaya çıkmasına sebep olur. Çekme işleminin gerçekleştirilebilmesi için malzemenin bu gerilmelere dayanması gerekmektedir. Malzeme üzerindeki gerilmeler şekil değişimi ile orantılı olduğu için, her çekme işleminde malzemenin dayanabileceği ölçüde şekil değişimi uygulanmalıdır.

İlk çekme için izin verilen en büyük limit çekme oranı β_0 , zımba çapının sac kalınlığına oranına bağlı olarak Tablo 3.2 yardımıyla β_0 belirlenir.

Tablo 3.2. Zımba çapı ve sac kalınlığına bağlı olarak ortalama β_0 değerleri [51].

d/s	30	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600
β_0	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 $\beta_{gerçek} \leq \beta_0$ olmalıdır.

3.4.1. Silindirik Parçalar İçin Derin Çekme Adımları

$$1. \text{ çekme } d_1 = \frac{D}{\beta_0}$$

$$2. \text{ çekme } d_2 = \frac{d_1}{\beta_1}$$

$$3. \text{ çekme } d_3 = \frac{d_2}{\beta_1}$$

$$n. \text{ çekme } d_n = \frac{d_{n-1}}{\beta_1}$$

Silindirik çekmelerin kademelendirilmesinde kullanılan “Hubert” eşitliği aşağıda verilmiştir [51].

$$n \cong \frac{h_n}{d_n} = \frac{D^2 - d_n^2}{4 \cdot d_n^2} \quad (3. 30)$$

Burada;

n : gereken çekme sayısı

h_n : n'inci çekim sonrası kap yüksekliği (mm)

d_n : n'inci çekim sonrası kap çapı (mm)

D : ilkel parça çapı (mm)

3.4.2. Dikdörtgen Parçalar İçin Derin Çekme Adımları

Dikdörtgen parçalar için derin çekme adımları, tasarım yarıçapı R_l (Denklem 3.26) ve malzeme sabit q değerlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır. Derin çekme sacları için $q \approx 0,3$ alınır.

1. çekme $r_1 = 1,2 \cdot q \cdot R_l$

2. çekme $r_2 = 0,6 \cdot r_1$

3. çekme $r_3 = 0,6 \cdot r_2$

n. çekme $r_n = 0,6 \cdot r_{n-1}$

Başka bir deyişle, tıpkı ilkel parça boyutlarının belirlenmesi gibi, kap tabanı temel dikdörtgeni ve köşe yarıçapının belirlendiği varsayılır [51].

3.5. Çekme Kuvveti

Çekme kuvveti, zımba çapına, sac malzemenin kalınlığına ve cinsine bağlıdır. Ayrıca, baskı plakasının uyguladığı basınç, çekme hızı, kalıp ve zımba radyüsleri, ilkel parça çapı, çekme boşluğu ve yağlama da çekme kuvvetine etki etmektedir [46]. Çekme kuvvetinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikten faydalanılmaktadır [52].

Silindirik parçalar için:

$$F_z = \pi \cdot d \cdot s \cdot R_m \cdot n \quad (3. 31)$$

Dikdörtgen parçalar için:

$$F_z = \left(2 \cdot r_e \cdot \pi + \frac{4+(a+b)}{2} \right) \cdot s \cdot R_m \cdot n \quad (3.32)$$

Burada;

- F_z : çekme kuvveti (N),
 d : zımba çapı (mm),
 s : sac malzeme kalınlığı (mm),
 R_m : sac malzemenin çekme dayanımı (N/mm²),
 n : katsayı,
 r_e : köşe radyüsü (mm),

3.6. Baskı Plakası Kuvveti (BPK)

Baskı plakası kuvvetinin büyüklüğü, çekme işleminde oluşan kırışmaları 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.

$$F_B = \frac{\pi}{4} [D^2 - (d + 2 \cdot r)^2] \cdot p \quad (3.33)$$

Genellikle, kalıp yarıçapı ve zımba ile kalıp arasındaki çekme boşluğu ihmal edildiği için, BPK'nin yaklaşık değeri, zımba çapına bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [53].

$$F_B \approx \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot p \quad (3.34)$$

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

$$p = \left[(\beta_{actual} - 1)^2 + \frac{d}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{R_m}{400} \quad N/mm^2 \quad (3.35)$$

Burada;

- p : Baskı plakası basıncı (N/mm²),

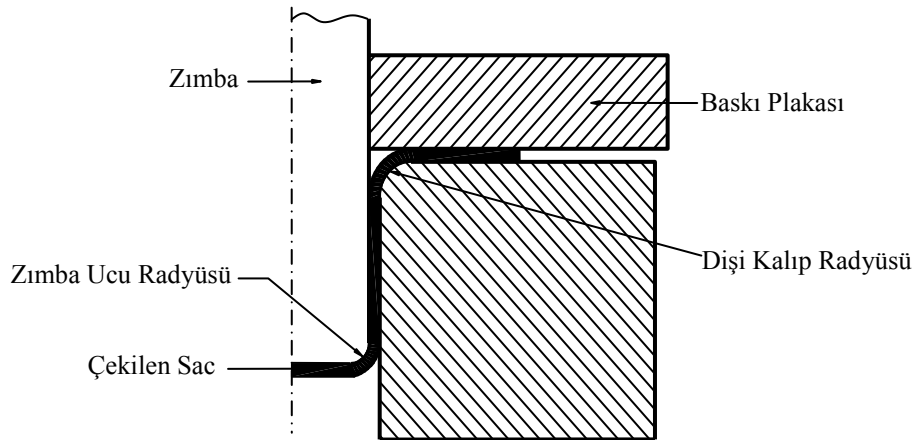
- d : Zımba çapı (mm),
 D : İlk çap (mm),
 s : Sac kalınlığı (mm),
 R_m : Çekme dayanımı (N/mm^2),
 β_{actual} : Gerçek çekme oranı (ilk çekme).

Baskı plakası kuvvetinin yetersiz olması halinde katlanmalar meydana gelir. Gereğinden büyük baskı plakası kuvveti ise yırtılmalara neden olur [44].

3.7. Kalıp Kenar Radyüsü ve Zımba Ucu Radyüsleri

Çekilen sacın ilk çekmede bir kere bükülüp doğrulduğu, müteakip çekmelerde ise iki kere bükülüp doğrulduğu dikkate alındığında, 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 takım ile temas etmeyen yüzeyi büyümekte ve parça üzerinde istenmeyen kırışıklıklar oluşmaktadır. Çekme kavislerinin çok düşük tutulması durumunda ise, sac malzemenin kalıp içerisinde akışı için gerekli olan temas alanı küçüleceğinden dolayı, takım kesme kalıbı gibi çalışmakta ve malzemenin yırtılması kolaylaşmaktadır [46, 54].

Zımba ucu radyüsü ve dişi kalıp radyüsü Şekil 3.10'da gösterilmiştir [46].



Şekil 3.10. Zımba ucu ve kalıp radyüsü [46].

Kalıp radyüsü için önerilen değer aralıkları Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Kalıp radyüsü için önerilen değerler [46].

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.

$$r_k = 0.035[50 + (D - d)]\sqrt{s} \quad (3. 35)$$

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 [46, 50].

$$\begin{aligned} \frac{s}{D} 100 > 0,6 & \quad \text{ise} \quad r_z = r_k \\ 0,3 < \frac{s}{D} 100 < 0,6 & \quad \text{ise} \quad r_z = 1,5 r_k \\ \frac{s}{D} 100 < 0,3 & \quad \text{ise} \quad r_z = 2 r_k \end{aligned}$$

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.

3.8. Çekme Hızı

Derin çekme işleminde zımbanın plastik deformasyonu başlattığı andaki hızına çekme hızı adı verilir. Çekme hızı; kalıplanan malzemenin cinsine, kalınlığına, kalıbın yüzey kalitesine ve yağlanma oranına göre değişir. Malzemenin cinsine göre deneyler sonucunda bulunan ortalama çekme hızı değerleri Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Silindirik çekmelerde malzemelerin cinsine göre çekme hızları [55].

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

3.9. Çekme Boşluğu

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 [56].

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 [46].

$$\text{Çelik için} \quad w = s + 0,07 \sqrt{10s} \quad (3.36)$$

$$\text{Alüminyum için} \quad w = s + 0,02 \sqrt{10s} \quad (3.37)$$

$$\text{Demir olmayan metaller için} \quad w = s + 0,04 \sqrt{10s} \quad (3.38)$$

3.10. Derin Çekmede Kullanılan Saclar

Kesme, bükme, çekme v.b. talaşsız şekillendirme işlemleri için seçilecek çelik saclarda aranacak ilk şart ön görülen presleme işlemine uygunluktur. Seçilen malzemede presleme esnasında çatlama, yırtılma, kopma gibi istenmeyen durumlar meydana gelmemelidir. Ayrıca pres işlemleri için düşünülen parçaların şekilleri de seçilen presleme yöntemine uyumlu olacak şekilde belirlenmelidir.

Preslemede “kesme” yöntemi ile imal edilecek parçalar için seçilecek çelik sacın türünün fazla önemi yoktur. Bu malzemelerin imalat sonrası yapılacak yüzey işlemlerine uygun yapıda olması gerekir.

Bükme, çekme ve sıvama gibi kalıpcılık yöntemlerinde üretilecek parçalar için seçilecek sacın önemi büyüktür. Çünkü bu imalat yöntemlerinde şekil değişikliği söz konusu olduğundan kalıplama işlemi esnasında kullanılacak malzemede çatlama, yırtılma ve kopma gibi hasarlar olmamalıdır.

Preslik saclar yumuşak alaşımsız çeliklerden kullanım amaçlarına göre sıcak veya soğuk haddeleme yöntemi ile imal edilmektedir. Pres işlerinde kullanılan 2 mm'nin altındaki saclar soğuk haddeleme yöntemi ile imal edilirler. Sıcak haddelenmiş saclarda işlem sonrası yüzeyde oluşan pul pul oksit tabakalar asitle giderildikten sonra piyasaya verilir. Bunlara “DKP” edilmiş sıcak hadde saclar denir. Sıcak veya soğuk haddelenmiş saclar arasında yapılacak seçim bir kalite tercihindan çok, istenilen kalınlıktaki malzemeyi temin edebilme sorunudur. Kalın sacları soğuk, ince sacları da sıcak haddelenmiş olarak temin etmek zordur. Orta kalınlıktaki saclarda ise üretilecek parçadaki yüzey durumu

tercihi belirleyen bir faktör olacaktır. Yüzey durumu önemli değilse sıcak hadde saclar daha ucuz olacağından tercih edilebilir. Boyut toleranslarındaki hassasiyet açısından soğuk haddelenmiş saclar sıcak haddelenmiş saclardan üstündür [46].

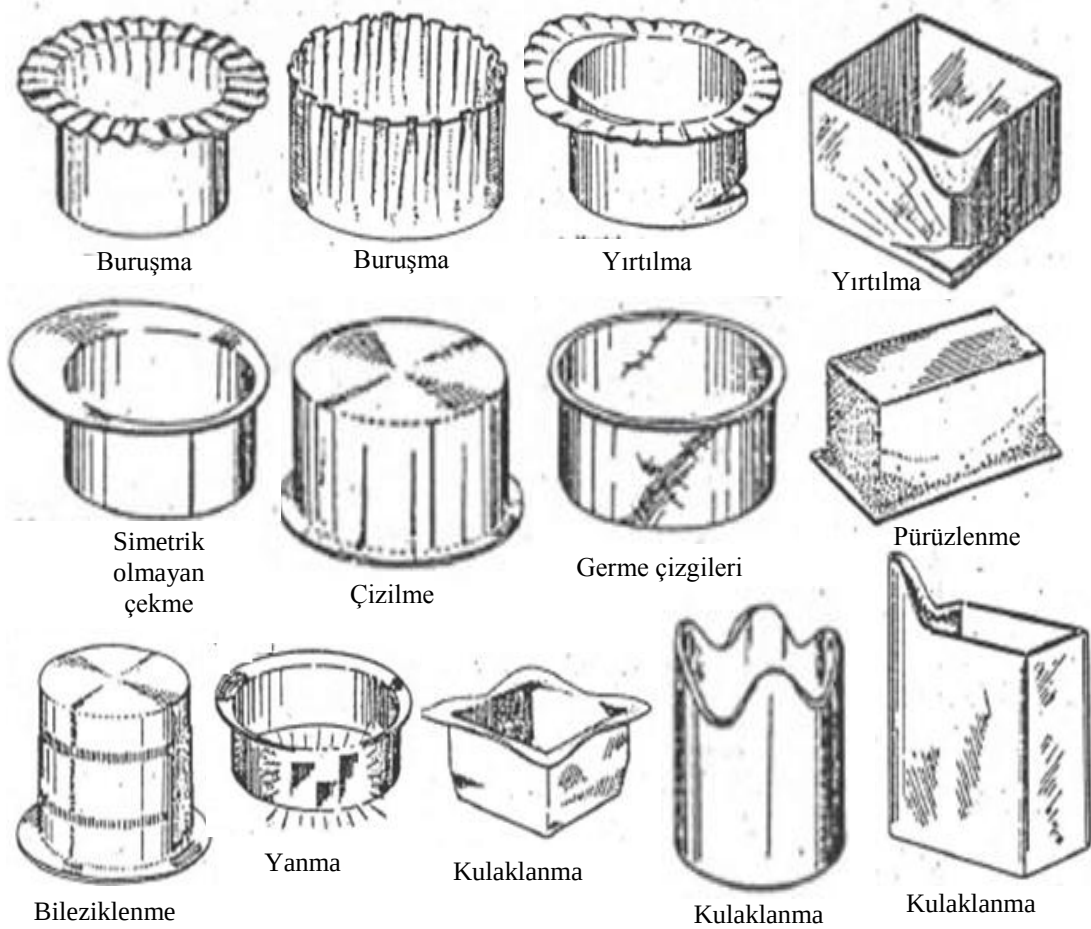
3.11. Derin Çekilme İşleminde Görülen Hatalar

Sac malzemelerin şekillendirilmesinde görülen önemli hatalar, erken çatlama, boyun verme olayından dolayı parça mukavemetinin azalması, buruşma veya burkulma ve geri yaylanmadan dolayı boyut toleranslarının değişmesi olarak sıralanabilir [49]. Bunların yanında özellikle tane yapısı iri olan metalik saclarda parça yüzeyinde pürüzlenme oluşur. İnce tane yapısına sahip malzeme kullanılırsa bu problem ortadan kalkar.

Derin çekme işleminde çatlama olayı genellikle zımba radyüsünün hemen üstündeki bölgede oluşur. Zımba veya matris radyüsünün az olması, malzeme özelliklerinin yetersiz olması, derin çekme oranının büyük seçilmesi, sıkıştırma basıncının yüksek olması, çekme boşluğunun küçük olması, yağlamanın yetersiz veya uygun yağ çeşidinin kullanılmaması bu hataya sebep olur [57]. Bu faktörlerin yetersizliği sonucunda zımba kuvveti artar ve malzemenin kritik bölgede incelerek kopması meydana gelir. Daha kaliteli malzeme kullanımı ve zımba kuvvetini azaltıcı tedbirlerin alınması ile bu hata önlenabilir. Bazı durumlarda çatlama işlemi parçanın üst veya dış kısımlarında görülür. Bunun sebebi ise malzemenin çevresel dış basınca karşı koyamayacak zayıflıkta özelliklere sahip olmasıdır. Malzeme üzerinde çentik gibi izlerin olması da çatlamaya yol açabilir. Buruşma olayı ise, çekme boşluğunun büyük olması, baskı plakası kuvvetinin yeterli olmaması, matris ve zımba radyüsleri ile taslak çapının gereğinden büyük olması veya malzemenin çok ince olduğu durumlarda görülür. Gerekli kalıp geometrisinin ve öngörülen baskı plakası kuvvetinin hassas ayarlanması ile buruşma engellenebilir. Şekil 3.11’de derin çekme işleminde rastlanan hatalar gösterilmektedir. Bunların yanında derin çekme işleminde genellikle aşağıdaki nedenlerden dolayı kabın flanş veya ağız kısmı düzgün olarak elde edilemez [58].

- Kalıp, çekilen malzeme ve zımba arasındaki sürtünme katsayısının farklı oluşu.
- Çekme işlemi esnasında malzemenin kalıp içersindeki homojen olmayan plastik deformasyonu.
- Çekilecek taslağın kalıba simetrik veya merkezi olarak yerleştirilmemesi.

- İş parçası yüzeyinin düzgün olmaması ve baskı plakası yüzeyinin düzgünlüğünü zamanla kaybetmesi nedeniyle baskı kuvvetinin taslak yüzeyine homojen olarak dağılamaması.
- Çekilecek olan sac parçanın üretimi esnasında hadde yönünün tek yönlü olması ve bunun sonucu olarak çekme işlemi sırasında farklı uzamaların meydana gelmesi veya belli bölgelerde yırtılmaların oluşması.

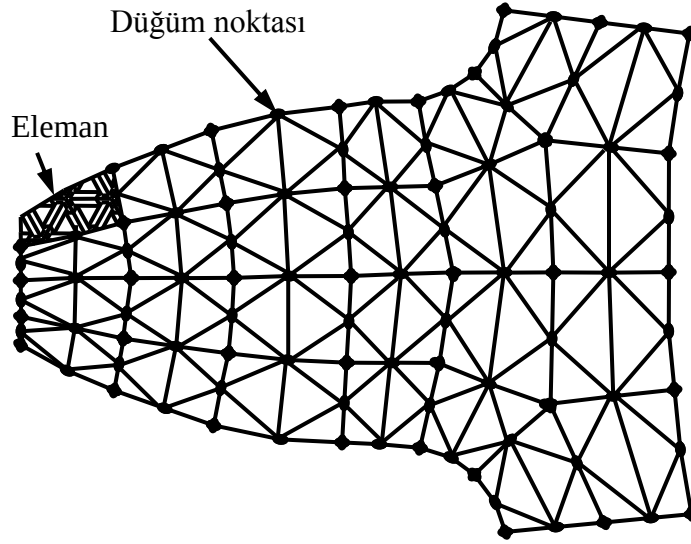


Şekil 3.11. Derin çekme işleminde görülen çekme hataları [58].

3.12. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method – FEM) yada sonlu elemanlar analizi (Finite Element Analysis – FEA) günlük yaşamda bir çok problemin çözümünde kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodunda problem daha önce belirlenmiş parçalara

(elemanlara) ayrılarak basitleştirilir (Şekil 3.12). Her elemanın yüklemeye vereceği tepkiyi ifade eden bir denklemi vardır. Bu elemanların tepkilerinin toplamı, tasarımın yüklemeye vereceği tepkiyi gösterir. Elemanlar sonlu sayıda bilinmeyen içerdiğinden bu metoda sonlu elemanlar metodu denir.



Şekil 3.12. Bir problemin sonlu elemanlar modeli [59]

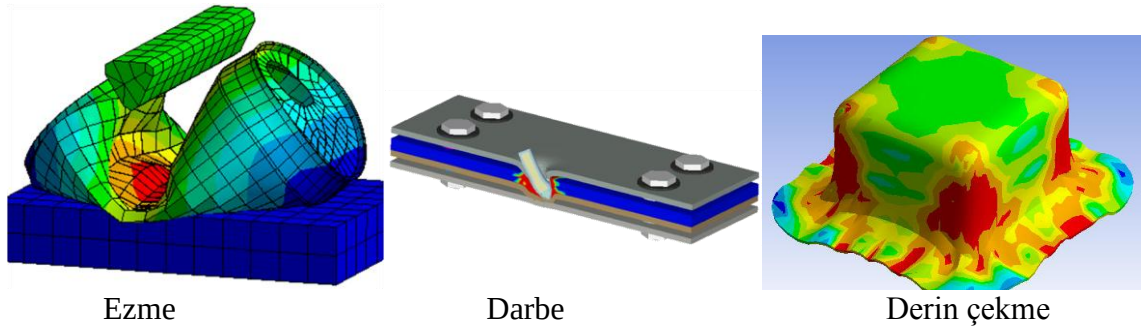
Sonlu sayıda bilinmeyişi olan sonlu elemanlar modeli sonsuz miktarda bilinmeyişi içeren fiziki modelle yalnızca benzeşim yapar, asla gerçeğin yerini tutmaz. Sistemin başarısı hangi sistemin simüle edildiğine ve simülasyon için nelerin kullanıldığına bağlıdır [60].

Mühendislikte FEM'in uygulama alanları başlıklar halinde sıralanacak olursa;
Makine, Uzay, İnşaat ve Otomotiv endüstrisinde,
Yapısal analizlerde (statik/ dinamik, linear/nonlinear),
Isıl ve Akış analizlerinde,
Elektromanyetik alanlarda,
Geometrik yapılarda,
Biyomekanik ve benzeri alanlarda geniş bir şekilde uygulanmaktadır [61].

Günümüzde metalleri biçimlendirme konusunda dünya çapında 60'a yakın benzeşim (simülasyon) yazılımı mevcuttur. Bunların %90'ı üniversite ve araştırma

kuruluşlarında gerçekleştirilmiş olup yalnızca % 10'u ticari amaçlı olup kullanıma açıktır [62].

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çözümler 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 sunmaktadır. Derin çekme yönteminde malzemenin kalıp içerisine akışı ve bir takım dinamik yüklemelere maruz kalması dikkate alındığında, eksplisit yönteminin kullanılması daha uygun olacaktır. Şekil 3.13'de dinamik durumlar için bu yöntemin uygulamalarından bazı örnekler verilmiştir.



Şekil 3.13. Eksplisit yöntem kullanılan dinamik durumlar [63, 64]

İmplicit ve eksplisit yönteme ait denge denklemleri ve çözümü ise aşağıda açıklanmıştır.

3.12.1. İmplicit Yöntem

Bu yöntemde denge denklemleri $t+Dt$ anında çözülür. Sac şekillendirmedeki birçok nonlinear davranış nedeni ile denge konumu iteratif olarak elde edilir. Genelde, Denklem 3.39'da verilen Newton-Raphson yöntemi kullanılarak çözülür.

$$\Delta u^{(i+1)} = \Delta u^{(i)} + K_t^{-1} (F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (3.39)$$

Burada, K_t bilinen teğetsel direngenlik matrisi, F dış kuvvetlerin vektörü, I ise iç kuvvetlerin vektörü olup, Δu bir zaman adımıdaki deplasmanların vektörüdür. Bu yöntemde her iterasyon adımıda teğetsel direngenlik matrisinin yeniden oluşturulması ve

ayrıştırılması gerekir. 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 [48].

3.12.2. Eksplisit yöntem

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

$$\begin{aligned} u^{(i+1)} &= u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} \\ \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} &= \dot{u}^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^i}{2} \ddot{u}^{(i)} \end{aligned} \quad (3.40)$$

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

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1} (F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (3.41)$$

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

l : karakteristik sonlu elaman büyüklüğü,

c : malzemedeki ses hızı,

olmak üzere kararlı bir zaman adımı yaklaşık olarak

$$\Delta t = \frac{l}{c} \quad (3.42)$$

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 $10^5 - 10^6$ 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 [61].

3.12.3. İmplicit ve Eksplicit Yöntemlerin Karşılaştırılması

1. Eksplicit Yöntem (EY) mevcut durumda daha az hesap zamanına ve hafızaya gerek duymaktadır. Yalnız bu tip programların (Kişisel Bilgisayar-Personel Computer) PC bilgisayar teknolojisindeki gelişmeye paralel geliştirildiği unutulmamalıdır. İmplicit Yöntem (IY) ise mevcut yazılımların geliştirilmesi ile oluşturulmuştur.
2. EY'ler çarpma gibi kısa süreli dinamik problemlerin çözümü için çok elverişlidir. Ancak çok sayıda zaman adımına gerek duyarlar. IY'lerde adım aralığı teorik olarak sınırsızdır. Hesap zamanını kısaltmak için EY'lerde yapay olarak bir ivmelendirmeye veya yoğunluğu arttırmaya gidilir. Bunun sonucu ortaya çıkacak kütle etkileri ancak yazılım çok iyi tanıyan kullanıcılar tarafından alınacak önlemlerle giderilebilir. IY'lerde fiziksel sistemi değiştirmek gerekmez, çünkü çözüm zaten iterativ olarak yapılmaktadır.
3. EY'ler nümerik açıdan oldukça kararlıdır. Temas şartları küçük zaman adımları sayesinde tam anlamı ile tarif edilebilir. Pot oluşması gibi kararsızlık olguları kolayca belirlenir ve yakınsama problemleri ile karşılaşılmaz. IY'ler ise bu durumda işlemeyebilir veya burkulma sonrası gibi ek hesaplara gereksinim duyulabilir.
4. Geriye yayılma ve iç gerilmeler konusunda IY'ler daha üstündür. Bu tip hesaplamalarda takım parçalarının birbirlerinden uzaklaştırılmasının simülasyonu çok önemlidir. Bu yükleme boşaltması EY'lerde ancak iş parçası hareketini tamamlamışsa, yani dinamik etkiler sönümlenmiş ise uygulanabilir. Hesap zamanını azaltma kaygısı, elemanlarda kullanılan düşük dereceli integrasyon gerilmelerinin hassas hatta doğru

hesaplanmasını engeller. Ancak, geriye yaylanmanın temel şartı ise gerilmelerin doğru hesaplanmasıdır. Dolayısıyla EY'lerle elde edilen geriye yaylanmalar ancak tendense olarak doğru sonuç verir. Eleman integrasyon derecesi yükseltilerek buna karşı gelinebilir, ancak hesap zamanı oldukça artar ve IY'lere karşı olan avantaj kaybedilir [61].

4. MATERYAL ve METOT

4.1. Çalışmanın Amacı

Derin çekme işlemi, sac-metal şekillendirmede yaygın olarak kullanılan önemli yöntemlerden biridir. Bu yöntemde kalıplama faktörlerinin tayini ve bu faktörlerin ürün üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, endüstriyel açılarından büyük önem arz etmektedir. Endüstriyel uygulamalarda, derin çekme kalıplarının matris ve baskı plakası yüzeylerine genellikle açı verilmemektedir. Bu yüzden, çekme oranı daha düşük olmakta ve malzemeyi şekillendirmek için daha yüksek zımba kuvvetine ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla, malzeme akışının kontrolü zorlaşmakta ve elde edilen üründe kulaklanma, buruşma ve incelme gibi ürün kalitesini etkileyen belirgin hatalar meydana gelmektedir.

Bu çalışmanın amacı, matris/zımba radyüsü ve matris/baskı plakası yüzeylerine verilen açıların çekme oranı üzerindeki etkisini belirlemektir. Bunun için matris iç kenarlarına ve zımba alt yüzey kenarlarına $R=4$ mm, $R=6$ mm ve $R=8$ mm'lik radyüsler, matris/baskı plakası yüzeylerine ise $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ lik açılar verilmiştir. Baskı plakası kuvvetleri 2450 N, 4900 N, 7350 N ve 9800 N olarak alınmıştır. Verilen açı ve radyüslerin etkisini tespit etmek için bir dizi deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak bilgisayar destekli analiz çalışması yapılmış ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hem deneysel çalışmalardan hem de sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlardan, matris/zımba radyüsü ve matris/baskı plakası açısının artmasının limit çekme oranını arttırdığı, bunda literatür sonuçları ile aynı sonuçları sağladığı görülmüştür.

4.2. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada, deney malzemesi olarak 0,9 mm kalınlığındaki DIN EN 10130–1999 sacı kullanılmıştır. Bu malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 4.1’de verilmiştir.

Sac malzemenin 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 haddelendirme yönünde toplam 9 adet numune çekme testine tabi tutulmuştur. Mekanik deney sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1. DIN EN 10130 – 1999 çelik sacının kimyasal analizi

Element	%	Element	%
Karbon (C)	0.0440	Nikel (Ni)	0.0261
Fosfor (P)	0.108	Bakır (Cu)	0.00452
Kükürt (S)	0.0085	Niobyum (Nb)	0.00241
Krom (Cr)	0.0116	Titanyum (Ti)	0.00027
Mangan (Mn)	0.241	Kalay (Sn)	0.0864
Molibden (Mo)	0.0116	Demir (Fe)	99.46

Tablo 4.2. Deney numunesinin mekanik özellikleri

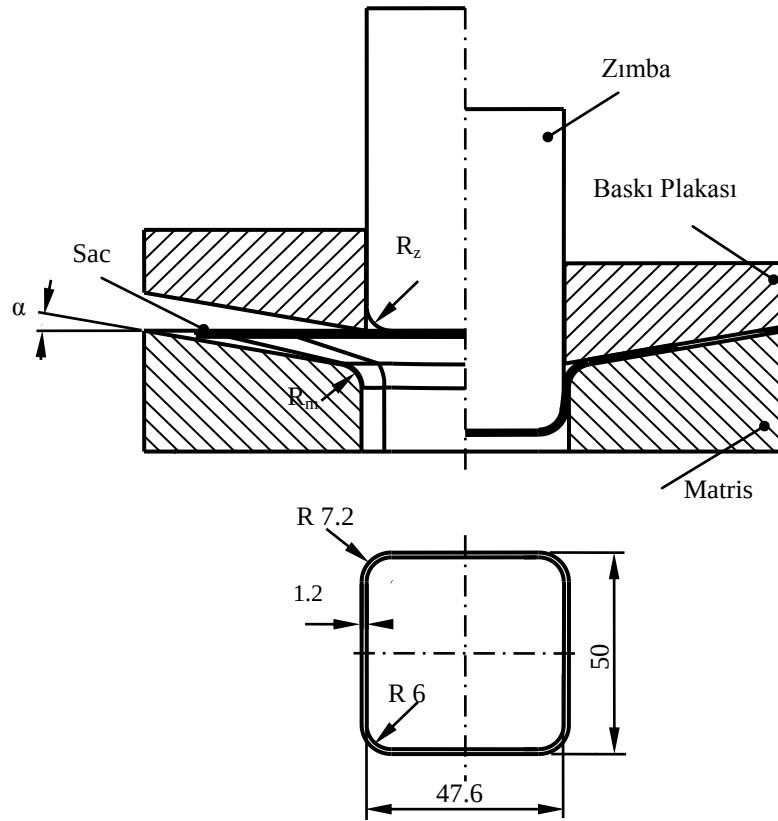
Hadde yönü (°)	Akma dayanımı (N/mm ²)	Çekme dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)	Elastikiyet modülü (kN/mm ²)	Poisson oranı
0	180.53	315.83	36.99	195	0.3
45	208.34	328.79	33.08		
90	194.46	309.53	35.22		

Çekilecek parça boyutları önce, 120x120 mm ve 150x150 mm ölçülerinde kare şeklinde kesilmiş, daha sonra limit çekme oranını belirlemek amacıyla 95 mm çapından 2,5 mm aralıklarla arttırılarak 135 mm çap aralığında torna tezgahında işlenerek ilkel parça boyutları elde edilmiştir. Tablo 4.3’de ilkel parça çaplarına karşılık gelen limit çekme oranları verilmiştir.

Tablo 4.3. İlkel parça çaplarına karşılık gelen limit çekme oranları

İlkel parça çapı (mm)	Limit Çekme Oranı (β)	İlkel parça çapı (mm)	Limit Çekme Oranı (β)	İlkel parça çapı (mm)	Limit Çekme Oranı (β)
95	1,72	110	2,00	125	2,27
97,5	1,77	112,5	2,04	127,5	2,32
100	1,81	115	2,09	130	2,37
102,5	1,86	117,5	2,13	132,5	2,42
105	1,90	120	2,18	135	2,47
107,5	1,95	122,5	2,22		

Matrisler 1.2080, zımbalar 1.2842 soğuk iş takım çeliği ve baskı plakaları ise CK45 çeliği kullanılarak, Fanuc O – M dik işlem merkezli CNC tezgâhında matris ve baskı plakalarının işleme yönleri kalıp merkezine doğru olacak şekilde işlenerek imal edilmiştir (Şekil 4.1). Kalıp elemanlarının ısıtıl işlemleri Bodycote İstaş Isıl İşlem Sanayii A.Ş. firmasında gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem sonrasında matris ve zımba sertlikleri 58 HRc, baskı plakası sertliği ise 42 HRc sertlik değerlerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan kalıp geometrileri

Derin çekme işleminde kalıp elemanlarının yüzey pürüzlülükleri sürtünmeyi önemli ölçüde etkilemektedir. İmalatı tamamlanan matris, zımba ve baskı plakası yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo marka Surf test SJ – 201 model ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Tablo 4.4).

Tablo 4.4. Kalıp elemanlarının yüzey pürüzlülükleri

Ortalama yüzey pürüzlülüğü		Ra, μm
Zimba	Yan yüzey	0,523
	Alt yüzey	0,641
	Zimba radyüsü	0,718
Matris	Üst yüzey	1,036
	İç yüzey	0,767
	Matris radyüsü	0,972
Baskı plakası	Üst yüzey	1,253

Deneysel çalışmalarda zimbaya gelen kuvvetin 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 çakışık yerleştirilmiş olması önemlidir. Çekme kalıpları üzerinde, farklı matris/zimba radyüslerinin, matris/baskı plakası açılarının ve baskı plakası kuvvetlerinin çekme işlemindeki kuvvetler üzerindeki etkileri yük hücresine gelen kuvvetin ölçülmesiyle tespit edilmiştir.

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

Çekme deneylerinde kullanılan çekme parametre değerleri Tablo 4.5’de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi ile toplam 48 deney parametresi oluşturulmuştur.

Tablo 4.5. Derin çekme parametreleri

Çekme Parametreleri				
Matris/Baskı plakası açısı α (°)	0	5	10	15
Baskı plakası kuvveti (N)	2450	4900	7350	9800
Matris/zimba radyüsü (mm)	4	6	8	-

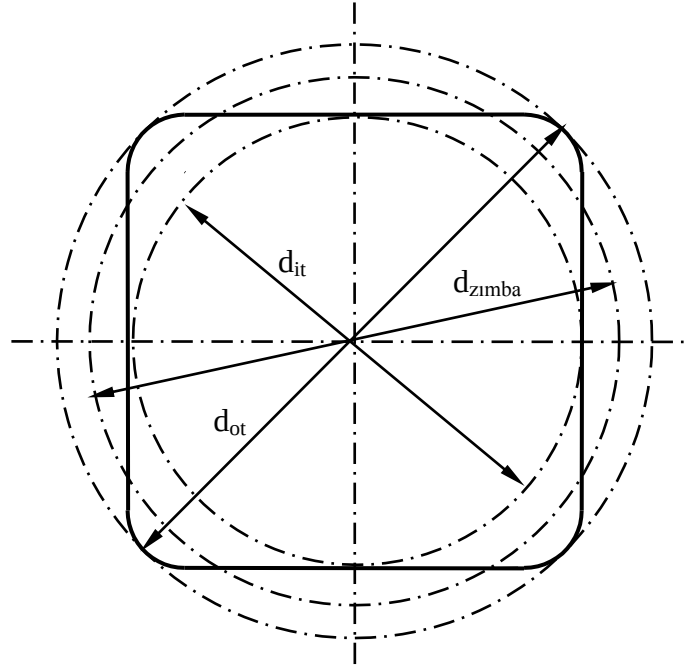
Kare kaplarda limit çekme oranının (β) hesabı için kesin bir ifade yoktur. Ancak bu çalışmada β değerleri, Denklem 4.1 ve Denklem 4.2 kullanılarak belirlenmiştir.

$$\beta = \frac{D_{max}}{d_{zimba}} \quad (4.1)$$

$$d_{zimba} = \frac{d_{it} + d_{ot}}{2} \quad (4.2)$$

Burada, D_{max} ilkel parça çapı, d_{it} ve d_{ot} kare zımbanın iç ve dış teğet dairelerinin çaplarıdır.

Kare kaplar için ortalama zımba çapının (d_{zimba}) belirlenmesi Şekil 4.2’de verilen değerlerin Denklem 4.2’de kullanılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 4.2. Kare kap için ortalama zımba çapının (d_{zimba}) belirlenmesi

Baskı plakası kuvvetini kontrol etmek amacıyla hidrolik pompaya bir basınç kontrol valfi, yön kontrol valfi, manometre ve iki adet de hidrolik silindir bağlanmıştır. Manometrede okunan basınç değerine karşılık gelen kuvvet yük hücresi yardımıyla belirlenmiş ve baskı plakası kuvveti ayarlanmıştır.

Derin çekme deneyleri, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Atölyesinde bulunan 600 kN basma kapasiteli C tipi Şahinler marka hidrolik pres tezgahında gerçekleştirilmiştir. Kalıp pres tezgahına bağlanmış, çekme hızı sabit 4 mm/s olacak şekilde hidrolik olarak ayarlanmış ve MECHAOPTO Dijital Takometre ile pres hızı ölçülmüştür. Şekil 4.3’de deney setinin fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.3. Deneysel çalışmaların yapıldığı pres tezgahı ve kalıp seti

Derin çekme işlemi sırasında sac malzeme, baskı plakası, matris ve zımba arasında ki sürtünmeyi azaltmak, sac malzemenin takım yüzeyinde daha kolay kaymasını sağlamak ve kalıp elemanlarının aşınmalarını önlemek amacıyla, yoğunluğu 15 °C de 883 kg/m³ olan Shell Tellus 68 numara yağ yağlayıcı olarak kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar, pres hızı sabit tutularak her deney sonunda baskı plakası kuvveti değiştirilerek 4 farklı baskı plakası kuvveti uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her bir kap için, belirlenen bu 4 farklı baskı kuvveti tekrar edilerek uygulanmış ve matris/baskı plakası ayrı ayrı değiştirilerek 4 farklı kalıp açısı üzerinde tekrar edilmiştir. Kalıp açısı değerlerinin her değişiminden sonra, matris/zimbalar değiştirilmek suretiyle 3 farklı radyüs değeri de ayrı ayrı uygulanarak tekrar edilmiştir. Matris/baskı plakası açısı, matris/zımba radyüsleri ve baskı plakası kuvvetlerinin çekme işlemine etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Her bir parametre için çekme deneylerinde en yüksek çekme boyu, kapların deformasyona uğramadan çekilebildiği en büyük β değerine ulaşıncaya kadar çekilmiş ve belirlenen β değerinin doğruluğu için işlem 3 defa tekrarlanmıştır.

4.3. Analiz Çalışmaları

Sac malzeme üzerinde meydana gelen deformasyonların sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak analizleri ANSYS Workbench 12 paket programında gerçekleştirilmiştir. ANSYS Workbench 12 paket programı deformasyon işlemlerinin analizinde yüksek güvenilirliğe sahip bir paket program olarak bilinmektedir.

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

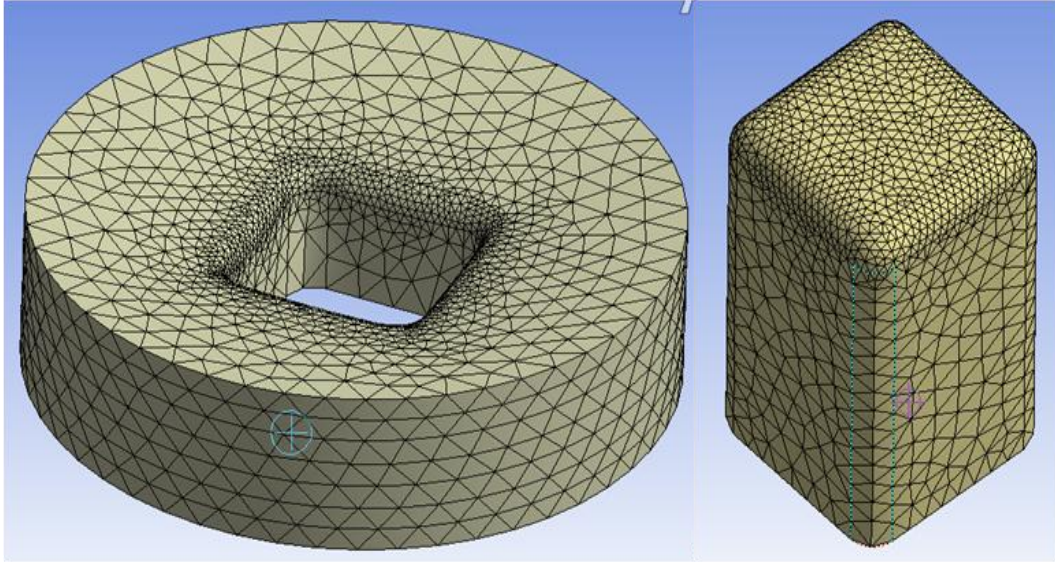
Deneylerde kullanılan kalıba ait bütün geometrik özellikler (kalıp boyutları, matris/zımba radyüsleri, matris/baskı plakası açıları vb.) dikkate alınarak kalıp elemanlarının üç boyutlu modelleri SolidWorks 2010 paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen katı model dosyaları, analiz programında kalıp geometrisini oluşturmak amacıyla Parasolid (.x_t) uzantılı olarak kaydedilmiştir. Kalıp seti için SolidWorks'de kullanılan koordinat sistemi esas alınmış, ANSYS Workbench paket programı için oluşturulan modeller çağırılarak paket programın veri yapısına dönüştürülmüştür [64,65].

Analizler öncesinde, kalıp elemanlarının modellenmesinin ardından, çözümlemede kullanılacak olan sac malzeme modeli oluşturulmuş, oluşturulan model için Multilinear Isotropic Hardening malzeme modeli kullanılmıştır. Malzeme modeli için gerekli olan akma ve çekme dayanımı yapılan çekme deneyi sonucundan; elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν), yoğunluğu (ρ), bulk ve kayma modülü değerleri ise paket programdan alınmıştır. Tablo 4.6'da analizlerde kullanılan sac malzeme için alınan E , ν ve ρ değerleri verilmiştir.

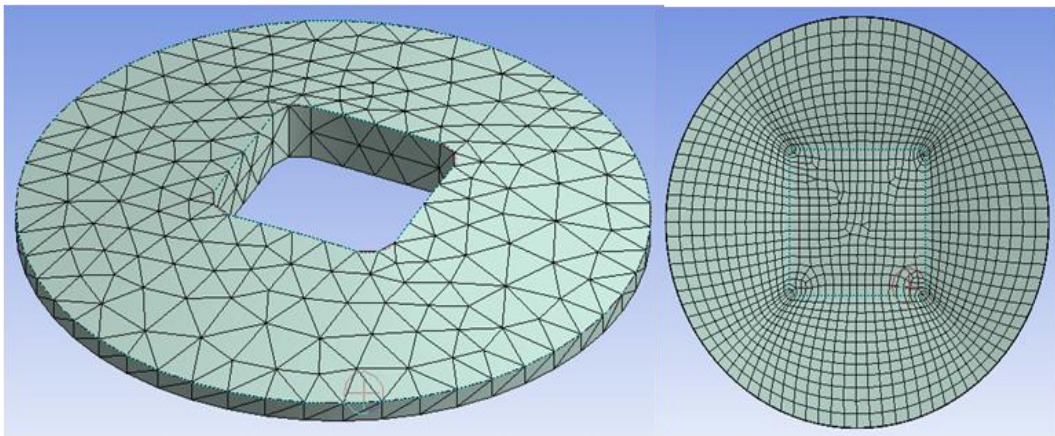
Tablo 4.6. Analizde kullanılan sac malzeme özellikleri

Yoğunluk (kg/m^3)	7870
Elastikiyet modülü (kN/mm^2)	195
Poisson oranı	0,3
Akma dayanımı (N/mm^2)	200
Çekme dayanımı (N/mm^2)	315
Bulk modülü (kN/mm^2)	175
Kayma modülü (kN/mm^2)	76,3

Matris, zımba, baskı plakası ve sac malzeme için ağ yapıları oluşturularak analiz işlemi öncesi hazırlıklar tamamlanmıştır. Matris ve zımbaya ait ağ yapıları Şekil 4.4’de ve Baskı plakası ve sac malzemeye ait ağ yapıları ise Şekil 4.5’de verilmiştir.



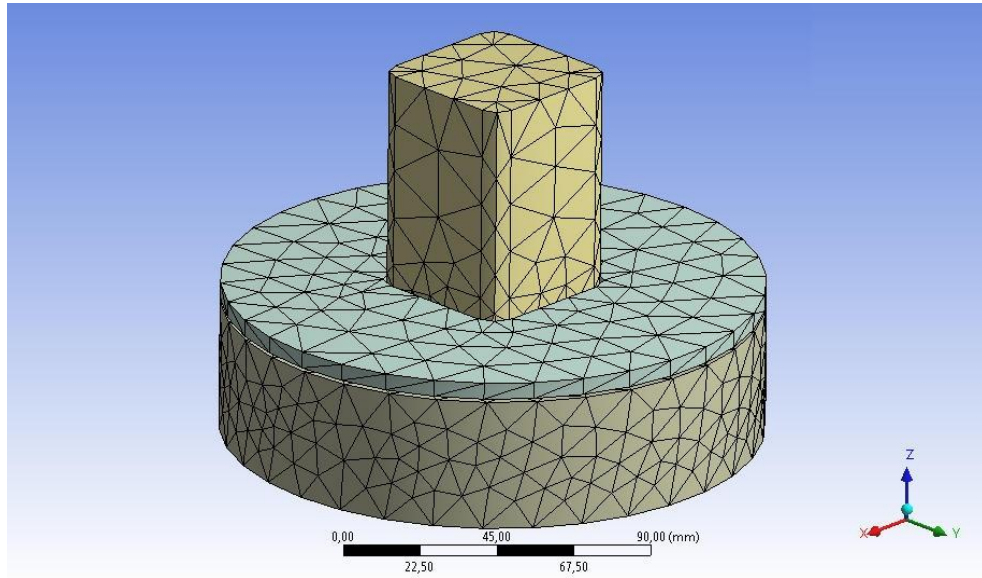
Şekil 4.4. Matris ve zımbaya ait ağ yapıları



Şekil 4.5. Baskı plakası ve sac malzemeye ait ağ yapıları

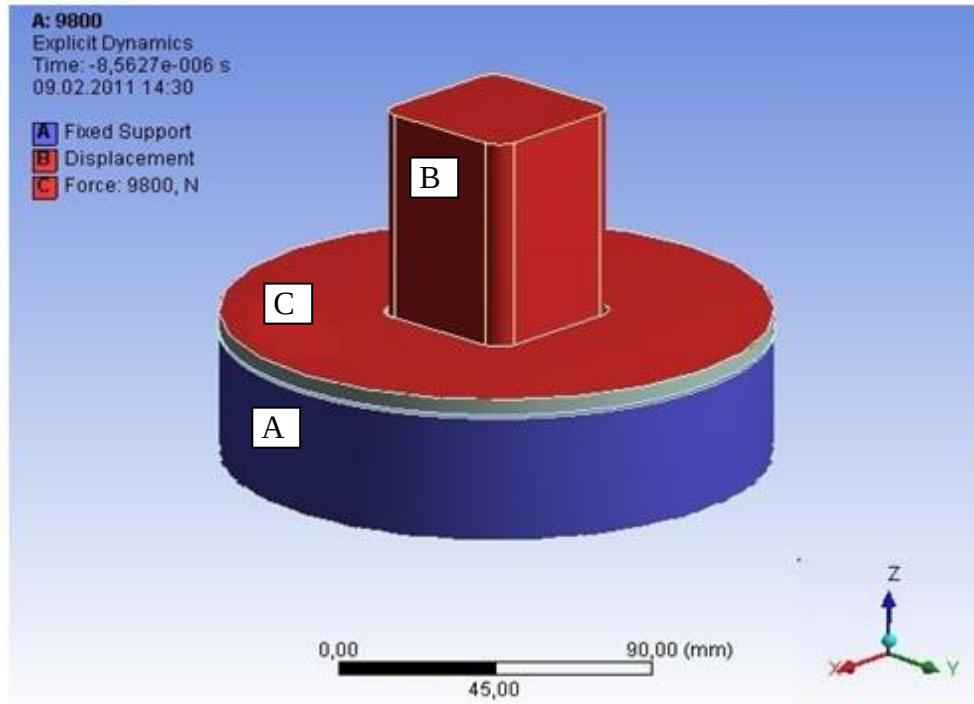
Ağ yapılarının oluşturulması esnasında, baskı plakası, zımba ve matrisin ağ aralıkları 10 mm, sac malzemede ise ağ aralığı 3 mm olarak alınmıştır. Çalışmada, sac malzemede deformasyon işleminin incelenmesi esas hedef olduğundan, kalıp elemanlarının ağ yapıları zaman kaybını önlemek amacıyla daha büyük tutulmuş, deformasyon esnasında sac malzemenin zımba ve matris radyüslerine temasının daha hassas hesaplanması için radyüslü yüzeylerdeki ağ aralığı 2 mm olarak hassaslaştırılmıştır.

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



Şekil 4.6. Kalıp elemanlarının oluşturulması

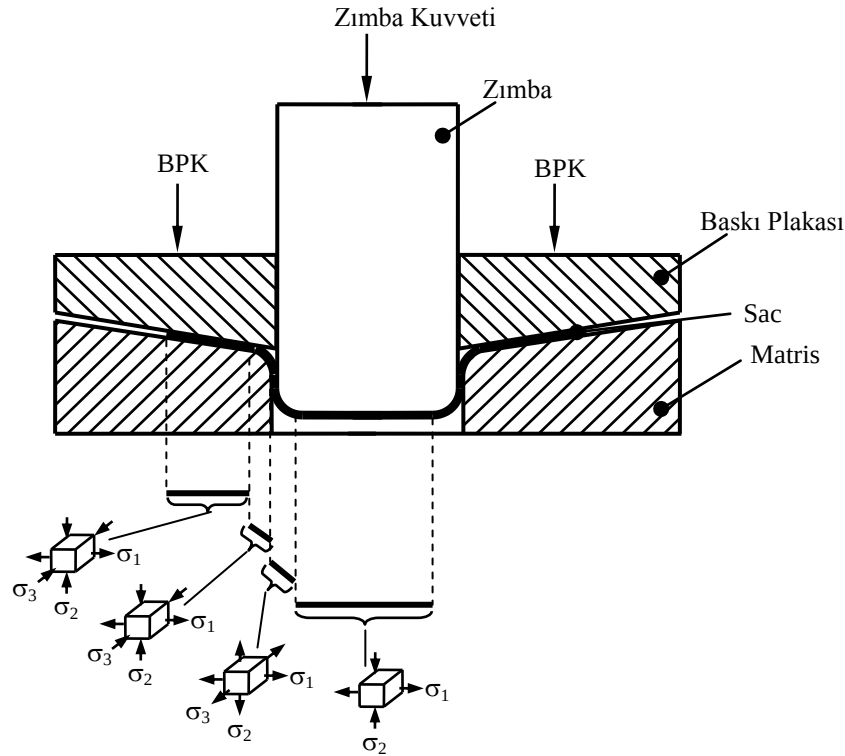
Malzeme özellikleri, baskı plakası kuvveti, zımba hızı gibi parametreler program içerisinde tanımlanarak çekme işlemi modellenmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Kalıp elemanlarının parametrelerinin belirlenmesi

5. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

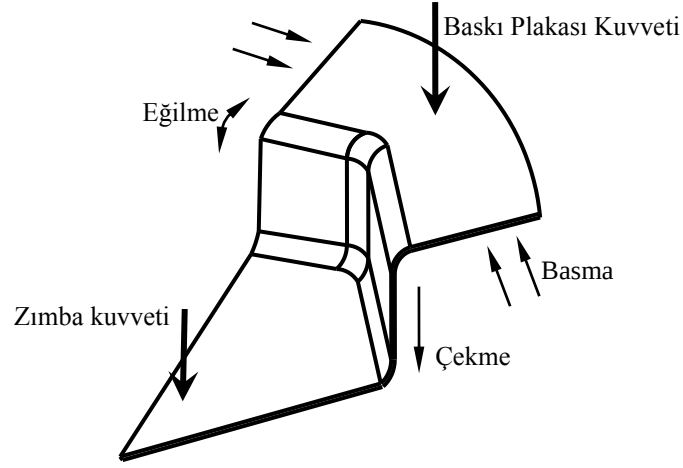
Baskı plakası geometrisinin doğru tespit edilmesi halinde, malzemenin kalıp boşluğu içerisine akışını kolaylaştırmalı ve dolayısıyla çekme boyu artmalı, kalınlığının sürekli artması ile kap kenarlarında basma gerilmesine karşı malzemede oluşacak buruşmalar engellenmelidir. Derin çekme işlemi sırasında kulaklanmalar, buruşmalar ve ondülasyonlar doğru tespit edilemeyen ilkel parça çapı ve zımba geometrisinden kaynaklanmaktadır. Derin çekme işleminde sac malzemede meydana gelen gerilmeler Şekil 5.1’de verilmiştir. Matris – baskı plakası ve matris radyüsüne temas eden bölgelerde σ_1 yönünde çekme gerilmesi oluşurken σ_2 ve σ_3 yönünde basma gerilmeleri, zımba radyüsünde σ_1 , σ_2 ve σ_3 ’ün çekme gerilmesi ve zımba tabanında ise σ_1 ’in çekme, σ_2 ’nin basma gerilmeleri olarak oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.1. Derin çekme işleminde meydana gelen gerilmeler

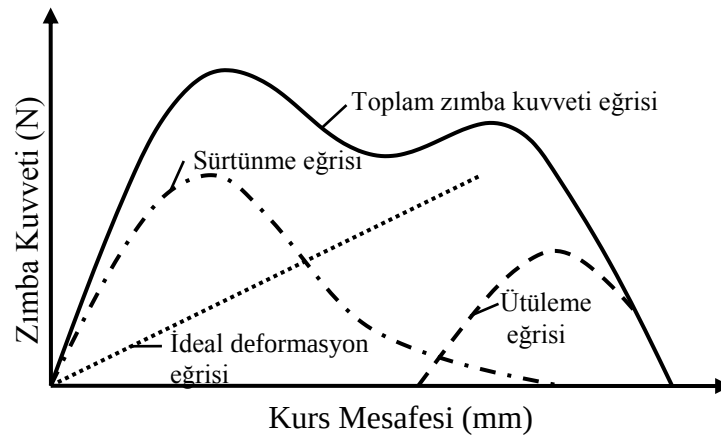
Matris/baskı plakası açısı ve matris/zımba radyüsü arttıkça çekme işlemini kolaylaştıran radyal gerilmeler artar, teğetsel gerilmeler ise azalır. Ancak radyal gerilmelerin çok fazla artması kapta çatlama ve yırtılmalara yol açar. Çekme işlemi

sırasında kabın alt köşeleri genelde en yüksek çekme ve basma gerilmelerinin etkisi altındadır (Şekil 5.2) [66].



Şekil 5.2. Dikdörtgen veya kare kaplarda oluşan gerilmeler

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

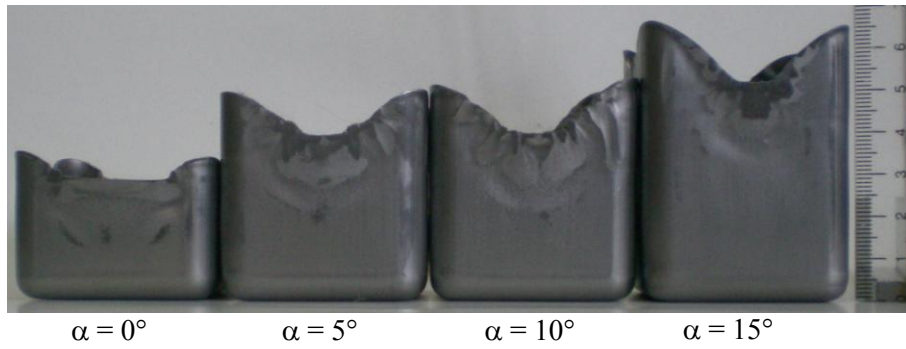


Şekil 5.3. Derin çekmede zimba kuvveti- kurs mesafesi ilişkisi [67].

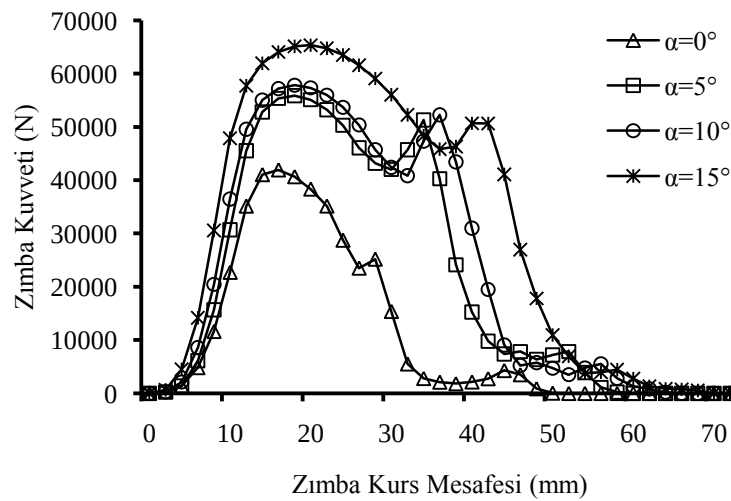
5.1. Matris/Baskı Plakası Açısının Çekme Oranı Üzerindeki Etkisi

Matris/zimba radyüsünün farklı değerleri ($R=4$ mm, $R=6$ mm ve $R=8$ mm) için baskı plakası kuvveti (BPK) ve matris/baskı plakası açısının (α) değişmesi ile elde edilen limit çekme oranları (β) değerlendirilmiştir.

Matris/zimba radyüsü $R=4$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N olarak uygulandığında, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=1,77$ ve en büyük zimba kuvveti 41967,18 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,00$ ve en büyük zimba kuvveti 55877,76 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,04$ ve en büyük zimba kuvveti 57820,14 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zimba kuvveti 65354,22 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.4’de matris/zimba radyüsü $R=4$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri ve Şekil 5.5’de ise deneyler esnasında ölçülen zimba kuvvetleri verilmiştir. Şekil 5.4’de görüldüğü gibi, kalıp açısının artmasıyla limit çekme oranının da arttığı belirlenmiştir. Uygulanan baskı plakası kuvvetinin yeterli olmamasından dolayı kapların üst kısımlarında belirgin şekilde ondülasyonlar meydana gelmiştir.



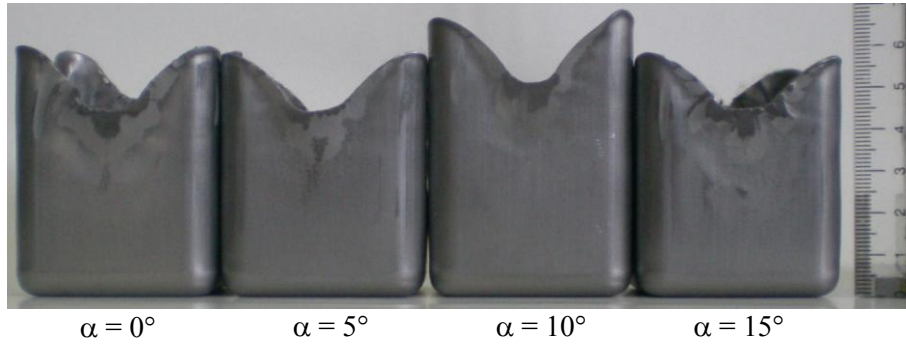
Şekil 5.4. $R=4$ mm için, $BPK=2450$ N olduğunda elde edilen numuneler



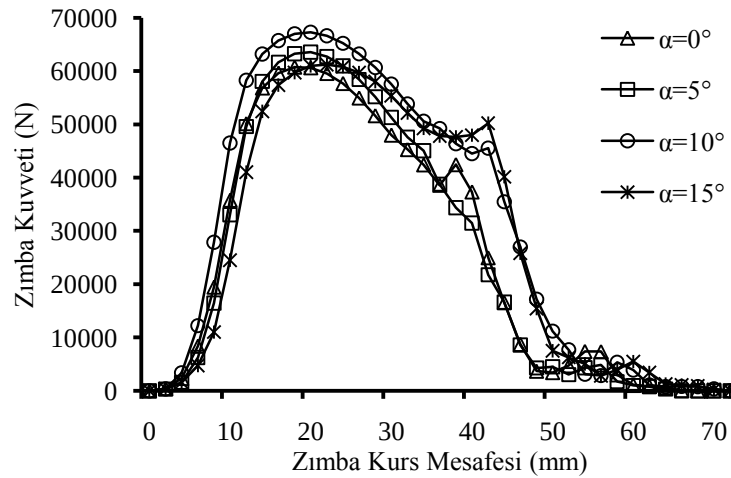
Şekil 5.5. $R=4$ mm için, $BPK=2450$ N olduğunda ölçülen zimba kuvvetleri

Şekil 5.5 incelendiğinde, eğilim çizgilerinde iki adet tepe noktası olduğu görülmektedir. Birinci nokta kesit daralmasının başlangıç noktası, ikinci nokta ise düşük baskı plakası kuvvetinden dolayı çekilen sac malzemenin kenarında oluşan ondülasyonların kalıp boşluğuna sıkışmasından kaynaklanan kuvvet artışını göstermektedir.

Baskı plakası kuvveti 4900 N olarak uygulandığında, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=1,90$ ve en büyük zımba kuvveti 60802,38 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 63608,04 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 67296,6 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 61214,4 N olarak elde edilmiştir. Matris/zımba radyüsü $R=4$ mm ve baskı plakası kuvveti 4900 N için α 'ya bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.6'da ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.6. $R=4$ mm için, $BPK=4900$ N olduğunda elde edilen numuneler

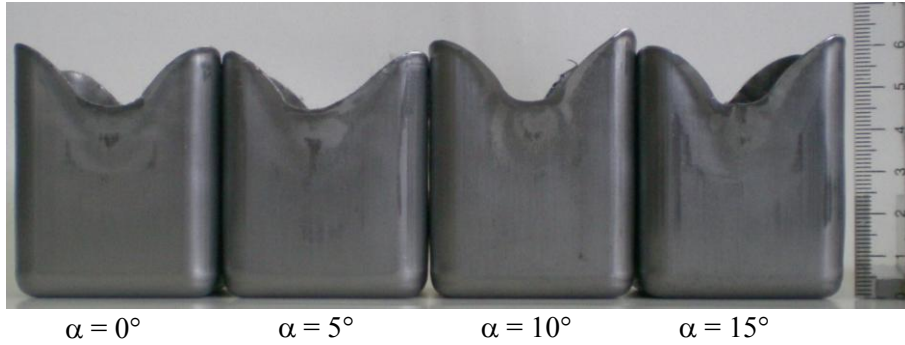


Şekil 5.7. $R=4$ mm için, $BPK=4900$ N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

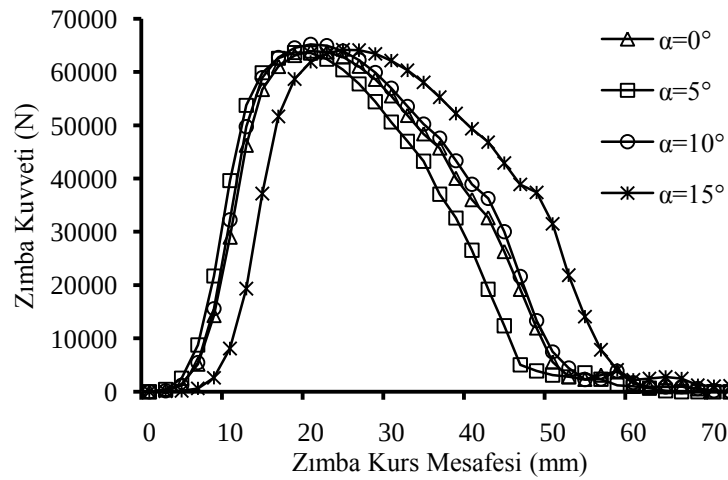
Şekilde görüldüğü gibi $\alpha=10^\circ$ 'de elde edilen kabın diğer açı değerlerinde elde edilen kaplara göre daha düzgün ve çekme boyunun da daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.7 incelendiğinde, kalıp açısı $\alpha=5^\circ$ için eğilim çizgisinde ikinci tepe noktasının oluşmadığı yani çekilen sac malzemenin kenarında ondülasyonların oluşmadığı belirlenmiştir.

Baskı plakası kuvveti 7350 N olarak uygulandığında, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=1,95$ ve en büyük zımba kuvveti 63941,58 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 63725,76 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 65216,88 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 64216,26 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.8'de $R=4$ mm ve baskı plakası kuvveti 7350 N için α 'nın değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri ve Şekil 5.9'da ise deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri verilmiştir.



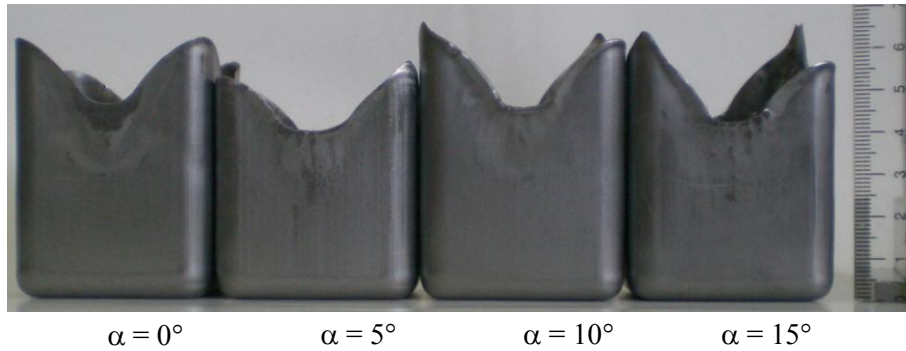
Şekil 5.8. $R=4$ mm için, $BPK=7350$ N olduğunda elde edilen numuneler



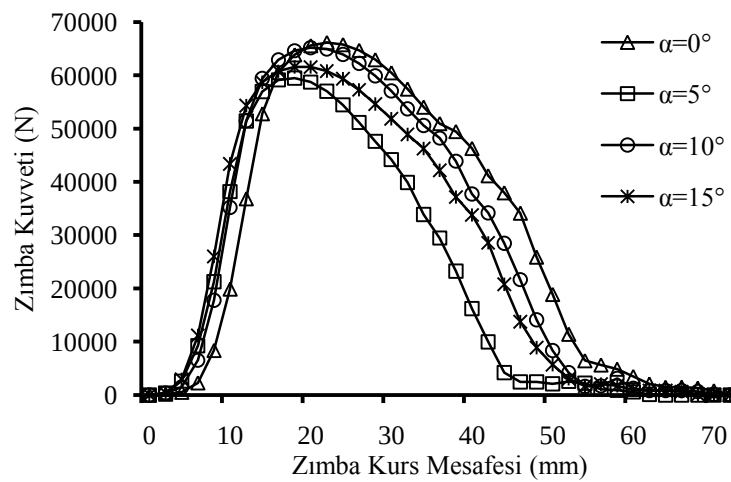
Şekil 5.9. $R=4$ mm için, $BPK=7350$ N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Şekil 5.8’de $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ ’deki kalıplardan elde edilen numunelerin üst köşelerinde kalıp açısından dolayı aksel kuvvet artışına bağlı kulaklanmaların daha fazla olduğu görülmüştür. Şekil 5.9’da eğilim çizgilerinde bir adet tepe noktası olduğu görülmektedir. Baskı plakası kuvvetinin yeterli olmasından dolayı ikinci tepe noktalarının oluşmadığı belirlenmiştir.

BPK=9800 N’da, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,00$ ve en büyük zımba kuvveti 66158,64 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,09$ ve en büyük zımba kuvveti 59507,46 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 65177,64 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 61646,04 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 9800 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.10’da ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.11’de verilmiştir.



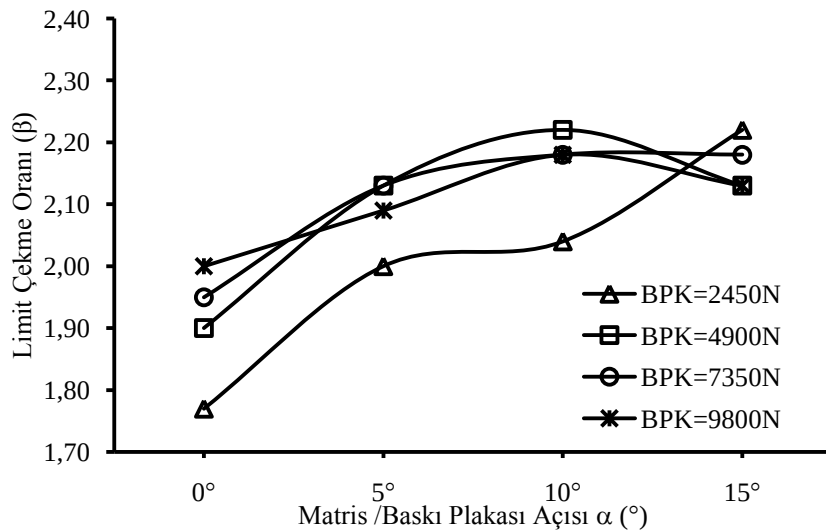
Şekil 5.10. R=4 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen numuneler



Şekil 5.11. R=4 mm için, BPK=9800 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

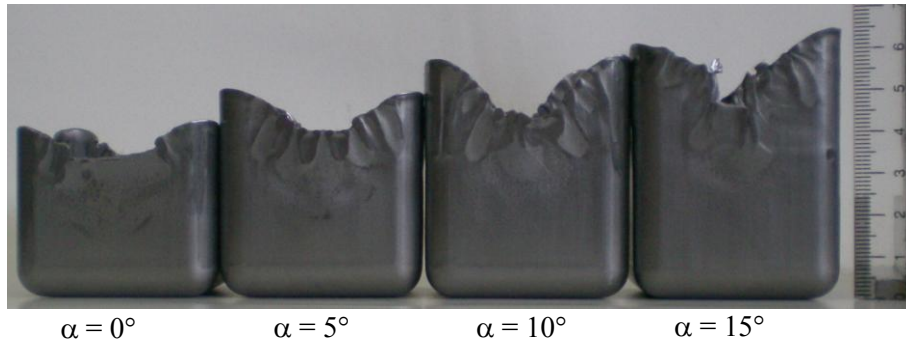
Şekilde görüldüğü gibi, elde edilen kapların üst kısımlarında belirli şekilde kulaklanmaların olduğu, kalıp açısının artması ile eksenel kuvvetin artmasının kulaklanmayı arttırdığı, 9800 N'luk baskı plakası kuvvetinin; ideal baskı plakası kuvvetinden daha yüksek olmasının kulaklanmaları arttırdığı görülmüştür. Şekil 5.11'de Şekil 5.9'a benzer eğilim çizgilerinde bir adet tepe noktası olduğu, baskı plakası kuvvetinin yeterli olmasından dolayı ikinci tepe noktasının oluşmadığı belirlenmiştir.

Matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için baskı plakası kuvveti ve α değerlerine bağlı olarak β 'nin değişimi Şekil 5.12'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, α 'nın artması ile β 'nin arttığı, artan açı değerlerine bağlı olarak radyal gerilmelerin azalması ile sacın kalıp boşluğu içerisine daha kolay bir şekilde akması sağlanmaktadır. Bununla birlikte artan α açısı ile eksenel kuvvet de artarak BPK'nin azalmasına sebep olmaktadır [68]. Azalan BPK, oluşan ondülasyonların artmasına ve dolayısıyla β değerinin azalmasına neden olmaktadır. En büyük çekme oranı, $\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta, $BPK=4900$ N'da $\beta=2,22$ olarak elde edilmiştir. β 'nin bu değeri için biçimlendirme esnasında ölçülen en yüksek zımba kuvveti 67296,6 N'dur. $BPK=7350$ N için sabit β değerinde $\alpha=10^\circ$ 'de en büyük zımba kuvveti 65216,88 N; $\alpha=15^\circ$ 'de ölçülen en büyük zımba kuvveti ise 64216,26 N olup artan kalıp açısına bağlı olarak radyal kuvvetlerin azalması ile zımba kuvvetinin düştüğü ve dolayısıyla malzemenin kalıp boşluğu içerisine akışının kolaylaştığı görülmektedir.

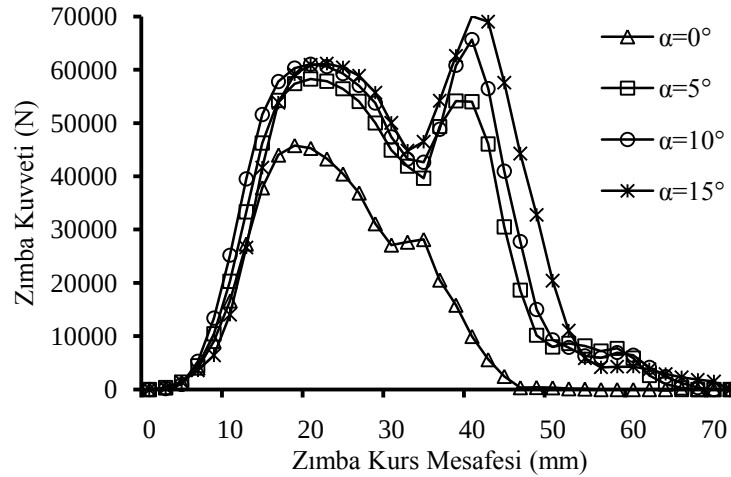


Şekil 5.12. Matris/Zımba radyüsü $R=4$ mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi

Matris/zımba radyüsü $R=6$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N olarak uygulandığında, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=1,86$ ve en büyük zımba kuvveti 45812,7 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,09$ ve en büyük zımba kuvveti 58271,4 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 65687,76 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 71534,52 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.13’de matris/zımba radyüsü $R=6$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri ve Şekil 5.14’de ise deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri verilmiştir.



Şekil 5.13. $R=6$ mm için, $BPK=2450$ N olduğunda elde edilen numuneler

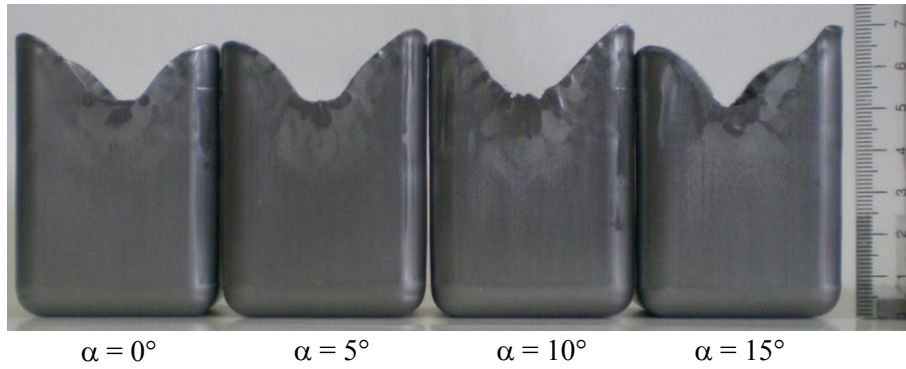


Şekil 5.14. $R=6$ mm için, $BPK=2450$ N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

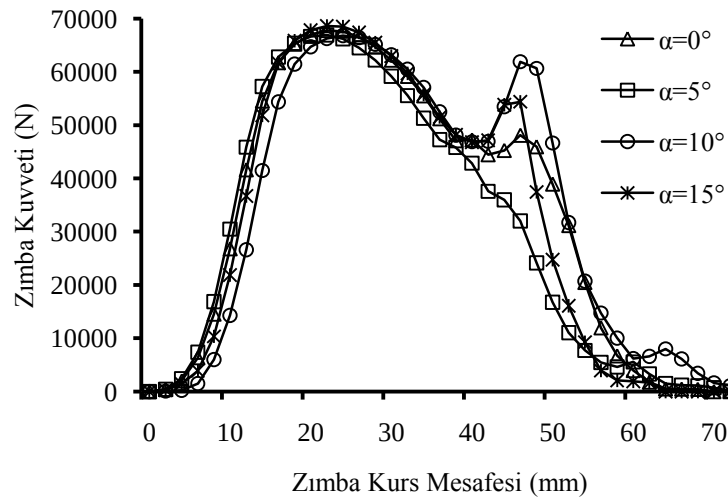
Şekilde görüldüğü gibi elde edilen kapların üst kısımlarında uygulanan baskı plakası kuvvetinin yeterli olmamasından dolayı belirgin şekilde ondülasyonlar meydana gelmiştir. Şekil 5.14 incelendiğinde, eğilim çizgilerinde iki adet tepe noktası olduğu

görülmektedir. Birinci nokta kesit daralmasının başlangıç noktası, ikinci nokta ise düşük baskı plakası kuvvetinden dolayı çekilen sac malzemenin kenarında oluşan ondülasyonların kalıp boşluğuna sıkışmasından kaynaklanan kuvvet artışını göstermektedir.

Baskı plakası kuvveti 4900 N olarak uygulandığında, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 67806,72 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 66963,06 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 66786,48 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68689,62 N olarak elde edilmiştir. Matris/Zımba radyüsü $R=6$ mm ve baskı plakası kuvveti 4900 N için α 'nın değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.15'de ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.16'de verilmiştir.



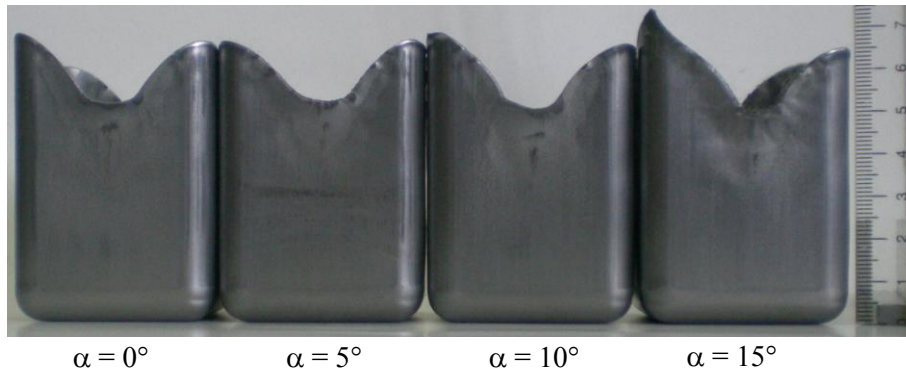
Şekil 5.15. $R=6$ mm için, $BPK=4900$ N olduğunda elde edilen numuneler



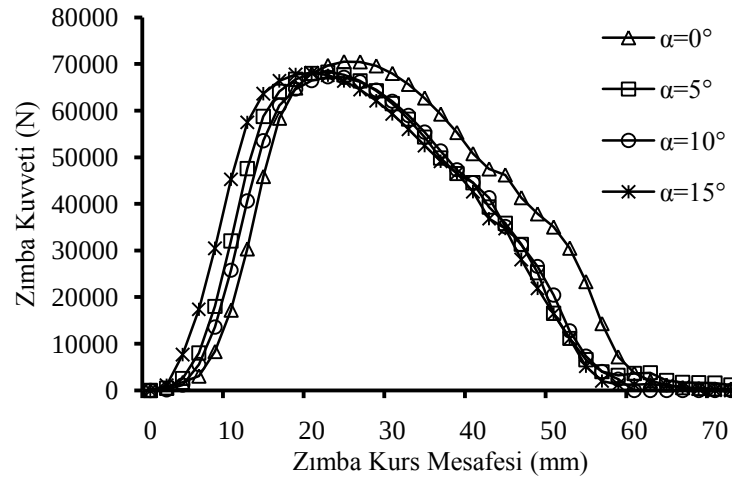
Şekil 5.16. $R=6$ mm için, $BPK=4900$ N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Şekilde baskı plakası kuvvetinin 4900 N olduğu durumda en büyük kulaklanma $\alpha=15^\circ$ meydana gelmiştir. Elde edilen limit çekme oranları eşit olmasına rağmen en düşük zımba kuvveti $\alpha=10^\circ$ 'de ölçülmüş ve R=6 mm için optimum kalıp açısının $\alpha=10^\circ$ olduğu tespit edilmiştir. Kalıp açısı ve matris/zımba radyüsünün artırılması ile kalıbın boğaz kısmında, malzemede çekme gerilmeleri oluşmakta, bu gerilmelerin oluşmasıyla malzemenin çekme kuvvetleri artarak kabın daha fazla çekilmesini sağlamaktadır. Ancak kapta önemli derecede kulaklanmalarda meydana gelmektedir.

Baskı plakası kuvveti 7350 N'da matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 70573,14 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68297,22 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 67296,6 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68101,02 N olarak elde edilmiştir. Matris/zımba radyüsü R=6 mm ve baskı plakası kuvveti 7350 N için α 'nın değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.17'de ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.18'de verilmiştir. Baskı plakası kuvveti 7350 N olarak uygulandığında, şekilde görüldüğü gibi $\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ de çekme oranı sabit $\beta=2,27$ olarak elde edilmiştir. R=6 mm için matris/baskı plakası açısının değişiminin limit çekme oranı üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı ancak $\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta zımba kuvvetinin en küçük olduğu tespit edilmiştir.

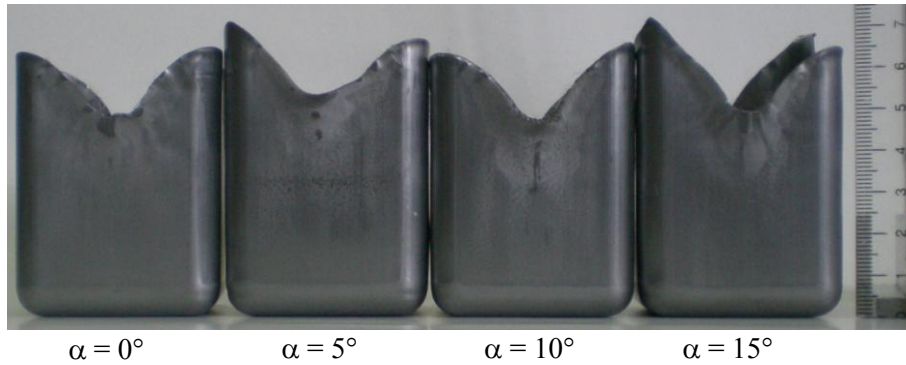


Şekil 5.17. R=6 mm için, BPK=7350 N olduğunda elde edilen numuneler

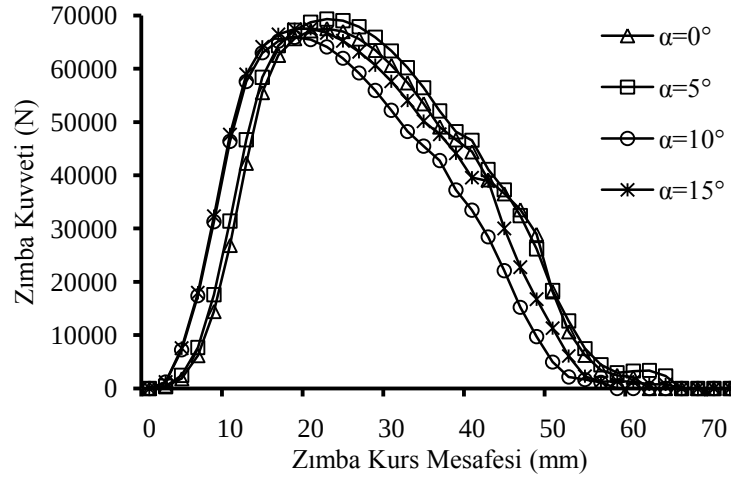


Şekil 5.18. R=6 mm için, BPK=7350 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

BPK=9800 N olarak uygulandığında, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 67551,66 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 69356,7 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 65903,58 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 67571,28 N olarak elde edilmiştir. Matris/zımba radyüsü R=6 mm ve baskı plakası kuvveti 9800 N için α 'nın değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.19'da ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.20'de verilmiştir. R=6 mm ve BPK 9800 N için optimum çekme oranı $\alpha=5^\circ$ de en büyük zımba kuvveti 69356,7 N olduğu durumda $\beta=2,27$ olarak elde edilmiştir. $\alpha=5^\circ$ 'den daha büyük kalıp açılarının limit çekme oranını azalttığı ve kulaklanmayı arttığı görülmüştür.



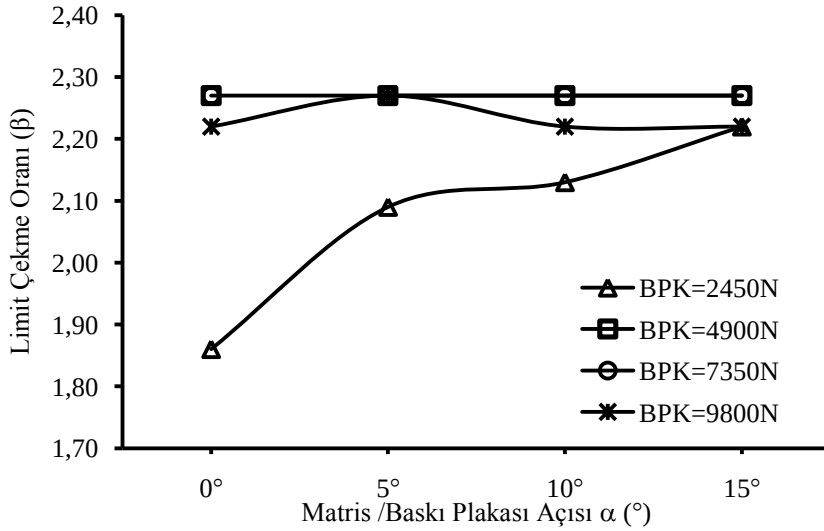
Şekil 5.19. R=6 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen numuneler



Şekil 5.20. R=6 mm için, BPK=9800 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Şekil 5.17 ve 5.19'da ise α açısı ile birlikte eksenel kuvvetin arttığı ve dolayısıyla sac malzeme üzerinde oluşan radyal gerilmelerin kulaklanmayı arttırdığı tespit edilmiştir.

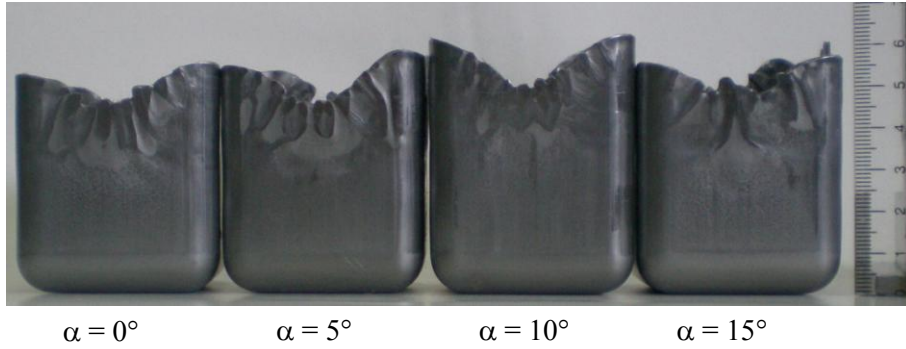
Şekil 5.21'de matris/zımba radyüsü R=6 mm için, farklı baskı plakası kuvvetlerinde Matris/Baskı plakası açısına bağlı olarak elde edilen optimum limit çekme oranlarının değişimi verilmiştir. $\alpha=0^\circ$ ve BPK=2450 N'da limit çekme oranı $\beta=1,86$ ve $\alpha=15^\circ$ de ise $\beta=2,22$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.21. Matris/Zımba radyüsü R=6 mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi

Matris/zımba radyüsünün 6 mm sabit değeri için baskı plakası kuvvetinin 7350 N olduğu durumda bütün açı değerleri için $\beta=2,27$ ve β 'nin bu değeri için BPK ve kalıp radyüsünün ideal olduğu tespit edilmiştir. Matris/baskı plakası açısının 0° , 5° , 10° ve 15° olduğu durumlarda en büyük zımba kuvvetleri sırası ile 70573 N, 68297 N, 67296 N ve 68101 N olarak ölçülmüştür. Kalıp açısının artması ile birlikte radyal gerilmeler azaldığından; bu durum zımba kuvvetlerinin azalmasına sebep olmaktadır [68]. Matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ iken zımba kuvvetinin en küçük değerde olduğu, ancak $\alpha=15^\circ$ 'de ise radyal gerilmelerin azalması sonucu zımba kuvvetinin arttığı ve dolayısıyla daha fazla ondülasyonun meydana geldiği tespit edilmiştir.

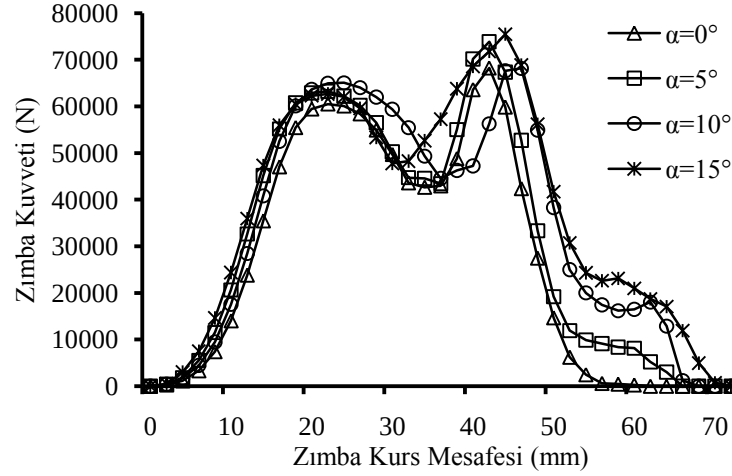
Matris/zımba radyüsü $R=8$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N olarak uygulandığında, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 68866,2 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 73928,16 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 69788,34 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 75497,76 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.22'de matris/zımba radyüsü $R=8$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N için α 'nın değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri ve Şekil 5.23'de ise deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri verilmiştir.



Şekil 5.22. $R=8$ mm için, $BPK=2450$ N olduğunda elde edilen numuneler

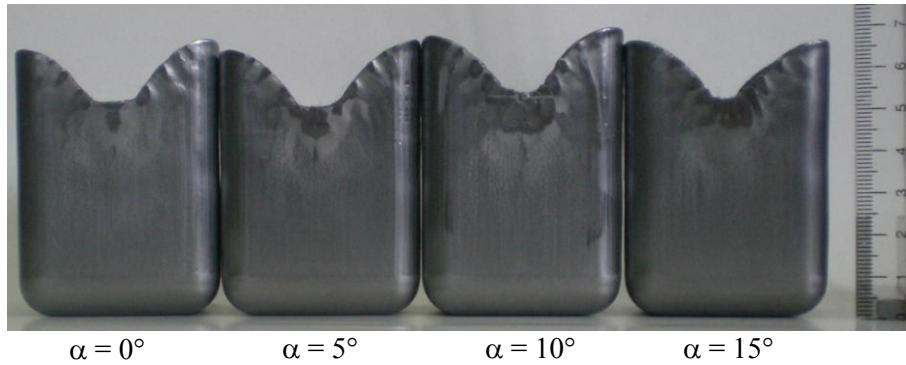
$R=8$ mm ve $BPK=2450$ N için en büyük çekme oranı $\beta=2,22$ olarak elde edilmiş, optimum kalıp açısının $\alpha=10^\circ$ olduğu ve $\alpha=10^\circ$ 'den sonra artan kalıp açısının çekme oranını azalttığı, bu yüzden kapların üst kısımlarında ondülasyonların daha fazla olduğu tespit edilmiştir. En büyük ondülasyonun $\alpha=15^\circ$ 'de olduğu, bu da düşük baskı plakası

kuvveti ile birlikte kalıp radyüs değerin büyük olması ve dolayısıyla eğme ve basma gerilmelerinin etkili olmasından kaynaklanmaktadır.

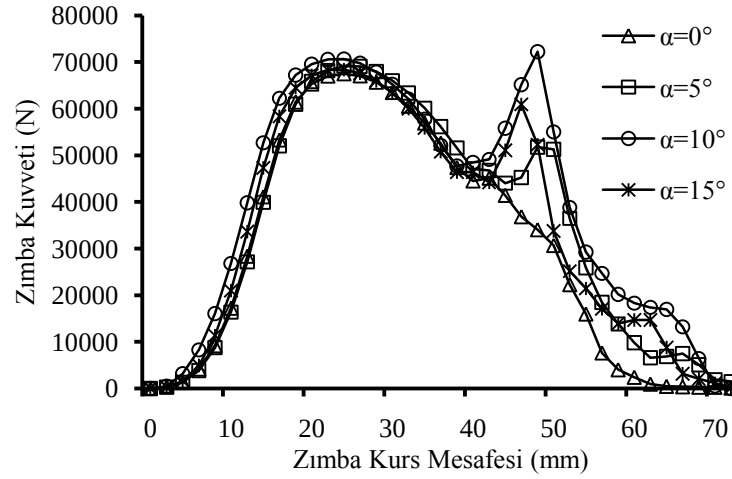


Şekil 5.23. R=8 mm için, BPK=2450 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Matris/zımba radyüsü R=8 mm ve baskı plakası kuvveti 4900 N olarak uygulandığında, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 67473,18 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 69219,36 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 72966,78 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 68434,56 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 4900 N için α 'nın değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.24'de ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.25'de verilmiştir.



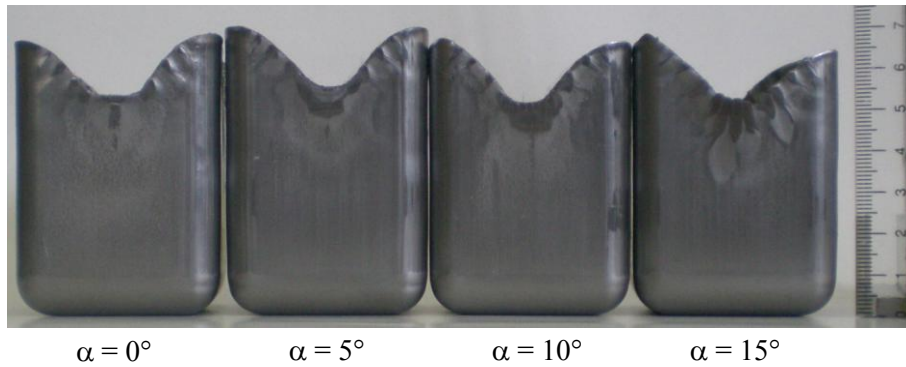
Şekil 5.24. R=8 mm için, BPK=4900 N olduğunda elde edilen numuneler



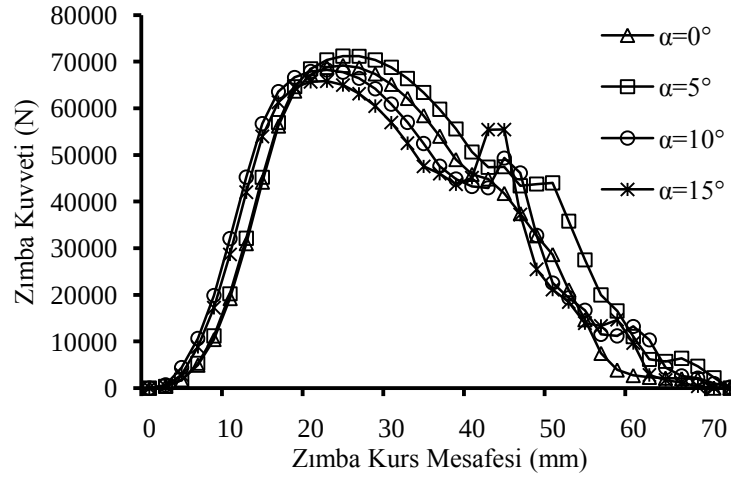
Şekil 5.25. R=8 mm için, BPK=4900 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

BPK=4900 N da en büyük çekme oranı $\beta=2,32$ olarak elde edilmiş, optimum kalıp açısının $\alpha=10^\circ$ olduğu ve $\alpha=10^\circ$ 'den sonra artan kalıp açısının çekme oranını azalttığı, çekme anında ütüleme kuvvetinin artmasıyla kaplarda ondülasyon oluşumunun azaldığı ve yüzey kalitesinin arttığı tespit edilmiştir.

Baskı plakası kuvveti 7350 N da, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ de limit çekme oranı $\beta=2,27$, zımba kuvveti 69199,74 N; $\alpha=5^\circ$ de limit çekme oranı $\beta=2,32$, zımba kuvveti 71279,46 N; $\alpha=10^\circ$ de limit çekme oranı $\beta=2,2$, zımba kuvveti 68218,74 N ve $\alpha=15^\circ$ de limit çekme oranı $\beta=2,27$, zımba kuvveti 65864,34 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.26'da R=8 mm ve baskı plakası kuvveti 7350 N için α 'ya bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri ve Şekil 5.27'de ise deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri verilmiştir.



Şekil 5.26. R=8 mm için, BPK=7350 N olduğunda elde edilen numuneler



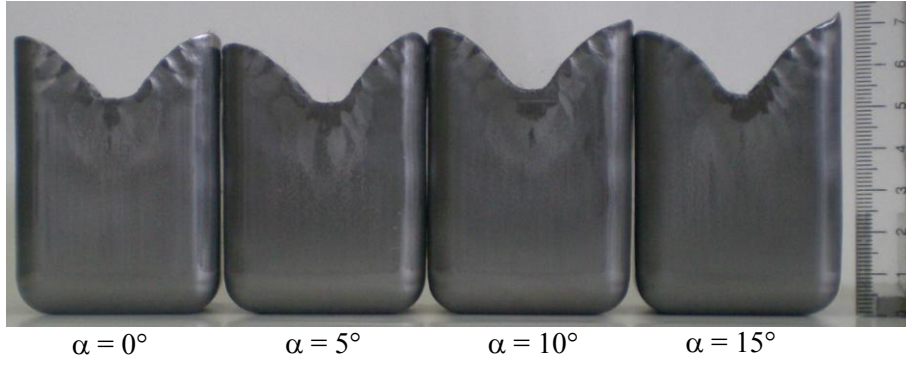
Şekil 5.27. R=8 mm için, BPK=7350 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

R=8 mm ve BPK 7350 N için optimum çekme oranı $\alpha=5^\circ$ de en büyük zımba kuvveti 71279,46 N olduğu durumda $\beta=2,32$ olarak elde edilmiştir. Optimum kalıp açısının $\alpha=5^\circ$ olduğu ve $\alpha=5^\circ$ 'den daha büyük açılar β üzerinde etkisinin olmadığı ve çekme oranının azaldığı görülmüştür. Şekil 5.27 incelendiğinde, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ 'de eğilim çizgilerinde iki adet tepe noktası olduğu, birinci nokta kesit daralmasının başlangıç noktası ve ikinci nokta ise artan kalıp açısının radyal gerilmeleri azaltması sonucu çekilen sac malzemenin kenarında oluşan ondülasyonların kalıp boşluğuna sıkışmasından kaynaklanan kuvvetin artışı göstermektedir.

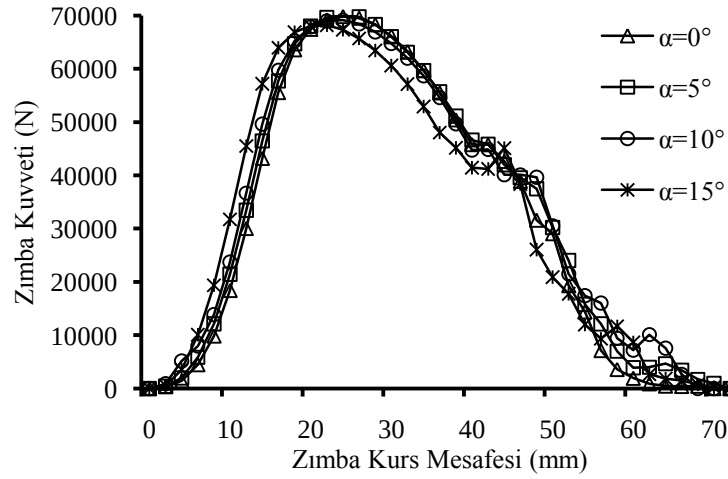
Matris/zımba radyüsü R=8 mm ve baskı plakası kuvveti 9800 N uygulandığında, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 69847,2 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 70180,74 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 69160,5 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68238,36 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.28'de matris/zımba radyüsü R=8 mm ve BPK 9800 N için kalıp açısına bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri ve Şekil 5.29'da ise deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri verilmiştir.

Şekil 5.28 ve 5.29 birlikte değerlendirildiğinde, baskı plakası kuvveti 9800 N olduğu durumda en büyük kulaklanma $\alpha=15^\circ$ meydana gelmiştir. En büyük çekme oranı $\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta $\beta=2,32$ olarak elde edilmiştir. Kalıp açısı ve matris/zımba radyüsünün artırılması ile kalıbın boğaz kısmında, malzemede çekme gerilmeleri oluşmakta, bu

gerilmelerin oluşmasıyla malzemenin çekme kuvvetleri artarak kabın daha fazla çekilmesini sağlamaktadır. Ancak kapta önemli derecede kulaklanmalar meydana gelmektedir.

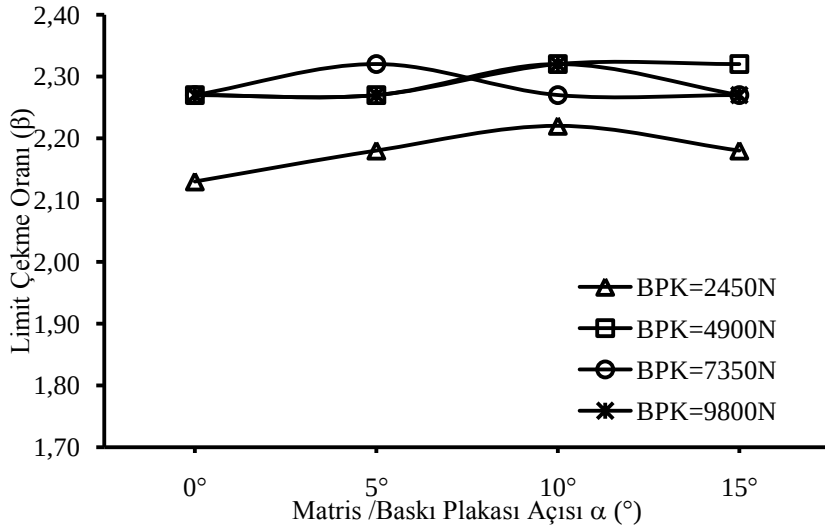


Şekil 5.28. R=8 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen numuneler



Şekil 5.29. R=8 mm için, BPK=9800 N olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

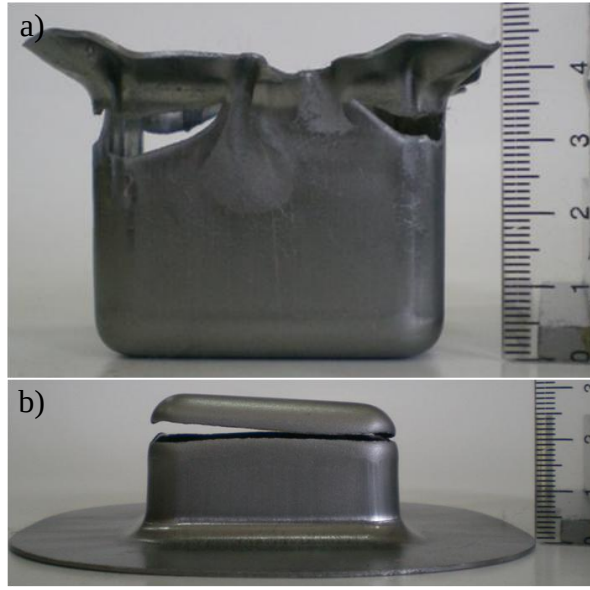
R=8 mm sabit matris/zımba radyüs değerinde, farklı baskı plakası kuvvetleri için matris/baskı plakası açılarına bağlı olarak elde edilen β 'nın değişimi Şekil 5.30'da verilmiştir.



Şekil 5.30. Matris/Zımba radyüsü R=8 mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi

Şekilde görüldüğü gibi BPK=2450 N’da ve $\alpha=0^\circ$ ’de limit çekme oranı $\beta=2,13$, $\alpha=10^\circ$ de artarak $\beta=2,22$ ve $\alpha=15^\circ$ de ise $\beta=2,18$ değerine düşmüştür. En büyük limit çekme oranı $\alpha=10^\circ$ kalıpta 4900 N ve 9800 N’luk baskı plakası kuvvetinde elde edilmiştir. Şekil 5.22 – 5.30 birlikte değerlendirildiğinde, matris/zımba radyüsünün 8 mm ve değişen baskı plakası kuvvetlerinde matris/baskı plakası açısının limit çekme oranı üzerinde etkisi olduğu görülmüştür.

Çekme işlemi sırasında matris/baskı plakası açısının artması malzemenin kalıp üst kenarlarıyla sürtünmesini azaltarak, buruşmayı önler, daha az bir zımba kuvveti ile malzeme akışını kolaylaştırarak çekme oranının artmasını sağlar. Malzemenin kalıbın ağız kısmındaki bölgeden rahatlıkla akışını kolaylaştırarak, bu bölgede malzemedeki çekme kuvvetini ve bu yüzden çekme gerilmesini azaltmakta, malzemenin daha fazla plastik şekil değişimine uğramasını kolaylaştırmaktadır. Burada kap duvarlarında basma ve çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Meydana gelen çekme gerilmelerinin etkisiyle malzemedeki daha fazla uzama olmakta, bu uzama malzemenin emniyetli çekme gerilmesi sınırına kadar devam ederek, emniyet sınırını (orantı sınırı) aştıktan sonra kapta yırtılma, çatlama ve kırılma gibi hasarlar oluşmaktadır (Şekil 5.31) [69].

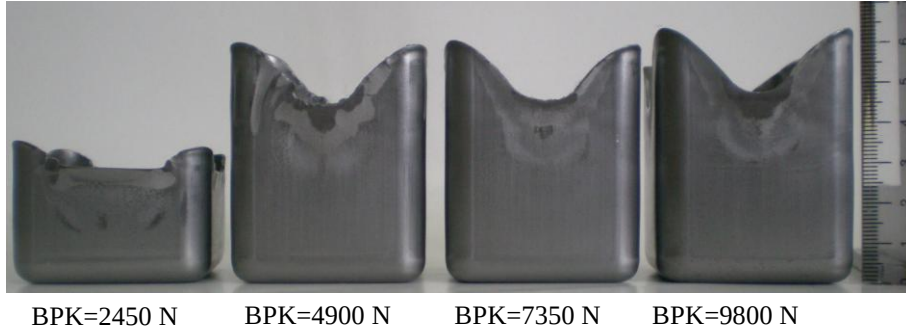


Şekil 5.31. Değişik yırtılma ve çatlakların oluştuğu numuneler

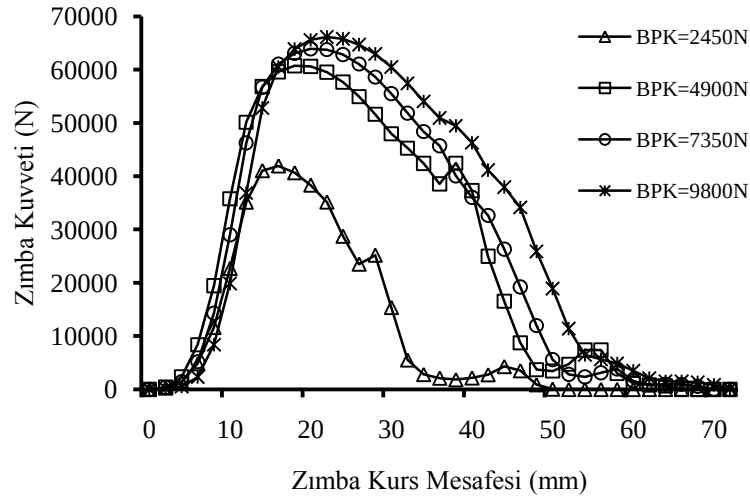
5.2. Baskı Plakası Kuvvetinin (BPK) Çekme Oranı (β) Üzerindeki Etkisi

Çekme işlemi sırasında, sac parça üzerine baskı plakası tarafından belirli bir kuvvetin uygulanması ile üründe oluşabilecek kırışıklıklar engellenerek, çekme işleminin düzenli bir şekilde gerçekleşmesi sağlanabilir. Baskı plakası kuvvetinin çekme oranı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 4 farklı kuvvet uygulanarak deneyler yapılmıştır.

Matris/zımba radyüsü $R=4$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ lik kalıpta, baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=1,77$ ve en büyük zımba kuvveti $41967,18$ N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=1,90$ ve en büyük zımba kuvveti $60802,38$ N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=1,95$ ve en büyük zımba kuvveti $63941,58$ N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,00$ ve en büyük zımba kuvveti $66158,64$ N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.32’de matris/zımba radyüsü $R=4$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için farklı BPK’ne göre elde edilen optimum deney numuneleri ve Şekil 5.33’de ise deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, baskı plakası kuvvetinin artması ile limit çekme oranının arttığı ve buna bağlı olarak kap yüksekliklerinin de artmıştır. Limit çekme oranının artması ile kaplarda önemli derecede ondülasyonların ve buruşmaların azaldığı görülmüştür.

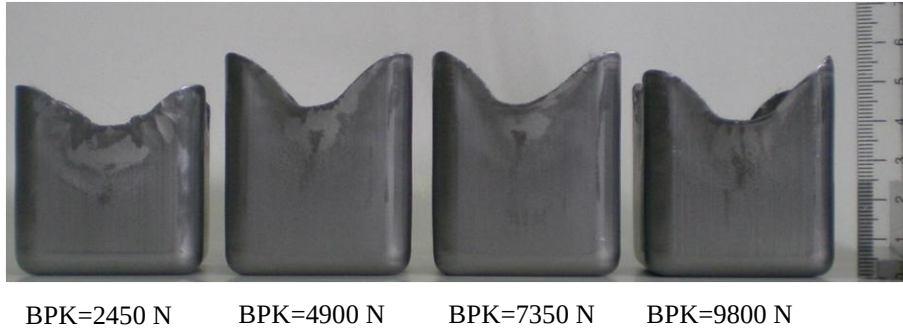


Şekil 5.32. $R=4$ mm ve $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

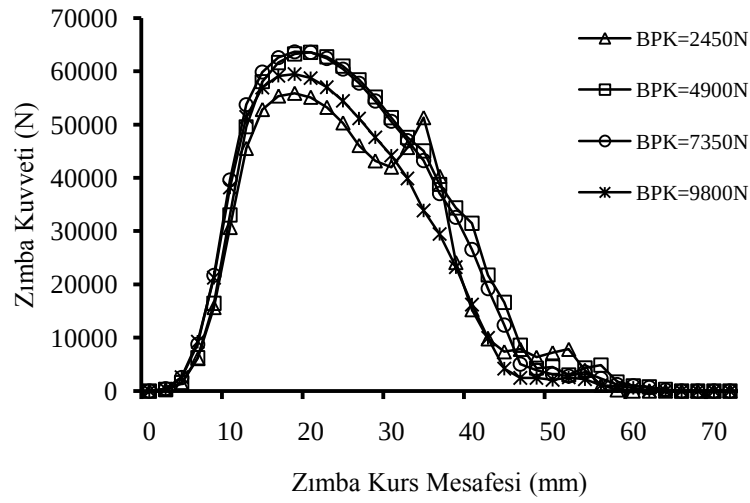


Şekil 5.33. $R=4$ mm ve $\alpha=0^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta, baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=2,00$ ve en büyük zımba kuvveti $55877,76$ N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti $63608,04$ N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti $63725,76$ N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,09$ ve en büyük zımba kuvveti $59507,46$ N olarak elde edilmiştir. $R=4$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ için BPK'lerine göre elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.34'de ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.35'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi en büyük çekme oranı yani kap yüksekliği BPK'nin 4900 N ve 7350 N olduğu durumda $\beta=2,13$, en düşük çekme oranı ise BPK'nin 2450 N olduğu durumda $\beta=2,00$ olarak elde edilmiştir. $R=4$ mm için optimum baskı plakası kuvveti 4900 N olarak tespit edilmiştir.

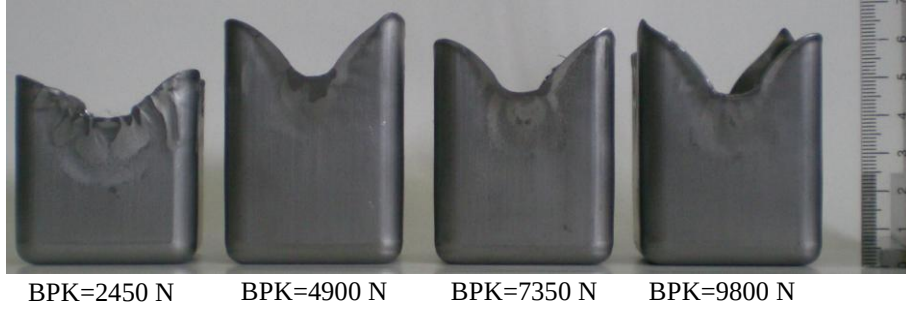


Şekil 5.34. $R=4$ mm ve $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

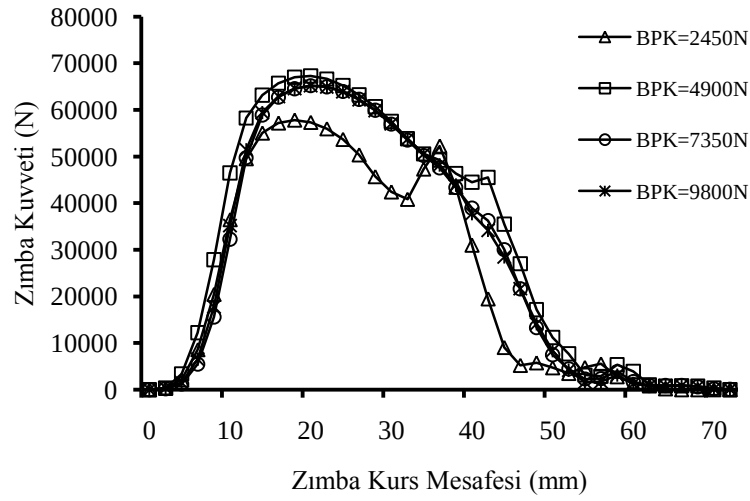


Şekil 5.35. $R=4$ mm ve $\alpha=5^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta, baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=2,04$ ve en büyük zımba kuvveti $57820,14$ N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti $67296,6$ N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti $65216,88$ N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti $65177,64$ N olarak elde edilmiştir. $R=4$ mm ve $\alpha=10^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.36'da ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.37'de verilmiştir. $\alpha=10^\circ$ lik kalıpta en büyük çekme oranı BPK'nin 4900 N olduğu durumda $\beta=2,22$ ve en düşük çekme oranı ise BPK'nin 2450 N'da $\beta=2,04$ olarak elde edilmiştir. BPK 2450 N'da kapta ondülasyonların olduğu, 9800 N da ise kulaklanmanın daha fazla olduğu ve giderek arttığı görülmüştür. $R=4$ mm için ondülasyon ve kulaklanmanın olmadığı yani optimum baskı plakası kuvveti 4900 N olarak tespit edilmiştir.

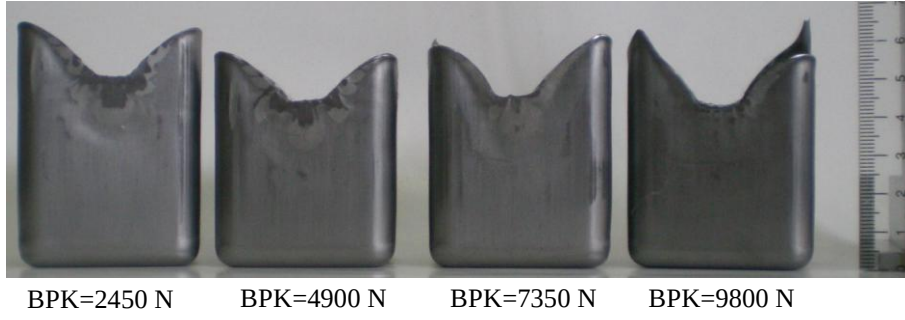


Şekil 5.36. $R=4$ mm ve $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

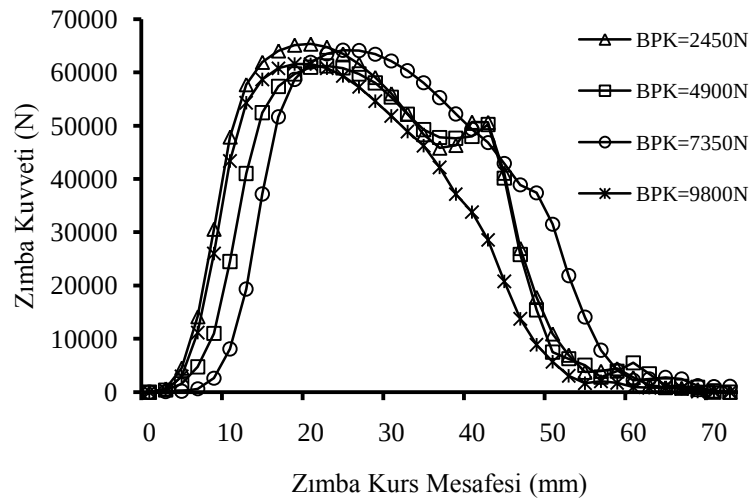


Şekil 5.37. $R=4$ mm ve $\alpha=10^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta, baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti $65354,22$ N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti $61214,4$ N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti $64216,26$ N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti $61646,04$ N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.19'da $R=4$ mm ve $\alpha=15^\circ$ 'de farklı BPK için elde edilen optimum deney numuneleri ve Şekil 5.4'de ise deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri verilmiştir. Şekil değerlendirildiğinde, BPK 2450 N olduğunda en büyük limit çekme oranının $\beta=2,22$ olduğu belirlenmiştir. Artan BPK ile birlikte kulaklanmanında arttığı görülmektedir. Artan açı değerleri ile radyal gerilmelerin azalması ve malzemenin kalıp boşluğu içerisine akışı daha kolay olduğundan $\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta optimum BPK 2450 N olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.38. $R=4$ mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

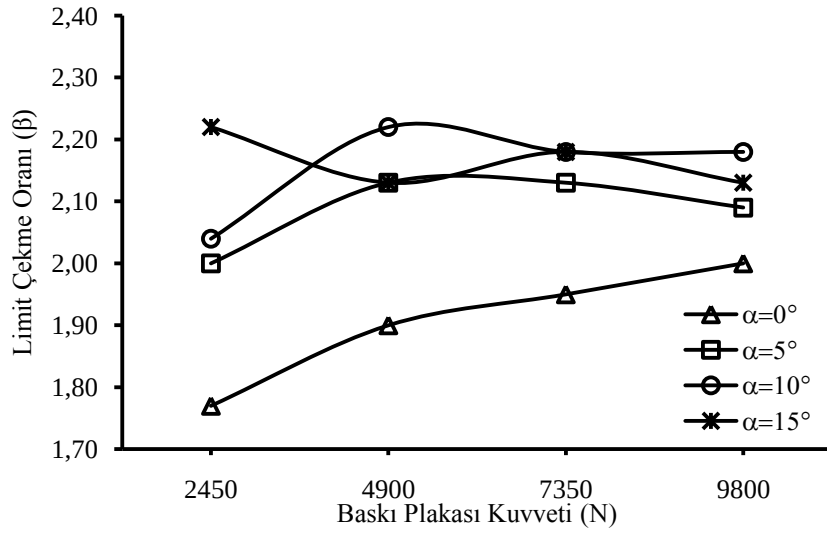


Şekil 5.39. $R=4$ mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Şekil 5.32 – 5.39’a göre, $BPK=2450N$ olduğunda numunelerde ondülasyonlar, $BPK=9800N$ olarak uygulanan numunelerde ise kulaklanmaların olduğu görülmüştür. Sabit β değerlerinde BPK ’nin artması zımba kuvvetini de arttırmakta ve dolayısıyla çekilen sacın daha erken hasara uğramasına neden olmaktadır. Kulaklanmaları engellemek için BPK küçük değerlerde tutulması önemlidir [68].

Şekil 5.40’da $R=4$ mm olduğu durumda farklı kalıp açılarında baskı plakası kuvvetinin β üzerindeki etkisinin değişimi verilmiştir.

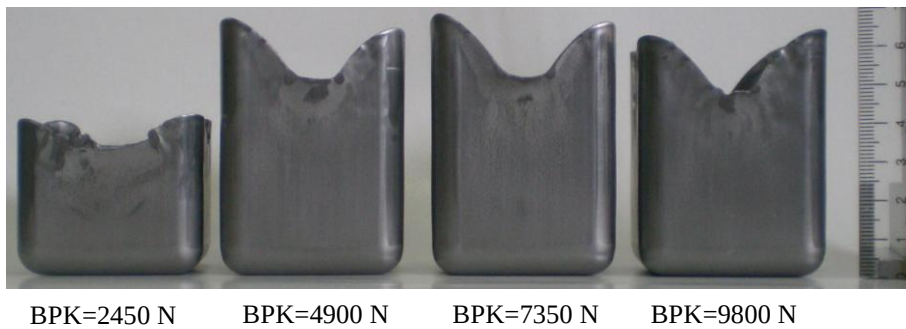
Şekilde görüldüğü gibi, $\alpha=0^\circ$ ’de artan BPK ’ne bağlı olarak β ’nin arttığı, $\alpha=0^\circ$ ve $BPK=2450$ N’da limit çekme oranı $\beta=1,77$, $\alpha=15^\circ$ de ise $\beta=2,00$ olarak elde edilmiştir. Kalıp açısının 5° ve 10° olduğu durumda ise 4900 N’luk baskı plakası kuvvetinde β ’nin en büyük değerde olduğu ve BPK ’nin artması ile birlikte β değerinde bir miktar düşüş olduğu görülmüştür.



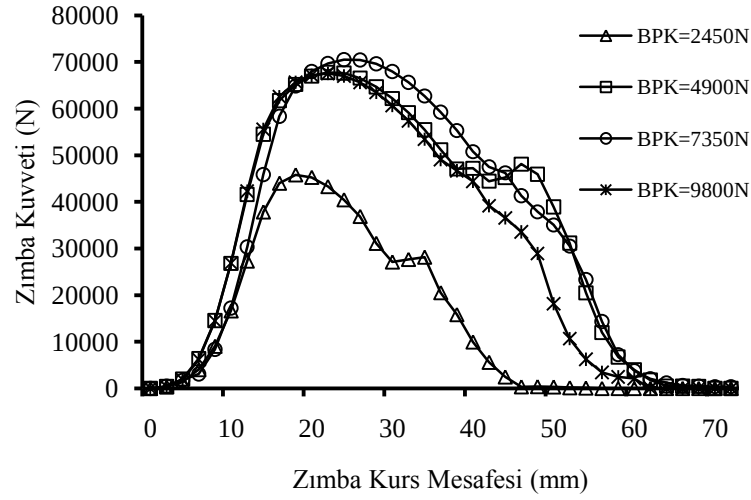
Şekil 5.40. R=4 mm için Baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

$\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta BPK=4900 N ve BPK=9800 N olduğunda limit çekme oranı $\beta=2,13$ olarak elde edilmiştir. β 'nın bu değeri için en büyük zımba kuvveti BPK=4900 N'da 61214,4 N ve BPK=9800 N için ise 61646,04 N olarak elde edilmiştir. Zımba kuvvetleri arasında oluşan 431,64 N'luk fark, baskı plakası kuvvetiniN; malzeme – kalıp arasındaki sürtünme kuvvetini artmasından kaynaklanmaktadır.

R=6 mm ve $\alpha=0^\circ$ 'lik kalıpta, baskı plakası kuvveti BPK=2450 N için limit çekme oranı $\beta=1,86$ ve en büyük zımba kuvveti 45812,7 N; BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 67806,72 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 70573,14 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 67551,66 N olarak elde edilmiştir. R=6 mm ve $\alpha=0^\circ$ için BPK değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.41'de ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.42'de verilmiştir.



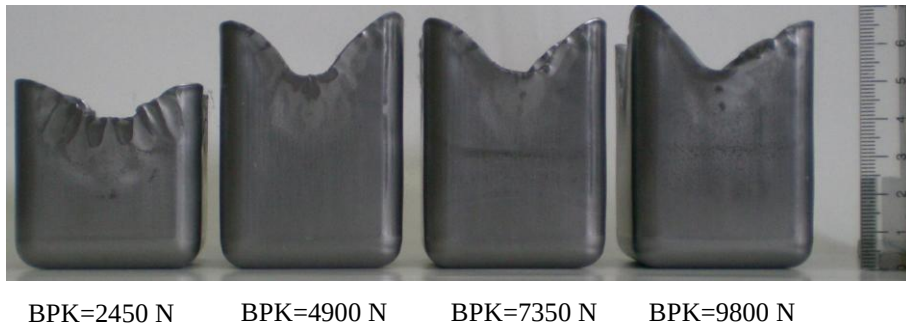
Şekil 5.41. R=6 mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler



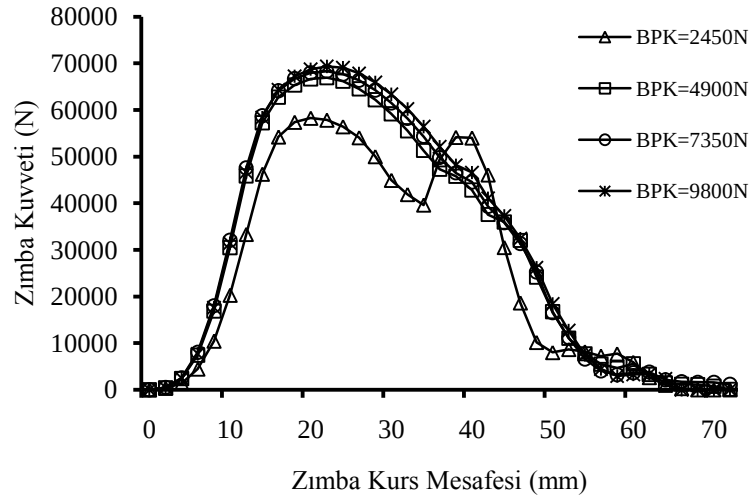
Şekil 5.42. R=6 mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Şekilde görüldüğü gibi en büyük çekme oranı BPK'nin 4900 N ve 7350 N olduğu durumda $\beta=2,27$, en düşük çekme oranı ise BPK'nin 2450 N olduğu durumda $\beta=1,86$ olarak elde edilmiştir. R=6 mm için optimum baskı plakası kuvveti 4900 N olarak tespit edilmiştir.

Matris/zımba radyüsü R=6 mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta, baskı plakası kuvveti BPK=2450 N için limit çekme oranı $\beta=2,09$ ve en büyük zımba kuvveti 58271,4 N; BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 66963,06 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68297,22 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 69356,7 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.43'de $\alpha=5^\circ$ için BPK değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri ve Şekil 5.44'de ise deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri verilmiştir.



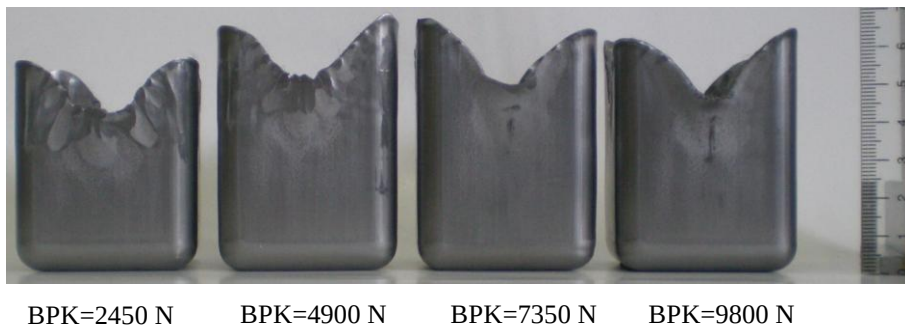
Şekil 5.43. R=6 mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler



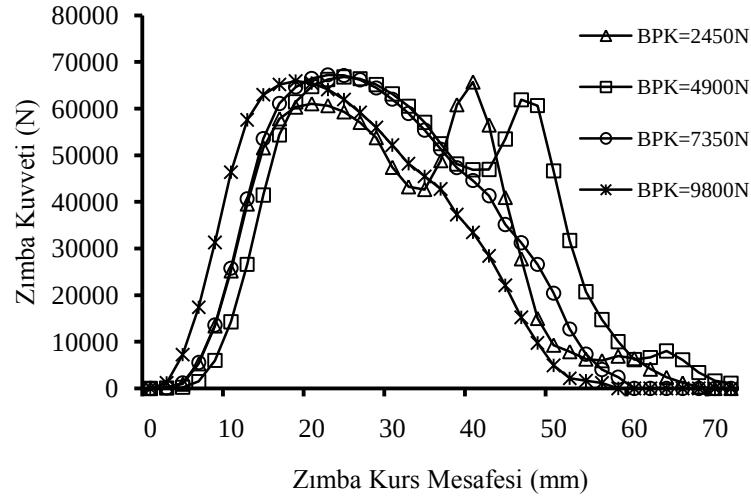
Şekil 5.44. R=6 mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Şekilde $\alpha=5^\circ$ olduğu durumda en büyük kulaklanma BPK=9800 N’da meydana gelmiştir. Elde edilen limit çekme oranları eşit olmasına rağmen en düşük zımba kuvveti BPK=4900 N olarak ölçülmüştür. R=6 mm ve $\alpha=5^\circ$ için optimum baskı plakası kuvvetinin 4900 N olduğu tespit edilmiştir.

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ ’lik kalıpta, baskı plakası kuvveti BPK=2450 N için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 65687,76 N; BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 66786,48 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 67296,6 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 65903,58 N olarak elde edilmiştir. matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için farklı BPK’ne göre elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.23’de ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.7’de verilmiştir.



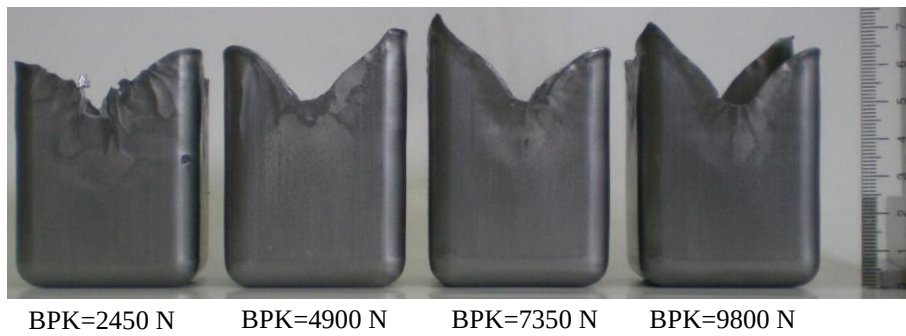
Şekil 5.45. R=6 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler



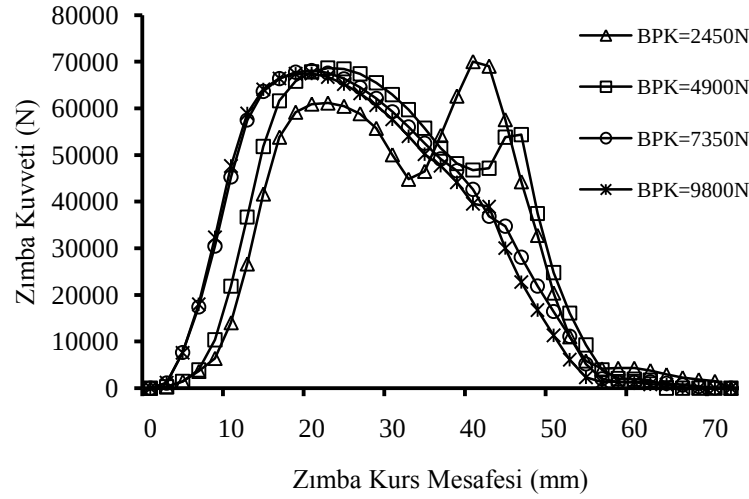
Şekil 5.46. R=6 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Şekilde görüldüğü gibi en büyük kap yüksekliği BPK'nin 4900 N ve 7350 N olduğu durumda ve dolayısıyla en büyük çekme oranı $\beta=2,27$, en düşük çekme oranı ve kap yüksekliği ise BPK'nin 2450 N olduğu durumda $\beta=2,13$ olarak elde edilmiştir. dolayısıyla R=6 mm için optimum baskı plakası kuvveti 4900 N olarak tespit edilmiştir.

$\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta, BPK=2450 N için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 71534,52 N; BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68689,62 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68101,02 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 67571,28 N olarak elde edilmiştir. R=6 mm ve $\alpha=15^\circ$ için farklı BPK'lerine göre elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.47'de ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.48'de verilmiştir.



Şekil 5.47. R=6 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

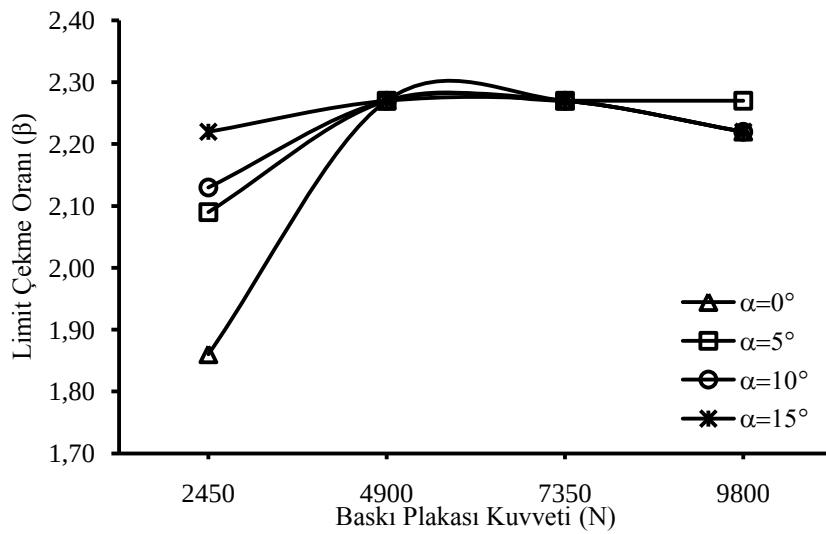


Şekil 5.48. R=6 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Şekilde görüldüğü gibi BPK 4900 ve 7350 N olduğunda en büyük limit çekme oranının $\beta=2,27$ olduğu, artan BPK ile kulaklanmalarında arttığı ve $\alpha=15^\circ$ lik kalıpta optimum BPK'nin 7350 N olduğu belirlenmiştir.

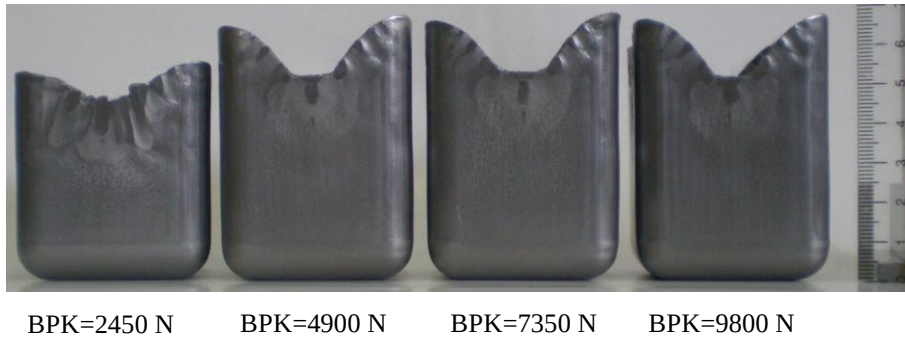
Şekil 5.49'da, matris/zımba radyüsünün sabit R=6 mm ve farklı α 'lar için, BPK'ne bağlı olarak β 'nın değişimi gösterilmiştir.

Şekil 5.49'da görüldüğü gibi, kalıp açısının bütün değerleri için 4900N baskı kuvveti değerinde β 'nın en büyük olduğu, bu değerden sonra BPK'nın artması ile β 'nın sabit kaldığı, ancak $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ için az bir miktar düşüş olduğu görülmüştür.

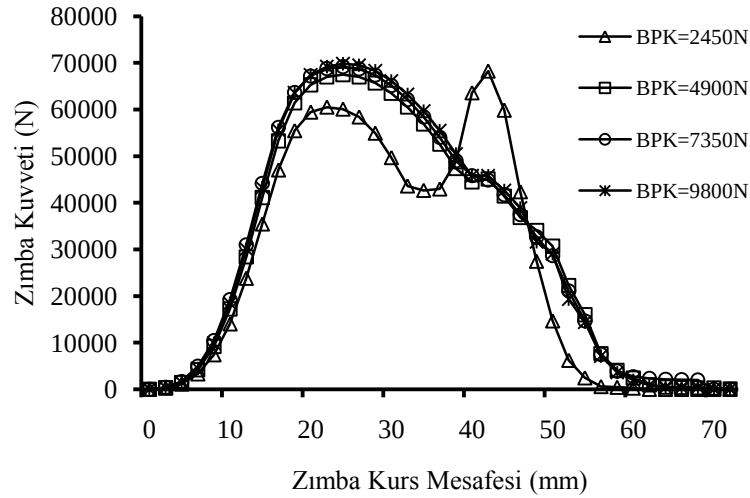


Şekil 5.49. R=6 mm için baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

Matris/zımba radyüsü $R=8$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ 'lık kalıpta, baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 68866,2 N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 67473,18 N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 69199,74 N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 69847,2 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.50'de $R=8$ mm ve $\alpha=0^\circ$ için BPK 'nin değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri ve Şekil 5.51'de ise deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri verilmiştir.



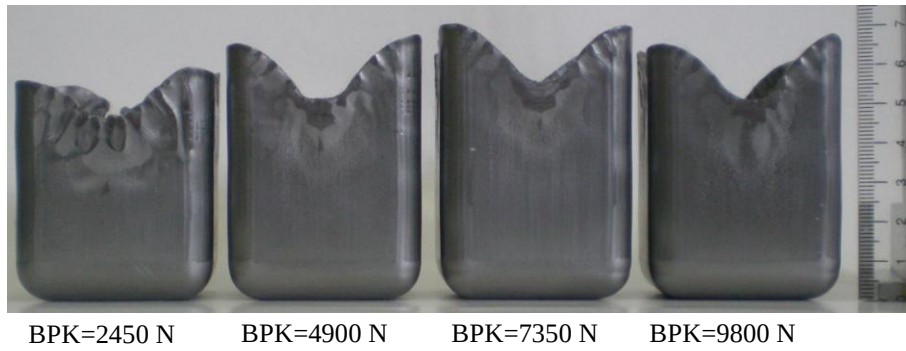
Şekil 5.50. $R=8$ mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler



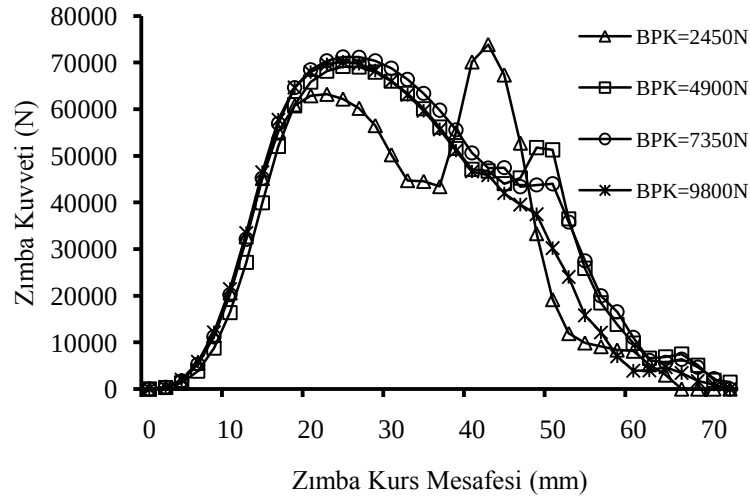
Şekil 5.51. $R=8$ mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

$R=8$ mm ve $\alpha=0^\circ$ için en büyük çekme oranı BPK 'nin 4900 N; 7350 N ve 9800 N olduğu durumda $\beta=2,27$ olarak elde edilmiştir. β 'nin bu değeri için zımba kuvvetinin en düşük olduğu ve dolayısıyla optimum baskı plakası kuvveti 4900 N olarak tespit edilmiştir.

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta, baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti $73928,16$ N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti $69219,36$ N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti $71279,46$ N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti $70180,74$ N olarak elde edilmiştir. Matris/zımba radyüsü $R=8$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ için BPK 'nin değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.52'de ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.53'de verilmiştir.



Şekil 5.52. $R=8$ mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

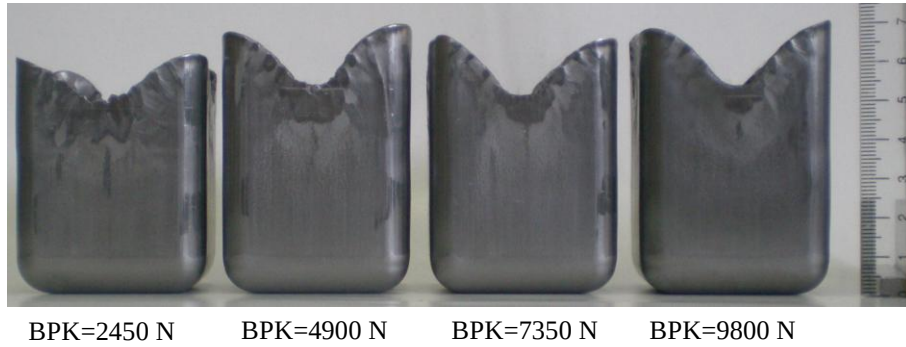


Şekil 5.53. $R=8$ mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

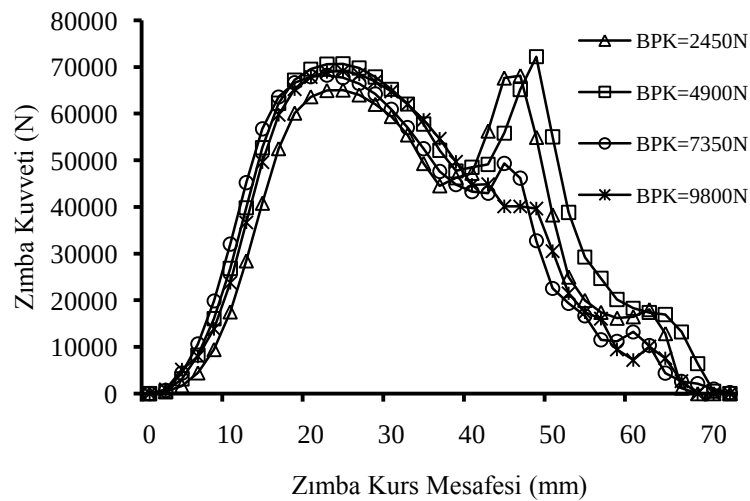
$\alpha=5^\circ$ lik kalıpta en büyük çekme oranı BPK 'nin 7350 N olduğu durumda $\beta=2,32$, en düşük çekme oranı ise BPK 'nin 2450 N olduğu durumda $\beta=2,18$ olarak elde edilmiştir. $BPK=2450$ N'da kapta ondülasyonların fazla olduğu, diğer kaplarda ise sadece kap

ağızlarında radyüsten dolayı ondülasyonların oluştuğu görülmektedir. R=8 mm için optimum baskı plakası kuvveti 7350 N olarak tespit edilmiştir.

$\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta, baskı plakası kuvveti BPK=2450 N için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 69788,34 N; BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 72966,78 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68218,74 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 69160,5 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.54'de matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.55'de verilmiştir.



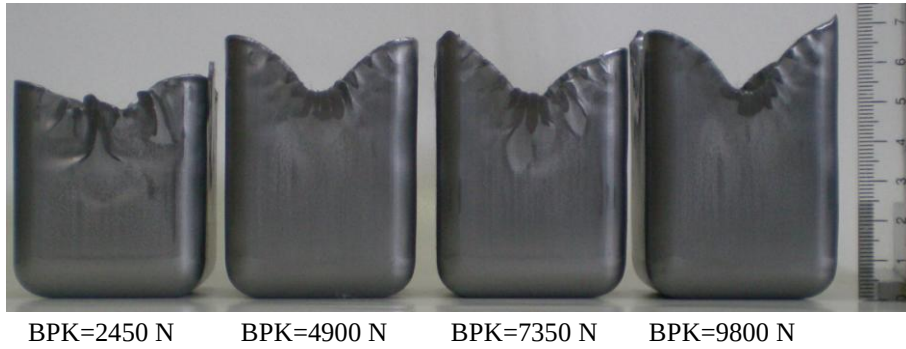
Şekil 5.54. R=8 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler



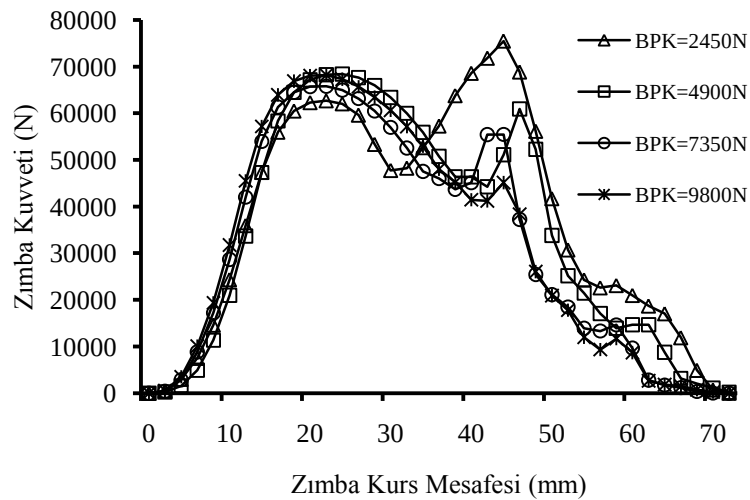
Şekil 5.55. R=8 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Şekil 5.54 ve 5.55’de görüldüğü gibi BPK 4900 ve 9800 N olduğunda en büyük limit çekme oranının $\beta=2,32$ olduğu belirlenmiştir. Artan BPK ile kulaklanmanın da arttığı görülmektedir. $\alpha=10^\circ$ lik kalıpta optimum BPK 9800 N olarak tespit edilmiştir. BPK 4900 N’deki en büyük zımba kuvvetinin 9800 N’den büyük olması, kalıp açısının radyal gerilmeleri azaltması sonucu çekme işlemi esnasında oluşan ondülasyondan kaynaklanmaktadır.

$\alpha=15^\circ$ ’lik kalıpta, baskı plakası kuvveti BPK=2450 N için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 75497,76 N; BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 68434,56 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 65864,34 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68238,36 N olarak elde edilmiştir. Matris/zımba radyüsü R=8 mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için farklı BPK’ine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.56’da ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.57’de verilmiştir.



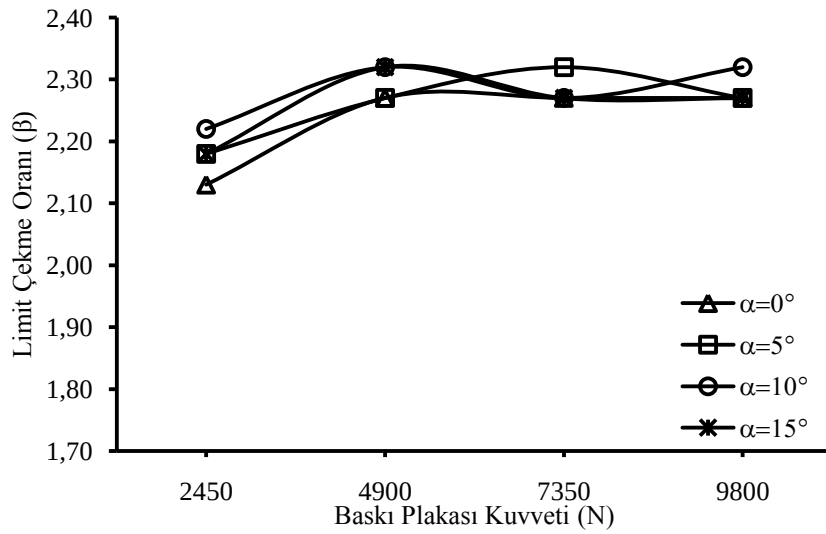
Şekil 5.56. R=8 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler



Şekil 5.57. R=8 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda ölçülen zımba kuvvetleri

Baskı plakası kuvvetinin az olduğu durumda kaplarda ondülasyonların meydana geldiği, fazla olduğunda ise kulaklanmaların olduğu görülmüştür. Aynı β değerlerinde, baskı plakası kuvvetinin artması radyal gerilmeleri arttırarak sac malzemenin kalıp içerisine geçişini engellemekte ve dolayısıyla zımba kuvvetinin de artmasına sebep olmaktadır.

Şekil 5.58’de matris/zımba radyüsünün sabit olduğu $R=8$ mm, BPK’ne bağlı olarak belirlenen β değerlerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 5.58. $R=8$ mm için Baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

Şekilde görüldüğü gibi, en büyük çekme oranı kalıp açısının 0° , 10° ve 15° ’de baskı plakası kuvvetinin 4900N olduğunda belirlenmiştir. BPK’nin artması ile birlikte β ’nın sabit kaldığı veya az bir miktar düştüğü görülmektedir. En küçük limit çekme oranı $\alpha=0^\circ$ ve $BPK=2450$ N’da $\beta=2,13$ ve en büyük limit çekme oranı $BPK=4900$ N’da $\beta=2,32$ olarak gerçekleşmiştir.

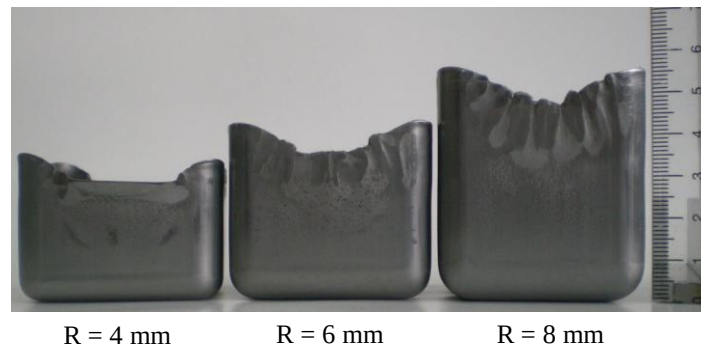
Çekme işlemi sırasında baskı plakası basıncının etkisi ile malzeme radyal ve basma gerilmelerinin etkisi altındadır. Baskı plakası ve kalıp yüzeyine açılar ve kalıp ağız kısmına da radyüslerin verilmesi, radyal ve basma gerilmelerinin etkisinde olan malzemenin akışını kolaylaştırırken; malzemede daha fazla plastik şekil değişiminin meydana gelmesi ve daha az bir baskı plakası kuvveti sağlamaktadır. Artan açı değerleri ile radyal gerilmelerin azalması ve malzemenin kalıp boşluğu içerisine akışı daha kolay olmaktadır. Kap yüksekliği artmaktadır. Matris/baskı plakası açısının artması eksenel

kuvveti arttırmakta, baskı plakası kuvvetini azaltmaktadır. α 'nın küçük olmasının çekme oranı üzerinde bir etkisi yoktur. Küçük α değerlerinde kapta çatlama, buruşma ve yırtılmalar meydana gelmekte ve istenilen çekme oranı elde edilememektedir. Derin çekme işlemlerinde aksenal kuvvetler önemlidir. α 'nın küçük olduğu, özellikle $0^\circ - 5^\circ$ aralığında aksenal kuvvetlerde artış olmamaktadır.

5.3. Matris/Zımba Radyüsünün (R) Çekme Oranı (β) Üzerindeki Etkisi

Derin çekme işlemlerinde, kalıp boşluğu içerisine malzeme akışını kolaylaştırmak amacıyla, zımbanın alt kısmına ve matrisin üst yüzeyine farklı radyüsler verilerek bu radyüslerin limit çekme oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun için zımbanın alt kısmına ve matrisin üst yüzeyine farklı radyüsler (4, 6 ve 8 mm) verilmiştir.

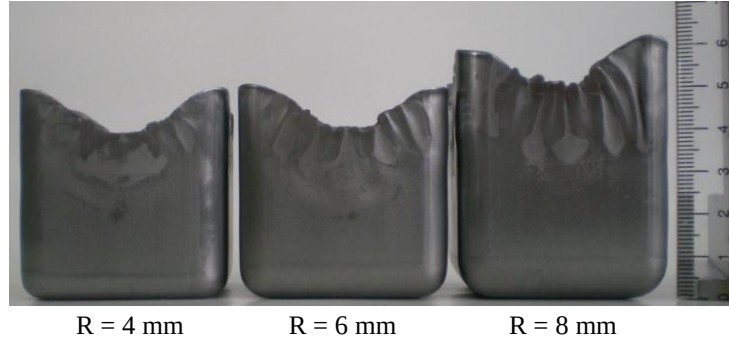
Baskı plakası kuvveti 2450 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ 'lik kalıpta, matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=1,77$ ve en büyük zımba kuvveti 41967,18 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=1,86$ ve en büyük zımba kuvveti 45812,7 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 68866,2 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.59'da baskı plakası kuvveti 2450 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, matris/zımba radyüsünün artması ile limit çekme oranının $\beta=1,77$ 'den $\beta=2,13$ 'e arttığı belirlenmiştir.



Şekil 5.59. BPK=2450 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

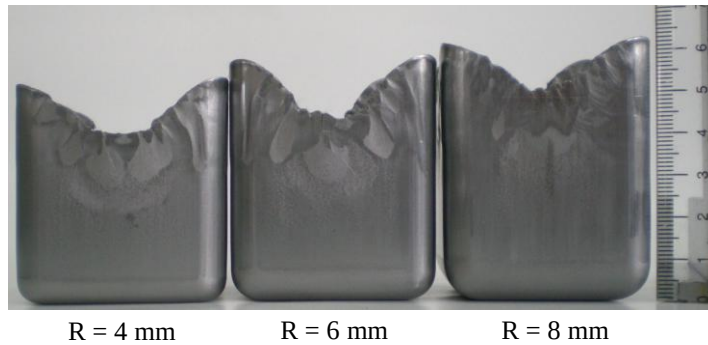
$\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta, matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,00$ ve en büyük zımba kuvveti 55877,76 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,09$ ve en büyük zımba kuvveti 58271,4 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba

kuvveti 73928,16 N olarak elde edilmiştir. BPK=2450 N ve $\alpha=5^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.60'da verilmiştir. Şekilde matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ olduğu durumda en fazla ondülasyonların R=8 mm'de meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.60. BPK=2450 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

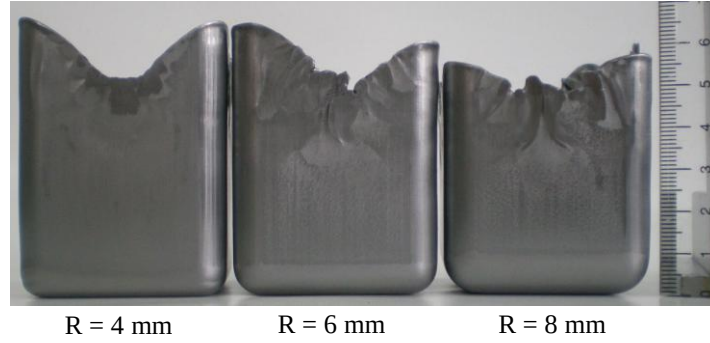
$\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta, R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,04$ ve en büyük zımba kuvveti 57820,14 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 65687,76 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 69788,34 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 2450 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.61'de verilmiştir.



Şekil 5.61. BPK=2450 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

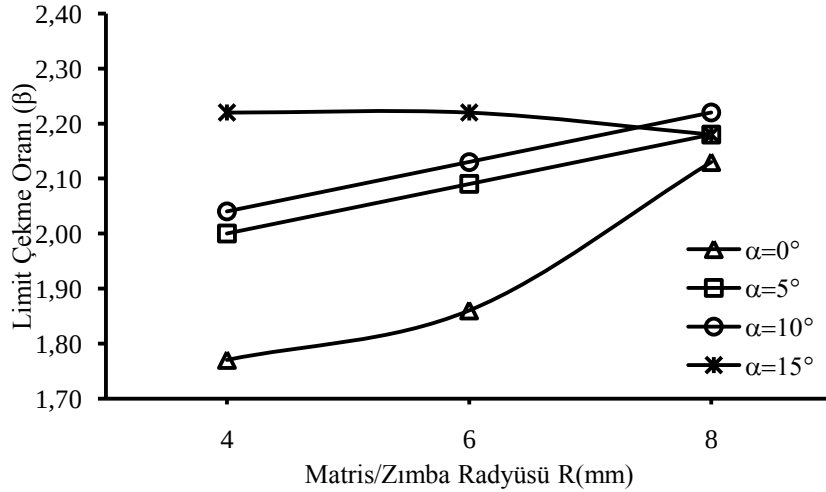
Şekilde görüldüğü gibi en büyük çekme oranı, R=8 mm'de $\beta=2,22$, en düşük çekme oranı ise R=4 mm ve $\beta=2,04$ olarak elde edilmiştir. BPK=2450 N ve $\alpha=10^\circ$ için matris/zımba radyüsünün optimum değeri R=8 mm olarak elde edilmiştir.

$\alpha=15^\circ$ ’lik kalıpta, matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 65354,22 N; $R=6$ mm için $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 71534,52 N ve $R=8$ mm için $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 75497,76 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.62’de baskı plakası kuvveti 2450 N ve $\alpha=15^\circ$ için R ’nin değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir. Radyüsün artmasıyla ondülasyonların arttığı ve dolayısıyla limit çekme oranının azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.62. BPK=2450 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

Şekil 5.63’de BPK’nin sabit 2450 N olduğu durumda, kalıp/zımba radyüsünün β üzerindeki etkisi verilmiştir.

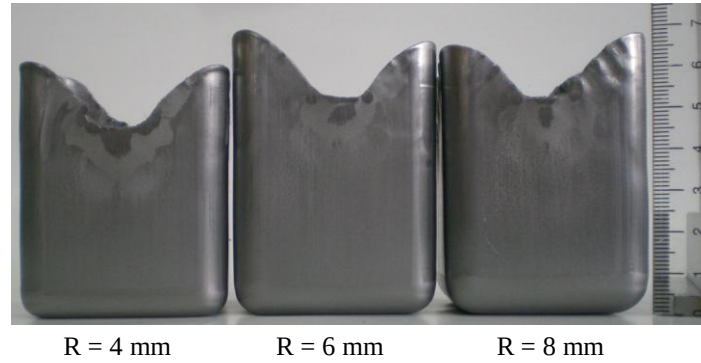


Şekil 5.63. Baskı plakası kuvveti (BPK) 2450 N için Matris/Zımba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

Şekilde görüldüğü gibi, $\alpha=0^\circ$ ve $R=4$ mm’de limit çekme oranı $\beta=1,77$ olarak elde edilmiştir. $R=8$ mm de ise $\beta=2,13$ olmuştur. α ’nın 5° ve 10° olduğu durumlarda ise radyüs

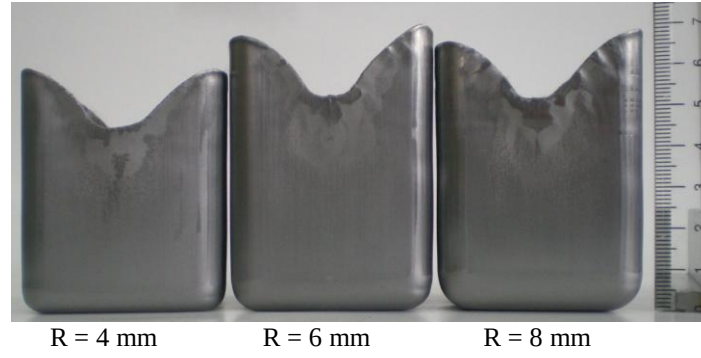
değerinin artması ile β değerinin de lineer bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Kalıp açısının 15° olması durumunda radyal kuvvetin azalması ve radyüsün büyük olmasından dolayı erken oluşan ondülasyonlar limit çekme oranını düşürmüştür.

Baskı plakası kuvveti 4900 N ve $\alpha=0^\circ$ 'lik kalıpta, R=4 mm için $\beta=1,90$ ve en büyük zımba kuvveti 60802,38 N; R=6 mm için $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 67806,72 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 67473,18 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.64'de BPK=4900 N ve $\alpha=0^\circ$ için R'nin değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir. Şekil değerlendirildiğinde, R=6 mm ve R=8 mm olduğunda en büyük limit çekme oranının $\beta=2,27$ olduğu belirlenmiştir. Artan kalıp radyüsü ile ondülasyonların arttığı görülmüştür. $\alpha=0^\circ$ 'lik kalıpta kulaklanmaların ve ondülasyonların olmadığı, optimum matris/zımba radyüsü R=6 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.64. BPK=4900 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

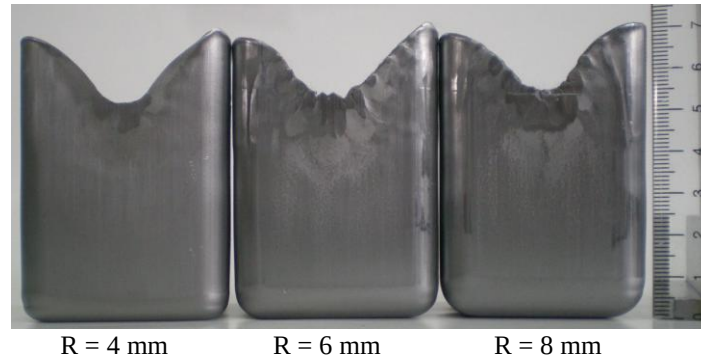
Matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta, matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 63608,04 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 66963,06 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 69219,36 N olarak tespit edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 4900 N ve $\alpha=5^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.65'de verilmiştir.



Şekil 5.65. BPK=4900 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

Şekilde görüldüğü gibi en büyük çekme oranı, radyüsün 6 ve 8 mm olduğu durumda $\beta=2,27$ olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 4900 N da optimum matris/zımba radyüsünün R=6 mm olduğu tespit edilmiştir.

$\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta, matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 67296,6 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 66786,48 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 72966,78 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.66'da baskı plakası kuvveti 4900 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir.

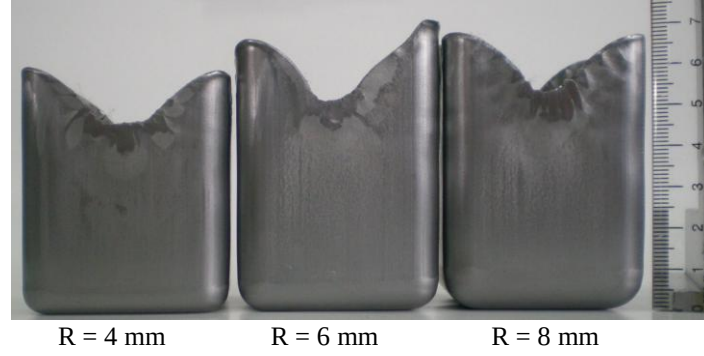


Şekil 5.66. BPK=4900 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

Şekilde görüldüğü gibi kalıp radyüsünün azalmasıyla kulaklanmaların arttığı ve ondülasyonların azaldığı görülmektedir.

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta, R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 61214,4 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68689,62 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük

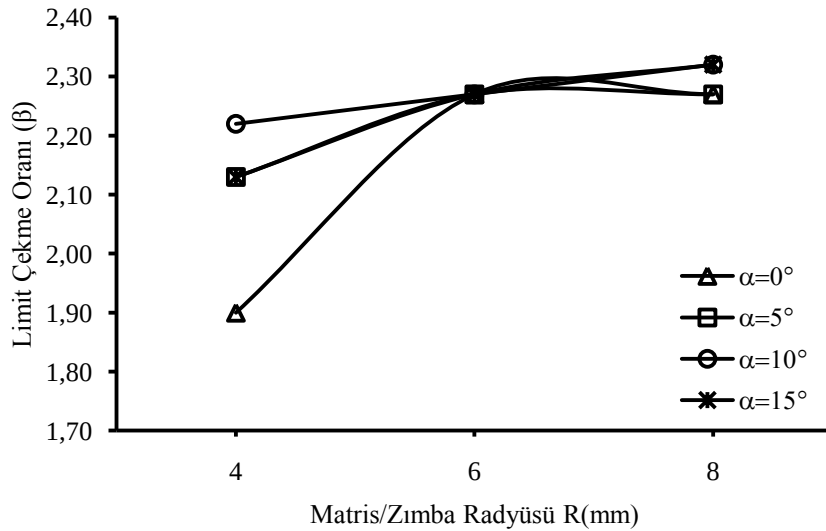
zımba kuvveti 68434,56 N olarak tespit edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 4900 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri Şekil 5.67’de verilmiştir.



Şekil 5.67. BPK=4900 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

Şekilde görüldüğü gibi en büyük çekme oranı, R=8 mm’de $\beta=2,32$ olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 4900 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ ’lik kalıpta optimum matris/zımba radyüsünün R=6 mm olduğu tespit edilmiştir.

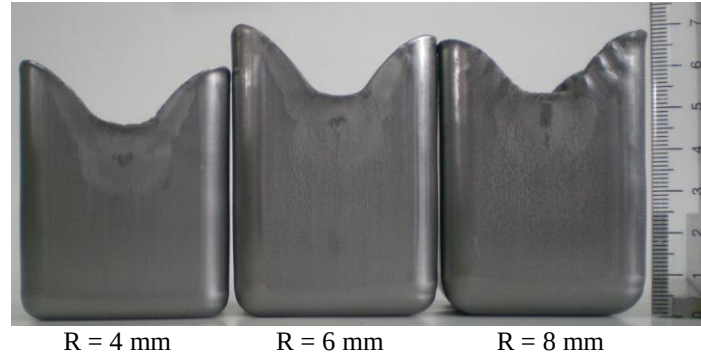
Şekil 5.68’de BPK’nin sabit olduğu 4900 N için farklı matris/zımba radyüslerinin β üzerindeki etkisinin değişimi verilmiştir.



Şekil 5.68. Baskı plakası kuvveti (BPK) 4900 N için Matris/Zımba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

Şekil 5.68’da artan radyüse bağlı olarak β ’nın arttığı, $\alpha=0^\circ$ ve $R=4$ mm’de limit çekme oranı $\beta=1,90$ olarak elde edilmiştir. $R=8$ mm de ise $\beta=2,27$ değerine çıkmıştır. $\alpha=10^\circ$ olduğu durumda ise radyüs değerinin artması ile β değerinin de lineer bir şekilde arttığı belirlenmiştir.

BPK=7350 N ve $\alpha=0^\circ$ ’lik kalıpta, Matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=1,95$ ve en büyük zımba kuvveti 63941,58 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 70573,14 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 69199,74 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.69’de BPK=7350 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için R ’nin değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir.

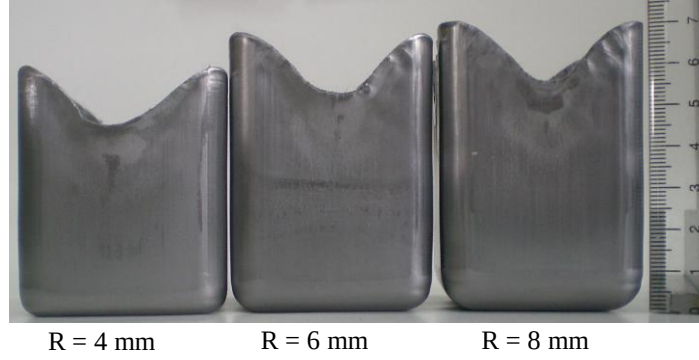


Şekil 5.69. BPK=7350 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

Şekilde görüldüğü gibi en büyük çekme oranı, kalıp radyüsünün 6 ve 8 mm olduğu durumda $\beta=2,27$ olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 7350 N da kulaklanmaların ve ondülasyonların olmadığı optimum matris/zımba radyüsünün $R=6$ mm olduğu tespit edilmiştir.

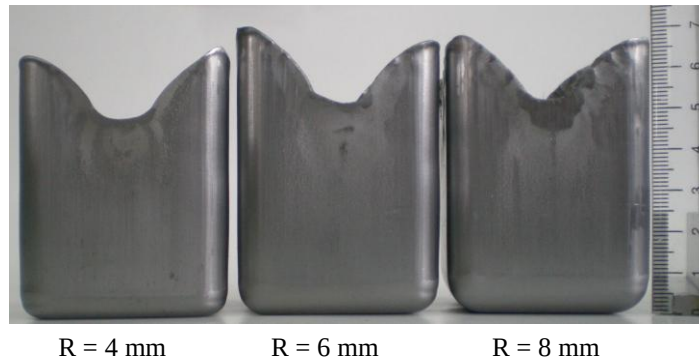
Matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ ’lik kalıpta, matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 63725,76 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68297,22 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 71279,46 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.70’de BPK=7350 N ve $\alpha=5^\circ$ için R ’nin değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir.

Şekil değerlendirildiğinde, en düşük çekme oranı $R=4$ mm'de $\beta=2,13$, en büyük limit çekme oranının ise $R=8$ mm'de $\beta=2,32$ olarak elde edilmiştir. $BPK=7350$ N ve $\alpha=5^\circ$ için matris/zımba radyüsünün optimum değeri $R=8$ mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.70. $BPK=7350$ N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

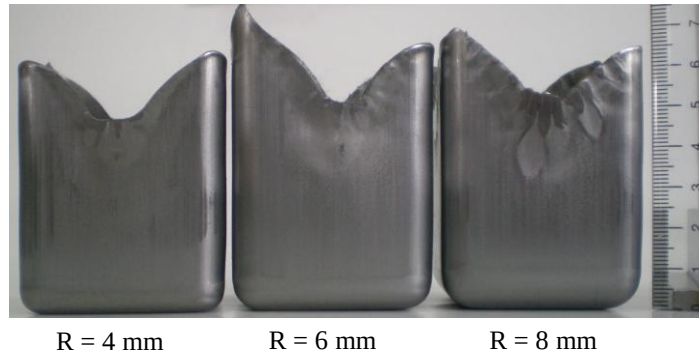
$\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta, Matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti $65216,88$ N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti $67296,6$ N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti $68218,74$ N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.71'de $BPK=7350$ N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir.



Şekil 5.71. $BPK=7350$ N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

Şekilde görüldüğü gibi en büyük çekme oranı, kalıp radyüsünün 6 ve 8 mm olduğu durumda $\beta=2,27$ ve BPK=7350 N için optimum matris/zımba radyüsünün R=6 mm olduğu tespit edilmiştir.

$\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta, matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 64216,26 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68101,02 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 65864,34 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.72'de baskı plakası kuvveti 7350 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir.

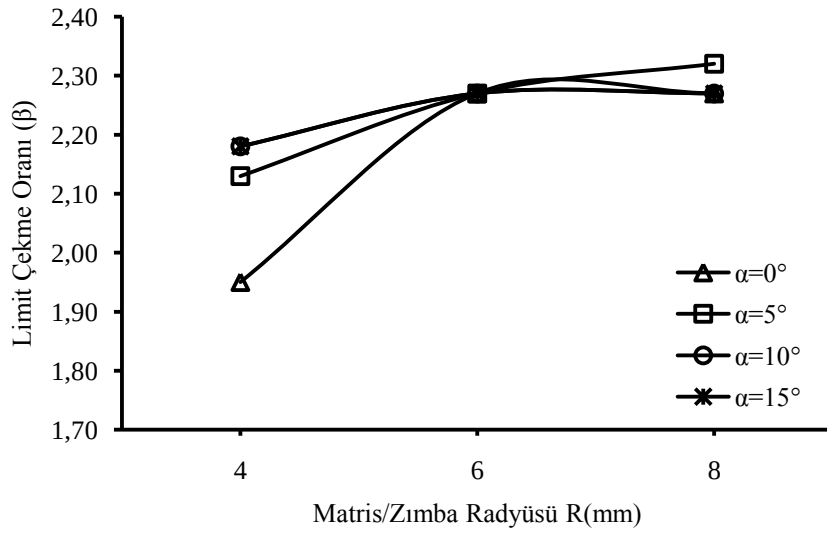


Şekil 5.72. BPK=7350 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

$\alpha=15^\circ$ için en büyük çekme oranı R=6 ve R=8 mm'de $\beta=2,27$ ve en düşük çekme oranı ise R=4 mm olduğu durumda $\beta=2,18$ olarak elde edilmiştir. R=8 mm'lik kapta ondülasyonların oluştuğu, R=6 mm'de ise kullaklanmanın arttığı görülmektedir. Baskı plakası kuvveti 7350 N ve $\alpha=15^\circ$ için optimum matris/zımba radyüsü R=6 mm olarak belirlenmiştir.

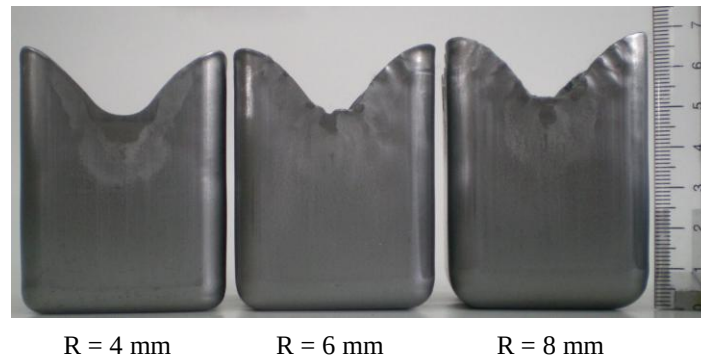
Şekil 5.73'de BPK sabit 7350 N olduğunda, matris/zımba radyüsünün β üzerindeki etkisinin değişimi verilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi 0° , 10° ve 15° 'lik kalıplarda matris/zımba radyüsü R=6 mm'ye kadar çekme oranının arttığı, bu değerden sonra radyüsün artması ile birlikte β 'nin sabit kaldığı, değişmediği görülmüştür.



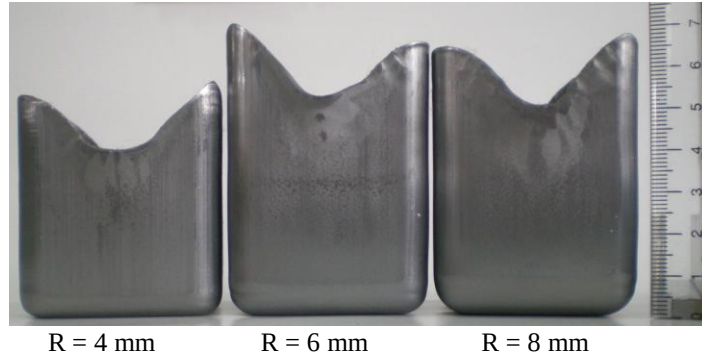
Şekil 5.73. Baskı plakası kuvveti (BPK) 7350 N için Matris/Zımba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

Baskı plakası kuvveti 9800 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ 'lik kalıpta, Matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,00$ ve en büyük zımba kuvveti 66158,64 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 67551,66 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 69847,2 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.74'da baskı plakası kuvveti 9800 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir. $\alpha=0^\circ$ 'lik kalıpta en büyük çekme oranı $R=8$ mm'de $\beta=2,27$ ve en düşük çekme oranı ise $R=4$ mm olduğu durumda $\beta=2,00$ olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 9800 N ve $\alpha=0^\circ$ için optimum matris/zımba radyüsü $R=8$ mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.74. BPK=9800 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

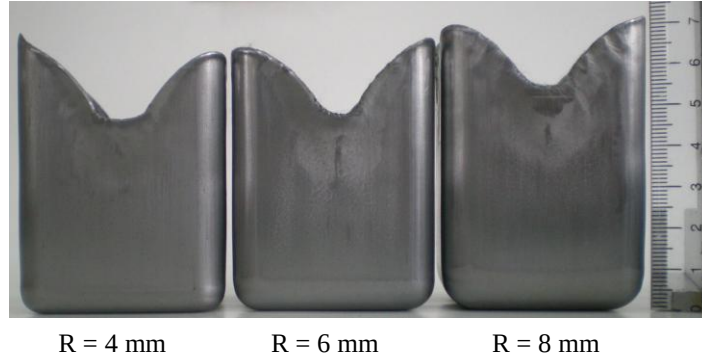
Matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ lik kalıpta, R=4 mm için $\beta=2,09$ ve en büyük zımba kuvveti 59507,46 N; R=6 mm için $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 69356,7 N ve R=8 mm için $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 70180,74 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.75’de BPK=9800 N ve $\alpha=5^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, R=6 mm ve R=8 mm olduğunda en büyük limit çekme oranı $\beta=2,27$ olarak belirlenmiştir. β ’nın bu değerinde kalıp radyüsünün artması ile baskı plakasının alanının azalmasından dolayı birim alanda daha fazla basınç oluşturmamasından dolayı zımba kuvveti artmıştır. Bu durumda optimum matris/zımba radyüsü R=6 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.75. BPK=9800 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

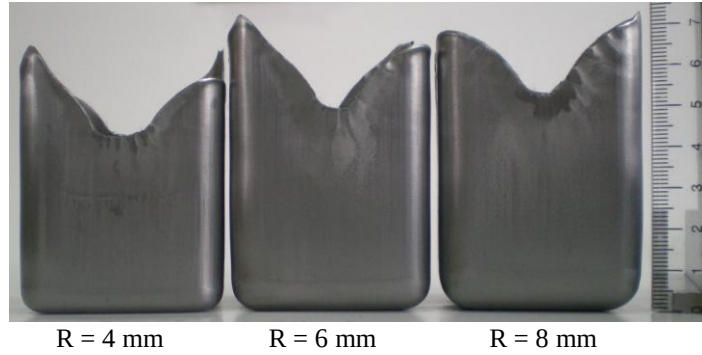
Matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ lik kalıpta, Matris/zımba radyüsü R=4 mm için $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 65177,64 N; R=6 mm için $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 65903,58 N ve R=8 mm için $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 69160,5 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.76’da baskı plakası kuvveti 9800 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi en büyük çekme oranı, R=8 mm olduğu durumda $\beta=2,32$ olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 9800 N’da ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ lik kalıpta optimum matris/zımba radyüsünün R=8 mm olduğu görülmüştür.



Şekil 5.76. BPK=9800 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

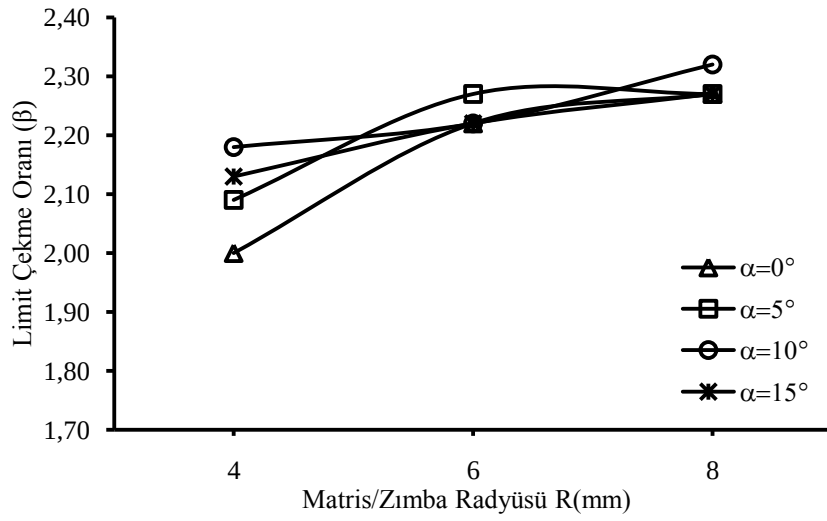
$\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta, matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,13$ ve en büyük zımba kuvveti 61646,04 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 67571,28 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,27$ ve en büyük zımba kuvveti 68238,36 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.77'de baskı plakası kuvveti 9800 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen optimum deney numuneleri verilmiştir.



Şekil 5.77. BPK=9800 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen numuneler

Şekilde $\alpha=15^\circ$ olduğu durumda en fazla kulaklanma R=4 mm'de meydana gelmiştir. Kalıp radyüsünün artmasıyla kulaklanmanın azaldığı görülmüştür. Kalıp açısı ve BPK'nin en büyük ($\alpha=15^\circ$ ve BPK=9800 N) değerlerinde olmasından dolayı kaplarda oluşacak ondülasyonlar engellenmiştir.

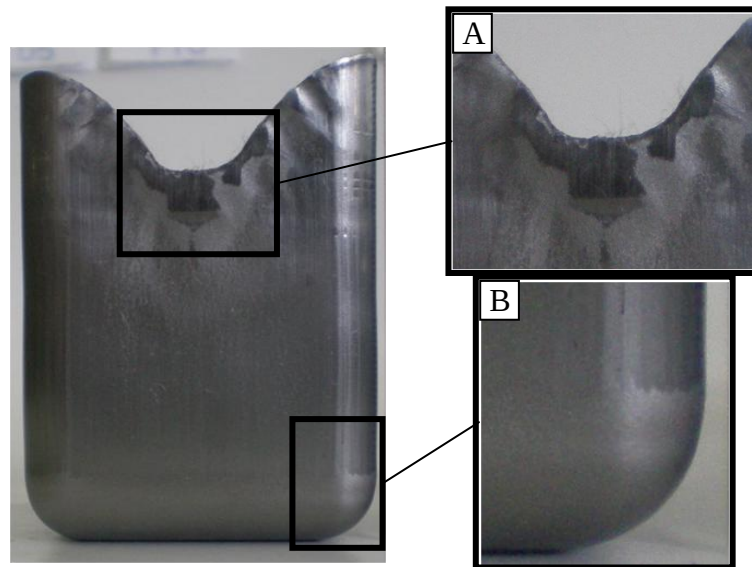
Şekil 5.78'de BPK'nin en büyük 9800 N olduğu durumda, matris/zımba radyüsünün β üzerindeki etkisi verilmiştir. Şekilde artan radyüs miktarına bağlı olarak β 'nın arttığı, $\alpha=10^\circ$ ve R=8 mm'de limit çekme oranı en büyük $\beta=2,32$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.78. Baskı plakası kuvveti (BPK) 9800 N için Matris/Zımba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.

Kare kaplarda, kabın köşeleri boyunca kulaklanmaların oluşması malzeme akışının kalıp boşluğuna doğru köşeden veya köşeye yakın bölgelerden radyal olarak kaymasıdır. Bu yüzden en kritik bölge, yani en fazla incelme veya çatlamların olduğu bölge kabın yan kenarlarının düşey köşe kenarları bölgesidir. Bu köşe kenarlar boyunca hem teğetsel hem de çekme kuvvetleri ve buna bağlı olarak çekme gerilmeleri etkili olmaktadır.

Kabın kenar orta kısımlarında ise buruşmalar ve köşelerinde de oluşan çekme gerilmelerinden dolayı (plastik deformasyondan dolayı) daha fazla ondülasyonlar meydana gelmektedir (Şekil 5.79) [70, 71].



Şekil 5.79. Çekilen kaptaki oluşan ondülasyon (A) ve incelme (B) bölgeleri

5.4. Derin Çekme Parametrelerinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Derin çekme yönteminde, dikkat edilmesi gereken hususlardan biri de et kalınlıklarındaki değişimlerdir. Çekme işleminin başarısı, et kalınlıklarının kontrolünün sağlanmasına bağlıdır. Et kalınlığının kontrolü, dayanım açısından ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Derin çekme işlemleri sırasında iş parçası üzerinde meydana gelen çeşitli gerilmelerin etkisi ile iş parçasının et kalınlığı değişmektedir. Kalıp açısı, baskı plakası kuvveti ve matris/zımba radyüsü gibi parametrelerin et kalınlığı üzerinde önemli bir etkisi vardır. İş parçasının taban kısmında et kalınlığı değişmez. Zımba radyüsü ve bu bölgeye yakın kısımlarda incelme, iş parçası duvarının üst kısmında ise kalınlaşma meydana gelmektedir.

Deneyisel çalışmalardan elde edilen numuneler, et kalınlıklarının incelenmesi amacıyla CNC dik işlem merkezli tezgahında hassas olarak kesilmiştir. Kesilen kabın duvar yüzeyi 5x5mm aralıklarla ızgaralara bölünmüş ve kesişim noktaları tespit edilmiştir. Kesilmiş ve ölçüm noktalarının gösterildiği numune Şekil 5.80’de, QLR digit marka 10^{-4} mm hassasiyetindeki dijital mikrometre ile belirlenen noktaların et kalınlıklarının ölçülmesi ise Şekil 5.81’de verilmiştir. Et kalınlıklarının belirlenmesi için en büyük β değerindeki her bir parametreden üç ayrı kabın tespit edilen noktalarından ölçümler alınarak bu ölçümlerin aritmetik ortalamaları ($t = \frac{t_1+t_2+t_3}{3}$) kalınlık değerleri olarak kullanılmıştır.



Şekil 5.80. Et kalınlığı ölçümü için hazırlanan numune



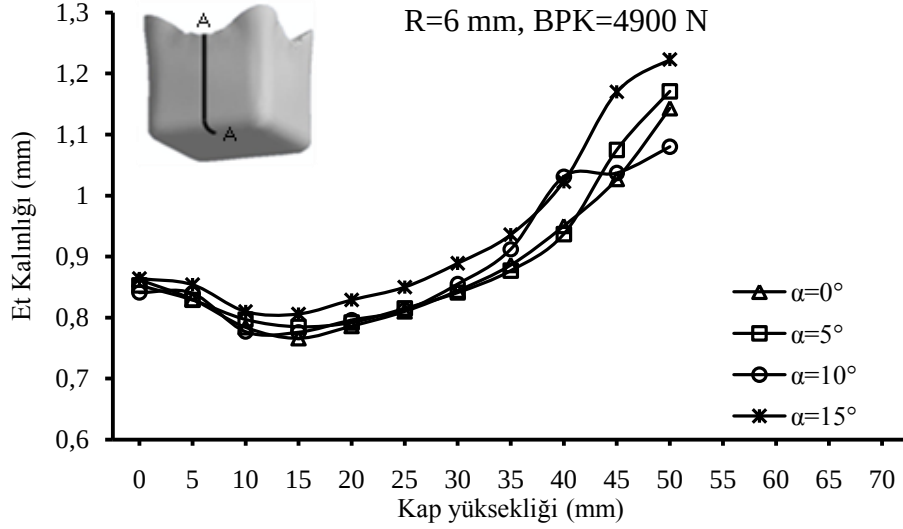
Şekil 5.81. Et kalınlıklarının ölçülmesi

5.4.1. Matris/Baskı Plakası Açısının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

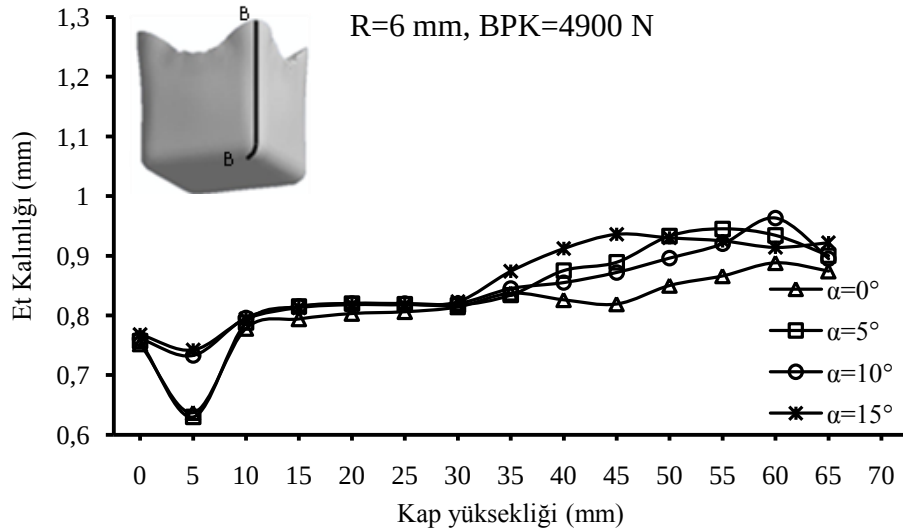
Derin çekme yöntemi ile imal edilen parça yüzeylerinin et kalınlıklarının homojen olması önemlidir. Genellikle homojenliği sağlamak amacıyla derin çekme işlemi tekrarlanmak suretiyle parça kalınlığı kademeli olarak azaltılmaktadır. Bu da, imalat maliyetini önemli derecede arttırmaktadır. Bu nedenle, açılı kalıplar kullanılarak hem kademe sayısı azaltılmakta, hem de et kalınlığı değişiminin belirli bir oranda tutulması sağlanabilmektedir.

Şekil 5.82 ve 5.83’de sabit R , β ve BPK ($R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve BPK=4900N) değerlerinde α ’nın kap orta yüzeyi (A – A doğrultusu) ve kritik kenar uzunluğu (B – B doğrultusu) boyunca et kalınlıkları üzerindeki etkisi sırasıyla verilmiştir. Şekil 5.53’de görüldüğü gibi, kap yüksekliğinin 0 – 15 mm olduğu aralıkta et kalınlığının azaldığı ve yaklaşık olarak 0,75 – 0,85 mm aralığında olduğu, çekilen sac kalınlığının ortalama % 11 oranında incelendiği belirlenmiştir. 15 mm mesafeden sonra üst bölgelere doğru kap kalınlığı kademeli olarak artmakta ve kap yüksekliğinin 35 – 40 mm olduğu noktalardan itibaren kalınlık değerlerinin sac kalınlığından daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kalınlıktaki bu artış oranı yaklaşık olarak % 25’dir. α ’nın bütün değerleri için et kalınlığının kap yüksekliği boyunca değişimi benzer eğilim göstermektedir. Ancak, α ’nın artmasıyla incelme azalmakta ve kalınlaşma da artmaktadır. Bu durum, kalıp içerisine itilen malzemenin daha kolay akmasına ve bu kolay akmadan dolayı gerekli çekme kuvvetinin

azalmasına atfedilmiştir. Zımba kuvvetinin azalması, malzeme üzerinde meydana gelen çekme gerilmelerinin azalmasına yol açmakta ve dolayısıyla et kalınlıklarını arttırmaktadır.



Şekil 5.82. A – A doğrultusu boyunca α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi



Şekil 5.83. B – B doğrultusu boyunca α 'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi

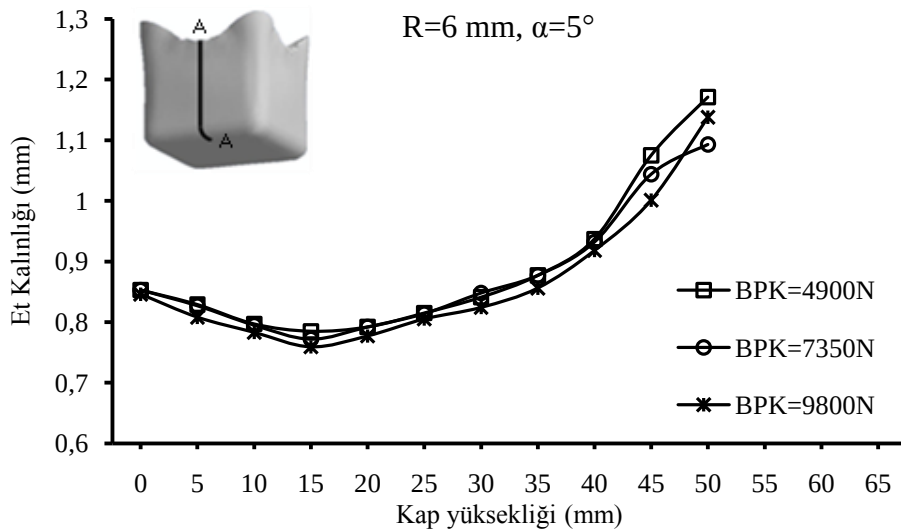
Şekil 5.83 incelendiğinde, B – B doğrultusunda olan et kalınlıklarındaki değişim A – A doğrultusunda olandan farklı olarak, kritik kenar uzunluğu boyunca yaklaşık 45 – 50 mm'ye kadar azalmakta, 50 mm'den sonra ise artmaktadır. Kritik kenar boyunca meydana gelen incelmelerin orta yüzeyde meydana gelen incelmelere göre daha fazla olduğu, kaplarda ölçülen en küçük kalınlık değerinin sırasıyla $\alpha=0^\circ$ 'de 0,637 mm, $\alpha=5^\circ$ için 0,630

mm, $\alpha=10^\circ$ için 0,733 mm ve $\alpha=15^\circ$ 'de ise 0,742 mm olduğu ve bu değerin giderek arttığı tespit edilmiştir.

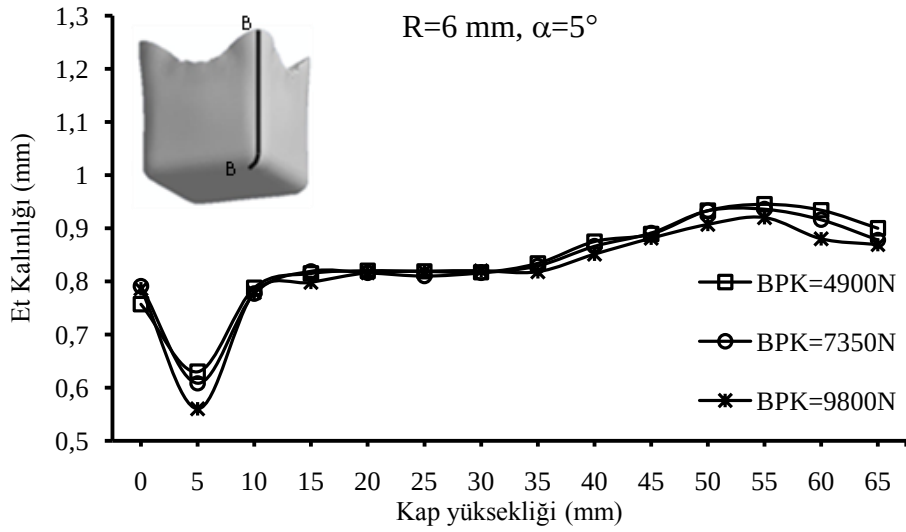
Çekme işlemi sırasında dairesel taslak malzemede oluşan ondülasyonlar çekme kuvvetini artırmakta ve bunun sonucunda zımba radyüsünün olduğu bölgelerde en fazla incelmelerin olduğu görülmüştür. Dolayısıyla kalıp açısının et kalınlığı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

5.4.2. Baskı Plakası Kuvvetinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Şekil 5.84 ve 5.85'de sabit R, β ve α ($R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve $\alpha=5^\circ$) değerlerinde BPK'nın et kalınlığı üzerindeki etkisinin değişimi görülmektedir. En küçük et kalınlıkları sırasıyla, 4900 N; 7350 N ve 9800 N BPK için 0,630 mm, 0,608 mm ve 0,560 mm olarak ölçülmüştür. Baskı plakası kuvvetinin artmasıyla, malzeme – kalıp arasındaki radyal gerilmeler artmakta, artan radyal gerilmeler sürtünme kuvvetlerini de artırmaktadır. Sürtünme kuvvetinin artması, malzemede daha yüksek çekme gerilmelerinin oluşmasına yol açmakta ve bu nedenle daha fazla incelme meydana gelmektedir. Baskı plakası kuvvetinin artmasının et kalınlığı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür.



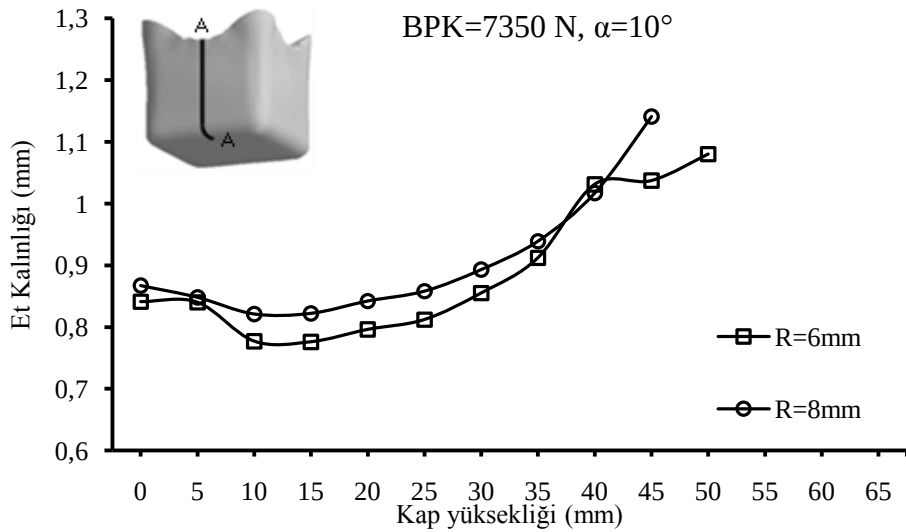
Şekil 5.84. A – A doğrultusu boyunca BPK'nın et kalınlığı üzerindeki etkisi



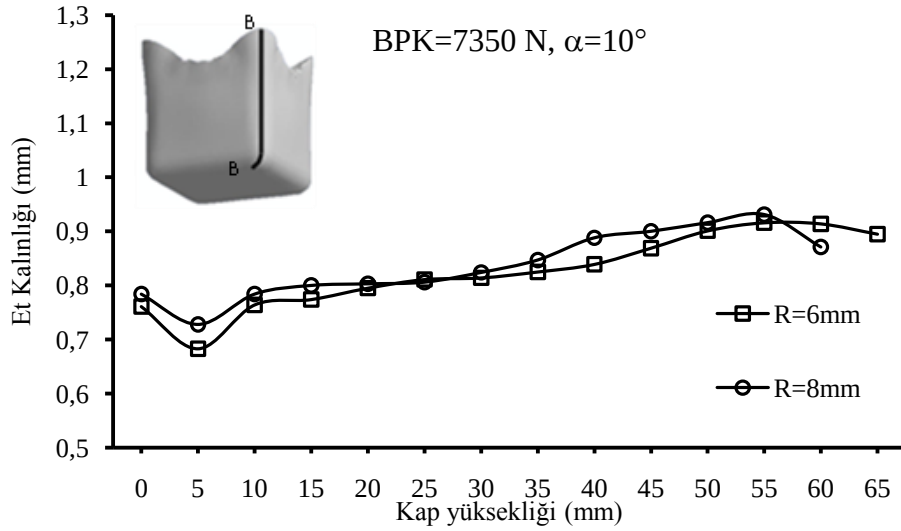
Şekil 5.85. B – B doğrultusu boyunca BPK'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi

5.4.3. Matris/Zimba Radyüsünün Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Şekil 5.86 ve 5.87'de sabit BPK, β ve α (BPK=7350N, $\beta=2,27$ ve $\alpha=10^\circ$) değerlerinde R'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi görülmektedir. En büyük incelmeyen olduğu bölgede et kalınlığı R=6mm de 0,683 mm ve R=8mm de 0,728 mm olarak ölçülmüştür. R'nin artmasıyla birlikte et kalınlığı da artmaktadır. Bu artış, malzemenin kalıp içerisine akışı esnasında matris radyüsü bölgesinde malzemede oluşan çekme ve basma gerilmelerinin azalmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.86. A – A doğrultusu boyunca R'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi



Şekil 5.87. B – B doğrultusu boyunca R'nin et kalınlığı üzerindeki etkisi

5.5. İlkel Parça Çapının Kap Hasarları Üzerindeki Etkisi

Şekil 5.88’de, farklı ilkel parça çaplarında çekilen numunelerde meydana gelen değişik yırtılma ve çatlak hasarları görülmektedir. Çekilen kapların üst kısımlarında buruşma ve kulaklanma, taban kısımlarında ise tabana paralel ve derinlemesine yırtılma ve çatlak şeklinde hasarların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bilindiği gibi, ilkel parça çapı büyüdükçe sacı plastik deformasyona uğratmak için gerekli zımba kuvveti artmaktadır. Zımba 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. Baskı plakası kuvvetinin (BPK) fazla olduğu durumlarda, yırtılmalar genellikle kap tabanının kenar ve köşe kısımlarında oluşmaktadır. BPK’nın düşük olduğu durumlarda ise ondülasyonların artmasından dolayı kabın üst kısımlarında aşırı buruşmalar meydana gelmekte ve buda üst kısımlarda yırtılmaların oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 5.88. Değişik yırtılma ve çatlak hasarlarının olduğu numuneler

5.6. Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi

Anova, test edilen parça gruplarının ortalama performansları arasındaki farklılığı ortaya koymak için kullanılan istatistiğe dayalı bir karar aracıdır. Varyans analizi, toplam varyasyonu bileşenlerine ayıran matematiksel bir tekniktir 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 önem derecesi doğru sonuçlar vermeyebilir. Bununla birlikte standart F testinin varsayımlarından sapmalara karşı duyarsız olması nedeniyle bazı varsayımları sağlamasa da kullanılabileceği belirtilmektedir [25].

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 [72]. Tez çalışmasında bu hesaplamaların tamamı Minitab R15 paket programı vasıtasıyla yapılmıştır.

İstatistiksel çalışmada matris/baskı plakası açısı, baskı plakası kuvveti ve matris/zimba radyüsü parametreleri incelenmiştir. Bu parametreler derin çekme işleminde etkili olan ve operatör tarafından değiştirilebilen parametrelerdir. Dolayısıyla 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. Örneğin limit çekme oranının incelendiği bir çalışmada, LÇÖ'nün en yüksek olması istenir veya zimba kuvvetinin en düşük olmasının istendiği çalışmada en küçük en iyidir seçimi tercih edilir. S/N oranlarının belirlenmesinde her bir durum için aşağıdaki farklı formüllerden yararlanılır;

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 [73].

Tablo 5.1'de ortalama S/N oranlarının belirlenmesinde kullanılan derin çekme parametreleri ile bunların faktör seviyeleri verilmiştir. Burada matris/ baskı plakası açısı ve baskı plakası kuvvetinin dört seviyesi, matris/zımba radyüsünün ise üç seviyesi belirlenmiştir.

Tablo 5.1. Derin çekme parametre ve seviyeleri

Sembol	Çekme Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	Kalıp/Baskı plakası açısı α (°)	0	5	10	15
B	Baskı plakası kuvveti (N)	2450	4900	7350	9800
C	Matris/zımba radyüsü (mm)	4	6	8	-

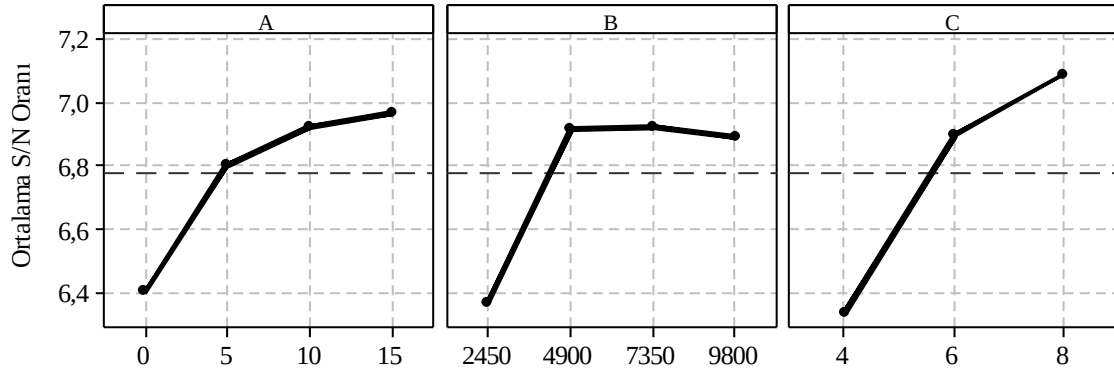
Tablo 5.2'de limit çekme oranına etki eden derin çekme parametrelerinin ortalama S/N oranları gösterilmektedir. Burada matris/baskı plakası açısı faktörünün dördüncü, baskı plakası kuvvetinin ve matris/zımba radyüsünün üçüncü seviyelerinin en yüksek değere sahip oldukları görülmektedir. Dolayısıyla limit çekme oranına etki eden faktörlerin optimum değerleri sırasıyla matris/baskı plakası için 15°, baskı plakası kuvveti için 7350 N ve matris/zımba radyüsü için 8 mm olduğu söylenebilir.

Tablo 5.2. Limit çekme oranı için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları

Sembol	Çekme Parametreleri	Ortalama S/N oranı (db)			
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	Matris/Baskı plakası açısı	6,404	6,804	6,922	6,969 ^a
B	Baskı plakası kuvveti	6,368	6,915	6,922 ^a	6,893
C	Matris/zimba radyüsü	6,338	6,897	7,089 ^a	-

a: optimum seviye

Tablo 5.2'ye bağlı olarak oluşturulan Şekil 5.89'daki grafikler incelendiğinde bu durum daha net olarak görülebilmektedir. Matris/baskı plakası açısı grafiği dikkate alındığında artan açı değerlerine bağlı olarak artış gösterdiği ve 15° değerinde en büyük olduğu görülmüştür. Baskı plakası kuvvetinin grafiğinde, özellikle 2450 N'dan 4900 N'a gelirken eğrinin eğiminin oldukça dik olduğu, kuvvet artışının devam etmesiyle eğrinin ortalama eksen çizgisine paralel bir şekilde seyrettiği ve 7350 N'da en büyük olduğu görülmektedir. Matris/zimba radyüsünün ise açıda olduğu gibi, ortalama eksen çizgisini dik bir şekilde kestikten sonra yükselişini sürdürerek 8 mm değerinde en büyük olmuştur.



Şekil 5.89. Limit çekme oranı için S/N grafikleri

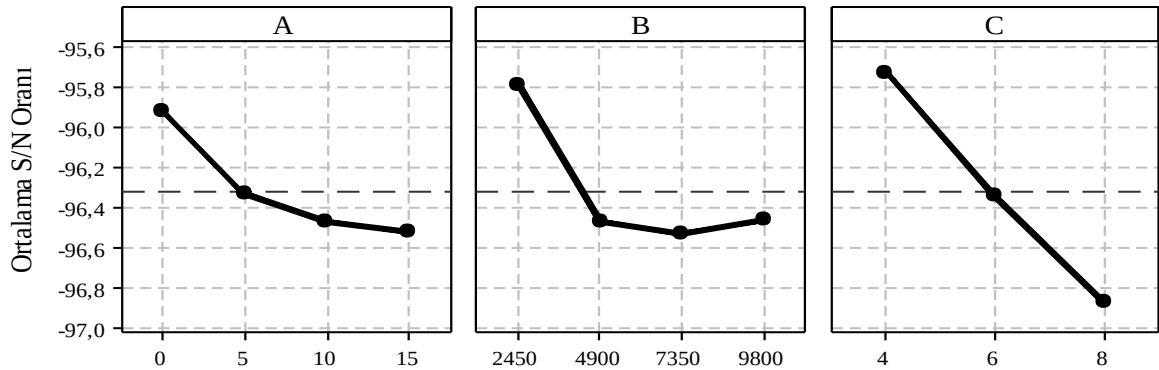
Tablo 5.3'de derin çekme faktörlerine bağlı olarak elde edilen en büyük zimba kuvveti için ortalama S/N oranları verilmektedir. Tablo değerleri incelendiğinde Tablo 5.2'ye benzer şekilde, matris/baskı plakası açısının dördüncü, baskı plakası kuvveti ve matris/zimba radyüsünün üçüncü seviyelerinin optimum oldukları görülebilmektedir. Böylece optimum derin çekme faktör seviyeleri olarak açı için 15°, baskı plakası için 7350 N ve radyüs için 8 mm değerleri tercih edilmelidir.

Tablo 5.3. Zimba kuvveti için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları

Sembol	Çekme Parametreleri	Ortalama S/N oranı (db)			
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	Matris/Baskı plakası açısı	-96,54	-96,34	-96,48	-96,55 ^a
B	Baskı plakası kuvveti	-96,38	-96,48	-96,54 ^a	-96,47
C	Matris/zimba radyüsü	-95,94	-96,56	-96,88 ^a	-

a: optimum seviye

Şekil 5.90 dikkate alındığında derin çekme faktör seviyelerine bağlı olarak oluşturulan ortalama S/N oranları eğrileri görülmektedir. Şekilde açının artmasıyla birlikte özellikle 0°’den 5°’ye gelirken dik bir eğimin olduğu ve artan açı miktarına bağlı olarak 15°’de en büyük olduğu gözlenmektedir. Baskı plakası da 2450 N’den 4900 N’a gelirken dik bir şekilde kesmiş ve artan kuvvetle birlikte ortalama eksen çizgisine paralellik göstererek 7350 N’da en büyük değere ulaşmıştır. Matris/zimba radyüsü Şekil 5.89’a benzer bir eğilim göstermiş ve eksenini dik bir açıyla keserek yükselişine devam ederek 8 mm’de en büyük değerine ulaşmıştır.



Şekil 5.90. Zimba kuvveti için S/N grafikleri

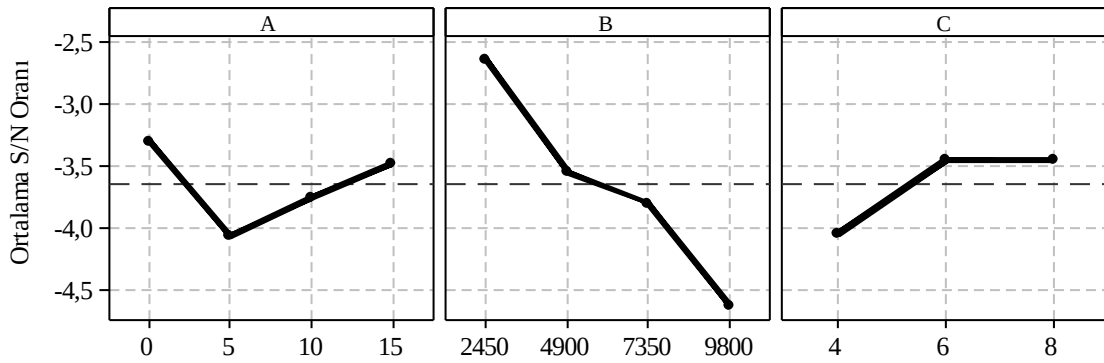
Tablo 5.4’de derin çekme faktörlerinin et kalınlığı üzerindeki optimum seviyeleri verilmiştir. Burada optimum seviyeler olarak matris/baskı plakası açısının dördüncü, baskı plakası kuvvetinin birinci ve matris/zimba radyüsünün üçüncü seviyesinin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla optimum işlem performansı için optimum faktör değerleri sırasıyla 15° baskı plakası açısı, 2450 N baskı plakası kuvveti ve 8 mm zimba radyüsüdür.

Tablo 5.4. Et kalınlığı için her bir seviyedeki ortalama S/N oranları

Sembol	Çekme Parametreleri	Ortalama S/N oranı (db)			
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	Matris/Baskı plakası açısı	-3,525	-4,059	-3,757	-3,482 ^a
B	Baskı plakası kuvveti	-2,736 ^a	-3,542	-3,796	-4,616
C	Matris/zımba radyüsü	-4,158	-3,543	-3,456 ^a	-

a: optimum seviye

Şekil 5.91 incelendiğinde açının belirli bir eğiliminin olmamasına rağmen 15° en büyük olduğu görülmektedir. Baskı plakası kuvvetinin artışıyla beraber S/N oranlarının giderek düştüğü ve dolayısıyla 2450 N başlangıç kuvvetinde en büyük olmuştur. Radyüs eğrisinde ise yukarıdaki S/N grafikleri ile karşılaştırıldığında ortalama eksen çizgisini daha düşük bir açıyla kesmiş, artan radyüs değerleri ile birlikte yatay bir seyir izleyerek 8 mm’de en büyük olmuştur.



Şekil 5.91. 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 5.5 – 5.7 derin çekme işlemine ait ANOVA tablosu sonuçlarını göstermektedir. Tablolardaki son sütun N; 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. Tablo 5.5'e dikkat edildiğinde, matris/zımba radyüsünün % 38,52'lik oranla derin çekmede limit çekme oranına en fazla etki eden faktördür. Bunun yanı sıra % 20,46'lık oranla baskı plakası kuvveti ve % 17,25'lik oranla da matris/baskı plakası açısının etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 5.5. Limit çekme oranı için ANOVA sonuçları

Çekme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F değeri	% Dağılım
Matris/Baskı plakası açısı	3	0,1314	0,0438	3,06	17,25
Baskı plakası kuvveti	3	0,1558	0,051933	3,77	20,46
Matris/Zimba radyüsü	2	0,2933	0,14665	14,09	38,52
Hata	47	0,7614	0,0162	-	23,77
Toplam	55	1,3419	-	-	100

Tablo 5.6’da derin çekme parametrelerinin zimba kuvveti üzerine olan etkilerine ait ANOVA sonuçları görülmektedir. Buradaki % dağılım sütunu göz önüne alındığında matris/zimba radyüsünün yukarıdakine benzer şekilde % 38,52’lik oranla derin çekmede zimba kuvvetine en fazla etki eden faktör olduğu görülmektedir. Diğer faktörlerden etkinlik derecesi bakımından baskı plakası kuvveti % 9,67’lik oranla ikinci ve matris/baskı plakası açısı ise % 6,1’lik oranla üçüncü sırada yer almaktadır.

Tablo 5.6. Zimba kuvveti için ANOVA sonuçları

Çekme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F değeri	% Dağılım
Matris/Baskı plakası açısı	3	107899426	35966475,3	0,95	6,1
Baskı plakası kuvveti	3	171104794	57034931,3	1,57	9,67
Matris/Zimba radyüsü	2	567629581	283814791	14,09	38,52
Hata	47	1769001717	37638334,4	-	45,71
Toplam	55	2615635518	-	-	100

Derin çekme parametrelerinin et kalınlığı üzerindeki etkisini ifade eden Tablo 5.7’de % dağılım sütununda diğer iki ANOVA tablosundan farklı olarak % 41,16’lık oranla baskı plakası kuvveti faktörünün en yüksek etkiye sahip olduğu görülmektedir. Diğer iki parametreden matris /zimba radyüsü % 6,84 ve matris / baskı plakası açısı % 5,78 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.7. Et kalınlığı için ANOVA sonuçları

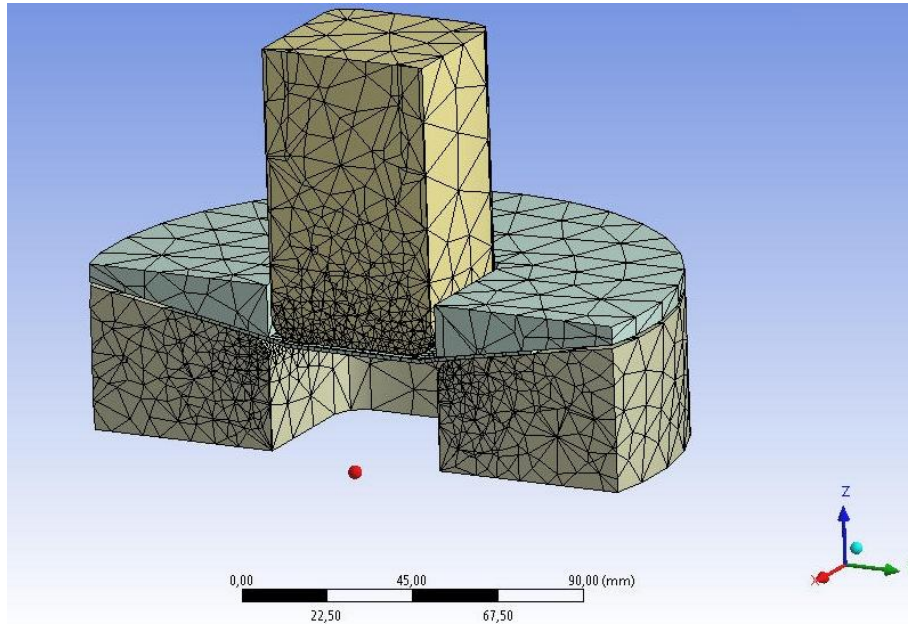
Çekme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F değeri	% Dağılım
Matris/Baskı plakası açısı	3	0,01938	0,00646	0,9	5,78
Baskı plakası kuvveti	3	0,138	0,046	10,26	41,16
Matris/Zimba radyüsü	2	0,02294	0,01147	1,65	6,84
Hata	47	0,33526	0,00713319	-	46,22
Toplam	55	0,51558	-	-	100

6. SONLU ELEMANLAR METODU İLE SAYISAL ANALİZ

Bu bölümde, sonlu elemanlar metodu ile kare kap derin çekme işleminin modellenmesi 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.

Deneylerde kullanılan kalıba ait bütün geometrik özellikler (kalıp boyutları, matris/zımba radyüsleri, matris/baskı plakası açıları) ve yüklemeler (zımba hızı ve baskı plakası kuvveti) dikkate alınarak her bir parametre için ayrı çözümler oluşturulmuştur.

Matris/zımba radyüslerinin farklı değerleri ve matris/baskı plakası açıları için ANSYS programından elde edilen çözümlerin sonlu eleman ağ sistemi Şekil 6.1’de gösterilmiştir.

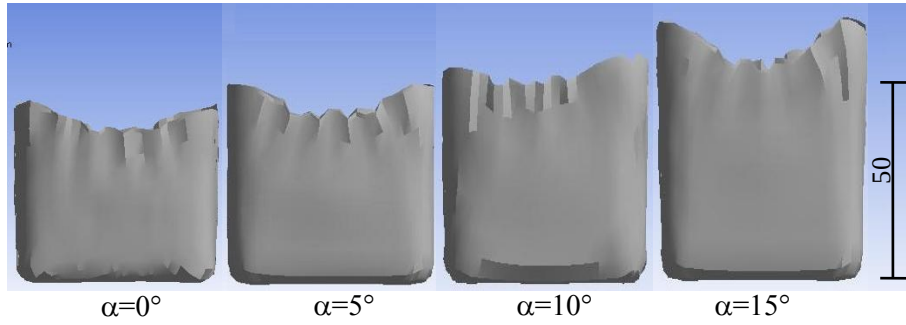


Şekil 6.1. Kalıp modelinin sonlu elemanlar ağ sistemi

6.1. Matris/Baskı Plakası Açısının Çekme Oranı Üzerindeki Etkisi

Matris/zımba radyüslerinin farklı değerleri ($R=4$ mm, $R=6$ mm ve $R=8$ mm) için baskı plakası kuvveti (BPK) ve matris/baskı plakası açısının (α) değişmesi ile analiz edilen limit çekme oranları (β) değerlendirilmiştir.

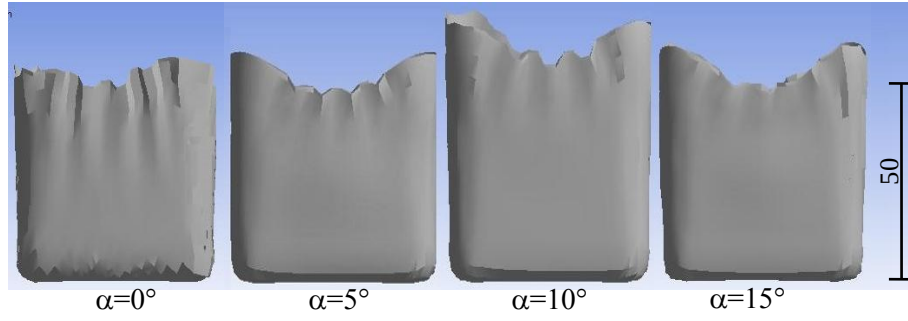
Matris/zımba radyüsü $R=4$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N olarak uygulandığında; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=1,82$ ve en büyük zımba kuvveti 53903,59 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=1,96$ ve en büyük zımba kuvveti 60548,88 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,09$ ve en büyük zımba kuvveti 63240,67 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,16$ ve en büyük zımba kuvveti 65857,81 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.2’de matris/zımba radyüsü $R=4$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.2. $R=4$ mm için, $BPK=2450$ N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

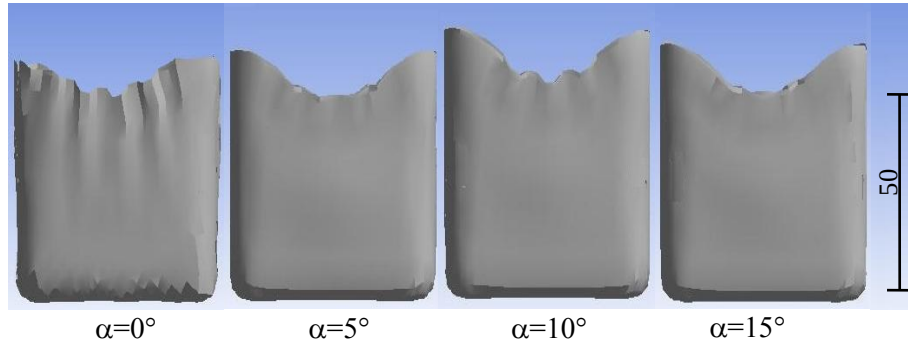
Şekil 6.2’den görüldüğü gibi kalıp açısının artmasıyla beraber limit çekme oranının da arttığı belirlenmiştir. Uygulanan baskı plakası kuvvetinin yeterli olmamasından dolayı kapların üst kısımlarında belirgin şekilde ondülasyonlar meydana gelmiştir.

Baskı plakası kuvveti 4900 N olarak uygulandığında; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=1,93$ ve en büyük zımba kuvveti 64143,99 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,11$ ve en büyük zımba kuvveti 65370,42 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 67604,15 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 64919,55 N olarak elde edilmiştir. Matris/zımba radyüsü $R=4$ mm ve baskı plakası kuvveti 4900 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.3’de verilmiştir.



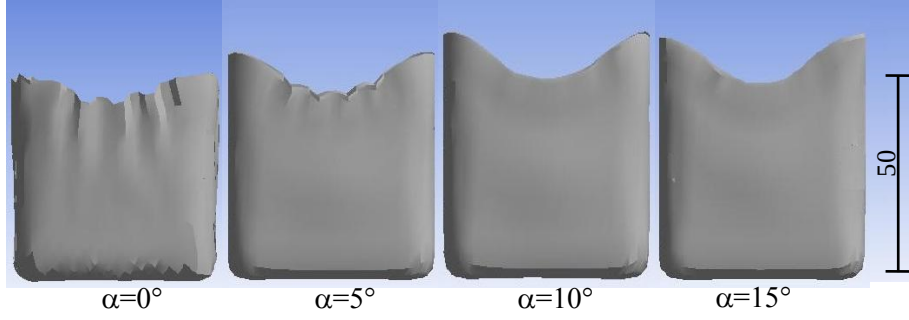
Şekil 6.3. R=4 mm için, BPK=4900 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Baskı plakası kuvveti 7350 N olarak uygulandığında; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,00$ ve en büyük zımba kuvveti 65895,44 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,15$ ve en büyük zımba kuvveti 65915,03 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 67051,99 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,20$ ve en büyük zımba kuvveti 66125,43 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.4’de R=4 mm ve baskı plakası kuvveti 7350 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



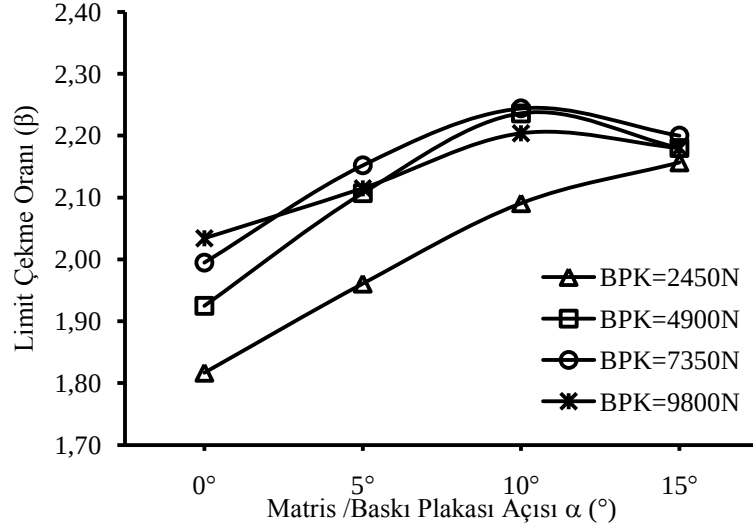
Şekil 6.4. R=4 mm için, BPK=7350 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

BPK=9800 N’da; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,03$ ve en büyük zımba kuvveti 66959,97 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,12$ ve en büyük zımba kuvveti 63803,98 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,20$ ve en büyük zımba kuvveti 66664,82 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 65151,87 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 9800 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.5’de verilmiştir.



Şekil 6.5. R=4 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

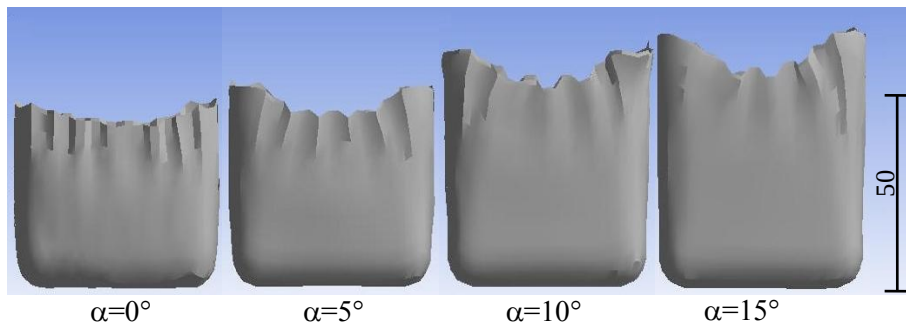
Matris/zımba radyüsü R=4 mm için baskı plakası kuvveti ve α değerlerine bağlı olarak β 'nın değişimi Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. Matris/Zımba radyüsü R=4 mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi

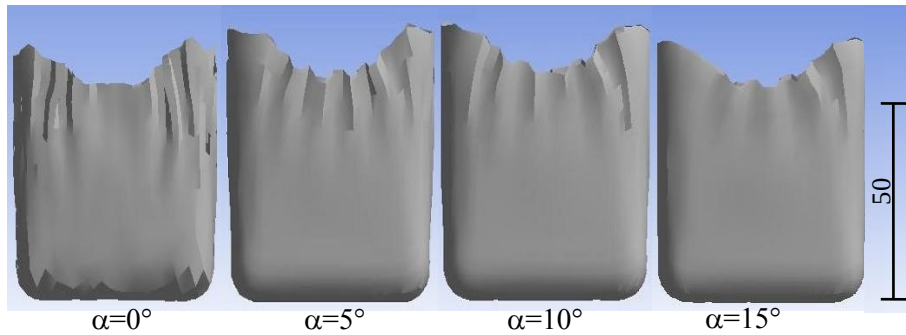
Şekil 6.6'da görüldüğü gibi, α 'nın artması ile β değerlerinin de artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Artan açı değerlerinde radyal gerilmelerin düşmesi ile malzemenin kalıp boşluğu içerisine kolay akışını sağlamaktadır. Azalan BPK ondülasyonların artmasına ve β değerinin azalmasına neden olmaktadır. Analiz programından elde edilen limit çekme oranı, en büyük zımba kuvveti, oluşan ondülasyonlar ve kulaklanmaların deneysel çalışma sonuçları ile büyük oranda benzerlik gösterdiği ve analiz programından elde edilen sonuçların matris/zımba radyüsü R=4 mm için teorik olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Matris/zımba radyüsü $R=6$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N uygulandığında; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=1,93$ ve en büyük zımba kuvveti 56497,5 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,11$ ve en büyük zımba kuvveti 62983,4 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 67085,43 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 69757,71 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.7’de matris/zımba radyüsü $R=6$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



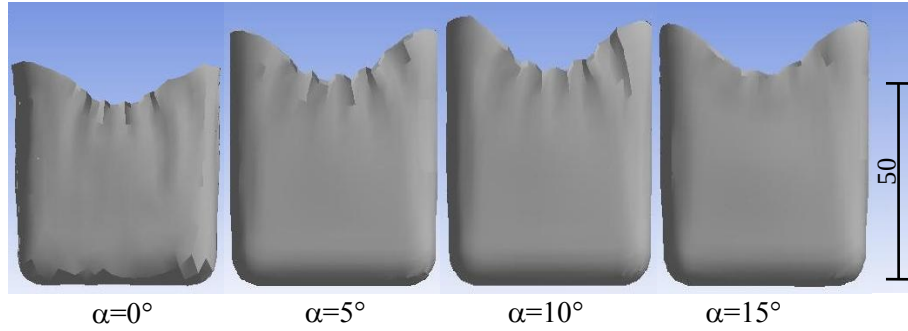
Şekil 6.7. $R=6$ mm için, BPK=2450 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Baskı plakası kuvveti 4900 N olarak uygulandığında; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti 66051,36 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 67605,53 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,29$ ve en büyük zımba kuvveti 67347,99 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 68494,21 N olarak elde edilmiştir. $R=6$ mm ve baskı plakası kuvveti 4900 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.8’de verilmiştir.



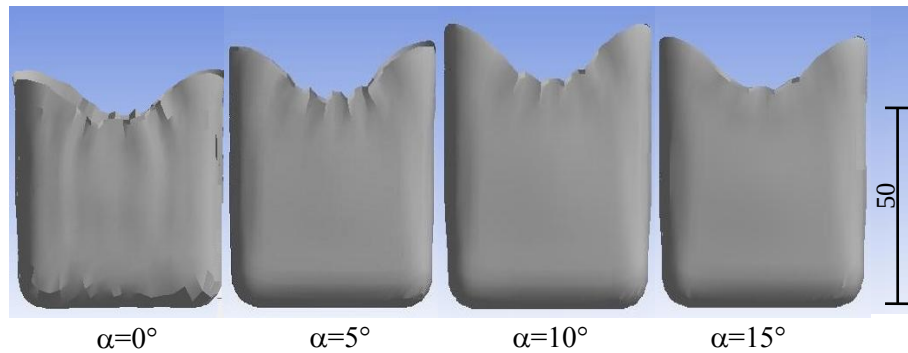
Şekil 6.8. $R=6$ mm için, BPK=4900 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Baskı plakası kuvveti 7350 N’da; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,23$ ve en büyük zımba kuvveti 68402,32 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 68428,66 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,34$ ve en büyük zımba kuvveti 68111,2 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,34$ ve en büyük zımba kuvveti 68593,86 N olarak elde edilmiştir. BPK=7350 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.9’da verilmiştir.



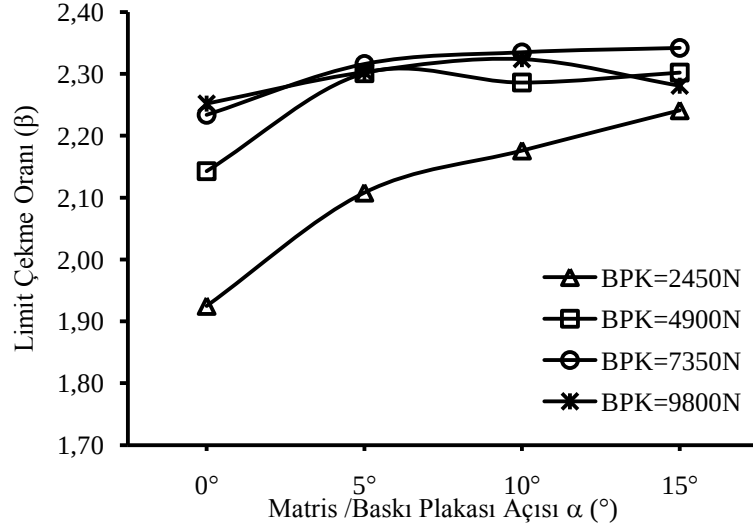
Şekil 6.9. R=6 mm için, BPK=7350 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

BPK=9800 N alındığında; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,25$ ve en büyük zımba kuvveti 67550,68 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 68821,25 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 67811,84 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,28$ ve en büyük zımba kuvveti 68223,94 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.10’da matris/zımba radyüsü R=6 mm ve baskı plakası kuvveti 9800 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.10. R=6 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

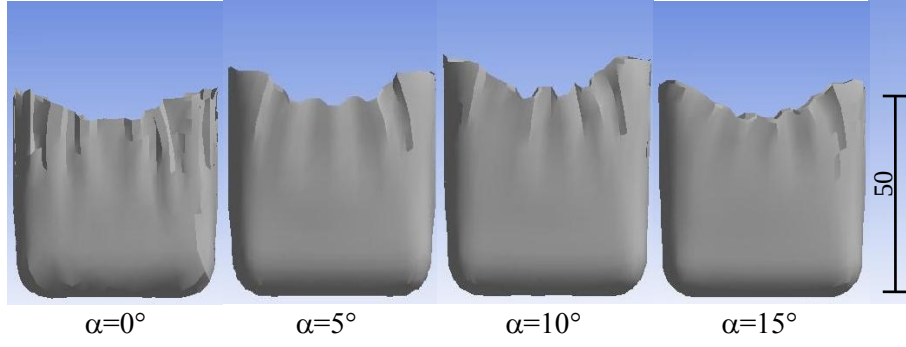
Matris/zımba radyüsü $R=6$ mm için, farklı baskı plakası kuvvetlerinde Matris/Baskı plakası açısının değişimiyle elde edilen optimum limit çekme oranları Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.11. Matris/Zımba radyüsü $R=6$ mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi

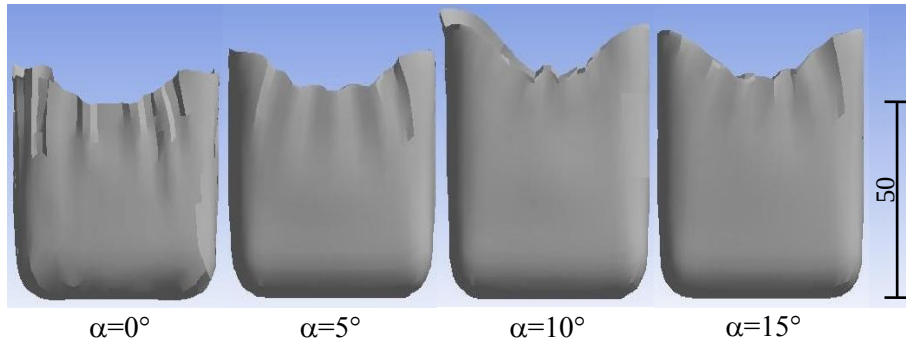
Şekil 6.11’de görüldüğü gibi, α ’nın artması ile β değerlerinin de arttığı görülmektedir. En düşük limit çekme oranı $\alpha=0^\circ$ ’de $\beta=1,93$ ve en büyük limit çekme oranı ise $\alpha=15^\circ$ ’de $\beta=2,34$ olarak elde edilmiştir. Analiz programından elde edilen sonuçların deneysel çalışma sonuçlarıyla benzerlik gösterdiği belirlenmiştir.

Matris/zımba radyüsü $R=8$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N uygulandığında; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,15$ ve en büyük zımba kuvveti 68454,65 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,20$ ve en büyük zımba kuvveti 70936,43 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 68855,72 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 71905,83 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.12’de matris/zımba radyüsü $R=8$ mm ve baskı plakası kuvveti 2450 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



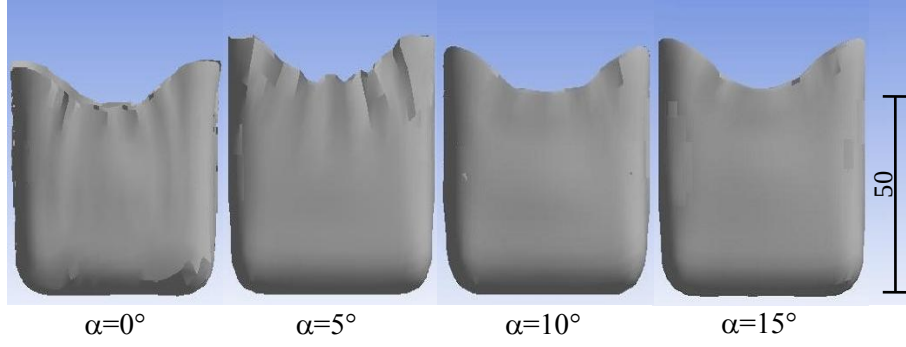
Şekil 6.12. R=8 mm için, BPK=2450 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Baskı plakası kuvveti 4900 N uygulandığında; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 67242,44 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,29$ ve en büyük zımba kuvveti 68557,73 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 70119,24 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 68003,03 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.13’de matris/zımba radyüsü R=8 mm ve baskı plakası kuvveti 4900 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



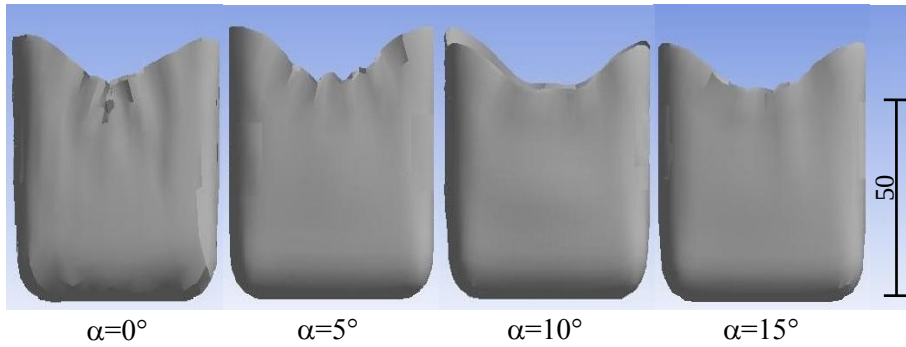
Şekil 6.13. R=8 mm için, BPK=4900 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Baskı plakası kuvveti 7350 N’da; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 68702,12 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,34$ ve en büyük zımba kuvveti 69637,58 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 68471,62 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,31$ ve en büyük zımba kuvveti 67155,52 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.14’de BPK=7350 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.14. R=8 mm için, BPK=7350 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

BPK=9800 N olarak uygulandığında; matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,31$ ve en büyük zımba kuvveti 69129,15 N; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 69426,67 N; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,31$ ve en büyük zımba kuvveti 68335,8 N ve $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta=2,28$ ve en büyük zımba kuvveti 68080,88 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.15’de baskı plakası kuvveti 9800 N için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.

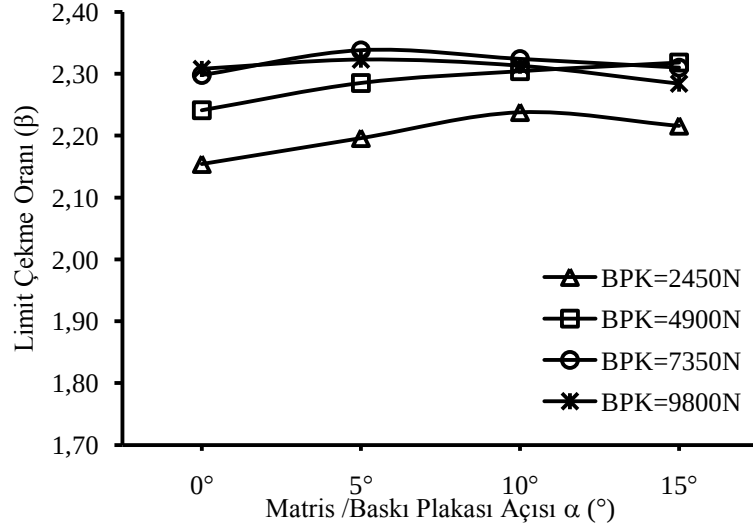


Şekil 6.15. R=8 mm için, BPK=9800 N olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Matris/zımba radyüsü R=8 mm için, farklı baskı plakası kuvvetlerinde matris/baskı plakası açısının değişimiyle elde edilen optimum limit çekme oranları Şekil 6.16’da verilmiştir.

Şekil 6.16’da görüldüğü gibi, α ’nın artması ile β değerlerinin de artma eğiliminde olduğu görülmektedir. En düşük limit çekme oranı $\alpha=0^\circ$ ’de $\beta=1,15$ ve en büyük çekme oranı ise $\alpha=5^\circ$ ’de $\beta=2,34$ olarak elde edilmiştir. Analiz programından elde edilen limit çekme oranı, en büyük zımba kuvveti, oluşan ondülasyonlar ve kulaklanmaların deneysel

Çalışma sonuçları ile tutarlı olduğunu ve analiz programından elde edilen sonuçların matris/baskı plakası yüzeylerine aı verilen kalıplarda kullanılabileceği belirlenmiştir.

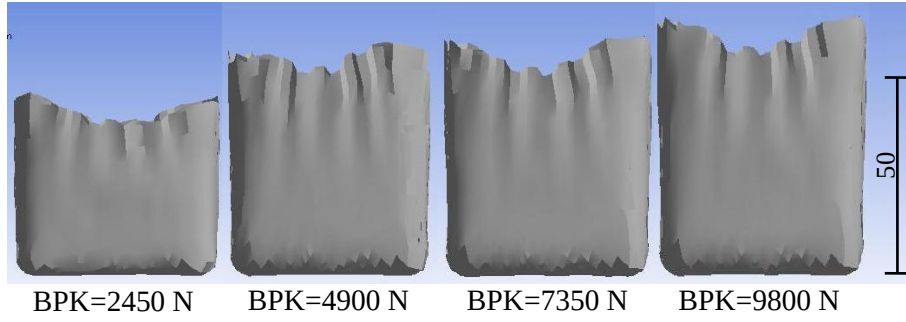


şekil 6.16. Matris/Zımba radyüsü R=8 mm için Matris/Baskı plakası açısının çekme oranı üzerindeki etkisi

6.2. Baskı Plakası Kuvvetinin (BPK) ekme Oranı (β) zerindeki Etkisi

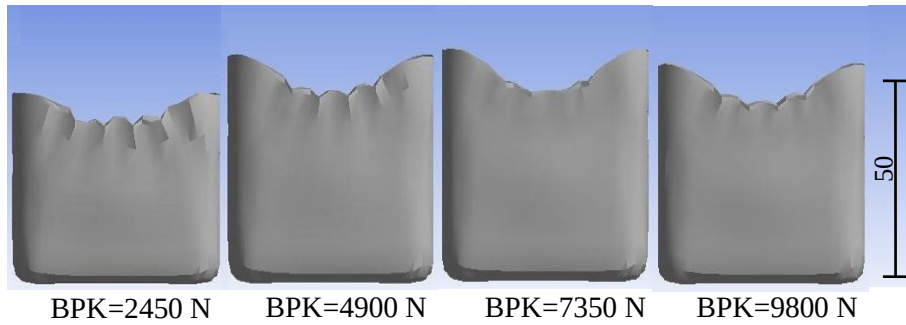
Çekme işlemi sırasında, sac parça üzerine baskı plakası tarafından belirli bir kuvvet uygulanarak, üründe oluşabilecek kırışıklıklar engellenerek ve çekme işleminin düzenli bir şekilde gerçekleşmesi sağlanabilir. Baskı kuvvetinin çekme üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, 4 farklı kuvvet değerlerinde analizler yapılmıştır.

Matris/zımba radyüsü R=4 mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ 'lık kalıpta; baskı plakası kuvveti BPK=2450 N için limit çekme oranı $\beta=1,82$ ve en büyük zımba kuvveti 53903,59 N; BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=1,93$ ve en büyük zımba kuvveti 64143,99 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,00$ ve en büyük zımba kuvveti 65895,44 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,03$ ve en büyük zımba kuvveti 66959,97 N olarak elde edilmiştir. şekil 6.17'de matris/zımba radyüsü R=4 mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



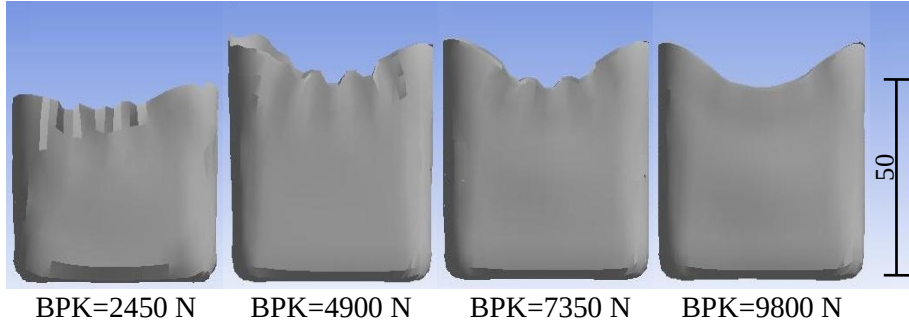
Şekil 6.17. $R=4$ mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta; baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=1,96$ ve en büyük zımba kuvveti $60548,88$ N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=2,11$ ve en büyük zımba kuvveti $65370,42$ N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=2,15$ ve en büyük zımba kuvveti $65915,03$ N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,12$ ve en büyük zımba kuvveti $63803,98$ N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.18'de matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



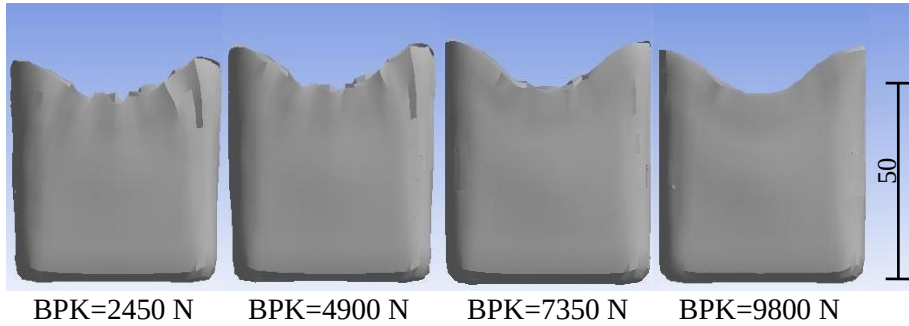
Şekil 6.18. $R=4$ mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

$\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta; baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=2,09$ ve en büyük zımba kuvveti $63240,67$ N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti $67604,15$ N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti $67051,99$ N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,20$ ve en büyük zımba kuvveti $66664,82$ N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.19'da matris/zımba radyüsü $R=4$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



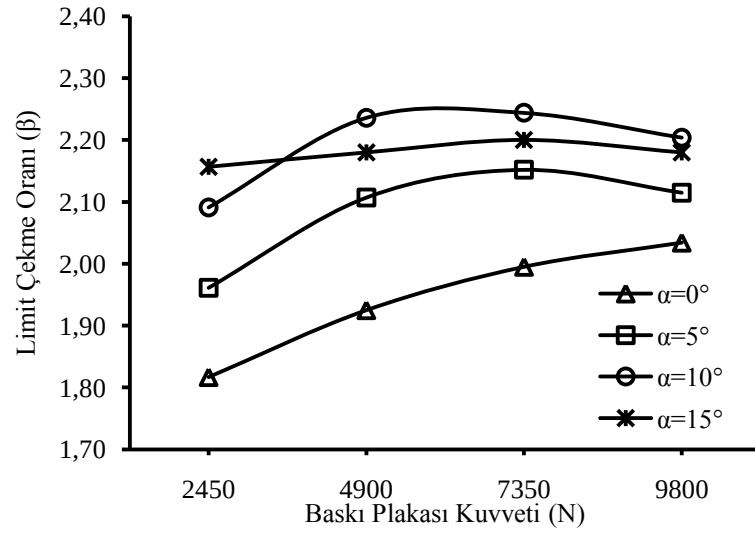
Şekil 6.19. $R=4$ mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

$R=4$ mm ve $\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta; baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=2,16$ ve en büyük zımba kuvveti $65857,81$ N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti $64919,55$ N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=2,20$ ve en büyük zımba kuvveti $66125,43$ N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti $65151,87$ N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.20'de matris/zımba radyüsü $R=4$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



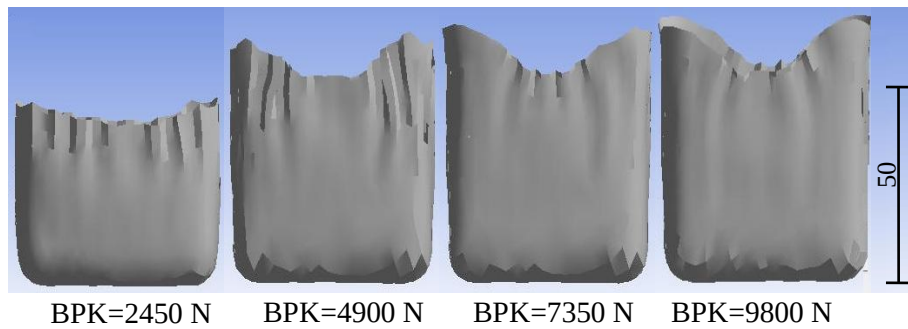
Şekil 6.20. $R=4$ mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Şekil 6.21'de $R=4$ mm olduğu durumlarda farklı kalıp açılarında baskı plakası kuvvetinin β üzerindeki etkisinin değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, $\alpha=0^\circ$ 'de artan BPK'ne bağlı olarak β 'nin arttığı, $\alpha=0^\circ$ ve $BPK=2450$ N'da limit çekme oranı $\beta=1,82$, $\alpha=15^\circ$ de ise $\beta=2,03$ olarak elde edilmiştir. Kalıp açısının $5^\circ - 15^\circ$ olduğu durumda ise 7350 N'luk baskı plakası kuvvetinde β 'nin en büyük değerde olduğu ve BPK'nin artması ile birlikte β değerinde bir miktar düşüş olduğu görülmüştür.



Şekil 6.21. Matris/Zımba radyüsü $R=4$ mm için Baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

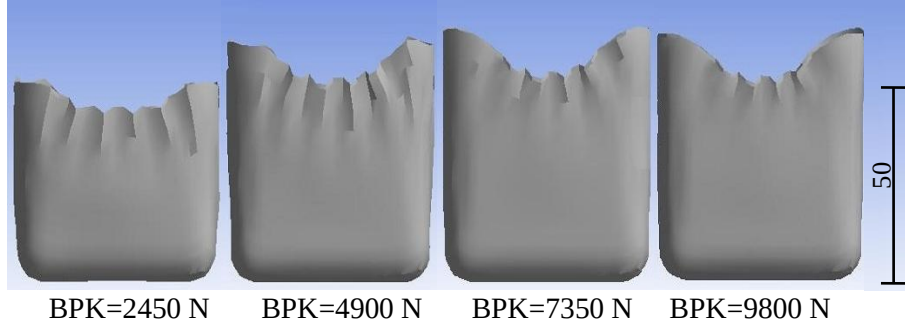
Matris/zımba radyüsü $R=6$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ 'lik kalıpta; baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=1,93$ ve en büyük zımba kuvveti $56497,5$ N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti $66051,36$ N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=2,23$ ve en büyük zımba kuvveti $68402,32$ N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,25$ ve en büyük zımba kuvveti $67550,68$ N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.22'de matris/zımba radyüsü $R=6$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.22. $R=6$ mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

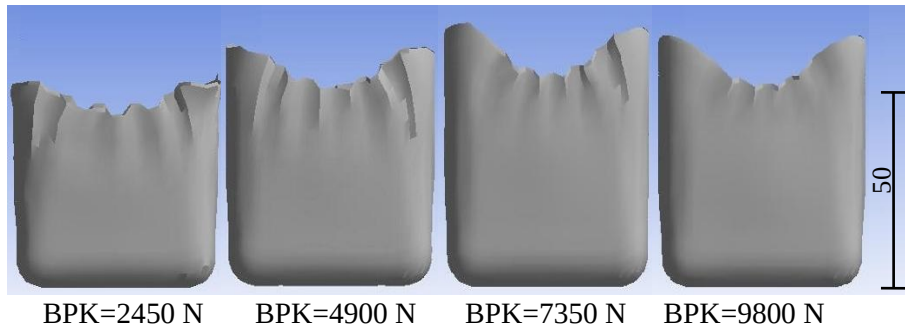
$R=6$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta; baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=2,11$ ve en büyük zımba kuvveti $62983,4$ N;

BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 67605,53 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 68428,66 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 68821,25 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.23’de matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ için BPK’nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



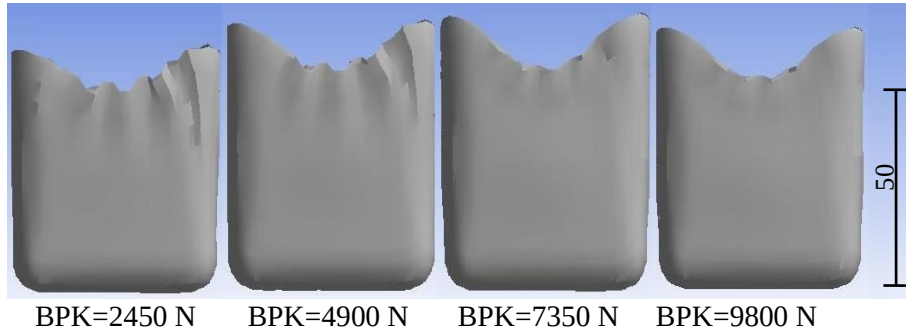
Şekil 6.23. R=6 mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

R=6 mm ve $\alpha=10^\circ$ ’lik kalıpta; baskı plakası kuvveti BPK=2450 N için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 67085,43 N; BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=2,29$ ve en büyük zımba kuvveti 67347,99 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,34$ ve en büyük zımba kuvveti 68111,2 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 67811,84 N olarak elde edilmiştir. Matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için BPK’nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.24’de verilmiştir.



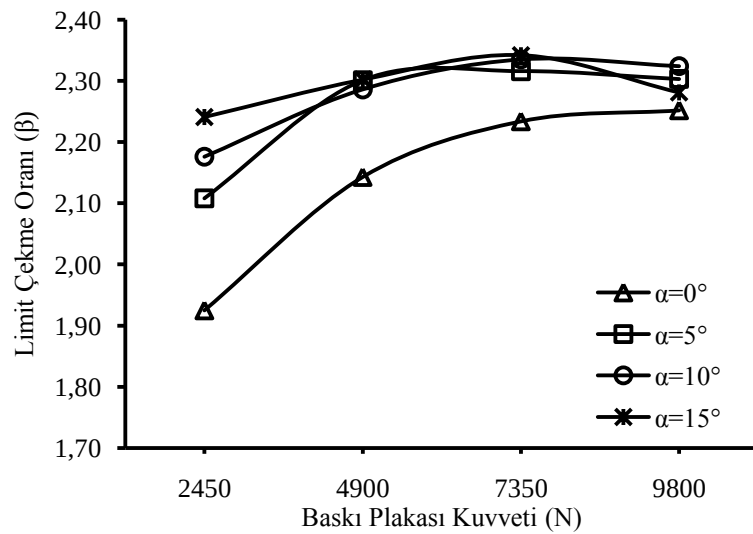
Şekil 6.24. R=6 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

R=6 mm ve $\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta; baskı plakası kuvveti BPK=2450 N için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 69757,71 N; BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 68494,21 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,34$ ve en büyük zımba kuvveti 68593,86 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,28$ ve en büyük zımba kuvveti 68223,94 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.25'de matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



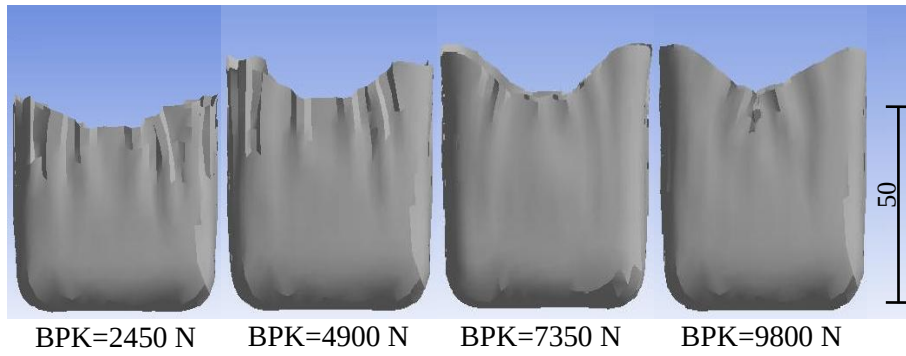
Şekil 6.25. R=6 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Şekil 6.26'da, matris/zımba radyüsünün sabit R=6 mm olduğu durumda, BPK'ne bağlı olarak belirlenen β değerlerinin değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, kalıp açısının $5^\circ - 15^\circ$ için 7350 N baskı kuvveti değerinde β 'nın en büyük olduğu ve BPK'nin artması ile birlikte sabit kaldığı veya az bir miktar düşüş olduğu görülmektedir.



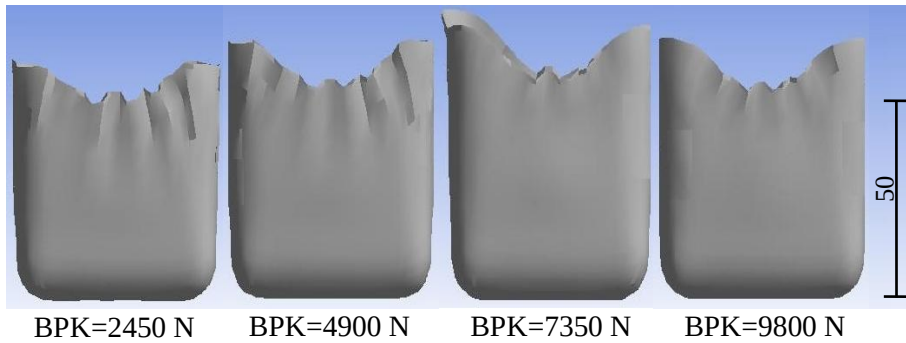
Şekil 6.26. Matris/Zımba radyüsü R=6 mm için Baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

Matris/zımba radyüsü $R=8$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ 'lik kalıpta; baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=2,15$ ve en büyük zımba kuvveti $68454,65$ N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti $67242,44$ N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti $68702,12$ N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,31$ ve en büyük zımba kuvveti $69129,15$ N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.27'de matris/zımba radyüsü $R=8$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



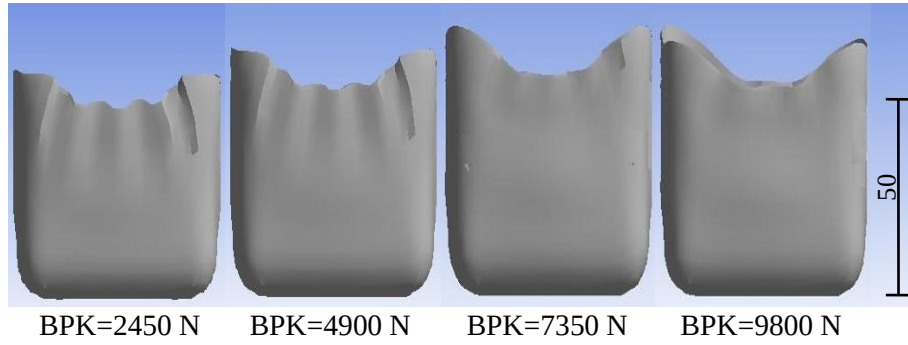
Şekil 6.27. $R=8$ mm için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta; baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için limit çekme oranı $\beta=2,20$ ve en büyük zımba kuvveti $70936,43$ N; $BPK=4900$ N için limit çekme oranı $\beta=2,29$ ve en büyük zımba kuvveti $68557,73$ N; $BPK=7350$ N için limit çekme oranı $\beta=2,34$ ve en büyük zımba kuvveti $69637,58$ N ve $BPK=9800$ N için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti $69426,67$ N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.28'de matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



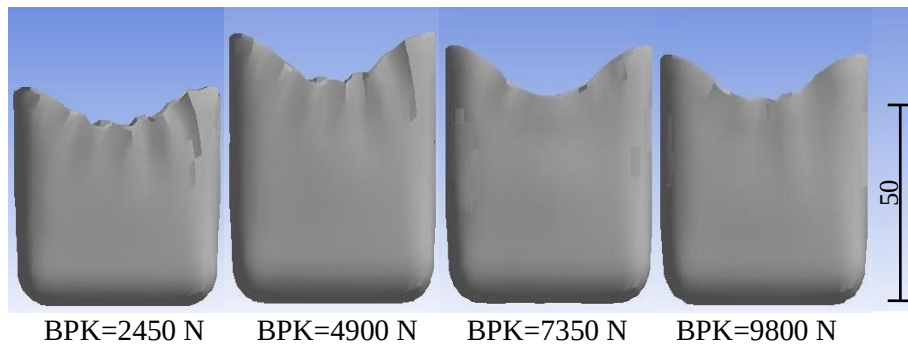
Şekil 6.28. $R=8$ mm için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

R=8 mm ve $\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta; baskı plakası kuvveti BPK=2450 N için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 68855,72 N; BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 70119,24 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 68471,62 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,31$ ve en büyük zımba kuvveti 68335,8 N olarak elde edilmiştir. Matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.29'da verilmiştir.



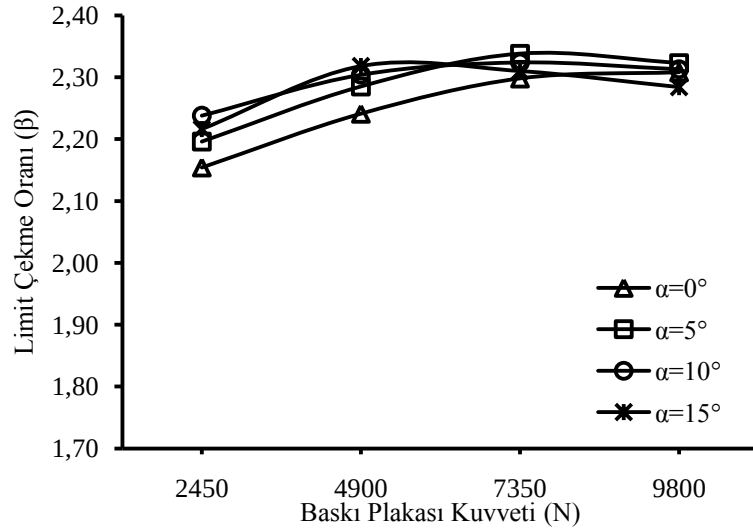
Şekil 6.29. R=8 mm için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

$\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta; baskı plakası kuvveti BPK=2450 N için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 71905,83 N; BPK=4900 N için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 68003,03 N; BPK=7350 N için limit çekme oranı $\beta=2,31$ ve en büyük zımba kuvveti 67155,52 N ve BPK=9800 N için limit çekme oranı $\beta=2,28$ ve en büyük zımba kuvveti 68080,88 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.30'da $\alpha=15^\circ$ için BPK'nin değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.30. R=8 mm için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Şekil 6.31’de, matris/zımba radyüsünün sabit $R=8$ mm olduğu durumda, BPK’ne bağlı olarak belirlenen β değerlerinin değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, kalıp açısının tüm değerleri için 7350 N baskı kuvveti değerinde β ’nın en büyük olduğu ve BPK’nın artması ile birlikte sabit kaldığı veya az bir miktar düşüş olduğu görülmektedir.



Şekil 6.31. Matris/Zımba radyüsü $R=8$ mm için Baskı plakası kuvvetinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

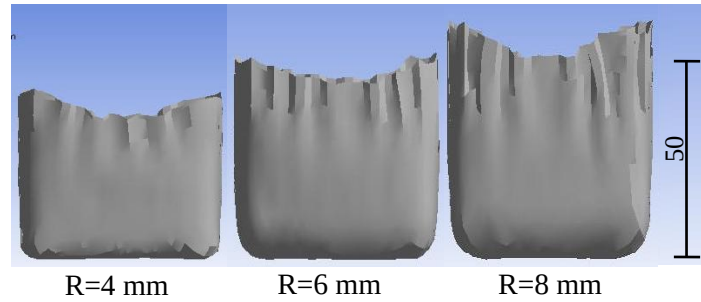
Baskı plakası kuvvetinin az olduğu durumda kaplarda ondülasyonların oluştuğu, fazla olduğunda ise kulaklanmaların oluştuğu görülmüştür. Aynı β değerlerinde ise artan baskı plakası kuvvetinin daha fazla zımba kuvveti gerektiği belirlenmiştir. Analiz programından elde edilen limit çekme oranı, en büyük zımba kuvveti, oluşan ondülasyonlar ve kulaklanmaların deneysel çalışma sonuçlarına büyük benzerlik gösterdiği ve analiz programından elde edilen sonuçların baskı plakası kuvvetinin belirlenmesi için kullanılabileceği belirlenmiştir.

6.3. Matris/Zımba Radyüsünün (R) Çekme Oranı (β) Üzerindeki Etkisi

Derin çekme işlemlerinde, kalıp boşluğu içerisine malzeme akışını kolaylaştırmak amacıyla, zımbanın alt kısmına ve matrisin üst yüzeyine farklı radyüsler verilerek bu radyüslerin limit çekme oranı üzerindeki etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Bunun için

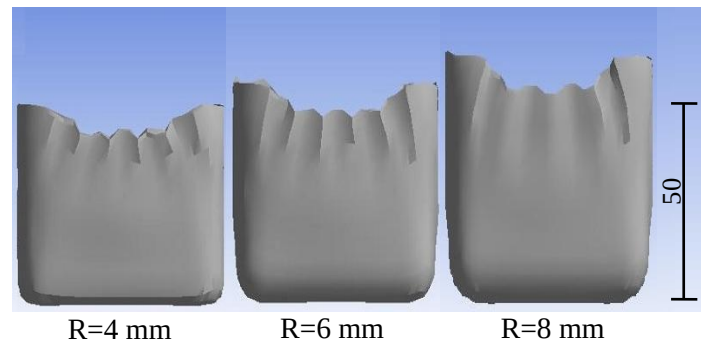
matris ve zımba radyüsleri 4 mm, 6 mm ve 8 mm olarak alınmış, artan matris ve zımba radyüslerinin limit çekme oranını arttırdığı elde edilmiştir.

Baskı plakası kuvveti 2450 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ 'lik kalıpta; matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=1,82$ ve en büyük zımba kuvveti 53903,59 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=1,93$ ve en büyük zımba kuvveti 56497,5 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,15$ ve en büyük zımba kuvveti 68454,65 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.32'de Baskı plakası kuvveti 2450 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



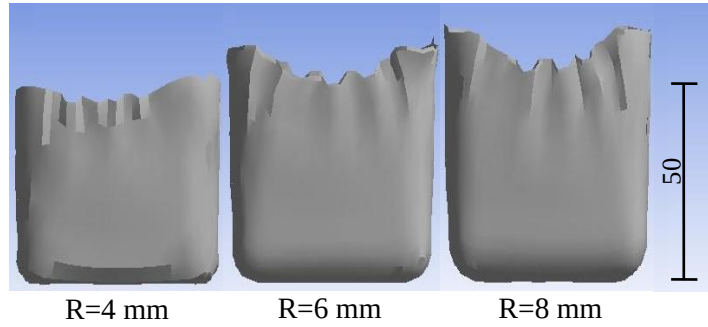
Şekil 6.32. BPK=2450 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

$\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta; matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=1,96$ ve en büyük zımba kuvveti 60548,88 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,11$ ve en büyük zımba kuvveti 62983,4 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,20$ ve en büyük zımba kuvveti 70936,43 N olarak elde edilmiştir. BPK=2450 N ve $\alpha=5^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.33'de verilmiştir.



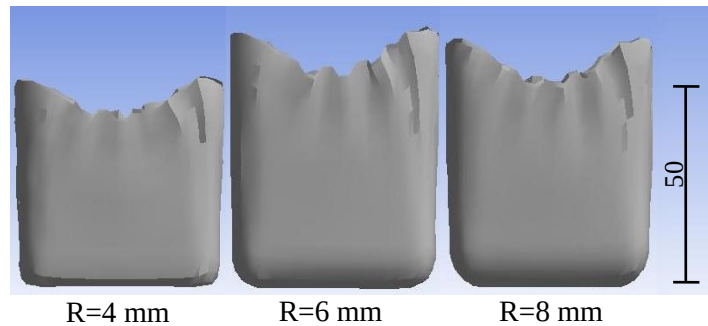
Şekil 6.33. BPK=2450 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

$\alpha=10^\circ$ ’lik kalıpta; matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,09$ ve en büyük zımba kuvveti 63240,67 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 67085,43 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 68855,72 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 2450 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.34’de verilmiştir.



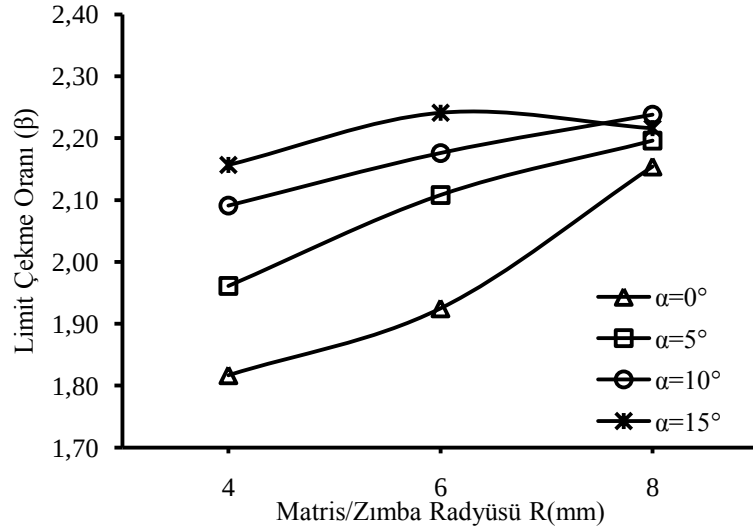
Şekil 6.34. BPK=2450 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

$\alpha=15^\circ$ ’lik kalıpta; matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,16$ ve en büyük zımba kuvveti 65857,81 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 69757,71 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,22$ ve en büyük zımba kuvveti 71905,83 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.35’de Baskı plakası kuvveti 2450 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.35. BPK=2450 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

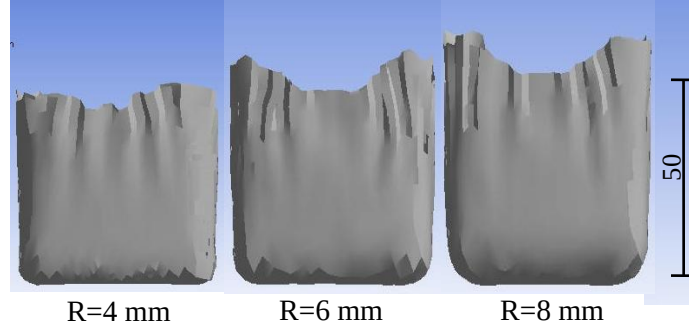
Şekil 5.36’da BPK’nin sabit olduğu durumda (2450 N), kalıp/zımba radyüslerinin β üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 6.36. Baskı plakası kuvveti (BPK) 2450 N için Matris/Zımba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

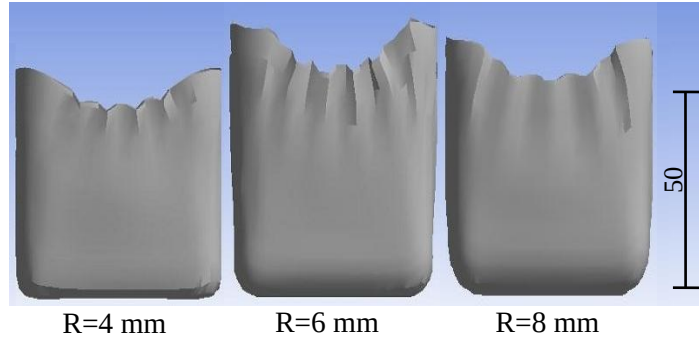
Şekilde görüldüğü gibi, $\alpha=0^\circ$ ve $R=4$ mm’de limit çekme oranı $\beta=1,82$ olarak elde edilmiştir. $R=8$ mm de ise $\beta=2,15$ olmuştur. α ’nın 0° , 5° ve 10° olduğu durumlarda ise radyüs değerinin artması ile β değerinin de arttığı belirlenmiştir. Kalıp açısının 15° olması durumunda radyal kuvvetin azalması ve kalıp radyüsünün büyük olmasından dolayı erken oluşan ondülasyonlar limit çekme oranını azaltmıştır.

Baskı plakası kuvveti 4900 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ ’lik kalıpta; matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=1,93$ ve en büyük zımba kuvveti 64143,99 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,14$ ve en büyük zımba kuvveti 66051,36 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 67242,44 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 4900 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.37’de verilmiştir.



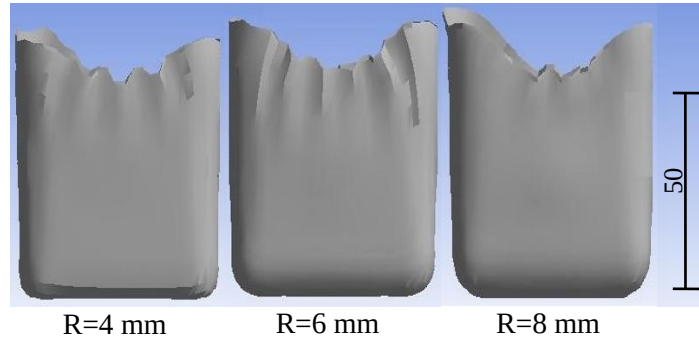
Şekil 6.37. BPK=4900 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

$\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta; matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,11$ ve en büyük zımba kuvveti 65370,42 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 67605,53 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,29$ ve en büyük zımba kuvveti 68557,73 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 4900 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.38'de verilmiştir.



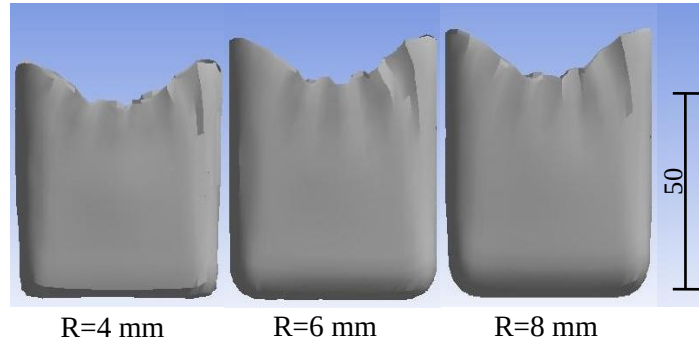
Şekil 6.38. BPK=4900 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

$\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta; matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 67604,15 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,29$ ve en büyük zımba kuvveti 67347,99 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 70119,24 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 4900 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.39'da verilmiştir.



Şekil 6.39. BPK=4900 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

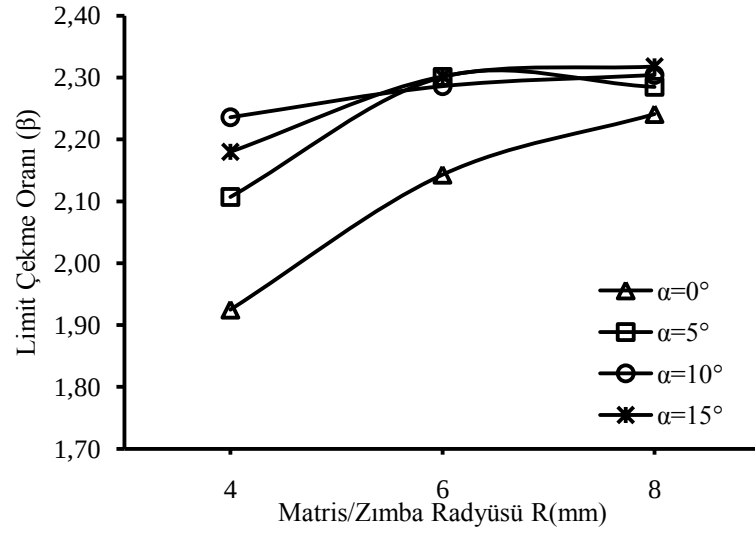
$\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta; matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 64919,55 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 68494,21 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 68003,03 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 4900 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.40'da verilmiştir.



Şekil 6.40. BPK=4900 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

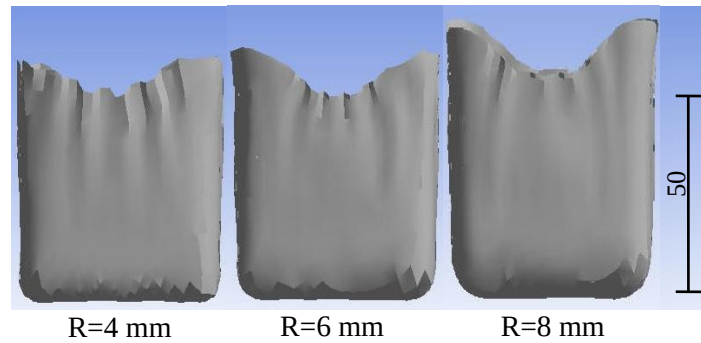
Şekil 6.41'de BPK'nin sabit olduğu 4900 N için farklı matris/zımba radyüslerinin β üzerindeki etkisinin değişimi verilmiştir.

Şekil 6.41'de artan radyüse bağlı olarak β 'nin arttığı, $\alpha=0^\circ$ ve R=4 mm'de en küçük limit çekme oranı $\beta=1,93$ olarak elde edilmiştir. R=8 mm de ise en büyük $\beta=2,32$ değerine çıkmıştır. Açılı kalıplarda ise R=6 mm değerine kadar β değerinin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 6.41. Baskı plakası kuvveti (BPK) 4900 N için Matris/Zımba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

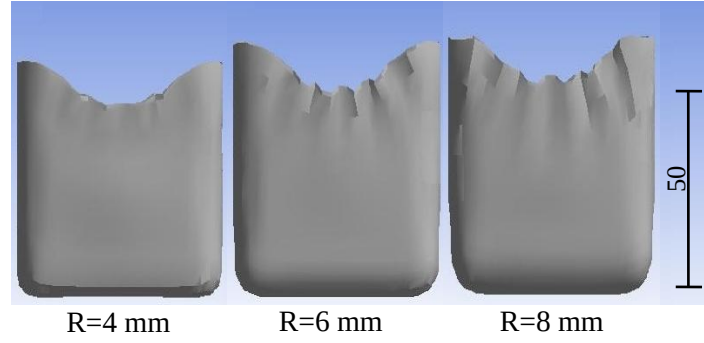
Baskı plakası kuvveti 7350 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ 'lik kalıpta; matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,00$ ve en büyük zımba kuvveti 65895,44 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,23$ ve en büyük zımba kuvveti 68402,32 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 68702,12 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6.42'de baskı plakası kuvveti 7350 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.42. BPK=7350 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

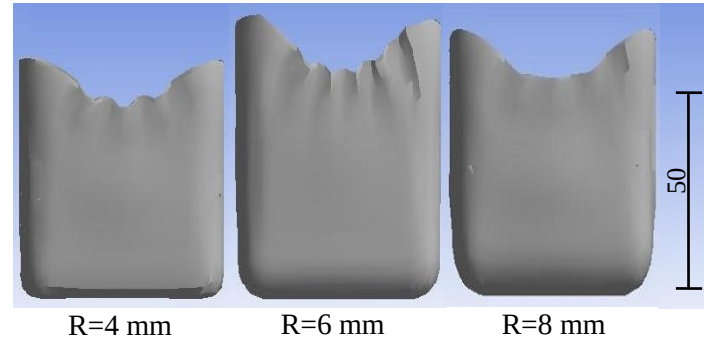
$\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta; matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,15$ ve en büyük zımba kuvveti 65915,03 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 68428,66 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,34$ ve en büyük zımba

kuvveti 69637,58 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 7350 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.43’de verilmiştir.



Şekil 6.43. BPK=7350 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

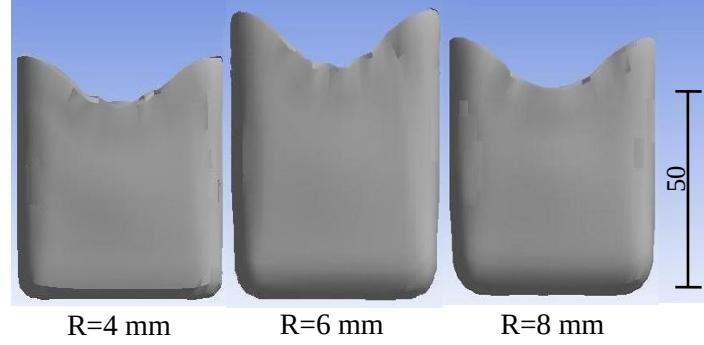
$\alpha=10^\circ$ ’lik kalıpta; matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,24$ ve en büyük zımba kuvveti 67051,99 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,34$ ve en büyük zımba kuvveti 68111,2 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 68471,62 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 7350 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.44’de verilmiştir.



Şekil 6.44. BPK=7350 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

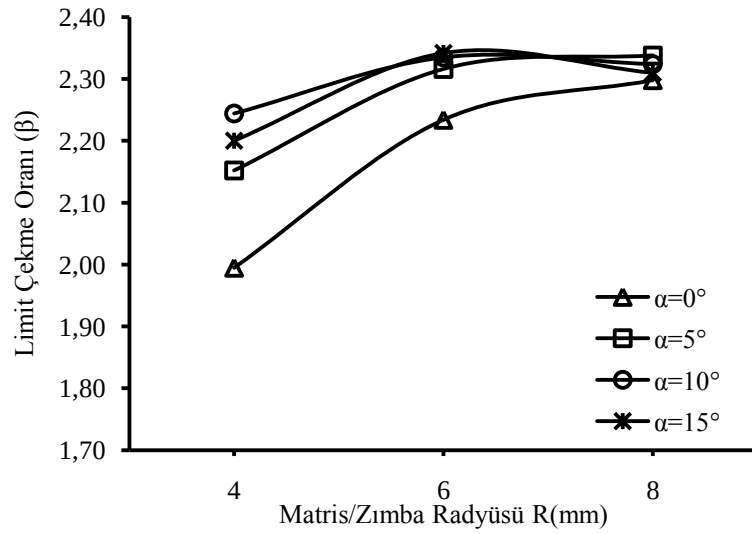
$\alpha=15^\circ$ ’lik kalıpta; matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,20$ ve en büyük zımba kuvveti 66125,43 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,34$ ve en büyük zımba kuvveti 68593,86 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,31$ ve en büyük zımba kuvveti 67155,52 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 7350 N ve matris/baskı

plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.45’de verilmiştir.



Şekil 6.45. BPK=7350 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

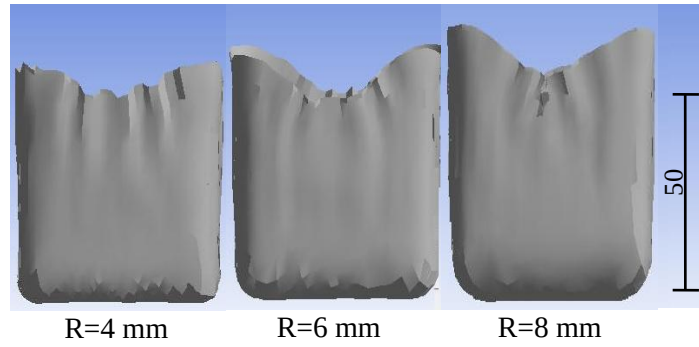
Şekil 6.46’da BPK’nin sabit 7350 N olduğunda, matris/zımba radyüsünün β üzerindeki etkisinin değişimi verilmiştir.



Şekil 6.46. Baskı plakası kuvveti (BPK) 7350 N için Matris/Zımba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

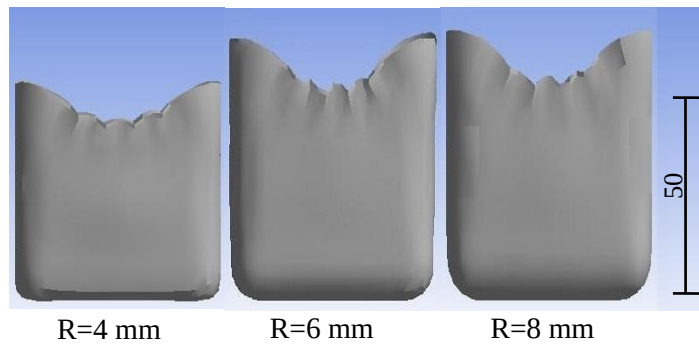
Şekilde görüldüğü gibi 5° , 10° ve 15° ’lik kalıplarda matris/zımba radyüsü $R=6$ mm’ye kadar çekme oranının arttığı, bu değerden sonra radyüsün artması ile birlikte β ’nın sabit kaldığı veya azaldığı görülmüştür.

Baskı plakası kuvveti 9800 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ 'lik kalıpta; matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,03$ ve en büyük zımba kuvveti 66959,97 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,25$ ve en büyük zımba kuvveti 67550,68 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,31$ ve en büyük zımba kuvveti 69129,15 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 9800 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.47'de verilmiştir.



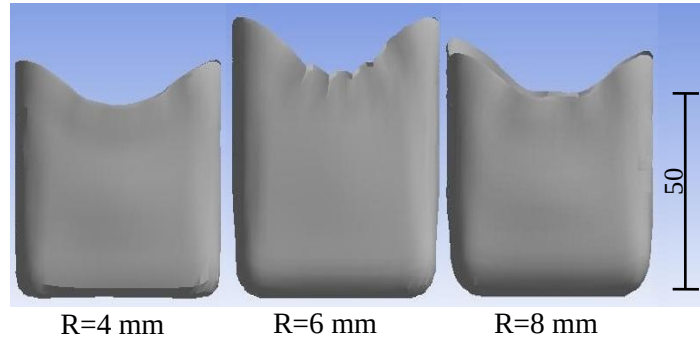
Şekil 6.47. BPK=9800 N için, $\alpha=0^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

$\alpha=5^\circ$ 'lik kalıpta; matris/zımba radyüsü R=4 mm için limit çekme oranı $\beta=2,12$ ve en büyük zımba kuvveti 63803,98 N; R=6 mm için limit çekme oranı $\beta=2,30$ ve en büyük zımba kuvveti 68821,25 N ve R=8 mm için limit çekme oranı $\beta=2,32$ ve en büyük zımba kuvveti 69426,67 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 9800 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.48'de verilmiştir.



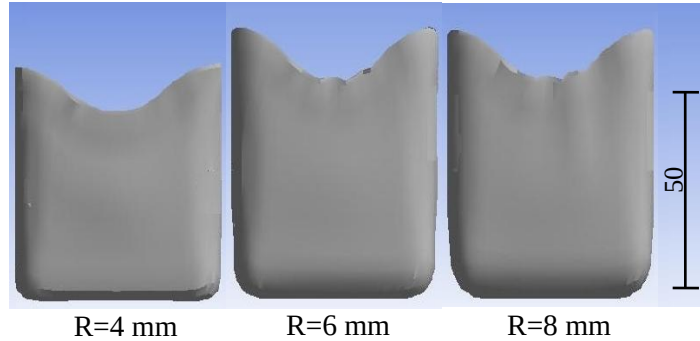
Şekil 6.48. BPK=9800 N için, $\alpha=5^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

$\alpha=10^\circ$ 'lik kalıpta; matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,20$ ve en büyük zımba kuvveti 66664,82 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,34$ ve en büyük zımba kuvveti 67811,84 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,31$ ve en büyük zımba kuvveti 68335,8 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 9800 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.49'da verilmiştir.



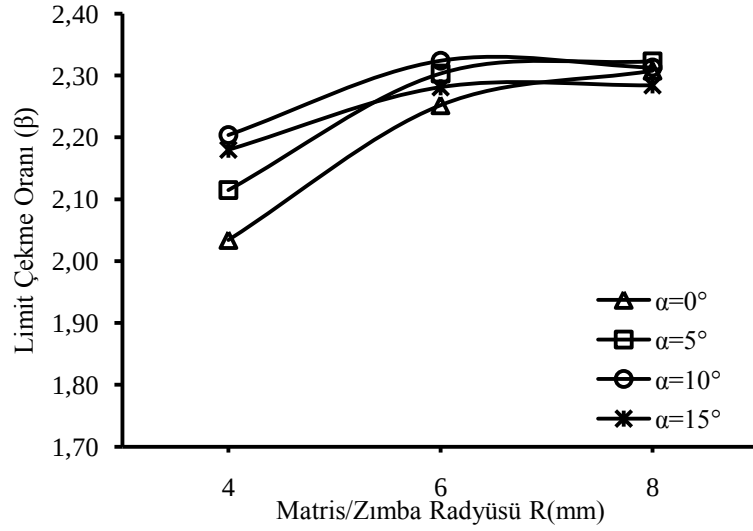
Şekil 6.49. BPK=9800 N için, $\alpha=10^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

$\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta; matris/zımba radyüsü $R=4$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,18$ ve en büyük zımba kuvveti 65151,87 N; $R=6$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,28$ ve en büyük zımba kuvveti 68223,94 N ve $R=8$ mm için limit çekme oranı $\beta=2,28$ ve en büyük zımba kuvveti 68080,88 N olarak elde edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 9800 N ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için matris/zımba radyüsünün değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları Şekil 6.50'de verilmiştir.



Şekil 6.50. BPK=9800 N için, $\alpha=15^\circ$ olduğunda elde edilen analiz sonuçları

Şekil 6.51’de BPK’nin en büyük 9800 N olduğu durumda, matris/zımba radyüsünün β üzerindeki etkisi verilmiştir. Şekilde artan radyüs miktarına bağlı olarak β ’nın arttığı, $\alpha=10^\circ$ ve $R=6$ mm’de limit çekme oranı en büyük $\beta=2,32$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.51. Baskı plakası kuvveti (BPK) 9800 N için Matris/Zımba radyüsünün (R) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

Analiz programından elde edilen limit çekme oranı, en büyük zımba kuvveti, oluşan ondülasyonlar ve kulaklanmaların, deneysel çalışma sonuçları ile tutarlılık gösterdiği ve analiz programından elde edilen sonuçların matris/zımba radyüsünün belirlenmesinde kullanılabileceği belirlenmiştir.

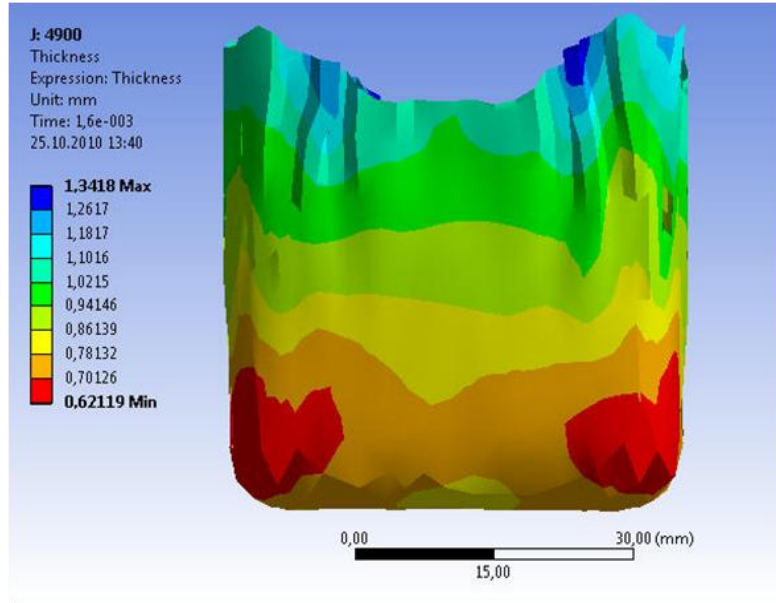
6.4. Derin Çekme Parametrelerinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Et kalınlığının kontrolü, ürün kalitesini doğrudan etkilediği gibi, üretilen parçanın ölçü tamlığı açısından da son derece önemlidir.

Derin çekme işlemleri sırasında iş parçası üzerinde basma ve çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu gerilmelerin etkisi ile iş parçasının et kalınlığı değişmektedir. Kalıp açısı, BPK ve radyüs gibi parametrelerin et kalınlığı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Yapılan analizlerde çekilen kabın taban kısmında et kalınlığı değişmemekte, zımba radyüsü ve bu bölgeye yakın kısımlarda incelme olmakta, iş parçası duvarının üst kısmında ise kalınlaşma meydana geldiği analiz sonuçlarından belirlenmiştir.

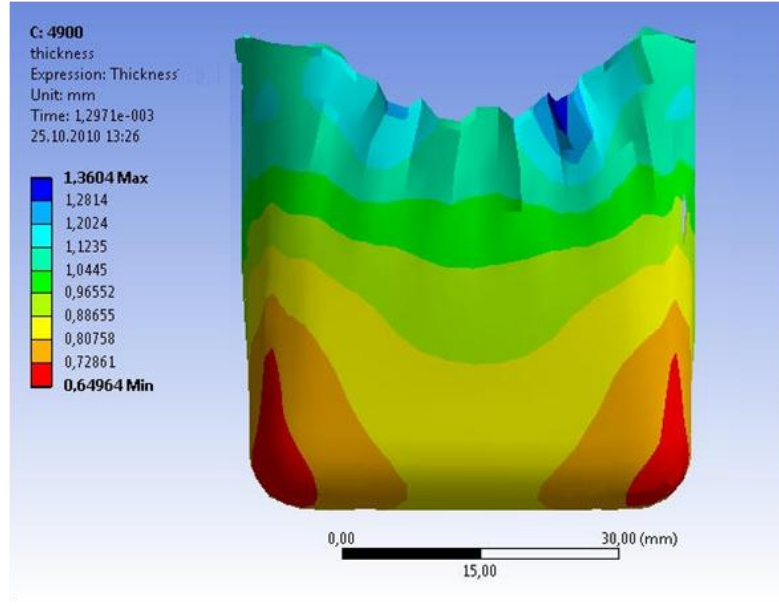
6.4.1. Matris/Baskı Plakası Açısının Et Kalınlığı Üzerine Etkisi

Şekil 6.52’de sabit $R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve $BPK=4900$ N değerlerinde matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ ’de elde edilen et kalınlığı dağılımı görülmektedir. Kritik bölgedeki et kalınlığı 0,6211 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı 1,3418 mm’dir. Kabın kritik bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur.



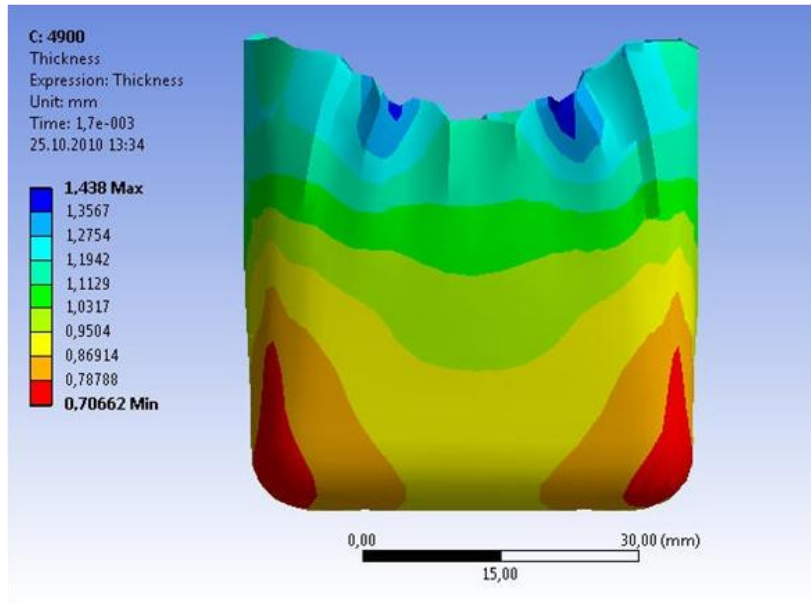
Şekil 6.52. Matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve $BPK=4900N$)

Şekil 6.53’de sabit $R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve $BPK=4900$ N değerlerinde matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ ’de elde edilen et kalınlığı dağılımı görülmektedir. Kritik bölgedeki et kalınlığı 0,6496 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı 1,3604 mm’dir. Kabın kritik bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur.



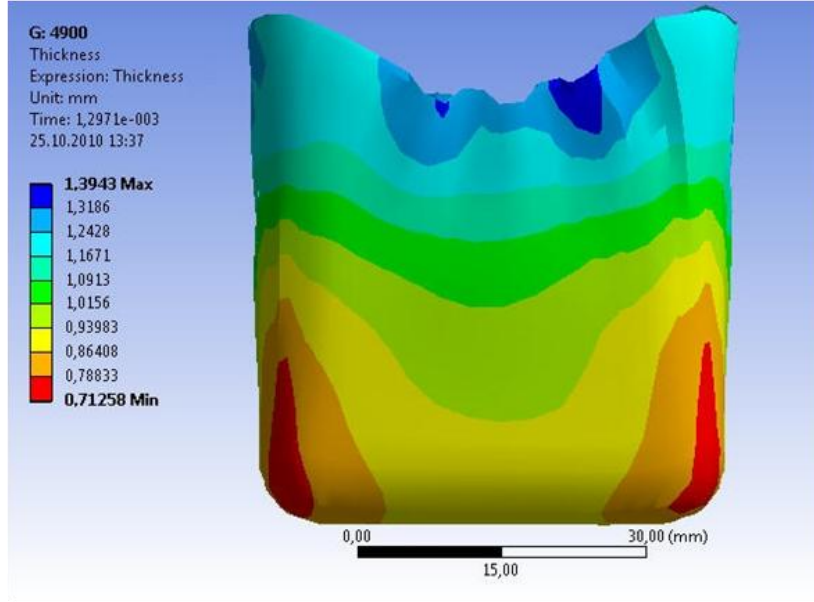
Şekil 6.53. Matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ için et kalınlığı dağılımı (R=6 mm, $\beta=2,27$ ve BPK=4900N)

Şekil 6.54’de sabit R=6 mm, $\beta=2,27$ ve BPK=4900 N değerlerinde matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ ’de elde edilen et kalınlığı dağılımı görülmektedir. Kritik bölgedeki et kalınlığı 0,7066 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı 1,438 mm’dir. Kabın kritik bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur.



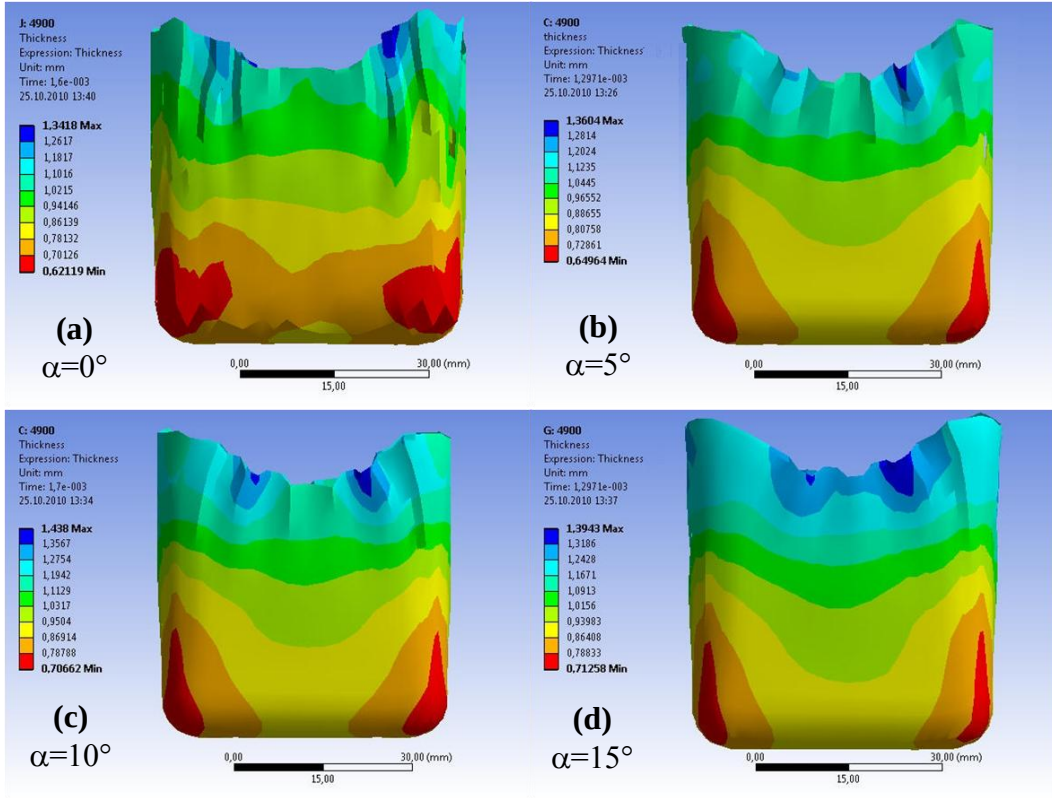
Şekil 6.54. Matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ için et kalınlığı dağılımı (R=6 mm, $\beta=2,27$ ve BPK=4900N)

Şekil 6.55’de sabit $R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve $BPK=4900$ N değerlerinde matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ ’de elde edilen et kalınlığı dağılımı görülmektedir. Kritik bölgedeki et kalınlığı 0,7125 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı 1,3943 mm’dir. Kabın kritik bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur.



Şekil 6.55. Matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve $BPK=4900$ N)

Şekil 6.56’de $R=6$ mm, $\beta=2,27$ ve $BPK=4900$ N’da matris/baskı plakası açısının değişmesiyle elde edilen et kalınlıkları dağılımı verilmiştir. Şekil 6.56’de kap yüksekliği ve renk ölçeği değerlendirildiğinde, kabın üst kısımlarında et kalınlığının 1,0 ila 1,2 mm aralığında değiştiği görülmektedir. Çekilen sacın kalınlığının 0,90 mm olduğu dikkate alındığında, üst bölgelerdeki kalınlık artışının bütün açı değerleri için yaklaşık % 22 kadar arttığı görülmektedir. Kap yüzeyi ve kabın alt kısımlarındaki et kalınlıklarının ise sırasıyla 0,8 – 0,9 mm, ve 0,6 – 0,7 mm olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kap yüzeylerinde daha homojen bir et kalınlığı dağılımının, üst bölgelerde kalınlaşmaların ve alt bölgelerde ise incelmelerin oluştuğunu göstermektedir.



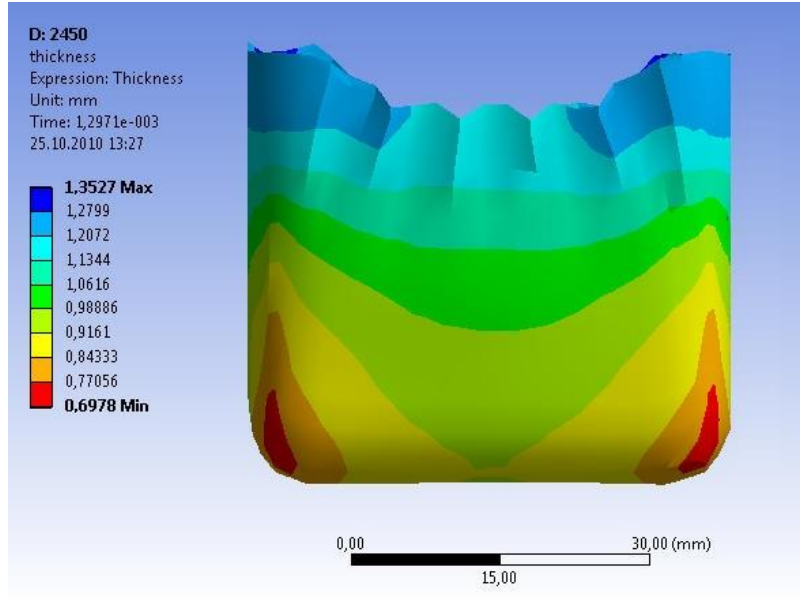
Şekil 6.56. Matris/baskı plakası açısının değişmesiyle elde edilen et kalınlıkları dağılımı

$\alpha=0^\circ$ 'de elde edilen kaptaki en küçük kalınlık değeri 0,6211 mm iken, $\alpha=5^\circ$ için bu değer 0,6496 mm, $\alpha=10^\circ$ için 0,7066 mm değerinde ve $\alpha=15^\circ$ ise 0,7125 mm değerine yükseldiği tespit edilmiştir.

En büyük incelmeler çekme gerilmesinin artması ve dairesel taslak malzeme nedeniyle oluşan ondülasyonların sebep olduğu çekme kuvvetinin artması nedeniyle zımba radyüsünün olduğu bölgede görülmektedir. Bu durumda, kalıp açısının artması ile et kalınlığının homojen olduğu alanlar da artmaktadır. Dolayısıyla kalıp açısının et kalınlığı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu sayısal sonuçlardan görülmüştür.

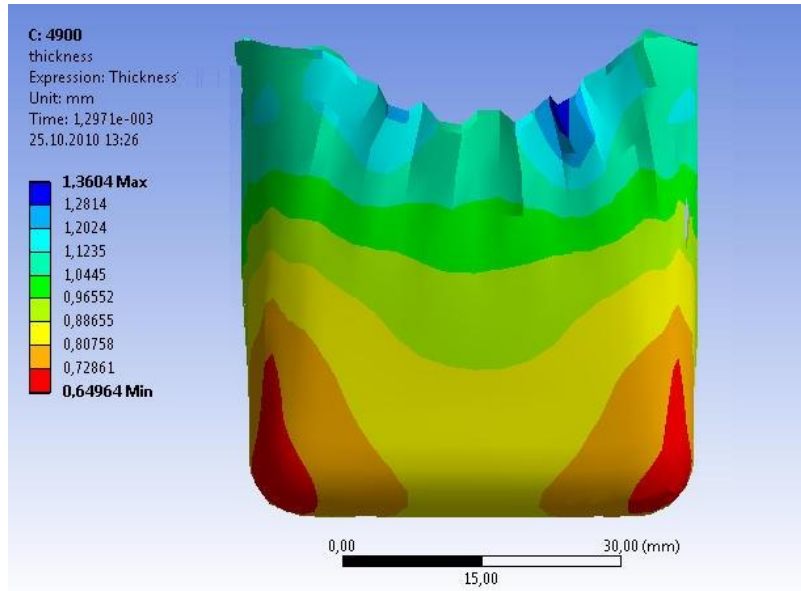
6.4.2. Baskı Plakası Kuvvetinin Et Kalınlığı Üzerine Etkisi

Şekil 6.57'de sabit kalıp radyüsü $R=6$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ 'de $BPK=2450$ N değerlerinde elde edilen et kalınlığı dağılımı görülmektedir. Kritik bölgedeki et kalınlığı 0,6978 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı 1,3527 mm'dir. Kabın kritik bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur.



Şekil 6.57. Baskı plakası kuvveti 2450 N için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\alpha=5^\circ$)

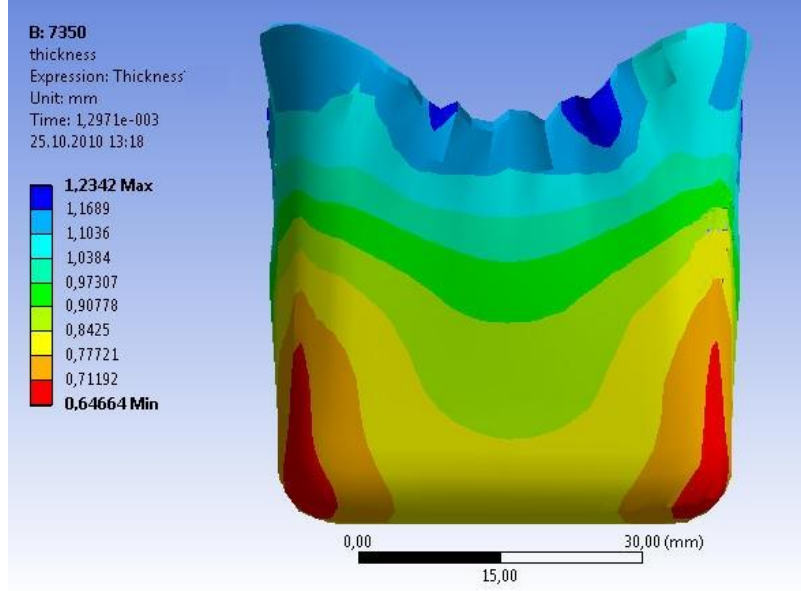
Şekil 6.58’de sabit kalıp radyüsü $R=6$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ ’de BPK=4900 N değerlerinde elde edilen et kalınlığı dağılımı görülmektedir. Kritik bölgedeki et kalınlığı 0,6496 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı 1,3604 mm’dir. Kabın kritik bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur.



Şekil 6.58. Baskı plakası kuvveti 4900 N için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\alpha=5^\circ$)

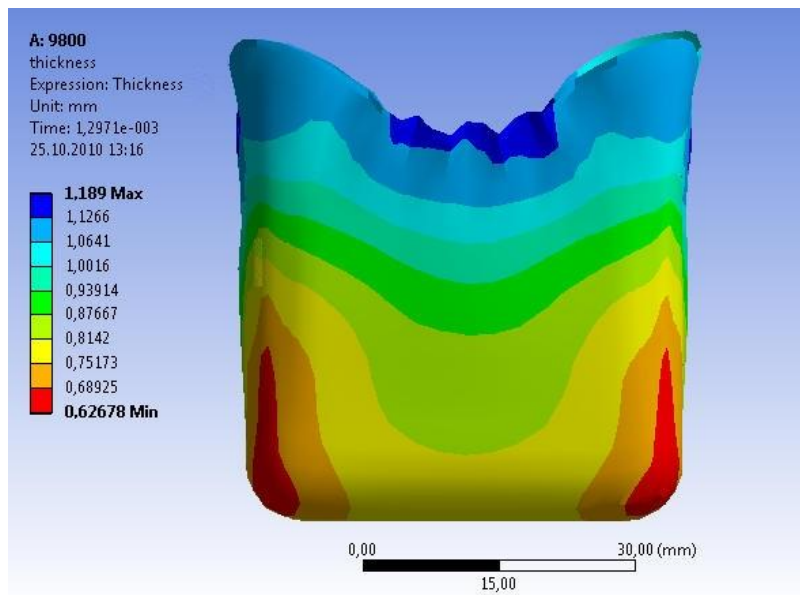
Şekil 6.59’de sabit kalıp radyüsü $R=6$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ ’de BPK=4900 N değerlerinde elde edilen et kalınlığı dağılımı görülmektedir. Kritik bölgedeki

et kalınlığı 0,6466 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı 1,2342 mm'dir. Kabın kritik bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur.



Şekil 6.59. Baskı plakası kuvveti 7350 N için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\alpha=5^\circ$)

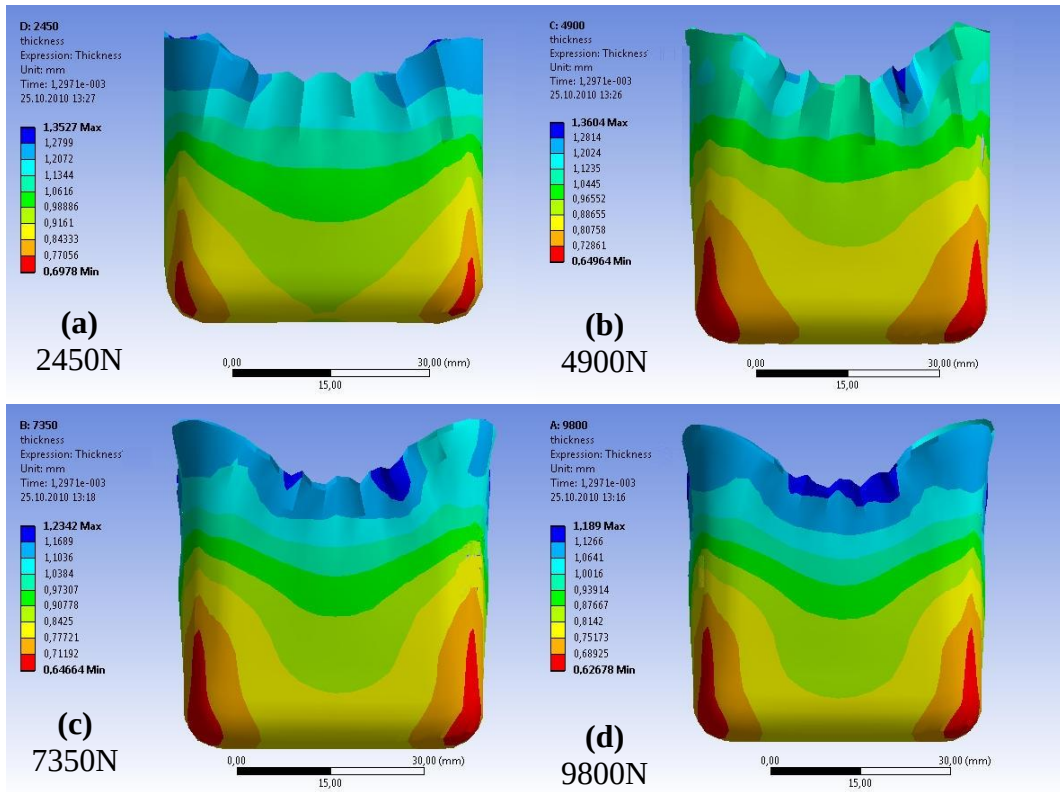
Şekil 6.60'da sabit kalıp radyüsü $R=6$ mm ve matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ de BPK=4900 N değerlerinde elde edilen et kalınlığı dağılımı görülmektedir. Kritik bölgedeki et kalınlığı 0,6267 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı 1,189 mm'dir. Kabın kritik bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur.



Şekil 6.60. Baskı plakası kuvveti 9800 N için et kalınlığı dağılımı ($R=6$ mm, $\alpha=5^\circ$)

Şekil 6.61’de dört farklı baskı plakası kuvveti için et kalınlığı dağılımları birlikte verilmiştir. Kritik bölgedeki et kalınlığı BPK 4900 N için 0,6496 mm iken BPK 7350 N da 0,6466 mm ve BPK 9800 N olduğunda ise 0,6267 mm olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, baskı kuvvetinin artması ile malzemenin kalıp içerisine geçişi esnasında sürtünme kuvvetinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla baskı kuvvetinin et kalınlığı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu sayısal sonuçlara dayanılarak söylenebilir.

BPK 2450 N olduğu durumda elde edilen kaptaki en küçük incelme değeri 0,6978 mm’dir. Bu değerin yüksek olması limit çekme oranının diğer parametrelerden düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

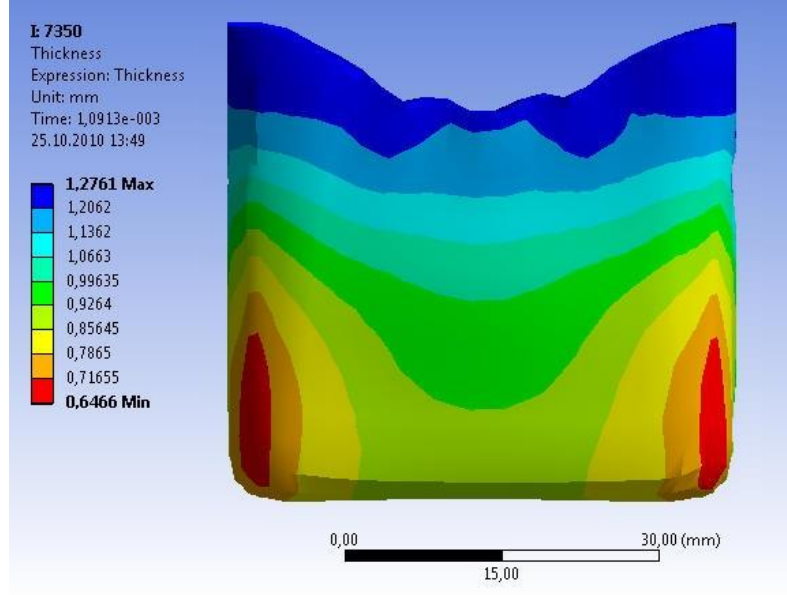


Şekil 6.61. Baskı plakası kuvvetinin değişmesiyle elde edilen et kalınlıkları dağılımı

6.4.3. Matris/Zımba Radyüsünün Et Kalınlığı Üzerine Etkisi

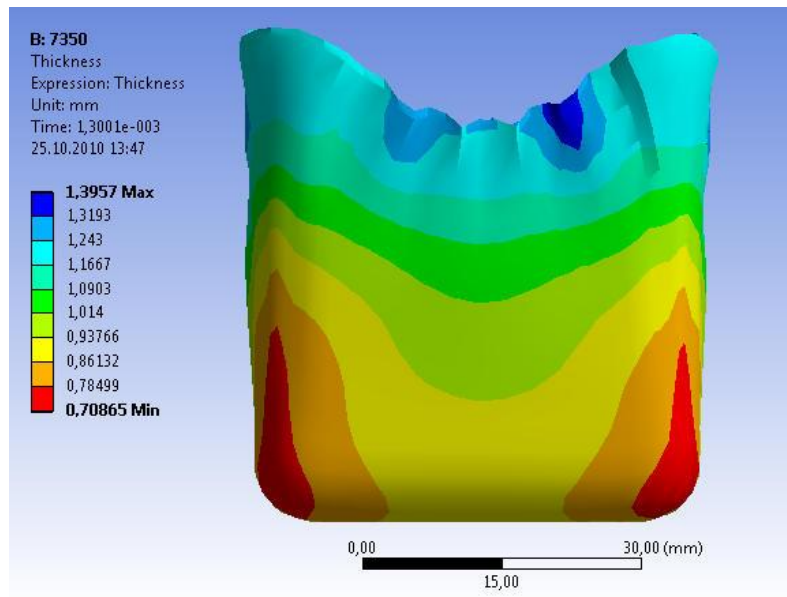
Şekil 6.62’de sabit BPK ve α (BPK=7350N, $\alpha=10^\circ$) değerlerinde Matris/Zımba radyüsü R=4 mm için et kalınlığı dağılımı görülmektedir. Kritik bölgedeki et kalınlığı

0,6466 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı 1,2761 mm'dir. Kabın kritik bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur.



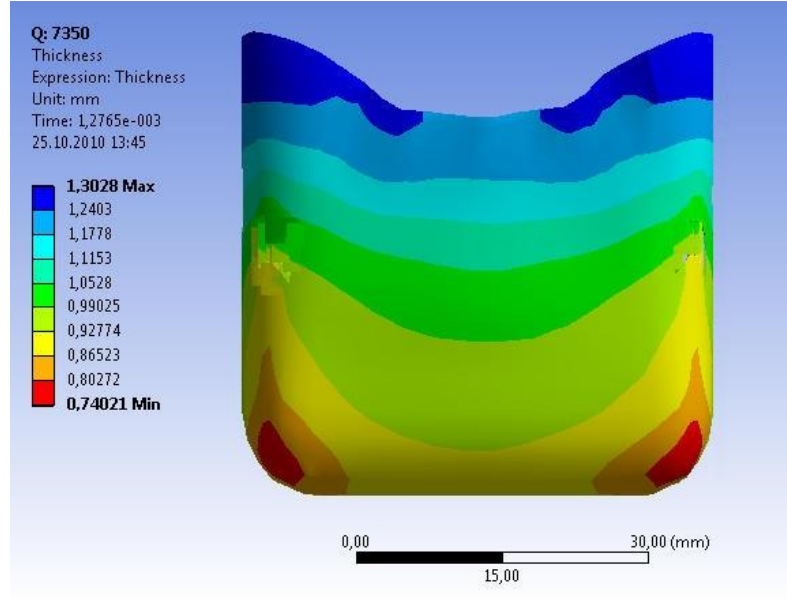
Şekil 6.62. Matris/Zımba radyüsü R=4 mm için et kalınlık dağılımı (BPK=7350N, $\alpha=10^\circ$)

Şekil 6.63'de sabit BPK ve α (BPK=7350N, $\alpha=10^\circ$) değerlerinde Matris/Zımba radyüsü R=6 mm için et kalınlığı dağılımı görülmektedir. Kritik bölgedeki et kalınlığı 0,7086 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı 1,3957 mm'dir. Kabın kritik bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur.



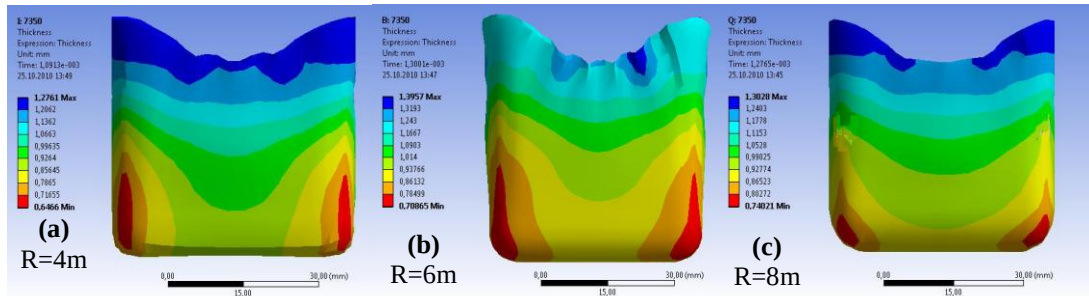
Şekil 6.63. Matris/Zımba radyüsü R=6 mm için et kalınlık dağılımı (BPK=7350N, $\alpha=10^\circ$)

Şekil 6.64’de sabit BPK ve α (BPK=7350N, $\alpha=10^\circ$) değerlerinde Matris/Zımba radyüsü R=8 mm için et kalınlığı dağılımı görülmektedir. Kritik bölgedeki et kalınlığı 0,7402 mm iken kabın üst bölgesinde et kalınlığı 1,3028 mm’dir. Kabın kritik bölgesinden yukarıya doğru bir kalınlık artışı söz konusudur.



Şekil 6.64. Matris/Zımba radyüsü R=6 mm için et kalınlık dağılımı (BPK=7350N, $\alpha=10^\circ$)

Şekil 6.65’de da üç farklı matris/zımba radyüsü için et kalınlığı dağılımının birlikte verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi kritik kenar bölgesindeki et kalınlığı çekme gerilmesinin en büyük olmasından dolayı diğer bölgelere göre daha düşüktür. Matris/zımba radyüsü arttıkça et kalınlıkları arasındaki farkın da arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 6.65. Kalıp radyüsü değişimi ile elde edilen et kalınlıkları dağılımı

6.5. Zimba Kurs Mesafesinin Gerilmeye Etkisi

Zimba kurs mesafesine bağı olarak sayısal analiz metodu ile elde edilen numunelerde meydana gelen gerilmelerin değişimi Tablo 6.1’de verilmiştir. Bu gerilmeler kurs boyu ile ilişkilendirildiğinde, 40 mm kurs mesafesine kadar kap kenarlarında oluşan gerilme bölgelerinin kademeli olarak arttığı görülmektedir. 40 mm kurs mesafesinde, toplam gerilme değerlerinde ve gerilme bölgelerinde belirgin bir artış olmaktadır. Bu artış, kurs boyunun artmasıyla birlikte kalıp içerisine itilen malzeme miktarının da artması ile ilişkilendirilebilir. Malzeme miktarındaki artış, yığılmalara ve dolayısıyla daha fazla çekme kuvveti gereksinimine yol açmaktadır. Çekme işleminin tamamlandığı 61 mm kurs boyunda ise gerilme bölgelerinde ani bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir. $R=6$ mm ve $BPK=4900$ N olduğu durumda matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ ve $\alpha=10^\circ$ için zimba kurs mesafesi değişiminde oluşan gerilme dağılımları karşılaştırıldığında, kurs mesafesinin her durumu için $\alpha=10^\circ$ ’lik kalıpta oluşan en büyük gerilme değerlerinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda kalıp açısının gerilmeleri azalttığı söylenebilir.

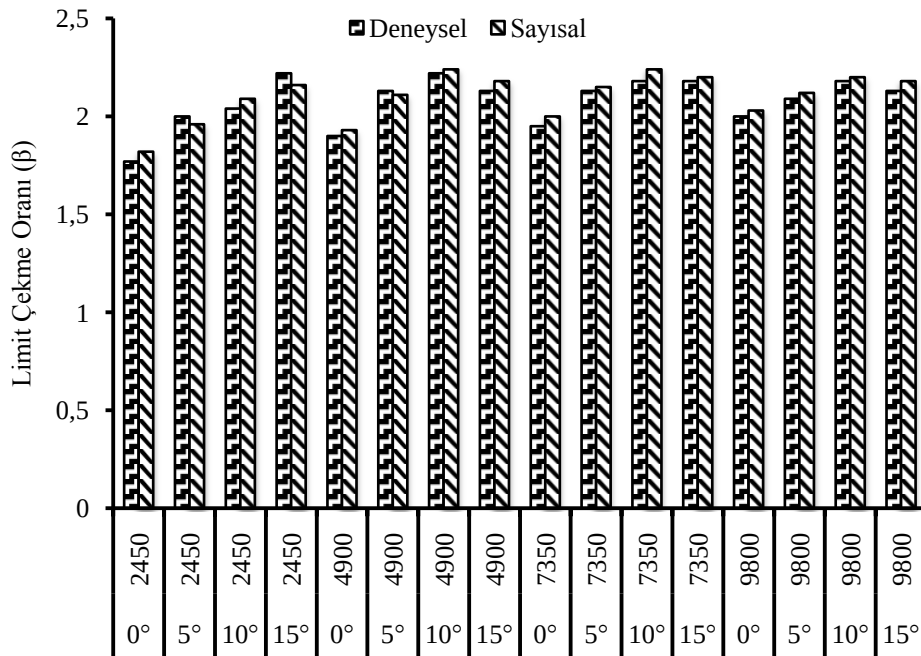
Tablo 6.1. Zimba kurs mesafesi boyunca gerilme dağılımı

Zimba kurs mesafesi (mm)	Matris/baskı plakası açısı	
	$\alpha=5^\circ$	$\alpha=10^\circ$
3	C:\9900 Equivalent (von-Mises) Stress - Blank shape Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 5.115e-005 11.03.2011 14:06 386.69 Max 278.09 249.49 220.89 192.29 163.69 135.09 106.49 77.894 49.294 Min 0.00 25.00 50.00 (mm)	Equivalent (von-Mises) Stress - Blank holder(10) Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 5.0933e-005 11.03.2011 13:53 286.37 Max 256.06 195.4 169.92 146.43 118.95 93.469 67.866 42.503 17.02 Min 0.00 25.00 50.00 (mm)
15	C:\9900 Equivalent (von-Mises) Stress - Blank shape Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 3.5004e-004 11.03.2011 14:06 592.18 Max 538.83 467.88 405.73 343.58 281.43 219.28 157.13 94.981 32.892 Min 0.00 25.00 50.00 (mm)	Equivalent (von-Mises) Stress - Blank holder(10) Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 3.5815e-004 11.03.2011 13:54 582.83 Max 526.21 465.81 413.4 357 300.4 244.2 187.8 131.39 74.992 Min 0.00 25.00 50.00 (mm)
22	C:\9900 Equivalent (von-Mises) Stress - Blank shape Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 5.2515e-004 11.03.2011 14:07 612 Max 558.58 489.16 427.73 366.31 304.88 243.46 182.03 120.61 59.187 Min 0.00 25.00 50.00 (mm)	Equivalent (von-Mises) Stress - Blank holder(10) Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 5.2515e-004 11.03.2011 14:06 618.28 Max 552.91 485.53 430.15 374.76 319.4 266.83 208.85 151.27 93.898 Min 0.00 25.00 50.00 (mm)
40	C:\9900 Equivalent (von-Mises) Stress - Blank shape Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 8.5897e-004 11.03.2011 14:08 613.82 Max 549.01 484.2 419.39 354.58 289.77 224.96 160.15 95.336 30.526 Min 0.00 25.00 50.00 (mm)	Equivalent (von-Mises) Stress - Blank holder(10) Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 8.5898e-004 11.03.2011 13:55 618.87 Max 548.39 485.79 423.25 360.71 305.34 250.83 197.89 139.55 40.014 Min 0.00 25.00 50.00 (mm)
65	C:\9900 Equivalent (von-Mises) Stress - Blank shape Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 1.5e-003 11.03.2011 14:13 606.72 Max 548.37 474.83 407.88 341.33 274.88 208.44 142.29 75.942 9.5942 Min 0.00 25.00 50.00 (mm)	Equivalent (von-Mises) Stress - Blank holder(10) Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 1.5881e-003 11.03.2011 13:59 592.62 Max 528.42 464.23 408.83 350.84 271.64 207.44 143.24 73.946 14.848 Min 0.00 25.00 50.00 (mm)

6.6. Sayısal Olarak Hesaplanan Limit Çekme Oranlarının Deneysel Çalışma Sonuçları İle Karşılaştırılması

Bu bölümde açılı derin çekme kalıpları için sayısal analiz programından elde edilmiş olan çekme oranlarının deneysel çalışma sonucunda elde edilmiş olan çekme oranları ile karşılaştırmaları her bir matris/zimba radyüsü için grafikler halinde sunulmuştur.

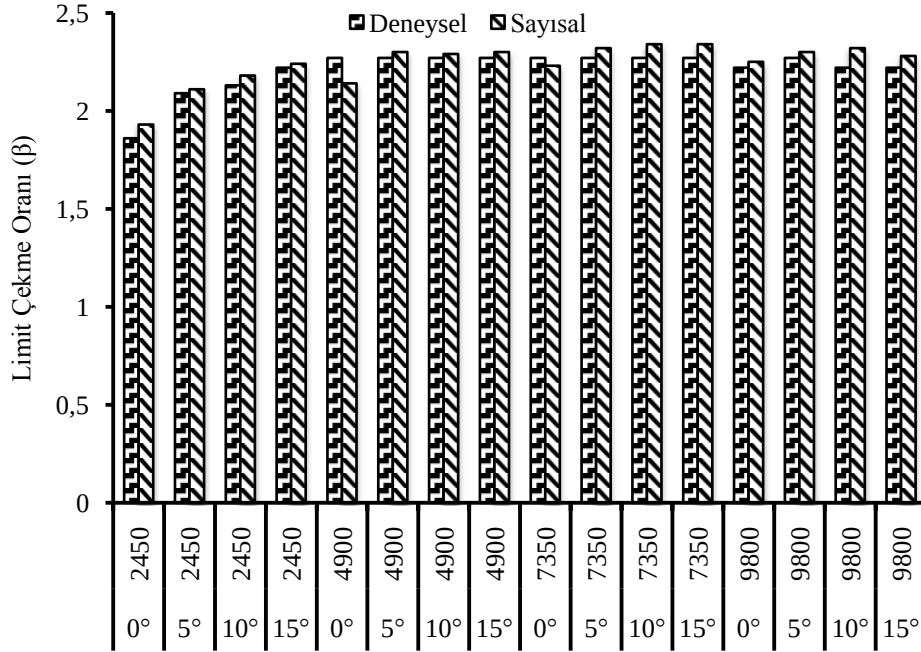
Şekil 6.66’da matris/zimba radyüsü R=4 mm’de sayısal olarak elde edilmiş çekme oranlarının deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.66. R=4 mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen limit çekme oranlarının değişimi

Şekil 6.66’den görüldüğü gibi en düşük sayısal limit çekme oranı $\alpha=0^\circ$, BPK=2450 N için $\beta=1,82$ olarak elde edilmiştir. En büyük çekme oranı ise $\alpha=10^\circ$, BPK=4900 N için $\beta=2,24$ olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşım oranlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç $\alpha=0^\circ$, BPK=2450 N için % 2,74 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $\alpha=10^\circ$, BPK=4900 N için % 0,89 olarak elde edilmiştir. R=4 mm’lik kalıp için yapılan deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının her ikisi de α ’nın artışına paralel olarak β da artış göstermektedir.

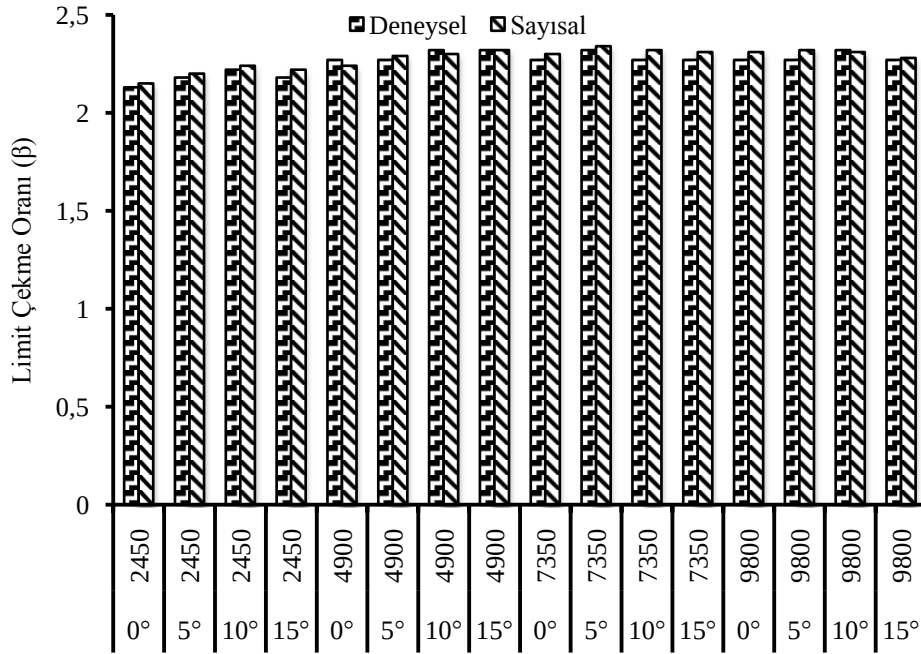
Şekil 6.67’de matris/zımba radyüsü $R=6$ mm’de sayısal olarak elde edilmiş çekme oranlarının deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.67. $R=6$ mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen limit çekme oranlarının değişimi

Şekil 6.67’den görüldüğü gibi en düşük sayısal limit çekme oranı $\alpha=0^\circ$, BPK=2450 N için $\beta=1,93$ olarak elde edilmiştir. En büyük çekme oranı ise $\alpha=10^\circ$, BPK=7350 N için $\beta=2,34$ olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşım oranlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç $\alpha=0^\circ$, BPK=4900 N için % 5,72 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $\alpha=10^\circ$, BPK=4900 N için % 0,87 olarak elde edilmiştir. $R=6$ mm’lik kalıp için yapılan deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının her ikisi de α ’nın artışına bağlı olarak limit çekme oranları da artmaktadır.

Şekil 6.68’de matris/zimba radyüsü R=8 mm’de sayısal olarak elde edilmiş çekme oranlarının deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.

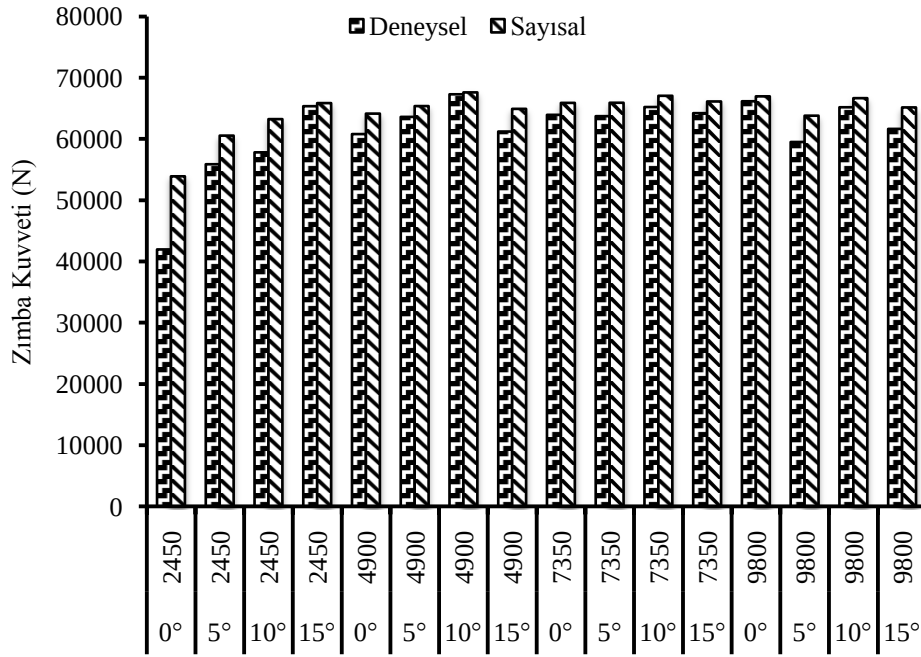


Şekil 6.68. R=8 mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen limit çekme oranlarının değişimi

Şekil 6.68’den görüldüğü gibi en düşük sayısal limit çekme oranı $\alpha=0^\circ$, BPK=2450 N için $\beta=2,15$ olarak elde edilmiştir. En büyük çekme oranı ise $\alpha=5^\circ$, BPK=7350 N için $\beta=2,34$ olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman en uzak sonuç $\alpha=10^\circ$, BPK=7350 N için % 2,15 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $\alpha=10^\circ$, BPK=9800 N için % 0,43 olarak elde edilmiştir. R=8 mm’lik kalıp için yapılan deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının her ikisi de α ’nın artışına paralel olarak limit çekme oranlarında arttığı görülmektedir.

Sayısal analiz programından elde edilmiş olan en büyük zımba kuvvetlerinin deneysel çalışma sonucunda elde edilmiş olan zımba kuvvetleri ile karşılaştırmaları her bir matris/zımba radyüsü için grafikler halinde sunulmuştur.

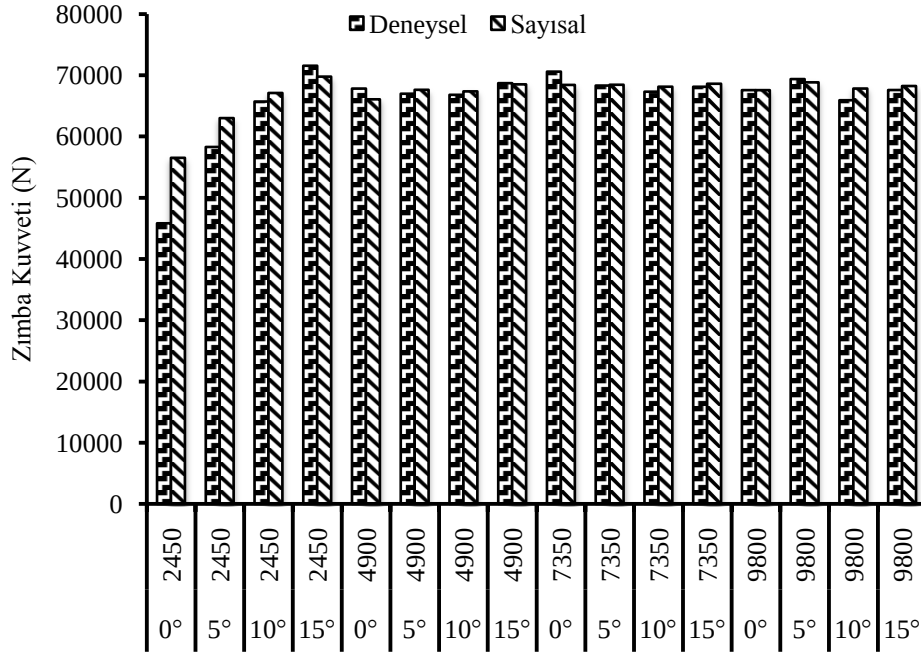
Şekil 6.69’da matris/zımba radyüsü $R=4$ mm’de sayısal olarak elde edilmiş en büyük zımba kuvvetlerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.69. $R=4$ mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen zımba kuvvetlerinin değişimi

Şekil 6.69’den görüldüğü gibi en düşük sayısal zımba kuvveti $\alpha=0^\circ$, $BPK=2450$ N için 53903,59 N olarak elde edilmiştir. En büyük zımba kuvveti ise $\alpha=0^\circ$, $BPK=9800$ N için 66959,97 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşım oranlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç $\alpha=0^\circ$, $BPK=2450$ N için % 22,14 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $\alpha=10^\circ$, $BPK=4900$ N için % 0,76 olarak elde edilmiştir. $R=4$ mm’lik kalıp için yapılan deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının her ikisi de BPK’nın artışına paralel olarak zımba kuvveti de artış göstermektedir.

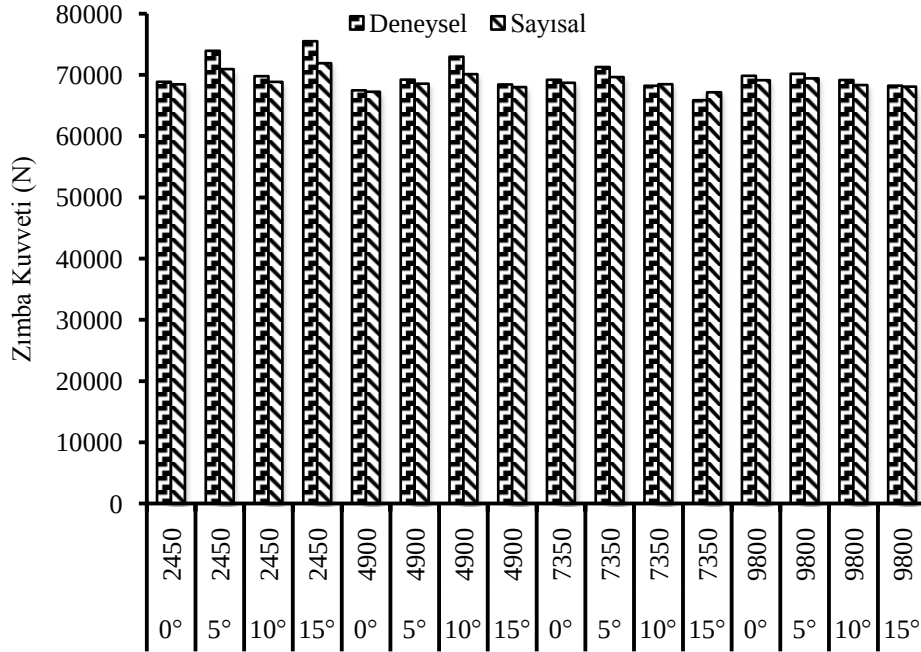
Şekil 6.70’de matris/zimba radyüsü R=6 mm’de sayısal olarak elde edilmiş en büyük zimba kuvvetlerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.70. R=6 mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen zimba kuvvetlerinin değişimi

Şekil 6.70’den görüldüğü gibi en düşük sayısal zimba kuvveti $\alpha=0^\circ$, BPK=2450 N için 56497,5 N olarak elde edilmiştir. En büyük zimba kuvveti ise $\alpha=15^\circ$, BPK=2450 N için 69757,71 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşım oranlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç $\alpha=0^\circ$, BPK=2450 N için % 18,91 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $\alpha=0^\circ$, BPK=9800 N için % 0,71 olarak elde edilmiştir. R=6 mm’lik kalıp için yapılan deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının her ikisi de BPK’nın artışına paralel olarak zimba kuvveti de artış göstermektedir.

Şekil 6.71’de matris/zımba radyüsü R=8 mm’de sayısal olarak elde edilmiş en büyük zımba kuvvetlerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 6.71. R=8 mm’de deneysel ve sayısal olarak elde edilen zımba kuvvetlerinin değişimi

Şekil 6.71’den görüldüğü gibi en düşük sayısal zımba kuvveti $\alpha=15^\circ$, BPK=7350 N için 67155,52 N olarak elde edilmiştir. En büyük zımba kuvveti ise $\alpha=15^\circ$, BPK=2450 N için 71905,83 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşım oranlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç $\alpha=0^\circ$, BPK=2450 N için % 4,75 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $\alpha=15^\circ$, BPK=9800 N için % 0,23 olarak elde edilmiştir. R=8 mm’lik kalıp için yapılan deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının her ikisi de BPK’nın artışına paralel olarak zımba kuvveti de artış göstermektedir.

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, derin çekme yönteminde limit çekme oranı üzerine etkisi olan parametreler deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde 0,9 mm kalınlığında DIN EN 10130–1999 sac malzeme kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, limit çekme oranı, zımba kuvveti ve et kalınlıklarına etki eden parametreler; matris/zımba radyüsü, baskı plakası kuvveti ve matris/baskı plakası yüzeylerine verilen açılardır. Bu parametrelerin farklı seviyeleri derin çekme işlemine uygulanarak elde edilen kabın optimum olduğu durumdaki parametre seviyeleri belirlenmeye çalışılmıştır. Deneysel sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilerek parametre etkinlikleri ve optimum seviyeleri belirlenmiştir. Çalışma aynı zamanda, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayarda analiz edilmiştir. Analiz programından elde edilen limit çekme oranları, kap et kalınlıkları ve zımba kuvvetleri sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

7.1. Genel Sonuçlar

Matris/baskı plakası yüzeylerine verilen açının artmasıyla malzemenin kalıp içerisine akışını daha kolay olmasını sağlamış ve çekme işlemini olumlu yönde etkilemiştir. Açının artmasıyla beraber limit çekme oranının da arttığı belirlenmiştir. Kalıp açısı $\alpha=10^\circ$ olduğu durumda limit çekme oranının maksimum değerine ulaştığı ve bu açı değerinden sonra ise limit çekme oranında azalmanın olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan artan açı değerlerinin radyal kuvvetleri azalttığı ve buna bağlı olarak çekme işlemi sırasında ölçülen maksimum zımba kuvvetinin de azaldığı gözlenmiştir. Matris/baskı plakası açısının değişimi esnasında et kalınlığı artan açı değerleri ile beraber artış göstermiştir.

Matris/baskı plakası açıları için, baskı plakası kuvvetinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda, limit çekme oranı, zımba kuvveti ve et kalınlığı ile baskı kuvvetinin doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Baskı kuvvetinin düşük değerlerde olması, sac malzeme üzerinde ondülasyonlara sebep olmakta, oluşan bu ondülasyonlar da malzemelerin daha çabuk yırtılmasına, çekme oranlarının düşmesine ve zımba kuvvetlerinin de artmasına yol açmaktadır. Baskı plakası kuvvetinin, olması gereken değerlerin üzerinde seçilmesi durumunda ise, zımba kuvvetini artırdığı ve çekilen kaptaki

kulaklanmalara yol açtığı gözlenmiştir. Baskı plakası kuvvetinin azalan değerlerinde sürtünme kuvvetinin azalmasına bağlı olarak çekilen kabın kritik bölgesindeki et kalınlığının arttığı, tersi durumunda ise et kalınlığında azalmanın olduğu belirlenmiştir.

Matris/zimba radyüsünün artan değerleri, malzemenin kalıp içerisinde daha kolay akışına izin verdiği için çekme işlemini olumlu yönde etkilemiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, kullanılan zimba radyüsü değerlerindeki artışla orantılı olarak, malzemenin daha kolay çekilebildiği, zimba ve matris radyüslerinin düşen değerlerinde ise sac malzemelerin daha çabuk yırtıldığı ve bundan dolayı çekme oranlarının da düştüğü belirlenmiştir. Kalıp radyüslerinin artmasıyla, zimba kuvveti azalmış ve limit çekme oranları artmıştır. Ancak kalıp radyüsünün büyük değerlerde olması baskı plakasının etki alanının azalmasına ve sac malzeme üzerinde kırışmaların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durumda da hem zimba kuvveti artmakta, hem de oluşan ondülasyonlardan dolayı sac malzeme kalıp ile zimba arasında sıkışmakta ve daha çabuk yırtılarak limit çekme oranının azalmasına neden olmaktadır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan bütün çekme parametrelerinin, sonlu elemanlar metoduna dayalı olarak yapılan analizler sonucunda, çekme deneylerinde ölçülen zimba kuvvetleri, limit çekme oranları ve et kalınlıklarındaki değişimlerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Derin çekme işleminin sonlu elemanlar analizi için geliştirilen bu modelin, pratik uygulamalarda da kullanılabileceği düşünülmektedir. Kullanılan analiz sonuçları incelendiğinde, özellikle sac malzeme özellikleri ve malzeme üzerinde oluşan deformasyonlara bağlı olarak et kalınlıklarındaki değişimlerin, analiz programının çözümleme hassasiyetini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, matris/baskı plakası yüzeylerine açı vermenin limit çekme oranı, et kalınlığı ve zimba kuvveti üzerinde olumlu etkilerinin olduğu, deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir.

ANOVA sonuçlarına göre, parametrelerin etkinlik oranları dikkate alındığında limit çekme oranı ve zimba kuvveti için en etkin parametrenin kalıp radyüsü olduğu saptanmıştır. Bu oranlar limit çekme oranı ve zimba kuvvetinin her ikisi için de %38,52'dir. Bunun yanı sıra et kalınlığı için en etkili faktörün baskı plakası kuvveti olduğu ve bu faktörün etkinlik oranının %41,16 olarak belirlenmiştir. Matris/baskı plakası açısının limit çekme oranı üzerinde etkinlik oranı %17,25 ve kabın et kalınlığı üzerindeki etkinliğinin ise %5,78 olduğu tespit edilmiştir.

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; $\alpha=15^\circ$, BPK=7350N ve R=8 mm olarak tespit edilmiştir. Optimum zımba kuvveti için gerekli parametre konfigürasyonu; $\alpha=15^\circ$, BPK=7350 N ve R=8 mm olarak belirlenmiştir. Son olarak et kalınlığı için olan konfigürasyon ise $\alpha=15^\circ$, BPK=2450 N ve R=8 mm olduğu saptanmıştır.

7.2. neriler

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

Açılı kalıplarda çekme hızının ve çekme boşluğunun derin çekmeye olan etkileri araştırılabilir.

Alüminyum, bakır, paslanmaz elik v.b. sacların ve hadde yönünün etkisi açılı kalıp kullanılarak derin ekilebilirliğe etkisi araştırılabilir.

Soğuk şekillendirme olarak yapılan bu çalışma, ılık ve sıcak şekillendirme ile tekrarlanarak çalışma daha geniş ve kapsamlı bir hale getirilebilir.

Kalıp elemanları üzerinde oluşabilecek aşınmalar ve bu aşınma oranları belirlenebilir.

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

KAYNAKLAR

- [1] **Savaş, V. and Seçgin, Ö.**, 2007, A new type of deep drawing die design and experimental results, *Materials and Design*, **28**, 1330–1333.
- [2] **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 Technol*, **40**, 1077–1083.
- [3] **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.
- [4] **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.
- [5] **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.
- [6] **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.
- [7] **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.
- [8] **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 Usingartificial Neural Network, *Materials and Design*, **30**, 3193–3205.
- [9] **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.
- [10] **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.

- [11] **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.
- [12] **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.
- [13] **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.
- [14] **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.
- [15] **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.
- [16] **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.
- [17] **Vollertsen, F., Niehoff, H. S. and Wielage, H.**, 2009, On the acting pressure in laser deep drawing, *Production Engineering*, **3**, 1–8.
- [18] **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.
- [19] **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.
- [20] **Padmanabhan, R., Oliveira, M. C. and Menezes, L. F.**, 2008, Deep Drawing of Aluminum–Steel Tailor-Welded Blanks, *Materials and Design*, **29**, 154–160.
- [21] **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.
- [22] **E, D., Mizuno, T. and Li, Z.**, 2008, Stress Analysis of Rectangular Cup Drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, **205**, 469–476.

- [23] **Khelifa, M. and Oudjene, M.**, 2008, Numerical Damage Prediction in Deep-Drawing of Sheet Metals, *Journal of Materials Processing Technology*, **200**, 71–76.
- [24] **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.
- [25] **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.
- [26] **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.
- [27] **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.
- [28] **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.
- [29] **Gavas, M. and Izciler, M.**, 2007, Effect of Blank Holder Gap on Deep Drawing of Square Cups, *Materials and Design*, **28**, 1641–1646.
- [30] **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.
- [31] **Karalı, M.**, 2007, Derin Sac Çekme İşleminde Kalıp Boşluğunun Cidar Kalınlık Değişimine Etkilerinin Sonlu Elemanlar Analizi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **1**, 55–60.
- [32] **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.
- [33] **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.
- [34] **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.
- [35] **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.

- [36] **Zimniak, Z.**, 2000, Implementation of The Forming Limit Stress Diagram in FEM Simulations, *Journal of Materials Processing Technology*, **106**, 261-266.
- [37] **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.
- [38] **Marumo, Y. and Saiki, H.**, 1998, Evaluation of The Forming Limit of Aluminum Square Cups, *Journal of Materials Processing Technology*, **80-81**, 427-432.
- [39] **Gea, H. C. and Ramamurthy, R.**, 1998, Blank Design Optimization on Deep Drawing of Square Shells, *IIE Transactions*, **30**, 913-921.
- [40] **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.
- [41] **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.
- [42] **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.
- [43] **Gavas, M. ve Küçükrendeci, İ.**, 2004, Alüminyum Kare Kabın Derin Çekilmesinde Taslak Malzeme Şekillerinin Değerlendirilmesi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **4**, 185-200.
- [44] **Çapan, L.**, 2003. Metallere Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [45] **Kayalı, E.S., Çimenoglu, H.**, 1995. Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- [46] **Güneş, A.T.**, 2002. Pres İşleri Tekniği Cilt 2, Makine Mühendisleri Odası, Ankara.
- [47] **Topaç, M. M.**, 2003. Karbonlu Çeliklerde Derin Çekmeye Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [48] **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.
- [49] **Uzun, İ., ve Erişkin, Y.**, 2002. Sac Metal Kalıpcılığı, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, Ankara.
- [50] **Erişkin, Y.**, 1986. Uygulamalı Sac Metal Kalıp Konstrüksiyonu, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları, Ankara.

- [51] **Tzchaetsch, H.**, 2006. Metal Forming Practice, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- [52] **Raabe, D., Wang, Y. And Roters, F.**, 2005, Crystal Plasticity Simulation Study On The Influence Of Texture On Earing in Steel, *Computational Material Science*, **34**, 221 – 234.
- [53] **Altan, T.**, 1998. Metal Forming Handbook, Schuler Springer – Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- [54] **Simith, A. D.**, 1990. Die Design Handbook, Society of Manufacturing Engineers, **10**, Michigan.
- [55] **Kayalı, E. S., ve Ensari, C.**, 2000. Metallerde Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları, İ.T.Ü. Kimya – Metalürji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [56] **Çimenoglu, H., ve Kayalı E. S.**, 1986. Malzemelerin Yapısı ve Dinamik Davranışları, İ.T.Ü. Kimya – Metalürji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [57] **Kayalı E. S.**, 1997. Mekanik İşlem Hasarları, T.M.M.O.B. Metalurji Mühendisleri Odası Hasar Analizi Seminer Notları, İstanbul.
- [58] **Alpers, B., Bergmann, D., Galanulis, K. And Winter, D.**, 2000. Advanced Deformation Measurement in Sheet Metal Forming, GOM, Gesselscheft für Optisch Meßtechnik, Germany.
- [59] <http://www.biymed.com/femmuh/analiz/fem/seynedir.htm> Sonlu Elemanlar Yöntemi. 25 Aralık 2010.
- [60] **Kırlı, O.**, 2003. Derin Çekme İle Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Non-Linear Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [61] **Yaşar, M.**, 2001. Yüksek hızda şekillendirilen alüminyum alaşımlarında oluşan deformasyon incelenmesi, *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [62] **Karalı, M.**, 2005. Derin sac çekme işleminde pot çemberi baskısının kontrolünün cidar kalınlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [63] <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Explicit+Dynamics/ANSYS+S+Explicit+STR#/1/12> Beverage Container. 11 Kasım 2010.
- [64] ANSYS Inc., ANSYS 12 Training Manual 1st Edition / Workbench - Mechanical Structural Nonlinearities, Multimedia CD, 2009.
- [65] **Lombard, M.**, 2010. SolidWorks 2010 Bible, Wiley Publishing Inc., Indianapolis.

- [66] **Enzhi, G., Hongwei, L., Hongchao, K., Hui, C., Jinshan, L. and Lian, Z.,** 2010. Finite Element Simulation on The Deep Drawing of Titanium Thin-Walled Surface Part, *Rare Metals*, **29**, 108 – 113.
- [67] **Dieter, G.E.,** 1984, Mechanical metallurgy, Mc Graw-Hill, Singapore.
- [68] **Sezek, S., Savas, V. and Aksakal, B.,** 2010. Effect of Die Radius on Blank Holder Force and Drawing Ratio: A Model and Experimental Investigation, *Materials and Manufacturing Processes*, **25**, 557–564.
- [69] **Singh, S. K., Mahesh, K., Kumar A. and Swathi, M.,** 2010. Understanding Formability of Extra Deep Drawing Steel at Elevated Temperature Using Finite Element Simulation, *Materials and Design*, **31**, 4478–4484.
- [70] **Merklein, M. and Gödel, V.,** 2009. Characterization of The Flow Behavior of Deep Drawing Steel Grades in Dependency of The Stress State and Its Impact on FEA, *International Journal of Material Forming*, **2**, 415–418.
- [71] **Gavas, M.,** 2009. Increasing The Drawing Height of Conical Square Cups Using Anti-Lock Braking System (ABS), *Journal of Mechanical Science and Technology*, **23**, 3079–3087.
- [72] **Saha, S., Pal, S. and Albright, J. A.,** 1982. Surgical drilling: design and performance of an improved drill, *J. Biomechanic Eng.*, **104**, 245 – 252.
- [73] **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.

ÖZGEÇMİŞ

11/01/1978 tarihinde Adana’da doğan Engin ÜNAL ilk, orta ve lise eğitimini Adana’da tamamladı. 1997 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Öğretmenliğini kazandı ve 2001 yılında bu bölümden başarıyla mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve 2003 yılında başarıyla tamamladı. Bir yıl kadar özel sektörde çalıştıktan sonra 2004 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi’ne araştırma görevlisi olarak atandı. 2005 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Ana Bilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı. Araştırma görevlisi olan Engin ÜNAL, evli ve bir çocuk babasıdır.

Engin ÜNAL

ELAZIĞ – 2011