

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK SAÇLARIN KARE KAP
DERİN ÇEKİLMESİNDE KALIP GEOMETRİSİ VE İŞLEM
PARAMETRELERİNİN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİLİĞE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Umutcan ÖZKAN

Yüksek Lisans Tezi

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Makina Mühendisliği Teknolojileri Programı

Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı

EKİM 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makina Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

**ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN KARE KAP DERİN
ÇEKİLMESİNDE KALIP GEOMETRİSİ VE İŞLEM
PARAMETRELERİNİN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİLİĞE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Tez Yazarı
Umutcan ÖZKAN

Danışman
Doç. Dr. Engin ÜNAL

EKİM 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makina Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Östenitik Paslanmaz Çelik Sacların Kare Kap Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi ve İşlem Parametrelerinin Şekillendirilebilirliğe Etkisinin Araştırılması

Yazarı: Umutcan ÖZKAN

İlk Teslim Tarihi: 09.09.2022

Savunma Tarihi: 27.10.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Doç. Dr. Engin ÜNAL Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Cebeli ÖZEK Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Vedat TAŞDEMİR Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Östenitik Paslanmaz Çelik Sacların Kare Kap Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi ve İşlem Parametrelerinin Şekillendirilebilirliğe Etkisinin Araştırılması” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

27.10.2022

Umutcan ÖZKAN



ÖNSÖZ

Bu Tez çalışmasının yapılmasında değerli bilgi, birikim ve deneyimlerini bir an olsun benden eksik etmeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Engin Ünal'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Aynı zamanda çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Cebeli Özek, Sn. Doç. Dr. Faruk Karaca ve Sn. Arş. Gör. Dr. Erman Çelik'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında ve bulunduğum eğitim seviyesine gelmemi sağlayan, hiçbir fedakârlıktan kaçmayan her kararında yanımda duran sevgili anne ve babama saygılarımı ve sevgilerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **TEKF.21.30** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir. Çalışmalar Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Etik Kurulunun 24/09/2021 tarih ve E-43865106-730.03.02-88181 sayılı izni ile gerçekleştirilmiştir.

Umutcan ÖZKAN
ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xiii
SİMGELER	xiv
KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. TEMEL BİLGİLER	14
3.1. İmalat Yöntemleri.....	14
3.2. Talassız İmalat.....	14
3.3. Plastik Şekil Değiştirme	14
3.4. Derin Çekme.....	21
3.4.1. Derin Çekmede Kullanılan Kalıp Parçaları	22
3.4.2. Derin Çekme Mekanığı	22
3.4.3. Derin Çekmede Oluşan Gerilmeler	23
3.5. Derin Çekme İşlemine Etki Eden Parametreler	26
3.5.1. Çekme Kuvveti.....	27
3.5.2. Baskı Plakası Kuvveti	28
3.5.3. Baskı Plakası Boşluğu	29
3.5.4. Matris-Baskı Plakası Açısı	30
3.5.5. Matris – Zimba Radyüsü	31
3.5.6. Limit Çekme Oranı.....	33
3.5.7. Çekme Hızı.....	34
3.5.8. Çekme Boşluğu	35
3.5.9. Sıcaklık.....	35
3.5.10. Yağlama	35
3.6. Derin Çekme İşleminde Görülen Hatalar	36
4. MATERYAL VE METOT	39
4.1. Çalışmanın Amacı	39
4.2. Deneysel Çalışmalar	39
4.3. İlkel Parça Boyutlarının Belirlenmesi.....	45
4.4. Sonlu Elemanlar Metodu Analizleri	45
5. DENEY SONUÇLARI	49
5.1. Deney Parametrelerinin Şekillendirilebilirliğe Olan Etkisi	49
5.1.1. Matris-Baskı Plakası Açısının Şekillendirilebilirliğe Etkisi	49
5.1.2. Matris Radyüsünün Şekillendirilebilirliğe Etkisi	60
5.1.3. Baskı Plakası Kuvvetinin Şekillendirilebilirliğe Etkisi	74
5.2. Maksimum Kuvvetlerin Karşılaştırılması.....	87

5.2.1. Matris-Baskı Plakası Açısının Maksimum Kuvvet Üzerindeki Etkisi	87
5.2.2. Matris Radyüsünün Maksimum Kuvvet Üzerindeki Etkisi	90
5.2.3. Baskı Plakası Kuvvetinin Maksimum Kuvvet Üzerindeki Etkisi	93
5.3. İlkel Parça Boyutlarının Numune Deformasyonlarına Olan Etkisi	96
5.4. Deney Parametrelerinin Kalınlığa Etkisi	99
6. SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZ.....	107
6.1. Sonlu Elemanlar Metodu Parametrelerinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	108
6.1.1. Matris-Baskı Plakası Açısının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	108
6.1.2. Matris Radyüsünün Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	111
6.1.3. Baskı Plakası Kuvvetinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi	114
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	118
8. SONUÇLAR.....	120
ÖNERİLER	122
KAYNAKLAR.....	123
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Östenitik Paslanmaz Çelik Sacların Kare Kap Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi ve İşlem Parametrelerinin Şekillendirilebilirliğe Etkisinin Araştırılması

Umutcan ÖZKAN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makina Mühendisliği Teknolojileri Programı
Ekim 2022, Sayfa: xv + 126

Bu çalışmada endüstride özellikle havacılık ve otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan östenitik paslanmaz çelik malzemelerin kare kap olarak derin çekme işleminde etkiyen parametrelerin şekillendirilebilirliğe olan etkileri araştırılmıştır. Kare kesitli kapların derin çekme işleminde ilkel parçanın işlenmesi sonrasında kapların yüzeylerinde yırtılmaya ve cidar bölgesinde incelmeye sıklıkla karşılaşılmaktadır. Derin çekme işleminde baskı plakası kuvveti, baskı plakası boşluğu, yağlama, çekme kuvveti, matris-baskı plakası açısı, çekme hızı, matris-zımba radyüsleri gibi şekillendirilebilirliğe büyük etkileri olan parametreler bulunmaktadır. Bu parametrelerin içerisinde matris-baskı plakası açısı 0° , 5° , 10° ve 15° olmak üzere 4 farklı açı değeri kullanılmıştır. Matris-zımba radyüsü 4 mm, 6 mm ve 8 mm olmak üzere 3 farklı radyüs değeri ve baskı plakası kuvveti 5500 N, 7950 N, 10400 N olmak üzere 3 farklı değerlerde kullanılarak şekillendirilebilirliğe olan etkisi araştırılmıştır. Kare kesitli kapların şekillendirilmesi sırasında kap üzerinde oluşan deformasyonların etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Aynı zamanda bu parametreler sonlu elemanlar metodu ile analiz edilip deneylerde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda kullanılan parametrelerin şekillendirilebilirliğe olumlu etkileri olmuştur. Parametre değerlerinin artması ile numunelerde deformasyonlar azalmıştır. Bütün deneysel çalışmalar sonucunda şekillendirilebilirliğe etki eden ideal parametreler; matris-baskı plakası açısı için 15° , matris-zımba radyüsü için 8 mm ve baskı plakası kuvveti için 10400 N olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kare kap, Derin çekme, Östenitik paslanmaz çelik, Şekillendirme, İşlem parametreleri

ABSTRACT

Investigation of The Effect of Die Geometry and Process Parameters on Formability in Square Cup Deep Drawing of Austenitic Stainless Steel Sheets

Umutcan ÖZKAN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Mechanical Engineering Technologies

October 2022, Pages: xv + 126

In this study, the effects of the parameters on the formability of the austenitic stainless steel materials, which are frequently used in the industry, especially in the aerospace and automotive sectors, on the formability of the square vessel deep drawing process were investigated. In the deep drawing process of square-section vessels, tearing on the surfaces of the vessels and thinning in the wall region are frequently encountered after processing the primitive part. In the deep drawing process, there are parameters that have great effects on formability such as the blank holder force, the blank holder gap, lubrication, deep drawing force, matrix-blank holder angle, drawing speed, matrix-punch radius. Among these parameters, 4 different angle values were used, namely the matrix-blank holder angle 0° , 5° , 10° and 15° . The effect of matrix-punch radius on formability was investigated by using 3 different radius values as 4 mm, 6 mm and 8 mm and blank holder force at 3 different values as 5500 N, 7950 N, 10400 N. The effects of the deformations that occur on the container during the shaping of the square-section vessels were investigated experimentally. At the same time, these parameters were analyzed with the finite element method and compared with the results obtained in the experiments. As a result of the experimental and numerical studies, the parameters used had positive effects on the formability. With the increase of parameter values, the deformations of the samples decreased. As a result of all experimental studies, ideal parameters affecting formability; 15° for the matrix-blank holder angle, 8 mm for the matrix-punch radius and 10400 N for the blank holder force.

Keywords: Square cup, Deep drawing, Austenitic stainless steel, Formability, Process parameters

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. İmalat yöntemlerinin sınıflandırılması [35].....	14
Şekil 3.2. Temel şekil değişimi; a) Basma, b) Çekme, c) Kayma [30].....	15
Şekil 3.3. Kayma düzlemi üzerindeki kuvvet bileşenleri [30].....	16
Şekil 3.4. Hooke eğrisi [36].....	17
Şekil 3.5. Derin çekme işleminin kesit görünümü [4]	22
Şekil 3.6. Derin çekme işleminde ayrılmış bölgeler [14]	23
Şekil 3.7. Derin çekme işleminin mekaniği [14]	24
Şekil 3.8. Derin çekme işleminde oluşan gerilmeler ve kalınlık değişimleri [14]	24
Şekil 3.9. Derin çekme işleminde buruşma ve kalınlık artışı [14].....	24
Şekil 3.10. Derin çekme işlemi sırasında bükme ve yırtılmalar [14].....	25
Şekil 3.11. Silindirik derin çekmede meydana gelen gerilmeler [10].....	25
Şekil 3.12. Derin çekme işlemine etki eden parametreler [38].....	26
Şekil 3.13. Baskı plakası boşluğunun şematik görünümü [16].....	30
Şekil 3.14. Matris – baskı plakası açısının şematik görünümü [12]	30
Şekil 3.15. Matris-zimba radyüsünün şematik görünümü [15].....	31
Şekil 3.16. Ortalama zimba çapının (dzimba) kare kap için belirlenmesi [47]	34
Şekil 3.17. Derin çekme işlemi ve temas yüzeyleri [51]	36
Şekil 3.18. Derin çekme işleminde görülen hatalar [15]	37
Şekil 4.1. Çekme deneyi test cihazı	41
Şekil 4.2. Çekme deneyi sonrası elde edilen çekme grafikleri	42
Şekil 4.3. Deney seti ve bağlı olduğu hidrolik pres tezgahı	44
Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan elemanların ölçüleri.....	45
Şekil 4.5. Baskı plakası ve matrisin ağ görünümü.....	46
Şekil 4.6. Zimba ve ilkel parçanın ağ görünümü	46
Şekil 4.7. Deney setinin montajlanmış görünümü	47
Şekil 4.8. Parametrelerin deney seti üzerinde uygulanışı	48
Şekil 5.1. R4 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zimba kuvveti	50
Şekil 5.2. R4 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler	50
Şekil 5.3. R4 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zimba kuvveti	51
Şekil 5.4. R4 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler	51
Şekil 5.5. R4 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zimba kuvveti	52

Şekil 5.6. R4 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler	52
Şekil 5.7. R6 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	53
Şekil 5.8. R6 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler	53
Şekil 5.9. R6 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	54
Şekil 5.10. R6 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler	55
Şekil 5.11. R6 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	55
Şekil 5.12. R6 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler	56
Şekil 5.13. R8 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	57
Şekil 5.14. R8 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler	57
Şekil 5.15. R8 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	58
Şekil 5.16. R8 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler	58
Şekil 5.17. R8 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	59
Şekil 5.18. R8 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler	59
Şekil 5.19. 0° için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	60
Şekil 5.20. 0° için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler	61
Şekil 5.21. 5° için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	62
Şekil 5.22. 5° için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler	62
Şekil 5.23. 10° için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	63
Şekil 5.24. 10° için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler	63
Şekil 5.25. 15° için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	64
Şekil 5.26. 15° için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler	64
Şekil 5.27. 0° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	65
Şekil 5.28. 0° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler	65
Şekil 5.29. 5° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	66
Şekil 5.30. 5° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler	67
Şekil 5.31. 10° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	68
Şekil 5.32. 10° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler	68
Şekil 5.33. 15° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	69
Şekil 5.34. 15° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler	69
Şekil 5.35. 0° için BPK'nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	70
Şekil 5.36. 0° için BPK'nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler	70
Şekil 5.37. 5° için BPK'nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	71
Şekil 5.38. 5° için BPK'nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler	71
Şekil 5.39. 10° için BPK'nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	72

Şekil 5.40. 10 ⁰ için BPK'nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler	72
Şekil 5.41. 15 ⁰ için BPK'nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	73
Şekil 5.42. 15 ⁰ için BPK'nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler	73
Şekil 5.43. 0 ⁰ ve 4 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	74
Şekil 5.44. 0 ⁰ ve 4 mm olduğu durumda elde edilen numuneler	75
Şekil 5.45. 5 ⁰ ve 4 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	76
Şekil 5.46. 5 ⁰ ve 4 mm olduğu durumda elde edilen numuneler	76
Şekil 5.47. 10 ⁰ ve 4 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	77
Şekil 5.48. 10 ⁰ ve 4 mm olduğu durumda elde edilen numuneler	77
Şekil 5.49. 15 ⁰ ve 4 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	78
Şekil 5.50. 15 ⁰ ve 4 mm olduğu durumda elde edilen numuneler	78
Şekil 5.51. 5 ⁰ ve 6 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	79
Şekil 5.52. 5 ⁰ ve 6 mm olduğu durumda elde edilen numuneler	79
Şekil 5.53. 10 ⁰ ve 6 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	80
Şekil 5.54. 10 ⁰ ve 6 mm olduğu durumda elde edilen numuneler	80
Şekil 5.55. 15 ⁰ ve 6 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	81
Şekil 5.56. 15 ⁰ ve 6 mm olduğu durumda elde edilen numuneler	82
Şekil 5.57. 0 ⁰ ve 8 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	83
Şekil 5.58. 0 ⁰ ve 8 mm olduğu durumda elde edilen numuneler	83
Şekil 5.59. 5 ⁰ ve 8 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	84
Şekil 5.60. 5 ⁰ ve 8 mm olduğu durumda elde edilen numuneler	84
Şekil 5.61. 10 ⁰ ve 8 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	85
Şekil 5.62. 10 ⁰ ve 8 mm olduğu durumda elde edilen numuneler	85
Şekil 5.63. 15 ⁰ ve 8 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti	86
Şekil 5.64. 15 ⁰ ve 8 mm olduğu durumda elde edilen numuneler	87
Şekil 5.65. 4 mm için Matris-Baskı plakası açısının maksimum kuvvet üzerindeki etkisi.....	88
Şekil 5.66. 6 mm için Matris-Baskı plakası açısının maksimum kuvvet üzerindeki etkisi.....	89
Şekil 5.67. 8 mm için Matris-Baskı plakası açısının maksimum kuvvet üzerindeki etkisi.....	90
Şekil 5.68. 5500 N için Matris radyüsünün maksimum kuvvet üzerindeki etkisi	91
Şekil 5.69. 7950 N için Matris radyüsünün maksimum kuvvet üzerindeki etkisi	92
Şekil 5.70. 10400 N için Matris radyüsünün maksimum kuvvet üzerindeki etkisi	93
Şekil 5.71. 4 mm için BPK'nın maksimum kuvvet üzerindeki etkisi.....	94
Şekil 5.72. 6 mm için BPK'nın maksimum kuvvet üzerindeki etkisi.....	95
Şekil 5.73. 8 mm için BPK'nın maksimum kuvvet üzerindeki etkisi.....	96

Şekil 5.74. 100 mm ve 105 mm ilkel parça çapında BPK'nın değişimi ile oluşan deformasyonlar	97
Şekil 5.75. Deneysel çalışmalar sonucunda oluşan çeşitli deformasyonlar ve hatalar	97
Şekil 5.76. BPK'nın 5500 N olduğu durumda ilkel parça çaplarının şekillendirilebilirliğe olan etkisi	98
Şekil 5.77. BPK'nın 7950 N olduğu durumda ilkel parça çaplarının şekillendirilebilirliğe olan etkisi	98
Şekil 5.78. BPK'nın 10400 N olduğu durumda ilkel parça çaplarının şekillendirilebilirliğe olan etkisi	98
Şekil 5.79. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen numunenin kalınlık ölçümüne hazırlanması	99
Şekil 5.80. 5500 N için kalınlık değişimi	100
Şekil 5.81. 7950 N için kalınlık değişimi	100
Şekil 5.82. 10400 N için kalınlık değişimi	101
Şekil 5.83. 0° için kalınlık değişimi	102
Şekil 5.84. 5° için kalınlık değişimi	102
Şekil 5.85. 10° için kalınlık değişimi	103
Şekil 5.86. 15° için kalınlık değişimi	104
Şekil 5.87. R=4 mm için kalınlık değişimi	105
Şekil 5.88. R=6 mm için kalınlık değişimi	105
Şekil 5.89. R=8 mm için kalınlık değişimi	106
Şekil 6.1. Geometrik unsurları oluşturan ağ görüntüsü	107
Şekil 6.2. Matris-baskı plakası açısının 0° olduğu durumda et kalınlığı değişimi	108
Şekil 6.3. Matris-baskı plakası açısının 5° olduğu durumda et kalınlığı değişimi	109
Şekil 6.4. Matris-baskı plakası açısının 10° olduğu durumda et kalınlığı değişimi	109
Şekil 6.5. Matris-baskı plakası açısının 15° olduğu durumda et kalınlığı değişimi	110
Şekil 6.6. Matris-baskı plakası açısının değişimi ile et kalınlığı değişimi	111
Şekil 6.7. Matris radyüsünün 4 mm olduğu durumda et kalınlığı değişimi	112
Şekil 6.8. Matris radyüsünün 6 mm olduğu durumda et kalınlığı değişimi	112
Şekil 6.9. Matris radyüsünün 8 mm olduğu durumda et kalınlığı değişimi	113
Şekil 6.10. Matris-radyüsünün değişimi ile et kalınlığı değişimi	114
Şekil 6.11. BPK'nın 5500 N olduğu durumda et kalınlığı değişimi	115
Şekil 6.12. BPK'nın 7950 N olduğu durumda et kalınlığı değişimi	115
Şekil 6.13. BPK'nın 10400 N olduğu durumda et kalınlığı değişimi	116
Şekil 6.14. BPK'nın değişimi ile et kalınlığı değişimi	117

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Bazı metallerin kristal yapıları [30]	18
Tablo 3.2. Matris radyüsü için önerilen değerler [15].....	32
Tablo 3.3. Çeşitli malzemelerin tek ve çift etkili çekme hızı değerleri [48]	34
Tablo 3.4. Derin çekme işleminde görülen hatalar ve sebepleri [10].....	38
Tablo 4.1. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik kimyasal özellikleri	40
Tablo 4.2. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemenin fiziksel özellikleri	40
Tablo 4.3. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemenin mekanik özellikleri	42
Tablo 4.4. Derin çekme deney parametrelerinin değerleri	43
Tablo 4.5. Sonlu elemanlar metodu analizlerinde kullanılan ilkel parça malzemesinin mekanik özellikleri..	46

SİMGELER

C	: Malzeme sabiti(N/mm ²)
D	: İlk çap (mm)
D	: İlk parça çapı (mm)
D	: Malzeme sabiti
d	: Zımba çapı (mm)
d _{it}	: Zımbanın iç teğet daire çapı
D _{max}	: İlk parça çapı
d _{ot}	: Zımbanın dış teğet daire çapı
d _{zımba}	: Zımbaya teğet daire çapı
E	: Elastisite modülü
F _b	: Baskı plakası kuvveti (N)
F _z	: Çekme kuvveti (N)
L	: Malzemenin deformasyondan sonraki uzunluğu (mm)
L ₀	: Malzemenin deformasyondan önceki uzunluğu (mm)
m	: Deformasyon hızı duyarlılığı üssü
n	: Katsayısı
p	: Baskı plakası basıncı (N/mm ²)
R	: Matris Radyüsü
r _e	: Matris köşe radyüsü (mm)
r _k	: Kalıp radyüsü (mm)
R _m	: Malzeme çekme dayanımı (N/mm ²)
R _m	: Malzemenin kopma dayanımı (N/mm ²)
r _m	: Matris radyüsü
r _p	: Zımba radyüsü
s	: Malzeme kalınlığı (mm)
T	: Deformasyon sıcaklığı
T _m	: Erime sıcaklığı
T _{yk}	: Yeniden kristalleşme sıcaklığı
V	: Pres hızı
V _{OC}	: Açık devre gerilimi
α	: Matris-baskı plakası açısı
β	: Limit çekme oranı
B _{gerçek}	: Gerçek çekme oranı (mm).
γ	: Kayma şekil değiştirme
ε	: Birim şekil Değiştirme
ε̇	: Gerçek deformasyon hızı (mm/s),
σ	: Çekme gerilmesi
τ	: Kayma gerilmesi

KISALTMALAR

AA	: Aluminum alloy
AISI	: American iron and steel institute
AL	: Alüminyum
ANOVA	: Analysis of variance
BPB	: Baskı plakası boşluğu
BPK	: Baskı plakası kuvveti
CNC	: Computer numeric control
DÇK	: Derin çekme kuvveti
DIN	: Deutsches Institut für Normung
DP	: Dual phase
EDD	: Extra deep drawing
EN	: European norm
Etial	: Eti alüminyum
FEM	: Finite element method
HMK	: Hacim merkezli kübik
HSLA	: High strength low alloy
IF	: Interstitial free
LÇO	: Limit çekme oranı
Mg	: Magnezyum
PTFE	: politetrafloroetilen
SLM	: Selective laser melting
SPS	: Sıkı paket hekzagonal
SS	: Stainles steel
YMK	: Yüzey merkezli kübik

1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde üretime etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi zamandır. Gelişen üretim endüstri ile birlikte parçaların üretim zamanının düşürülmesi ekonomik açıdan büyük önem arz etmektedir. Üretim maliyetinin azaltılması üretimi gerçekleştirecek olan ürüne en uygun üretim yöntemi ile mümkündür. Örneğin talaş kaldırma işlemine uygun bir parçayı plastik şekil değiştirme yöntemleri ile üretimi birçok açıdan uygunsuzdur. Parçaların seri üretimi açısından zaman ve maliyet incelendiğinde, sac metal kalıpcılığı imalat yöntemi üretim süresi ve ürün kalitesi bakımından uygun parça üretiminde diğer imalat yöntemlerine göre avantajları daha fazla olduğu görülmektedir. Sac metal kalıpcılığı yönteminde işleme, kesme, delme, bükme, şekil verme ve derin çekme gibi üretim yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bundan dolayı sac metal kalıpcılığı tekniğinde kullanılan yöntem ve parametrelerin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Malzemeye uygun parametre seçimi ile üretim hatalarının önüne geçilebilmektedir.

Derin çekme kısaca yassı bir sac levhadan 3 boyutlu bir kap elde işlemidir. Derin çekme işleminin gerçekleşmesi için 3 temel eleman bulunmaktadır. Bunlar matris, baskı plakası ve zımbadır. Derin çekme işleminde ilkel parça matris ile baskı plakası arasında bulunur. Hidrolik pres vasıtasıyla zımba ve matris ilkel parça üzerine radyal kuvvetler etkiyerek kalıbın içine çekilir. Bu sırada matris içine girmemiş bölgelerde çevresel kuvvetler oluşur. Uygun kuvvetlerin etkisiyle ilkel parça tamamen kalıbın içine girer ve kalıbın şeklini alır.

Derin çekme işleminde malzemenin deformasyona uğramadan uygun şekle gelmesi için etkiyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerinin fazlalığı derin çekme işlemini diğer sac metal kalıpcılığı işlemlerinden daha karmaşık bir hale getirmektedir. Bu parametreler direkt olarak ürün kalitesine etki etmektedir. Baskı plakası kuvveti (BPK), baskı plakası boşluğu, ilkel parça boyutları, üretimi yapılacak malzemenin kimyasal özellikleri, çekme kuvveti, matris-zımba radyüsleri, matris-baskı plakası açısı gibi parametreler derin çekme işlemine etki eden parametreler içerisinde en önemlileridir. Derin çekme işleminde yassı şekilde bulunan ilkel parçanın zımbanın radyal kuvvetiyle matris içine akışını kontrol edebilmek büyük önem arz etmektedir. Bu akış malzemenin deformasyona uğrayıp uğramadığının temel açıklamasıdır. Bu akışı kontrollü bir şekilde sağlamak için baskı plakası hidrolik pressten aldığı radyal kuvveti ilkel parça yüzeyine aktarmaktadır. Böylelikle ilkel parçanın matris içerisine akışı kontrol altında gerçekleşir. Baskı plakasının kuvvetinin fazla olması ise ilkel parça üzerinde kırılmaya veya kopmaya neden olabilir. Bu sebepten ötürü derin çekme işlemindeki parametreler için en uygun değerler parçanın deformasyona uğramadan üretimini sağlayacaktır. Böylelikle üretim süresi kaybı, hammadde kaybı gibi maliyetleri azaltacaktır.

Derin çekme işlemindeki parametrelerin uygun olarak seçilmesi için ön denemeler yapılması gerekmektedir. Bu da yine üretim maliyetlerine sebep olmaktadır. Bu maliyetlerden kurtarmak adına sonlu elemanlar metodu kullanılarak parametrelerin belirlenmesinde büyük yardımcı olmaktadır. Sonlu elemanlar metodu ile deney seti bilgisayar ortamında modellenerek gerekli parametrelerin denenerek analiz edilmesi sonucunda malzemede oluşacak deformasyonlar gözlemlenecektir ve böylelikle uygun parametre seçimi gerçekleştirilecektir.

Bu tez çalışmasında derin çekme işlemine etkiyen parametrelerden matris radyüsü, matris-baskı plakası açısı ve BPK farklı seviyelerde değiştirilerek bu parametrelerin şekillendirilebilirliğe olan etkileri araştırılmıştır. Bununla birlikte aynı parametreler sonlu elemanlar metodu ile sayısal ortamda analiz edilerek deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Böylelikle deneysel ve teorik çalışmalar eş zamanlı olarak yürütülmüştür. Bunun en büyük faydası ise parametre seviyelerinin doğru seçilmesi konusundaki yardımudur. Yapılacak olan deneylerde 0,8 mm kalınlığında AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sac malzeme kullanılmıştır. Bu sac levhalar limit çekme oranı üzerinden hesaplanarak farklı daire çaplarında CNC lazer ortamında kesilerek deney setine uygun hale getirilmiştir. Bu deneylerde Matris-baskı plakası açısı 0^0 , 5^0 , 10^0 ve 15^0 olmak üzere 4 farklı açı değeri değiştirilerek uygulanacaktır. Matris-zimba radyüsü 4 mm, 6 mm ve 8 mm olmak üzere 3 farklı radyüs değeri kullanılmıştır. BPK 5500 N, 7950 N, 10400 N olmak üzere 3 farklı değer kullanılmıştır. Yapılan deneyler ile ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak sayısal ortamda gerçekleştirilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında büyük oranda benzerlik gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda burada kullanılan parametrelerin derin çekme işlemine faydaları olduğu, ilkel parçanın işlenmesi sonucunda elde edilen numunenin bu parametreler ile daha optimal seviyede çıktığı gözlemlenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Derin çekme işlemlerinde derin çekmeye etki eden parametrelerin malzeme kalitesi ve limit çekme oranına etkisini belirlemek amacıyla çok fazla çalışmalar bulunmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde optimum numuneleri elde etmek için derin çekme işlemi sırasında oluşan çeşitli deformasyonların, numunende bulunan kalınlık değişimlerinin, gerilmelerin incelendiği görülmektedir. Aynı amaçla literatürde sonlu elemanlar metodu kullanılarak elde edilen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların ortak noktası ise derin çekme işlemine en uygun parametreleri tespit etmek ve en uygun ürünü endüstriye sağlamaktır.

Kayhan E. ve Kaftanoğlu B. [1] yüksek mukavemetli çeliklerin derin çekme işleminde çekme oranının geliştirmesi için deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada DP600, IF, HSLA çeliklerine ait olan derin çekme sınır oranın artırılmasını amaçlamıştır. Bu deneyde ilkel parçayı derin çekme işlemi öncesinde orta bölümünü 180-270 ° C arasında sıcaklık değişimi uygulanmıştır. Bu sıcaklık ilkel parçanın kenar bölümünden indüksiyon ile ısıtılmıştır. Bu işlemten sonra ilkel parçanın zımba deliğinden su damlatarak soğutulması yapılmıştır. Ön ısıtma sonucunda numunenin yüzey sıcaklığındaki değişim orta bölgesi içinde iki farklı noktaya odaklanmış kızıl ötesi sıcaklık ölçüm cihazlarından alınan veriler ile takip edilerek kontrollü ısıtma uygulamıştır. Burada sıcaklık ölçümünde kullanılan sensörlerden bir tanesini 45° açı ile konumlandırmıştır. Diğerini ise malzemeye dik olacak şekilde konumlandırmıştır. Yapmış olduğu deney setinde ilkel malzemenin kalınlığı 0,8-1,57 Aralığında 4 farklı değer ile yapmıştır. DP600, IF ve HSLA çelikleri ile gerçekleştirilen ılık çekme deneylerinde, limit çekme oranlarında (LÇO), oda sıcaklığında ölçülen değerlere göre %25,58 e kadar artış sağlanmıştır. Yapmış olduğu deneyler sonucunda derin çekme işleminin ılık sıcaklık seviyesinde yapılması, malzemenin içyapısında belirgin bir değişimin gerçekleşmesini önlenmiştir. Numunenin sıcaklığının artırılması ile uygulanan zımba kuvveti azalmış, numunenin ılık sıcaklık seviyesinde ısıtılmış olmasından dolayı malzeme içyapısında bariz bir değişim gerçekleşmemiş, yapılan sertlik ve kalınlık ölçümlerinde kabın taban bölgesine yakın bölgelerde birbirine yakın, ağız bölgesinde ise sınırlı miktarda farklılık tespit etmiştir.

Luo L. ve diğerleri [2] SS 304 kapların mikro derin çekme işleminde baskı plakası boşluğunun etkilerini araştırmışlardır. Çeşitli tane boyutları elde etmek için 50 µm kalınlığındaki SS 304 folyoların tavlanması gerçekleştirilmişlerdir. Folyoların stres-gerinim eğrilerini elde etmek için mikro-çekme testi yapıldı, ardından mikro derin çekme deneylerini yapmışlardır. Uygun boşluk boyutu ve matris-zımba radyüsü bir kombinasyonu, maksimum çekme kuvveti ortaya çıkmadan önce matris içi geri esnemeye neden olabilir. Yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda nispeten küçük bir boşluk, kırılma riskini açıkça artırmadan duvar kalınlığının düzgün dağılımı için uygundur. Aynı zamanda, dış yüzeyin genel şekil doğruluğunu artırırken, iç yüzey bozulmasına neden olabilir. Çizilmiş kap üzerinde tanımlanan üç alanda şekil doğruluğunun

karmaşık gelişimi, boşluk boyutunun, malzeme homojensizliğinin ve folyonun yüzey morfolojisinin bağlı etkisine bağlanabilir. Baskı plakası-matris boşluk boyutu, çekme kuvveti üzerinde hafif bir etkiye sahipken, boşluk ve matris-baskı plakası arasındaki temasları önemli ölçüde etkiler. Boşluk boyutu 58'den 53 μm ' ye düştüğünde, baskı plakasındaki temas kuvveti iki katına çıkar ve bu da önemli aşınma nedeniyle mikro derin çekme takımlarının hizmet ömrünü azaltabilir. Çekme kap üzerindeki duvar kalınlığının homojen olmayan dağılımını azaltmak ve kırılma riskini arttırmamak için küçük bir boşluk tercih edilebilir. Küçük boşluk, özellikle alt alanda ve iç geçiş alanında, dış yüzeyin şekil doğruluğunu iyileştirir. Ayrıca boşluk boyutu arttıkça yan duvar alanındaki şekil bozulmaları ve yüzey yırtılmalarının azaldığını tespit etmişlerdir.

Dal S. R. [3] derin çekme işleminde kırışma analizi yapmıştır. Bu çalışmada kare ve silindirik kesitli kapların derin çekme işlemi üretimi sırasında oluşan kırışmaları sonlu elemanlar metodu ile incelemiştir. Bu çalışmada, kare ve silindirik derin çekme işlemlerinde görülen buruşma Von Mises, CPB06ex2, BBC2008-8p, BBC2008-16p, Hill'48 akma kriterleri ve izotropik, kinematik ve birleşik pekleşme modelleri kullanılarak elde edilmiş bünye denklemleri ile incelemiştir. Yapılan çalışmada sac metal olarak AA 5042-H2 alüminyum alaşımını kullanmışlardır. Sac kalınlığını 1 mm olarak seçmişlerdir. Geliştirilen modellerin doğruluğunu kanıtlamak için literatürde yapılan deneysel çalışmalardan faydalanmıştır. Sonlu elemanlar metodu ile yapmış olduğu analizler sonucu işlenmiş parça üzerinde çıkan kırışıklık sayılarını literatürle karşılaştırdığında deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu tespit etmiştir. Çalışmasında kullanmış olduğu CPB06ex2 akma kriterinden yola çıkarak yapmış olduğu analizde kırışıklık profili ve zımba kuvveti ölçümünde kullanmış olduğu diğer modellere göre deneylere daha yakın sonuçlar vermiştir. Ayrıca, boş tutma kuvvetinin buruşma üzerindeki etkisini bulmak için silindirik ve kare plakalar kullanılarak yapılan derin çekme işlemini analiz etmiştir. 5.5 mm'deki yan duvar kırışma profili için, deneysel buruşma genliği ile sayısal sonuçlar arasında kayda değer sapmalar olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca diyagramlar, kinematik sertleşme modelinin kırışma profili tahmininde başarısız olduğunu göstermektedir. Bunlara ek olarak kare plakaların derin çekme işleminde, silindirik parçaların derin çekme işlemine göre kırışıklığı önlemek adına daha fazla Baskı plakası kuvveti uygulanması gerektiğini tespit etmiştir.

Gallee S. ve Pilvin P. [4] iki fazlı bir model kullanarak yarı kararlı bir östenitik paslanmaz çeliğin derin çekme analizini gerçekleştirmiştir. Östenitik paslanmaz çeliğin soğuk şekillendirme sırasında plastik deformasyonunun neden olduğu martenzit dönüşümünü hesaba katmak için Gallée ve diğerleri (2007) tarafından iki fazlı elastoviskoplastik tipte bir model geliştirilmiştir. Bu iki fazlı modelin kullanılmasındaki amaç silindirik formundaki bir kabın derin çekme işlemini sonlu elemanlar metodu ile araştırırken östenitik paslanmaz çeliğin davranışlarını tanımlamaktır. Bu modelin amacı, her fazın (östenit ve martenzit) bireysel davranışını ve hacim fraksiyonunu dikkate alarak çeliğin davranışını makroskopik ölçekte karakterize etmektir. Yapmış olduğu çalışmalar

sonucu İki fazlı model, östenitik fazın davranışını ve bu tür paslanmaz çelikte deformasyon tarafından indüklenen martenzit fazın davranışını ortaya çıkarır. Bu iki fazlı model, basma yükü- yer değiştirme eğrisinde iyi sonuçları verir, ancak kalınlık dağılımının incelenmesinde etkisi daha azdır.

Collins D.A. ve diğerleri [5] dökme östenitik paslanmaz çeliklerin uzun süreli termal yaşlanmanın kırılma direnci üzerindeki etkilerini araştırmak için çalışmalar yapmışlardır. Nükleer reaktörlerde kullanılan östenitik paslanmaz çeliklerin termal yaşlanma bozulmasına bağlı kırılma direnci kaybı, nükleer reaktörlerin uzun vadeli (80+ yıl) kullanılabilirliğini etkileyen potansiyel bir sınırlayıcı faktördür. Yapmış oldukları bu çalışmada kimyasal ve mikroyapısal açıdan çeşitli östenitik paslanmaz çelikleri 80+ yıl kullanımını simüle etmek için 290-400 ° C arasında 30000 saatte yaşlandırmışlardır. Bu çalışmalar sonucu hem ferrit hacim oranı hem de molibden içeriğinin termal bozunma duyarlılığı üzerinde önemli etkileri olduğu bulundu. Ferrit fazdaki kadar etkileyici olmasa da termal yaşlanma östenit fazının kırılma tokluğunun azalmasına yol açacaktır ve muhtemelen elementel göçün yanı sıra istifleme arıza enerjisinde yaşlanmanın neden olduğu değişiklikler nedeniyle ikizlenebilirlik ve martenzit dönüştürülebilirlikteki değişikliklerden kaynaklanmaktadır.

Zhang H. ve diğerleri [6] eklemeli olarak üretilmiş SLM 304L östenitik paslanmaz çeliklerin yorulma deneyindeki performansını değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, farklı tarama hızları ile yapılan seçici lazer ergitme (SLM) 304L östenitik paslanmaz çeliğin yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Seçici lazer eritme (SLM), karmaşık geometrilere sahip ve geleneksel üretim yöntemlerinin tasarım kısıtlamaları olmayan metal bileşenler için bir eklemeli üretim yöntemidir. Amaç, SLM 304L'nin mikro yapısını, yorulma arızası sürecini ve yorulma arızası mekanizmasını derinlemesine anlamaktır. Yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda SLM 304L SS'nin mükemmel yorulma performansına sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca aktif dislokasyon hareketlerinden kaynaklanan ve depolanan enerjinin neden olduğu sıcaklık artışı, yorulma testi sırasında dislokasyon hareketlerini düzenleyerek yüklemeye yönü ve tarama yönünden etkilenir. SLM 304L, yüksek stres seviyesinde üstün yorulma performansı sergilediğini ve artan tarama hızı, SLM 304L östenitik paslanmaz çeliğin yüzey pürüzlülüğünü ve gözenekliliğini artırmıştır. Fakat düşük seviyede lazer gücü uygulamanın yüzey pürüzlülüğüne ve gözenekliliğine negatif yönde etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Bu iki özelliğin malzemenin yorulma deneyleri üzerindeki kritik değer olduğunu bulmuşlardır. Gözeneklilik %7-9'dan yüksek olduğunda yorulma ömründe gözeneklilik kritik bir faktör oluştururken, gözeneklilik %7-9'dan düşük olduğunda yüzey pürüzlülüğü yorulma ömründe kritik bir faktördür. Düşük kalıntı gerilme, gerilme gevşemesi ve artık gerilme ile yorulma ömrü arasındaki korelasyon olmaması nedeniyle yorulma ömrü üzerinde zayıf bir etki olarak kabul edilir.

Tekaslan Ö. [7] AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğine bağlı olarak kalıcı gerilme problemleri üzerine bir doktora tezi yayınlamıştır. Bu tezde AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin değişik kesme parametreleri ile işlendikten sonra, üzerindeki işlemeye bağlı olan gerilmeleri araştırmıştır. 61 mm çapında ve 250 mm boyunda deney numuneleri hazırlayarak değişik kesme parametreleri ile CNC torna tezgâhında işleyip, hazırlamış olduğu deney düzeneği ile 0,34 mm derinlikte katman kaldırma yöntemini kullanarak malzeme üzerindeki kalıcı gerilmeleri tespit etmiştir. Yapmış olduğu deneysel çalışmalar sonucunda işlenmemiş malzemede çekme kalıcı gerilmelerin hâkim olduğunu tespit etmiştir. İşlenmiş deney numunelerinin yüzeyinde -1876 MPa ile -137 MPa arasında basma kalıcı gerilmelerinin de oluştuğunu görmüştür. Ayrıca deney numunelerinin üzerinde yapmış olduğu ölçümlerde yüzeyde bulunan basma kalıcı gerilmelerinin derinliğe bağlı olarak belli bir seviyeden sonra sifıra yaklaştığını, daha derin seviyeye inildiğinde çekme kalıcı gerilmelerine dönüştüğünü tespit etmiştir.

Tekaslan Ö. ve [8] diğerleri AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünü araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada 61 mm çapında ve 250 mm boyunda deney numunelerini CNC torna tezgâhı kullanarak çeşitli kesme parametreleri işleyip ve bu işlemeye bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerini belirleyip optimum kesme parametrelerini tespit etmeyi amaçlamışlardır. Yapmış oldukları deney çalışmaların sonucunda 75 m/dk. kesme hızı, 0,15 mm/d ilerleme ve 1,5 mm talaş derinliğinin ideal parametreler olduğunu ve bu parametreler ile en yüksek seviyede yüzey kalitesi elde edileceğini tespit etmişlerdir. 50 m/dk. kesme hızı, 0,25 mm/dk. ilerleme ve 2 mm derinlik parametreleri ile işleme sonucunda en kötü yüzey kalitesi elde ettiklerini tespit etmişlerdir.

Takuda H. ve diğerleri [9] östenitik paslanmaz çelik sacların sıcak derin çekme işleminde şekillendirilebilirliğini sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sacın sıcak derin çekmedeki şekillendirme limiti deneysel olarak incelenmiş ve rijit-plastik ve ısı iletimi sonlu elemanlar metodu ile sacdaki deformasyon davranışı ve sıcaklık değişimini incelemişlerdir. Şekillendirme limiti ve boyun bölgesi analiz tarafından doğru şekilde tahmin edilebilmektedir. Çekilebilirliğin etkili olması için sac malzemeyi 150 ° C altında ısıtmışlardır ve zımbayı soğutmuşlardır. Yapmış oldukları çalışmalar sonucunda limit çekme oranı sıcak derin çekmede 2,7 iken, bu değer oda sıcaklığındaki derin çekme işleminde 2,0 olarak tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar ve analizler sonucunda sıcaklığın çekilebilirlik üzerinde olumlu etkileri olduğunu tespit etmişlerdir.

Koçar O. [10] derin çekme işleminde ürün kalitesinin tahmini ve kontrolü üzerine bir doktora tezi yayınlamıştır. Yapmış olduğu bu çalışmada işlem parametrelerinin ürün kalitesi üzerine etkisini araştırmıştır. AL 5764 sac malzeme kullanarak silindirik kap şekline işlemiştir. Deneysel çalışmalarında matris açısı, yağlayıcı, zımba hızı ve baskı plakası kuvvetini 3 farklı parametrede değiştirerek ilkel parçanın işlenmesini gerçekleştirmiştir. Aynı zamanda Taguchi dizisi kullanarak

deney setini hazırlamıştır. Sonlu elemanlar metodu kullanarak deneysel veriler ile karşılaştırma yapmıştır. Elde ettiği veriler sonucunda baskı plakası kuvvetinin buruşma ve yırtılma için en etkili parametre olduğunu tespit etmiştir. Buruşma için en az etkili parametre zımba hızı, yırtılma için ise matris açısı olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca yağlayıcı maddenin ürün kalitesini arttırdığını tespit etmiştir.

Özek C. ve Bal M. [11] derin çekme kalıplarındaki matris-zımba radyüsünün ve çekme oranının et kalınlığı üzerine etkisini araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada DKP 37 sacını kullanarak 4 farklı matris açısı, 4 farklı matris-zımba radyüsü ve limit çekme oranı değiştirilerek bu parametrelerin et kalınlığındaki etkileri araştırılmıştır. Yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda matris-zımba radyüsü ve matris açısı arttıkça çekme oranının arttığını ve buna bağlı olarak et kalınlığının azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca çekme oranını sabit tutup açılı kalıplarda üretim yaptıklarında et kalınlığının çok fazla değişmediğini gözlemlemişlerdir.

Özek C. ve Ünal E. [12] matris-baskı plakası açısının limit çekme oranı ve et kalınlığına olan etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada DIN EN 10130-1999 çelik sac kullanmışlardır. Matris-baskı plakası açısını 4 farklı değerde, matris-zımba radyüsünü 3 farklı değerde değiştirerek limit çekme oranını ve et kalınlığını araştırmışlardır. Bu deneyler sonucunda matris-baskı plakası açısının artması ve matris-zımba radyüsünün artması ile limit çekme oranının arttığını tespit etmişlerdir. BPK arttığında ise daha yüksek limit çekme değerleri elde etmişlerdir. Aynı zamanda matris-baskı plakası açısının artması ile limit çekme oranının arttığını tespit etmişlerdir.

Özek C. ve Taşdemir V. [13] AA 5754-0 Al-Mg alaşımının ılık derin çekilmesinde matris yüzey açısının ve baskı plakası kuvvetinin etkisini araştırmışlardır. Matris-baskı plakası $0-15^{\circ}$ arasında açılar verilerek oda sıcaklığı, 100°C , 175°C , ve 250°C iş parçası sıcaklarında, 1,2 kN, 2,4 kN, 3,6 kN BPK verilerek deneyler yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda sıcaklığın arttıkça baskı plakası kuvvetinin artışının et kalınlığı değişimine olan etkisinin azaldığını tespit etmişlerdir. Sıcaklığın artışı ile malzemenin çekme işlemi sırasında malzeme akışını kolaylaştırdığını ve et kalınlığı dağılımının daha homojen olarak gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Gülen M. [14] derin çekme işleminde geri yaylanmanın etkisini sonlu elemanlar metodu ile incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada derin çekme işlemine uygun iki ayrı parça belirlemiş ve derin çekme işleminde kullanılacak olan parametreleri kararlaştırmıştır. BPK ile zımba hızının değerlerini değiştirerek gerekli analizleri yapmıştır. Yapmış oldukları analiz sonuçlarından yola çıkarak bilgisayar ortamında şekillendirme sınır diyagramı çizilmiştir. Bu sınır diyagramına göre üzerinde buruşma veya yırtılma olan parçalar elenerek geri yaylanma analizinde kullanılacak parçaları seçmiştir. Bu analizler sonucunda geri yaylanma miktarının en az ve en fazla çıktığı analizleri karşılaştırmıştır. Bunların farkını alarak iyileştirme oranını hesaplamıştır. Yapmış olduğu çalışmalar sonucunda hız değeri sabit tutulduğunda ve kuvvet arttırıldığında geri yaylanmanın

arttığını tespit etmiştir. Geri yaylanma miktarını azaltmak için daha küçük kuvvetler seçilmesini önermiştir.

Ünal E. [15] kare kesitli kapların derin çekilmesinde kalıp geometrisinin ve radyüsünün çekme oranına etkisini araştırmıştır. Bu çalışmasında BPK, matris/zımba radyüsü ve matris-baskı plakası açısının farklı parametrelerde değiştirilerek limit çekme oranı, zımba kuvveti ve kap et kalınlığına olan etkisini deneysel ve teorik olarak araştırmıştır. Bu deneylerde DIN-EN 10130-1999 adında 0,9 mm kalınlığında sac malzeme kullanmıştır. Yapmış olduğu deneysel ve teorik çalışmalar sonucunda matris-baskı plakası açısının artması sonucu limit çekme oranı artmış ve 10^0 iken maksimum duruma ulaştığını tespit etmiştir. Bu açı değerinden sonra ise limit çekme oranında azalmalar yaşanmıştır. Aynı zamanda limit çekme oranı, zımba kuvveti ve et kalınlığının baskı kuvveti ile doğrudan orantılı olduğunu vurgulamıştır. Matris-zımba radyüsünün ise artan değerlerinde limit çekme oranının arttığını ve daha olumlu deneyler elde ettiğini öne çıkarmıştır.

Gavas M. ve İzçiler M. [16] baskı plakası boşluğunun kare kap derin çekilmesine olan etkisini araştırmışlardır. Yapmış olduğu deneysel çalışmalarda 1 mm ETIAL-8 sac levha kullanmıştır. Baskı plakası boşluğunu 1 mm ile 1,8 mm arasında çeşitli değerler seçmiştir. Yapmış olduğu deneysel çalışmalar sonucunda baskı plakası boşluğunun artması yırtılma olmadan sac levhanın kalıp boşluğuna daha fazla girmesine imkân sağladığını vurgulamıştır. 1,8 mm'den fazla baskı plakası boşluğunun matris radyüsüne yakın bölgelerde kalınlaşmasından ve kırışmasından dolayı yırtılmalar oluştuğunu ve baskı plakası boşluğunun pozitif etkisinin kaybolduğunu tespit etmiştir. 1,3 mm baskı plakası boşluğundan sonra ise yüzey kalitesinin bozulduğunu söylemiştir. Bu sonuçlara göre en iyi baskı plakası boşluğunun 1 mm ile 1.3 mm arasında olduğunu söylemiştir.

Hassan M. ve diğerleri [17] konik kalıplar aracılığıyla kare kapların derin çekme özellikleri hakkında bir çalışma yapmıştır. Deney seti olarak dairesel işlenmiş bir parça, düz başlı kare bir zımba ile kare açıklığa sahip konik bir kalıp olarak listelenmiştir. Hazırlamış olduğu deney setinin optimum boyutlarını bulmak için sonlu elemanlar metodunu kullanmıştır. Derin çekmeye etkileyen temel parametreleri ve malzeme parametrelerini de incelemiştir. Yapmış olduğu sonlu elemanlar metodu analizleri ile 67/33 Cu-Zn Pirinç alaşımı için limit çekme oranını 3,1 ve Al99.5w Alüminyum alaşımı için limit çekme oranını 3,15 olarak hesaplamıştır. Deneysel çalışmalar ile 3,07 limit çekme oranında Pirinç kap ve 2,93 limit çekme oranında Alüminyum kap üretmiştir.

Khairnar Y. S. Ve diğerleri [18] kare kesitli kapların derin çekme işleminde işlem parametrelerinin optimizasyonu üzerine bir inceleme yapmışlardır. Çalışmalarında BPK, matris radyüsü, sürtünme, zımba hızı ve diğer işlem parametrelerine değinerek bunların kare kesitli kapların derin çekilmesinde optimum parametresini araştırmışlardır. İncelemiş oldukları makaleler sonucunda, BPK derin çekme işlemi esnasında malzeme akışını kontrol eder ve buruşmayı etkiler. Sürtünmenin bitmiş ürünün yüzey kalitesi ve takım ömrü üzerindeki etkisi de boş levhanın

kabiliyetini çizer. Derin çekme işlemi için verimli bir şekilde temas yüzeyleri arasında iyi yağlama filmi gerektirir. Zımba hızı ve kuvveti ürün kalitesini, üretim hızını ve yırtılmayı etkiler.

Reddy P. V. ve diğerleri [19] farklı anizotropik malzemeler kullanarak dikdörtgen kap derin çekme işlemini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışmalarda 0,8 mm SS304 paslanmaz çelik, 0,8 mm 70-30 pirinç ve 0,9 mm AA6111 alüminyum kullanmışlardır. Ayrıca sayısal analizlerinde yağlama ve çekme malzemesinin parametrelerini değiştirmişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda gerinim oluşum bölgesi, Paslanmaz çelik levhalar ve pirinç levhalarla karşılaştırıldığında alüminyum alaşımlı sac metal için daha fazladır. Alüminyum alaşımlı levhalar ve Pirinç levhalarla karşılaştırıldığında, SS304 levha için Stres oluşum bölgesi yüksektir. Kalınlık dağılım bölgesi tüm sac metaller için hemen hemen aynıdır, sadece alüminyum alaşımı için hafif bir değişiklik gözlemlenebilir. SS 304 için gereken zımba kuvveti diğer iki malzemeye göre daha fazladır.

Sener B. ve Kurtaran H. [20] AISI 304 paslanmaz çelik dikdörtgen kap derin çekme işleminin sonlu element yöntemi ile modellenmesi ve deneysel doğrulaması üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, AISI 304 paslanmaz çelik sacdan dikdörtgen bir kabın derin çekmesi sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sonlu elemanlar analizinden tahmin edilen kalınlık dağılımı deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlardır. Hem simülasyonda hem de deneyde zımba radyüsünde maksimum incelme gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, zımba radyüsünde çift eksenli esneme durumunun ortaya çıkmasıdır. Tahmin edilen incelme değerleri, zımba radyüsünde deneysel verilerden daha büyük olarak tespit etmişlerdir.

Ünal E. ve Özek C. [21] açısallı derin çekme işleminde et kalınlığı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları bu çalışmada kare kapların derin çekilmesi işleminde matris-baskı plakası açısının çekme mukavemeti, et kalınlığı ve yüksekliğine olan etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışmaları sonlu elemanlar metodu ile karşılaştırmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda matris-baskı plakası açısının daha yüksek limit çekme oranı verdiklerine ulaşmışlardır. Aynı zamanda matris-baskı plakası açısının artması zımba kuvvetinin azalmasına yol açmıştır. Bundan dolayı daha düşük baskı plakası kuvvetlerinde çekme işlemi sırasında malzeme üzerinde buruşmalar görülmüştür. Böylelikle kalıbın iç yüzeyi ile buruşmuş yüzey arasında sürtünme daha yüksek zımba kuvvetine yol açtığını ve et kalınlığında incelmelere neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Sabet A. S. ve diğerleri [22] derin çekme işleminde farklı temas koşullarında alüminyum malzeme için tribolojik araştırmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarında sürtünme katsayısını araştırmak adına farklı temaslarda, kayma hızlarında ve yüzey sıcaklıklarında EN AW-5182 EN ve AW-6016-T4 alüminyum alaşım kullanmışlardır. Söz konusu deneyleri sonlu elemanlar metodunu kullanarak sayısal ortamda modelleyip çözümlenmesini yapmışlardır. Bu verilerin doğruluğunu ispatlamak adına 3 farklı BPK uygulanarak deneysel olarak uygulanmıştır. Yapmış oldukları

sayısal çözümlerlerin sonuçları deneysel sonuçlarla uyduğunu belirtmişlerdir. Triboloji deneylerinin sonuçları, artan nominal temas basıncı ve kayma hızı ile sürtünme katsayısının azalma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkta sürtünme katsayısı, her iki alüminyum alaşımı için de arttı.

Takalkar A. S. ve Chinnapandi L. B. M. [23] yüksek sıcaklıklarda derin çekme işlemi üzerine bir inceleme yapmışlardır. Karşılaştırmalı çalışma, çeşitli sac metallerin derin çekme için farklı yaklaşım ve tekniklerin kullanımı üzerine yapmışlardır. Yırtılma, buruşma, kulaklanma, geri esneme gibi kusurların giderilmesi için geometri ve işlem parametrelerinin etkileri dikkate alınmıştır. Yüksek sıcaklıklarda farklı malzemeler için sonuçtan farklı davranışlar ve şekillendirilebilirlik gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak yüksek sıcaklık altındaki sac metal, derin çekme işlem parametrelerini önemli ölçüde etkileyen ve gelecekte odaklanması gereken mikroyapısal değişikliklere uğradığını söylemişlerdir.

Choudhari C. S. ve Khasbage S. S. [24] kare kap derin çekme işleminde kullanılan şekillendirme parametrelerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmalarında ekstra derin çekilmiş çelik (EDD) sac malzeme kullanılarak, kalıp şekli, malzeme kalınlığının, kuvvet, kuru/ıslak yağlama gibi farklı çekme parametrelerinin kare kap çekme işlemi üzerindeki etkisini analiz etmek için sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmalar sonucunda deneysel ve şekillendirilebilirlik analizi, dikkate alınan işlem parametreleri için, kuru yağlama ile 100 kN yük için, 1 mm ve 0,8 mm boş kalınlığa kıyasla 2 mm boş kalınlığa sahip malzemenin şekillendirilebilirliğinin daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Menchi A. R. ve diğerleri [25] silindirik ve dikdörtgen derin çekme işleminde kuvvet tahmini için analitik ifadeleri ve performanslarını değerlendirmiş ve karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında dikdörtgen parçaların derin çekme kuvvetini tahmin etmek için yeni ifadeler önermek ve silindirik ve dikdörtgen parçalar için derin çekme kuvveti ifadelerinin tahmin performansını değerlendirmek gibi konulardan bahsetmişlerdir. Araştırmalarının sonucunda analitik ifadelerin tahmin performansının değişken olduğunu ve ifadede yer alan parametre sayısına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı zamanda parametrik analiz; malzeme kalınlığının, plastik parametrelerin ve matris radyüslerinin derin çekme kuvveti üzerinde en önemli etkiye sahip parametreler olduğunu ortaya çıkardı; bu parametrelerin herhangi birindeki bir değişiklik, derin çekme kuvveti değerinde önemli bir değişikliğe neden olacağını söylemişlerdir.

Mahmood Z. H. ve [26] diğerleri kare kapların esnek mikro derin çekme işleminde ilkel parça şeklinin optimizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, mikro 304 paslanmaz çelik kare kaplar üretmek için esnek derin çekme işleminin kullanılmasından bahsetmişlerdir. Çalışmalarında, şekillendirilmiş parçaların flanş kısmında kulak oluşumundan kaynaklanan malzeme israfını en aza indirmek için ilkel folyo şeklinin optimizasyonundan da bahsetmişlerdir. İlkel folyo kalınlığının ve ilkel folyo şeklinin etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

Sonuçlarında, net şekilli mikro kare parçalar oluşturmak için esnek mikro derin çekme kullanmanın uygulanabilirliğine ulaşmışlardır. Boş şekil optimizasyonunun eylemi, serbest flanşlı başarılı kare kaplarla sonuçlandı ve bu da genel üretim maliyetinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmuşlardır.

Dwiwedi R. Ve Agnihotri G. [27] derin çekme işleminin parametrelerini incelemiştir. Yapmış oldukları çalışmada Baskı plakası kuvveti, sürtünme gibi parametrelerin işlem üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yapmış oldukları incelemeler sonucunda baskı plakası kuvvetinin çok dikkatli seçilmesinin çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda sürtünmenin kalınlık dağılımına ve yüzey kalitesine etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Choubey A. K. ve diğerleri [28] sonlu elemanlar metodunu kullanarak derin çekme işleminde matris-baskı plakası açısının analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında 2 mm kalınlığında 304 paslanmaz çelik kullanmışlar ve farklı matris-baskı plakası açısı ve zımba hızı parametrelerini farklı değerlerde değiştirerek analiz yapmışlardır. Analizleri sonucunda 3,5 mm/sn. altındaki hızlarda gerilmelerin minimum olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuçları, 3.5 mm/sn. zımba hızı ile 5 mm zımba radyüs radyüsünde gerilmelerin minimum olduğunu göstermiştir. Ayrıca simülasyon sonuçları, paslanmaz çelik kap için optimize edilmiş zımba basıncının 35 mm zımba kurs boyunda 16 MPa olduğunu göstermiştir.

Gharehchahi H. ve diğerleri [29] derin çekme işleminde optimum ilkel parça şeklinin tasarımını yeni bir sınır güncelleme formülü ile hesaplamışlardır. Yapmış oldukları çalışmada ilkel parça şeklinin parça kalitesine, üretim maliyetine, üretim zamanına ve üretim maliyetine etkisi olduğunu söylemişlerdir. Çalışmalarında optimum ilkel parça şeklini tespit etmek için yeni bir iterasyona dayalı algoritma oluşturmuşlardır. Bu algoritmaları sonlu elemanlar metodu kullanarak derin çekme işlemini sayısal olarak gerçekleştirmişlerdir. Buna bağlı olarak yazmış oldukları algoritmayı programda kullanarak önerilen yöntemi denemişlerdir. Aynı zamanda literatürde bulunan diğer iterasyonları açıklamışlardır. Çalışmalarının sonucunda temel nokta yöntemi ile optimum şekle ulaşma hızını arttırmışlardır. Temel nokta yöntemi, mevcut algoritmanın diğer algoritmalarından gelenlere göre bir avantajı olan, boşluk için ilk tahminlere karşı yeterince sağlam olduğunu söylemişlerdir. Çünkü makalelerde sunulan diğer algoritmalarda uygun ilk tahmin seçilmediği takdirde algoritma cevaba yakınsamayacaktır.

Ballıkaya H. [30] matris açılı derin çekme kalıplama yönteminin hidro-mekanik derin çekme yöntemine uygulanmasını araştırmıştır. Yapmış olduğu doktora tezinde şekillendirilen sac malzeme için; matris açısı, matris-zımba radyüsü, baskı plaka kuvveti ve hazne basıncının; limit çekme oranı (β), kap et kalınlık değişimleri ve zımba kuvvetinin şekillendirmeye olan etkileri araştırmıştır. Çalışmasında da 0.9 mm kalınlığında sac malzemenin derin çekilebilmesini deneysel ve sayısal analiz yöntemleri ile araştırılmıştır. Bu amaçla 30 mm çapında zımba, matris-zımba radyüslerinin 6 mm, 8 mm ve 10 mm, matris açıları ise 0° , 2.5° , 5° , 10° , 12.5° ve 15° olacak

şekilde seçmiştir. Hazne basıncı için 6 MPa, 8 MPa ve 10 MPa basınç uygulanmıştır. Sac malzemenin kalıp içine akması esnasında akma kontrolünü sağlamak adına gerekli olan baskı plaka kuvveti 1964,95 N, 5882,78 N ve 9507,64 N olarak seçmiştir. Yapmış olduğu deneysel çalışmalara ek olarak sonlu elemanlar metodunu kullanarak ANSYS paket programı üzerinde analizler yapmıştır. Deney planı L18 ortogonal dizinine göre Taguchi deney yöntemi ile yapmıştır. Limit çekme oranının en düşük değeri $\beta=2.4$ olarak ölçülürken en büyük değeri $\beta=2.6$ 'ya yükselmesi, 0.9 mm kalınlığındaki malzemenin kalınlık dağılımlarındaki en düşük bölge kalınlığı 0.7635 mm iken en yüksek bölge kalınlığı ise 0.9970 mm değeri elde etmiştir. Baskı plakası ve hazne basıncı için ideal değer bu parametrelerin ikincisi olmuştur. Kalıp açısı arttıkça zımbalama kuvvetinin arttığı ancak sac malzeme kalınlığındaki dalgalanmaların azaldığı tespit edilmiştir. Zımba radyusunun değerindeki artışa bağlı olarak akma noktası oranı da artar. Deneysel çalışmalarda artan zımba radyüs değerlerine bağlı olarak limit çekme oranının arttığı gözlenmiştir. Düşük zımba radyüs değerlerinde çekilen kap erken kırılmıştır. En uygun parametre seviyesi ikinci seviye (8 mm) olarak elde etmiştir. Sonuç olarak matris açısının ve hazne basıncının limit çekme oranı, numunenin et kalınlığı ve iş parçası yüzey kalitesi üzerindeki etkisi klasik derin çekme yöntemlerine göre daha iyi sonuç vermiştir.

Dudhat P. ve diğerleri derin çekme işlemi parametreleri için bir inceleme çalışması yapmışlardır. Bu çalışmalarında ürünün üretkenliğini ve kalitesini artırmak için optimizasyon tekniğinin yanı sıra bitiş parçasını elde etmede önemli rol oynayan derin çekme işleminin çeşitli parametrelerini ele almaktadır. Yağlama, ince derin çekme işleminde de etkin rol oynar. Derin proseste yağlama kullanılarak buruşma etkisi kesin olarak azaltılacağını tespit etmişlerdir [31].

Patil P.N ve Inamdar K.H dikdörtgen kesitli kapların derin çekme işlemine dair bir inceleme yapmışlardır. Bu çalışmalarının sonucunda silindirik şekilli parçalar için standart prosedürler mevcuttur ancak dikdörtgen şekilli parçalar için durum böyle değildir. Zımba radyüsü, matris radyüsü, baskı plakası kuvveti vb. gibi çeşitli faktörler süreci etkiler. Araştırmacılar bu parametreleri incelemişler ve süreç üzerindeki etkilerini deneysel olarak ve simülasyon yardımıyla incelemişlerdir. Kırılma, yırtılma, kulak ve geri yaylanma gibi kusurlar tepki parametreleri olarak kabul edilebilir olduğu sonucuna varmışlardır [32].

Padmanabhan R. ve diğerleri paslanmaz çeliğin derin çekme işlemlerindeki işlem parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında sonlu elemanlar metodunun Taguchi metodu ile kullanılarak derin çekme işleminde üç önemli işlem parametresinin, yani matris radyüsü, baskı plakası kuvveti ve sürtünme katsayısının katkı oranını belirlemişlerdir. FEM ve Taguchi tekniği, süreç parametrelerinin etkisini tahmin etmek için etkili bir araç kombinasyonu oluşturur. Proses parametrelerinin dairesel kabın kalite özellikleri (kalınlık değişimi) üzerindeki etkisini incelemek için varyans analizi (ANOVA) yapıldı ve yüzde katkıları hesaplandı. Matris radyüsü (%89,2) derin çekme işlemi üzerinde büyük etkiye sahiptir, bunu sürtünme katsayısı (%6,3) ve

BPK (%4,5) takip eder. Bu proses parametrelerinin daha fazla optimizasyonu, parçanın kalitesini iyileştirmek için dairesel kabın derin çekme davranışı üzerindeki faktörlerin etkisinin derecesine bağlı olarak kolaylaştırılabilir. Çalışma, paslanmaz çelik boş levhanın derin çekme hakkında bir fikir vermiştir. Çekilen parçanın kalitesi, şekillendirme koşullarına ve işlem parametrelerinin optimal değerine bağlıdır ve bunların uygun kombinasyonu, derin çekme işlemi için önemlidir [33].

Lal R. K. ve diğerleri derin çekme işleminde geri yaylanmayı etkileyen parametreleri incelemişlerdir. Geri yaylanmanın matris radyusunun sac kalınlığına oranı, sac kalınlığı gibi çeşitli parametrelere bağlı olduğu görülmektedir. İlk ham parça kalınlığı, BPK, zımba radyüsü, derin çekme işlemi ile üretilen kabın geri esnemesi gibi bazı önemli proses parametrelerinin önemi araştırmışlardır. Elde edilen sayısal sonuçlar, başlangıçtaki boşluk kalınlığının değerini artırarak deforme olmuş sacın geri yaylanmasını azalttığını göstermektedir. Ayrıca, artan BPK ile geri yaylanma azalacaktır. Ve baskı plakası kuvvetinin aşırı artması tabakanın yırtılmasına neden olabilir. Zımba radyüsünün artmasıyla geri yaylanma da artmıştır. Çalışmalarında geri yaylanmanın diğer parametrelerden ve diğer parametrelerin geri yaylanmadan etkilendiğini gözlemlemişlerdir [34].

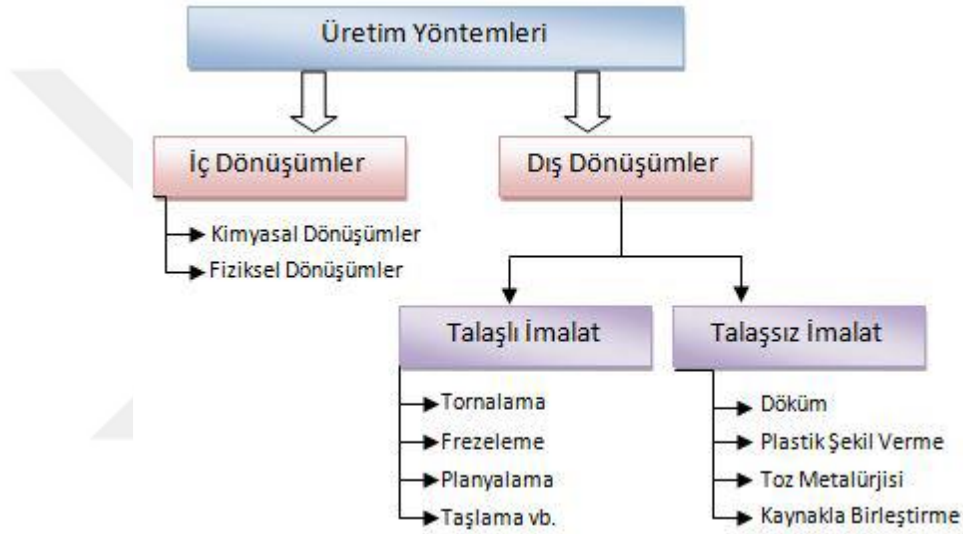
Yapılan literatür araştırmaları sonucunda derin çekme işlemine dair birçok makale derinlemesine incelenmiştir. İnceleme sonucunda derin çekme işleminde baskı kuvveti, BPK, matris-baskı plakası açısı, matris boşluğu, ilkel parça geometrisi, matris-zımba radyüsü ve baskı plakası boşluğu gibi birçok parametrenin derin çekme işlemi üzerindeki etkilerine dair deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Aynı zamanda bu çalışmalara ek olarak bu parametrelerinin et kalınlığına, limit çekme oranına, geri yaylanmaya etkilerini de araştırmışlardır.

Yapılan bu çalışmada ise, literatürde yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak östenitik paslanmaz çelik sac levha kullanılmış olup matris ve baskı plakasının yüzeylerinde 0° , 5° , 10° ve 15° olmak üzere 4 farklı açı, matris radyüsü 4 mm, 6 mm ve 8 mm olmak üzere 3 farklı radyüs ve BPK 5500 N, 7950 N ve 10400 N olarak 3 farklı kuvvet kullanılarak bu parametrelerin şekillendirilebilirliğe olan etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılacaktır. Yapılacak olan bu araştırma sonucunda kalıpcılık sektörüne katkılar sağlanacağı düşünülmektedir.

3. TEMEL BİLGİLER

3.1. İmalat Yöntemleri

Mühendislikte bir katı cisme çeşitli yöntemler ve farklı şekilde kuvvetler uygulanarak katı cismin şekil değişimine uğramasına deformasyon denir. Bu deformasyonların farklı yöntemlerde oluşturulması ile temel imalat yöntemlerini oluşturmaktadır. İmalat yöntemleri; talaşlı imalat ve talaşsız imalat olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çeşitli imalat yöntemleri Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. İmalat yöntemlerinin sınıflandırılması [35]

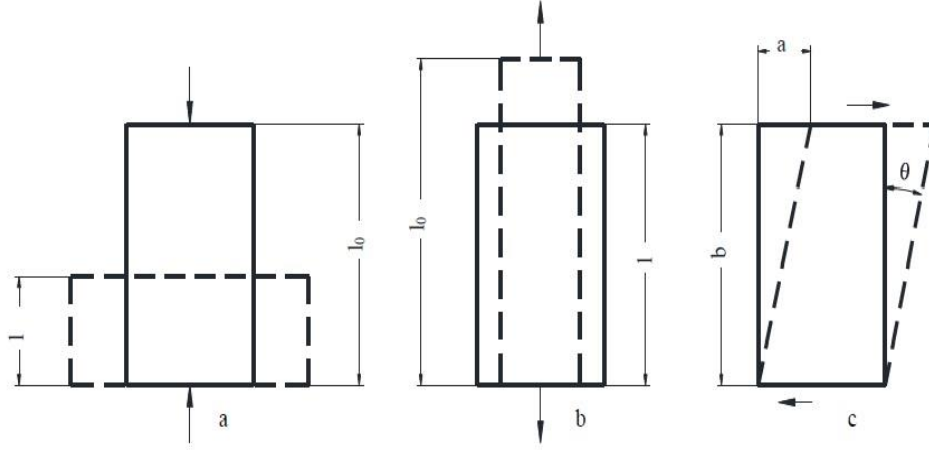
3.2. Talaşsız İmalat

Talaşsız imalat; işlenecek olan malzemenin üzerinden herhangi bir talaş kaldırma işlemi olmadan yani kendi ağırlığında herhangi bir değişim olmadan yaşadığı plastik deformasyon ile şekil değişimine denir.

3.3. Plastik Şekil Değiştirme

Bir malzemenin belirli kuvvet altında herhangi bir kütle kaybı olmadan başlangıç anındaki boyutunun değişimine şekil değiştirme denir. Şekil değiştirme işlemi plastik veya elastik olabilmektedir. Bu malzemenin kimyasal özelliklerine bağlıdır. Elastik şekil değişimi; malzemeye uygulanan kuvvet kaldırılınca eski boyuna gelmesi ve kalıcı olarak şekil kaybı yaşamayan şekil değişimi, plastik şekil değişimi ise malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldıktan sonra eski formuna

dönmeyen ve kalıcı olarak şekil değişimi yaşayan şekil değişimi olarak ifade edilir [35]. Şekil 3.2’de temel şekil değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Temel şekil değişimi; a) Basma, b) Çekme, c) Kayma [30]

Bir şekil değiştirme işlemi esnasında bu şekil değiştirmeye maruz kalan elemanın üzerinde oluşan birim şekil değiştirme ilk boyu ve son boyu ile bağlantılıdır. Birim şekil değiştirme Denklem 3.1’de görüldüğü gibi;

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

denklemini ile hesaplanır. Denklemden de anlaşıldığı üzere birim şekil değiştirmenin yönü çekmede pozitif basmada ise negatiftir [30]. Kaymada şekil değiştirme Denklem 3.2’de görüldüğü gibi;

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

şeklindeki denklem ile hesaplanır [30]. Denklem 3.2’den yola çıkarak en büyük kayma gerilmesi Denklem 3.3’de görüldüğü üzere;

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

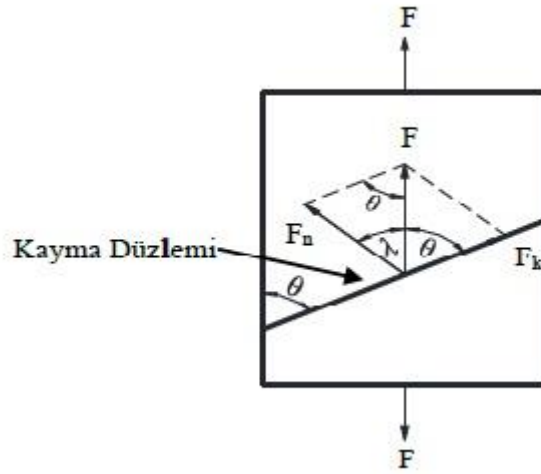
şeklinde ifade edilir. Denklemden G malzemenin kayma modülünü ifade etmektedir. Maksimum çekme kuvveti ise Denklem 3.4’de görüldüğü gibi;

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

denklemini ile hesaplanır[30]. Burada E malzemenin elastisite modülünü temsil eder. Elastisite modülü; bir malzemeye uygulanan düşük gerilmeler altında oluşan şekil değişiminin, gerilmeyi oluşturan yükün kalktıktan sonra malzemenin eski formuna geri dönme özelliğini tanımlar.

Mühendislik eğrisi olarak da bilinen Hooke eğrisi ile çekme işleminde meydana gerilmeler, elastisite modülü, akma noktası ve kopma noktası gibi birçok bilgiye ulaşılabilmektedir.

Deneysel araştırmalarda belirlenen plastik şekil deformasyona yol açan kayma gerilmesi, Denklem 3.3'den hesaplanan teorik kayma gerilmesinden ($\tau_{\max}$) daha düşüktür. Deneysel çalışmalar ve teorik hesaplamalardan elde edilen bu fark, yapıdaki malzeme hatalarından (bilhassa dislokasyon) kaynaklanmaktadır. Dislokasyonlar, yapıda eksik olan atom düzlemleridir. Başka bir deyişle, bir kristalin iki mükemmel parçası arasındaki düzensiz yapı bölgesi anlamına gelir ve kristalin kayma bölgesi ile kaymaz bölgesi arasında bir sınır oluşturan doğrusal bir kusur olarak tanımlanır. Kayma düzleminde oluşan kuvvetlerin bileşenleri Şekil 3.3'de verilmiştir. [30].



Şekil 3.3. Kayma düzlemindeki kuvvet bileşenleri [30]

Şekil 3.4'den yola çıkarak kayma düzlemindeki kuvvet bileşenleri kullanılarak Denklem 3.5'de F uygulanan çekme kuvvetini, F_k kayma kuvvetini, F_n normal kuvveti, A_0 , F kuvvetine dik kesit alanını ve A_k kayma düzlemindeki kesit alanını göstermektedir.

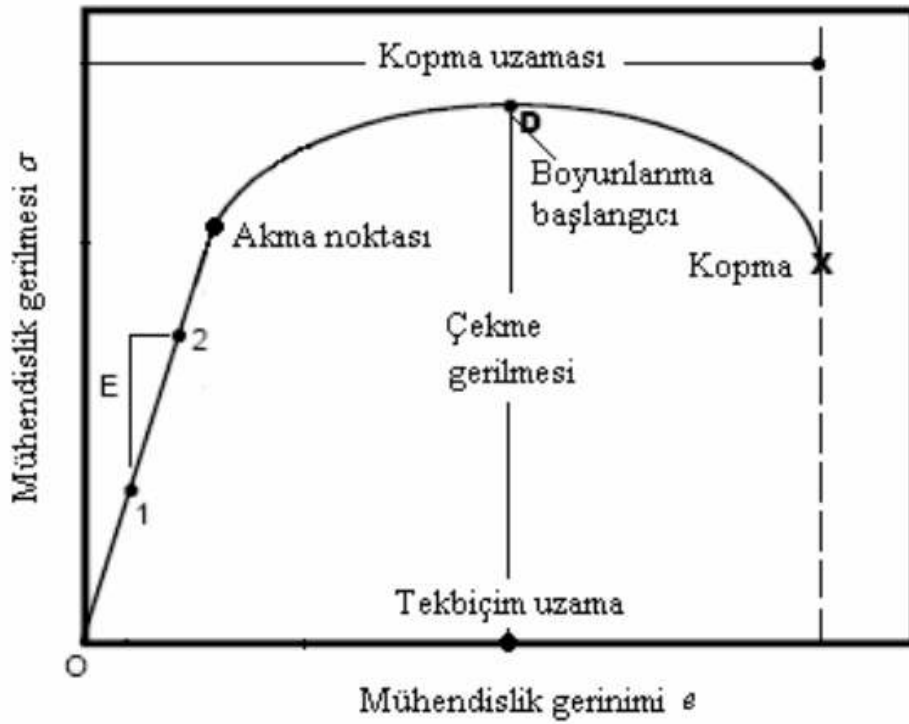
Kayma yalnızca, kayma düzlemindeki gerilmenin kayma yönündeki bileşeni (τ_r) ile gerçekleşir. Kayma yönündeki gerilme Denklem 3.5'de görüldüğü gibi;

$$\tau = \frac{F_k}{A_k} = \frac{F \cdot \cos \theta}{A_0 / \cos \lambda} = \frac{F}{A_0} \cdot \cos \theta \cdot \cos \lambda \rightarrow \tau_r = \sigma \cdot \cos \theta \cdot \cos \lambda \quad (3.5)$$

hesaplanır. Burada, σ kristale uygulanan normal gerilme olup Denklem 3.6'da;

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

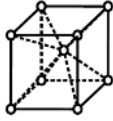
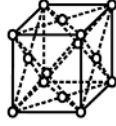
Denklemini ile hesaplanır. Bu denklem ise Hooke kanunu olarak adlandırılır [30]. Şekil 3.4'de Hooke eğrisi görünmektedir.



Şekil 3.4. Hooke eğrisi [36]

Metal malzemeler çok özel durumlar haricinde sürekli kristal yapıya sahiptirler. Bu kristal yapıya bağlı olarak metaller farklı deformasyon davranışı gösterirler. Yüzey merkezli kübik (YMK) ve sıkı paket hekzagonal (SPH) kafes yapılarına sahip metallerde kayma yalnızca bir kayma sisteminde oluşur. Uygulanan gerilmenin artması ve deformasyon sertleşmesi etkisi ile kritik kayma gerilmesi değerleri artan diğer kayma sistemleri de deformasyona katılır. Hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapı, deformasyon başlangıcında en büyük kesme gerilimi yönünü paylaşan iki veya daha fazla kesme düzlemi üzerinde kayar [30]. Çeşitli metallere ait olan kristal yapısının sınıflandırılması Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Bazı metallerin kristal yapıları [30]

Hacim Merkezli Kübik (HMK)	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)	Sıkı Paket Hegzagonal (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 kristaldeki kritik kayma gerilmesinin artmasına katkıda bulunan faktörler aynı zamanda mukavemette bir artışa neden olur. Metallerde artan artık gerilim, alaşım elementlerinin oranı ve kristal yapı kusurlarının oranı (özellikle dislokasyonlar) ile kritik kesme gerilimi de artar. Sıcaklık ve gerinim hızı da kritik kesmeyi önemli ölçüde etkiler.

Metalik malzemelerin plastik deformasyonu, kimyasal bileşim ve metalurjik yapı ile kontrol edilebilen özelliklere ve ayrıca oluşum koşullarına bağlıdır [30].

Deformasyon sırasında sıcaklığın malzemelerin deformasyon davranışı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Sıcaklık arttıkça malzemenin mukavemeti azalır ve sünekliği artar. Bu nedenle deformasyon süreçleri oluşum sıcaklığına göre sınıflandırılır.

Malzemelerin klasik sınıflandırmasında, yeniden kristalleşme sıcaklığı (T_{yk}) deformasyon sıcaklığı ile karşılaştırılır. Metallerin yeniden kristalleşme sıcaklığı, mutlak erime noktasının 1/3'ü ile 1/2'si arasındadır. $T > T_{yk}$ ise sıcak işlem, $T < T_{yk}$ ise soğuk işlem olarak belirtilir [30].

Deformasyon süreçleri, şekillendirme işlemi sırasındaki deformasyon sıcaklığı (T , °K) ile erime sıcaklığı (T_m , °K) arasındaki ilişki olan izotropik sıcaklığa (T/T_m) göre tanımlanır. Buna göre deformasyonlar 3 farklı grupta kategorize edilir [30].

$T/T_m > 0,5$ ise sıcak işlem

$0,5 > T/T_m > 0,3$ ise ılık işlem

$T/T_m < 0,3$ ise soğuk işlem olarak belirlenir.

Soğuk şekillendirme koşulları altında şekillendirme yaparken, malzemeye uygulanan gerinmenin bir fonksiyonu olarak iş sertleştirme yoluyla mukavemet artar. Deformasyonun mukavemete olan etkisi Denklemler 3.7'de görüldüğü üzere;

$$\sigma_g = K \cdot \varepsilon^n \quad (3.7)$$

şeklinde hesaplanır Holloman eşitliği ile gösterilmektedir [30].

Malzemenin metalurjik yapısı, özellikle tane şekli, soğuk şekillendirme sonucunda değişir. Plastik deformasyon sırasında tanelerin uzama yönünde deformasyonu (uzaması) nedeniyle malzeme özellikleri yöne bağlı hale gelir (anizotropi). Metalik malzemelerde iki tür anizotropi vardır. Bunlar kristalografik anizotropi ve mekanik fibrilasyondur.

Soğuk şekillendirme işlemleri sırasında genellikle malzeme yapısında iç gerilimler oluşur. Bu dezavantajlara ek olarak, soğuk şekillendirme işleminin avantajları, malzemenin işlem görmüş yüzeylerinin düzgünlüğü ve istenilen boyutsal toleranslarda ürün elde edilebilme imkânıdır. Soğuk şekillendirme işleminin malzeme yapısı üzerindeki etkilerinden kaçınmak ve çalışma sırasında sertleşme nedeniyle azalan sünekliği artırmak için soğuk iş işlemi sırasında bir ara tavlama gerekebilir. Tavllanmış malzeme durumunda, tavlama sıcaklığı, elde edilecek istenen özelliklere bağlı olarak yeniden kristalleşme sıcaklığının altında veya üstünde seçilebilir.

Sıcak şekillendirme sırasında, malzemedeki deformasyon sertleşmesi ve bozulmuş tane yapıları, deformasyon sırasında yeniden kristalleşme sonucunda yeni tanelerin oluşmasıyla büyük tanelere dönüştürülür. Sıcak şekillendirme işlemi yüksek sıcaklıklarda yapıldığından, tavlama işlemi maliyet eklemekte ve ayrıca malzeme yüzeyinin oksidasyonuna neden olmaktadır. Oksitlenme nedeniyle iyi bir yüzey elde etmek oldukça zordur.

Üretilen iş parçasının boyut toleranslarında, sıcak şekillendirilen iş parçaları, soğuk şekillendirilen iş parçalarına göre daha yüksektir. Sıcak şekillendirme işlemine tabi tutulan parçalarda, malzemede gerinim sertleşmesi olmadığı için deformasyon sabit gerilim altında gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda ($T > 0,5 T_m$) deformasyon hızının etkisi oldukça yüksektir. Deformasyon hızının mukavemet üzerindeki etkisi Denklem 3.8’de verilmiştir.[30].

$$\sigma = C . \dot{\epsilon}^m \quad (3.8)$$

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.

Metal şekillendirme hızı arttıkça malzemelerin mukavemeti artarken sünekliği azalır. HMK metalleri, deformasyon hızına diğer kristal yapıdaki malzemelere göre daha duyarlıdır. Birim zamanda malzemeye uygulanan deformasyon miktarını gösteren gerinim oranı, mühendislik deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) ve gerçek deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) olmak üzere iki ayrı sembol kullanılarak Denklem 3.9 ve Denklem 3.10’da ki gibi hesaplanır [30].

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

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

Burada;

L_0 : Malzemenin deformasyondan önceki uzunluğu (mm),

L : Malzemenin deformasyondan sonraki uzunluğu (mm),

V : Pres hızı ($v=dL / dt$) (m/dk),

Gerçek ve mühendislik deformasyon hızları ($\dot{\epsilon}$ ve $\dot{\epsilon}$) arasındaki bağlantı Denklem 3.11’de verilmiştir.

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

Ilık işlem şartlarında ($0,5 T_m > T > 0,3 T_m$) yapılan plastik deformasyon işlemlerinde, plastik deformasyon oranı, deformasyon sertleşmesi ve deformasyon hızı birbirleri ile yakından ilişkilidir. Bu durumda Denklem 3.12’deki eşitlik oluşur;

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

Burada;

D : malzeme sabitidir.

Ilık şekillendirmenin, sıcak ve soğuk şekillendirme işlemlerine göre birçok avantajı vardır. Sıcak şekillendirme işlemine göre en büyük avantajı, gerekli sıcaklığa ulaşmak için gereken enerji tasarrufudur. Soğuk şekillendirme işleminin en önemli avantajı, elde edilebilecek toplam şekillendirme hızının soğuk şekillendirme işlemine göre daha fazla olması ve aynı zamanda malzemenin mukavemetine yakın mukavemette bir ürün elde edilmesidir. Ilık şekillendirme işlemi, deformasyon sertleşmesindeki etkisi soğuk şekillendirmeye göre daha azdır. Ilık şekillendirme sırasında malzeme yeniden kristalleşmez, ancak dinamik iyileşmeye uğrar. Metalik malzemelerin plastik deformasyonu, malzeme özelliklerine, deformasyon sıcaklığına, gerinim miktarına ve gerinim hızına ve ayrıca sürtünme ve yağlama, hidrostatik basınç, artık gerilmeler ve geometrik faktörler gibi diğer faktörlere bağlıdır [30].

Malzemenin deforme olabilirliği, sürtünme kuvvetinden olumsuz etkilenir. Sürtünme kuvvetini en aza indirmek için matris ile iş parçası ve iş parçası ile yapı levhası arasında yağlama yapılması gerekir. Yağlayıcılar, toplam hallerine göre katı, sıvı, yarı katı ve gaz halinde yağlayıcılara ayrılır. Yağlama görevini yapacak yağları seçerken özellikle çalışma koşulları ve yağın kalitesi açısından doğru seçim yapmak gerekir. Plastik şekillendirme işlemleri sırasında iş parçasına etki eden hidrostatik basınç, mikro gözenek oluşumunu engellediğinden, özellikle kırılma

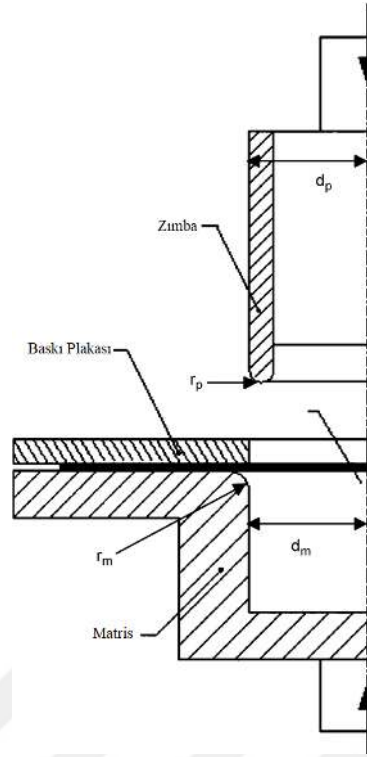
sınırlı şekillendirme işlemlerinde iş parçasının şekillendirilebilirliği üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Boyun kısıtlı uzama işlemlerinde hidrostatik basıncın süneklik açısından uzama üzerine olumlu bir etkisi yoktur. Plastik şekillendirme işlemleri sırasında malzemeler düzenli olarak deforme olmadığında yapılarında artık gerilmeler oluşur ve bu artık gerilmeler elastik gerilmelerdir ve malzemenin maksimum elastik sınırında olabilir. Artık gerilmeler, ısıtma işlemi veya plastik deformasyon ile giderilebilir veya yok edilebilir. Plastik deformasyona etki eden geometrik faktörler; İşlem öncesi dökülecek metalin şekli, kalıbın şekli ve deformasyon sırasında metal akışının durumu metalin istenilen şeklini belirleyecektir [30].

3.4. Derin Çekme

Sac metal şekillendirme, son zamanlarda dünya çapında otomotiv ve havacılık endüstrilerinde artan bir ilgi kazanmıştır. Sac metallerin plastik şekillendirilmesi, belirli malzemelerin uygun gerilme oranı, düşük basınç gibi doğru koşullarda, kırılmadan ve kırılmadan üretilmesidir. Derin çekme, sac metal oluşturmak için kullanılan en önemli yöntemlerden biridir ve verimliliği nedeniyle endüstride çok faydalıdır [37].

Derin çekme işleminde herhangi bir parça montajı olmadan en az hammadde kullanımı ve minimum fire malzeme ile ürün üretimi mümkün olabilmektedir. Bu derin çekme işlemi iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Birinci üretim türü saf çekme denilen sac malzemenin kalınlığında herhangi bir değişim olmaksızın yapılan derin çekme işlemidir. İkinci üretim türü ise ütüleme denilen, sac malzemenin kalınlığında bir azalma oluşumu ile gerçekleştirilen işlemidir [38].

Plastik şekil değiştirme yöntemlerinde önemli bir yere sahip olan derin çekme işlemi, iki boyutlu geometriye sahip sac malzemelerin kalıp boşluğuna presteki basma kuvveti ile çekilerek, belirli bir derinlik ve profile sahip üç boyutlu parçaların pres yardımıyla elde edilmesi işlemi olarak tanımlanır. Derin çekme işlemi, sac malzemelerin şekillendirilmesinde en çok kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır [12]. Şekil 3.5’de derin çekme işleminin kesit görüntüsü ve kullanılan elemanların açıklamaları görünmektedir. Burada r_p , zımba radyüsünü r_m ise matris radyüsünü göstermektedir.



Şekil 3.5. Derin çekme işleminin kesit görünümü [4]

3.4.1. Derin Çekmede Kullanılan Kalıp Parçaları

Derin çekme işleminde bulunması gereken en temel elemanlar zımba, baskı plakası ve matristir. Bu 3 parça derin çekme işleminin temel olarak yapılmasını sağlar.

Zımba: Kuvvet sağlayan bir makineden aldığı yükü zımba kuvvetine çevirerek ilkel parçanın üzerine aktararak kalıp içerisine girmesini sağlar. Böylelikle ilkel parça kalıp şeklini alır ve derin çekme işlemi gerçekleşmiş olur.

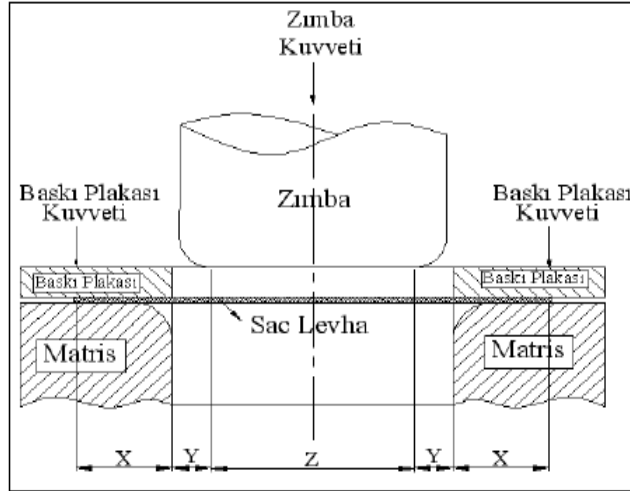
Baskı Plakası: İlkel parçanın matris ile baskı plakası arasında kalmasını sağlar. İlkel parça üzerine bir kuvvet uygulayarak zımbanın temas anında matris üzerinde hareketini kısıtlar ve uygun işlem şartlarını sağlar. Aynı zamanda uygun kuvvet seçimi ile ilkel parçanın kulaklanması engeller.

Matris: Derin çekme işleminin temel elemanıdır. İlkel parça matrisin içerisine akar böylelikle matris boşluğunun şeklini alır.

3.4.2. Derin Çekme Mekaniği

Derin çekme işleminde, çekilecek malzeme ilkel parça boyutlarının hesaplanmasında kullanılan denklemler ile boyutları hesaplanır ve matrise uygun şekilde hazırlanır. Baskı plakası malzemeye temas ederek ayarlanan kuvveti ilkel parça üzerine aktarır ve böylelikle ilkel parçanın zımba ile teması sırasında hareketi engellenir. Makine üzerinden aldığı kuvveti aktaran zımba ilkel

parçaya temas eder ve uyguladığı kuvvet ile malzeme matris radyüslerinin üzerinden akarak kalıp içerisine doğru girmeye başlar. Bu kuvvet ile birlikte malzeme aynı zamanda zımbanın yüzeyine sarılır ve matris boşluğuna girerek bu boşluğun şeklini alır. Derin çekme işlemi 3 farklı bölgeye ayrılarak Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



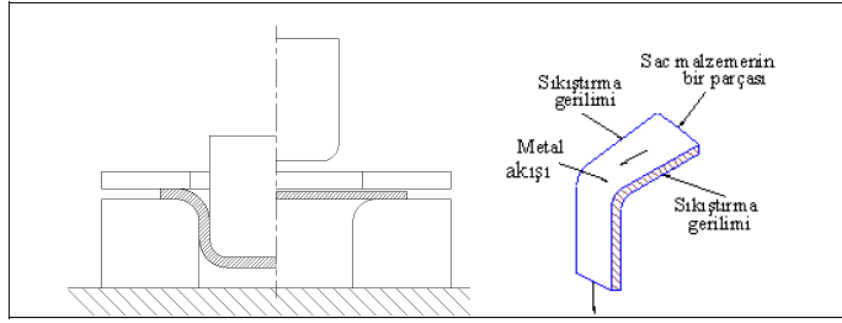
Şekil 3.6. Derin çekme işleminde ayrılmış bölgeler [14]

X ile işaretlenen alan sac levhanın matrise değdiği bölümdür. Y ile işaretlenen alanda çekme işleminin başlangıcı esnasında hem matrisle hem de zımba ile teması yoktur. Z ile işaretlenen dairesel alan ise zımbanın alt yüzeyine temas eder. Çekme işlemi sırasında X ile işaretlenen alan baskı plakası ile temas eder ve basınç etkisiyle çekmeye karşı kuvvet oluşturur. Çekme sırasında malzemenin kalınlığı artar, sac malzeme Y bölgesinde esneme ve kayma eğilimi gösterir ve Z bölgesindeki malzeme hem esneme hem de uzama geçirirken malzemenin kalınlığında incelme meydana gelir [14].

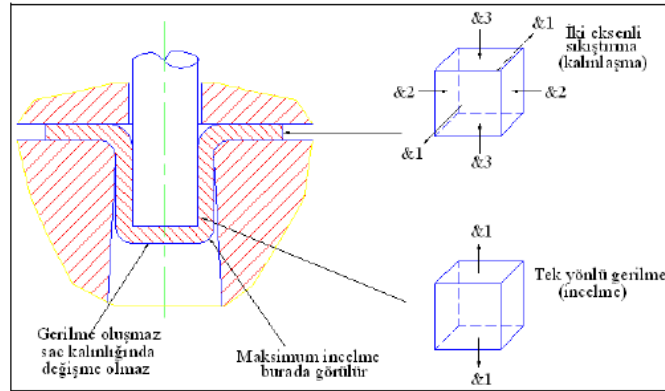
3.4.3. Derin Çekmede Oluşan Gerilmeler

Derin çekme işleminin temel mekanizmasında malzeme elastik bölgeden plastik bölgeye geçmeye zorlanır. Yani malzeme üzerinde kalıcı şekil değişimleri oluşur. Derin çekme işleminin herhangi bir hatayla sonuçlanmadan başarılı bir şekilde gerçekleşmesi için malzemenin bu gerilmelere dayanabilmesi gerekmektedir. Şekil 3.7’de bu gerilmeler görülmektedir.

Derin çekme sırasında, Şekil 3.7’deki gibi malzemenin kalıba temas ettiği yüzeyde basma gerilmeleri oluşur ve malzeme kalıbın bükümünde oluştukça inceler yani incalır. Bundan dolayı metal akışı, Şekil 3.8’deki gibi olur [14].

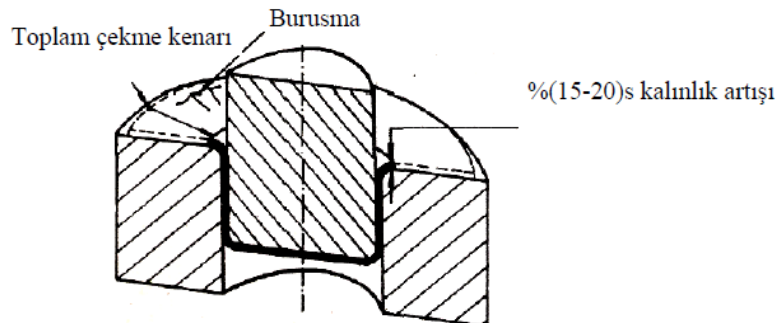


Şekil 3.7. Derin çekme işleminin mekaniği [14]



Şekil 3.8. Derin çekme işleminde oluşan gerilmeler ve kalınlık değişimleri [14]

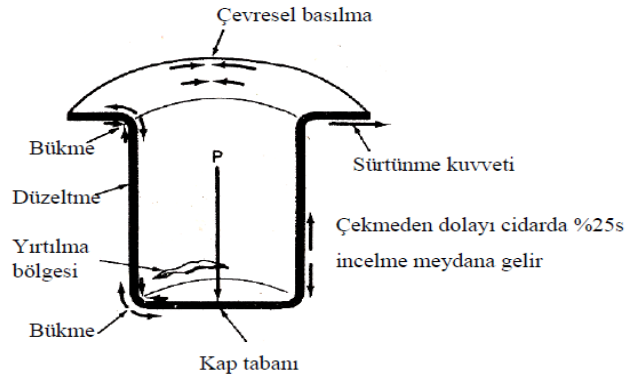
Aynı zamanda çekme işlemi sırasında zımbanın köşelerindeki radyüste tek taraflı gerilme ile maksimum malzeme incelmeye görülür, zımbanın alt kısmında ise sac kalınlığı değişmez, sacın baskı plakası ile bastırıldığı kısımda, iki yönlü sıkıştırma oluşup sac malzemenin kalınlığında Şekil 3.9'daki gibi kalınlaşma oluşur [14].



Şekil 3.9. Derin çekme işleminde buruşma ve kalınlık artışı [14]

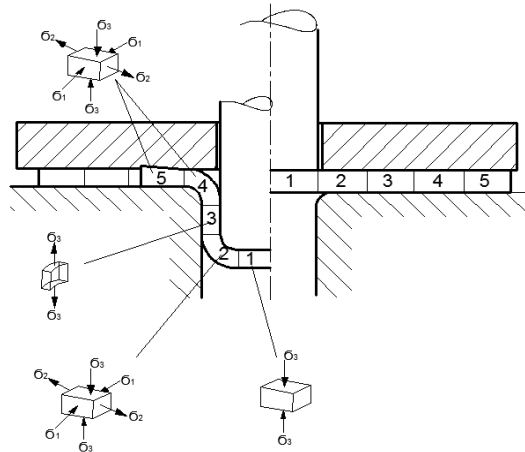
Sac malzemenin kalıp içine akması sırasında sacın dış çerçevesinde basma gerilimi oluşur. Bu basma gerilimi, kabın giriş kısmında malzeme birikmesine neden olur. Bu tür malzeme

birikimine buruşma denilir. Çekilen kabın ağız kısmında buruşma ve (% 15 - % 20) kadar kalınlıkta bir artış gözlemlenir. Ayrıca, çekme işlemi biten kabın ağızında ve tabanında eğilme ve basma gerilimleri, tabana yakın kısımlarda maksimum çekme gerilimi meydana gelir. Maksimum çekme geriliminin olduğu bu alanlarda, çekilen kabın duvar kalınlığı azalır ve parçanın aşırı gerilmesi, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi taban çevresinde yırtılma bölgeleri oluşturur [14].



Şekil 3.10. Derin çekme işlemi sırasında bükme ve yırtılmalar [14]

Şekil 3.11'de baskı plakalı çekmede silindirik parçanın çekme işlemi sırasında malzeme hareketi ve çeşitli çekme bölgelerindeki gerilmelerin dağılımları gösterilmiştir. Çekme sırasında (5) elemanı yer değiştirme ile (5') konumuna gelmiştir. Sol taraftaki şekilde gösterilen bu elemanın (σ_1) gerinimleri ile eni daralmış, baskı kuvvetinden doğan (σ_2) gerilmeleri ile çekmeye zorlanmış ve BPK'nın yaratmış olduğu etki ile (σ_3) gerilmesiyle sıkıştırılmıştır. (4) elemanı ise (4') konumuna geçerken (5) elemanı gibi üç yönlü gerilmenin etkisindedir. Bu eleman ayrıca kalıp köşesinde bükülmeye zorlanmıştır (3) elemanı (3') konumuna geçmeden önce kalıp köşesinde bükülmüş, sonra tekrar doğrulmuştur.



Şekil 3.11. Silindirik derin çekmede meydana gelen gerilmeler [10]

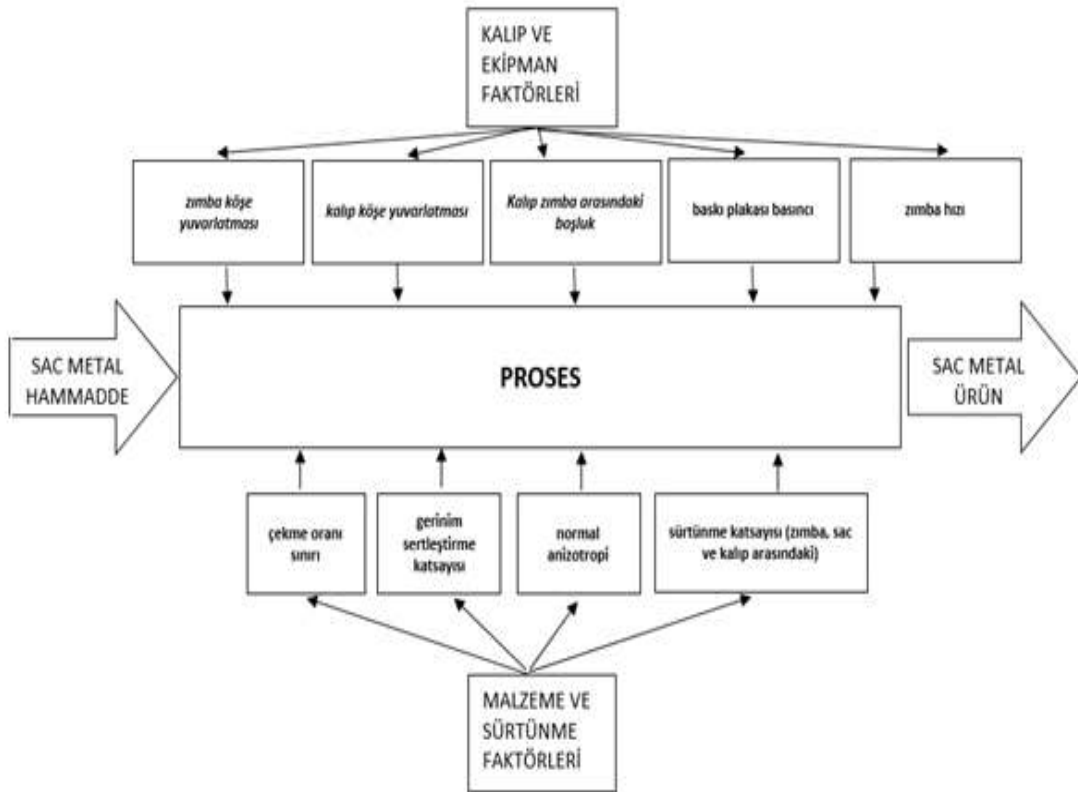
3.5. Derin Çekme İşlemine Etki Eden Parametreler

Derin çekme işleminde diğer plastik şekil verme yöntemlerinde olduğu gibi sonuca etkiyen birçok parametre olduğu görülmektedir.

Derin çekme işlemine etki eden parametreler:

- Çekme kuvveti,
- Baskı plakası kuvveti
- Baskı plakası boşluğu,
- Matris-baskı plakası açısı,
- Matris-zımba radyüsü,
- Limit çekme oranı,
- Çekme hızı,
- Çekme boşluğu,
- Sıcaklık,
- Yağlama.

Derin çekme işlemine etki eden parametreler Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Derin çekme işlemine etki eden parametreler [38]

3.5.1. Çekme Kuvveti

Çekme işleminin en temel parametrelerinden birisi çekme kuvvetidir. Bu kuvvet derin çekme işlemini gerçekleştirmek için gerekli olan maksimum kuvvet değeri olarak tanımlanır (DÇK). DÇK, mekanik pres kapasitesini tanımlamak, takımları tasarlamak, çizim işi ve gerinim enerjisini belirlemek ve proses verimliliğini tahmin etmek için gereklidir. Bununla birlikte, DÇK'nin hesaplanması, dâhil edilen çok sayıda parametre ve derin çekme işleminin karmaşıklığı nedeniyle zor bir iştir. Derin çekme parametrelerinin DÇK üzerindeki etkisini değerlendirmek için literatürde deneysel, sayısal ve analitik yöntemler kullanılmıştır. Deneysel testleri gerçekleştirmek için gerekli malzeme, alet ve makineler nedeniyle deneysel yöntemler pahalı ve zaman alıcıdır. Öte yandan, sayısal yöntemler daha ucuzdur ancak güvenilir sonuçlar sağlamak için sayısal bir modelin doğru tanımlanmasını ve doğrulanmasını gerektirir. Son olarak, analitik yöntemler, teorik analiz ve deneysel testlerden elde edilen analitik ifadelerle dayandıkları için uygun maliyetlidir ve uygulanması kolaydır [25].

Çekme kuvveti, sac malzemenin kalınlığına, zımba çapına ve cinsine bağlıdır. Aynı zamanda, baskı plakasının uyguladığı basınç, çekme hızı, ilkel parça çapı, çekme boşluğu, matris ve zımba radyüsleri ve yağlama da çekme kuvvetine etki etmektedir [15]. Denklen 3.12 ve 3.13'de silindirik ve dikdörtgen parçalar için çekme kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler verilmiştir.

Silindirik parçalar için:

$$F_z = \pi \cdot d \cdot s \cdot R_m \cdot n \quad (3.12)$$

Dikdörtgen parçalar için:

$$F_z = \left(2 \cdot r_e \cdot \pi + \frac{4 \cdot (a+b)}{2} \right) \cdot s \cdot R_m \cdot n \quad (3.13)$$

Burada;

- F_z : Çekme kuvveti (N),
- d : Zımba çapı (mm),
- s : Sac malzeme kalınlığı (mm),
- R_m : Malzemenin kopma dayanımı (N/mm²),
- n : Katsayısı,
- r_e : Kalıp köşe radyüsü (mm).

olarak gösterilmektedir.

3.5.2. Baskı Plakası Kuvveti

Baskı plakası kuvveti (BPK) ince kalınlıktaki malzemelerin derin çekilmesinde çok önemli bir parametredir. Ana işlevi, malzemelerin akışını kontrol etmek ve karmaşık ince duvarlı dış kabuk parçalarının derin çekme işleminde kırışmayı ve diğer olumsuz olayları bir dereceye kadar önlemek için derin çekme işleminde sürtünme kuvveti oluşturmaktır. Daha sonra sac malzemelerin şekillendirilebilirliği bu şekilde geliştirilebilir. Geleneksel çizim yöntemlerinde, genellikle sabit BPK benimsenir; bu, BPK 'nın sabit olduğu ve tüm çekme işlemi sırasında ayarlanamayacağı anlamına gelir. Sabit BPK, şekilleri nispeten basit olan küçük eğrilige sahip iş parçalarının sığ çizimi için uygundur [39].

BPK'nın büyüklüğü, çekme işleminde oluşan kırışıklıkları önlemek adına gerekli en önemli faktörlerdendir. Malzeme akışının kontrollü olması bu kuvvetten kaynaklanmaktadır. BPK arttıkça kalıp ile sac malzeme arasındaki tutunma kuvveti artar ve bununla birlikte sacın yüzeyindeki gerilmeler de artar [40].

BPK için gerekli hesaplamalarda Denklem 3.14 kullanılmaktadır.

$$F_B = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D + 2 \cdot r)^2] \cdot p \quad (3.14)$$

Burada çoğunlukla çekme boşluğu ile matris radyüsü ihmal edildiği için BPK'nın yaklaşık değeri zımba çapına bağlı olarak Denklem 3.15 ile hesaplanır [40].

$$F_B \approx \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot p \quad (3.15)$$

Baskı plakasının öz basıncı, zımba çapına ve malzeme kalınlığına bağlı olarak farklı malzemelerdeki hesaplanması Denklem 3.16 ile sağlanır.

$$p = \left[(\beta_{gerçek} - 1)^2 + \frac{d}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{R_m}{400} \quad (3.16)$$

Burada;

- F_B : BPK (N),
- D : İlk çap (mm),
- d : Zımba çapı (mm),
- p : Baskı plakası basıncı (N/mm²),
- s : Malzeme kalınlığı (mm),
- R_m : Malzeme çekme dayanımı (N/mm²),
- $\beta_{gerçek}$: Gerçek çekme oranı (mm).

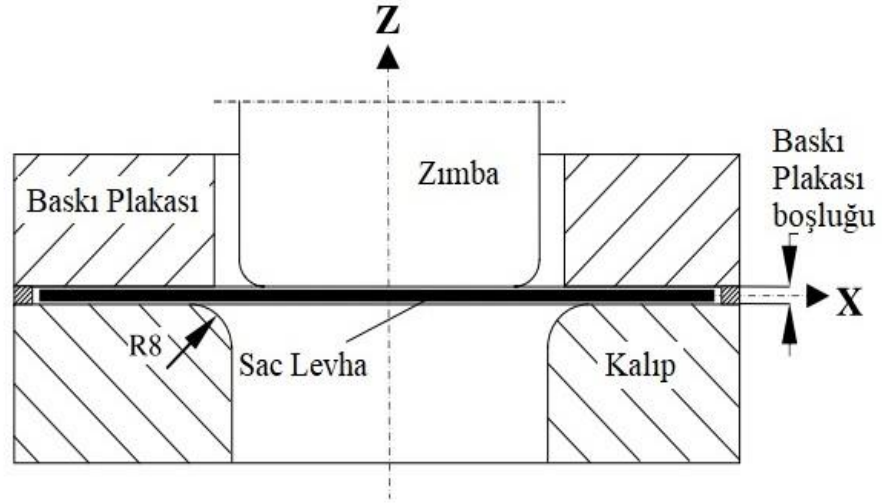
BPK'nın az olması durumunda malzeme üzerinde katlanmalar meydana gelir. Olması gerekenden daha büyük BPK ise yırtılmalara neden olur [40].

3.5.3. Baskı Plakası Boşluğu

Derin çekme işleminde birçok parametre işlemin başarısızlığını etkiler. Baskı plakası boşluğu ise bunlardan biridir. Parametreler arasında BPK ve baskı plakası boşluğu (BPB), parça kusurlarının büyümesini ve gelişimini büyük ölçüde etkileyebilir. Baskı plakası boşluğu kısaca baskı plakası ile matris yüzeyi arasındaki sabit mesafe olarak tanımlanır. İlk adımda, tutucu ara yüzünden gelen sürtünme kuvveti yoluyla levhaya bir sınırlayıcı kuvvet sağlamak için bir BPK uygulanır ve ardından zımba, malzemeyi kalıp boşluğuna çekmek ve malzemeyi istenen şekle plastik olarak deforme etmek için aşağı doğru hareket eder. Geleneksel derin çekme işlemlerinde, sac levhaya uygulanan BPK işlem sırasında sabittir, oysa deforme olan malzemedeki gerilme durumu önemli ölçüde değişir. Sonuç olarak buruşma ve kırılmaya neden olan işlem koşulları da değişir. Bu deformasyonları önlemek amacıyla malzeme üzerine kuvvet uygulamak yerine bir boşluk verilir [41].

Yapılan bir çalışmada baskı plakası-kalıp boşluk boyutu, çekme kuvveti üzerinde hafif bir etkiye sahipken matris-baskı plakası arasındaki temasları önemli ölçüde etkiler. Boşluk boyutu 58'den 53 μm 'ye düştüğünde, baskı plakasındaki temas kuvveti iki katına çıkar ve bu da önemli aşınma nedeniyle derin çekme takımlarının hizmet ömrünü azaltabilir. Başka bir literatür çalışması sonucunda baskı plakası boşluğunun malzemenin matris boşluğu içerisine akmasını kolaylaştırdığını ve kırışıklıkların önlenmesinde önemli bir etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir [2,42].

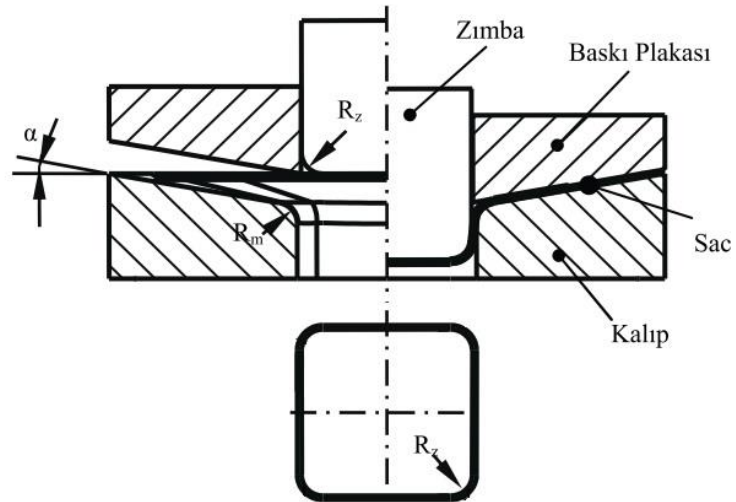
Diğer bir çalışmada ise 1 mm alüminyum levha kullanılarak 1mm'den 1,8 mm'ye kadar farklı ölçülerde baskı plakası boşluğu verilerek optimum seviyesi hesaplanmıştır. Yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda 1,8 mm'den fazla baskı plakası boşluğunun matris radyüsüne yakın bölgelerde kalınlaşmasından ve kırışmasından dolayı yırtılmalar oluştuğunu ve baskı plakası boşluğunun pozitif etkisinin kaybolduğunu tespit etmişlerdir. 1,3 mm baskı plakası boşluğundan sonra ise yüzey kalitesinin bozulduğunu söylemiştir. Bu sonuçlara göre en iyi baskı plakası boşluğunun 1 mm ile 1.3 mm arasında olduğunu söylemişlerdir [16]. Baskı plakası boşluğunun şematik görünümü Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.13. Baskı plakası boşluğunun şematik görünümü [16]

3.5.4. Matris-Baskı Plakası Açısı

Derin çekme işlemine etki eden bir diğer parametre ise matris-baskı plakası açısıdır. Yapılan çalışmalarda baskı plakası açısının et kalınlığını azalttığını, daha düşük çekme kuvvetleri, yüksek limit çekme oranı ve daha yüksek boyda kaplar elde edildiği görülmüştür [12,37,43]. Şekil 3.14’de matris-baskı plakası açısının şematik görünümü verilmiştir.

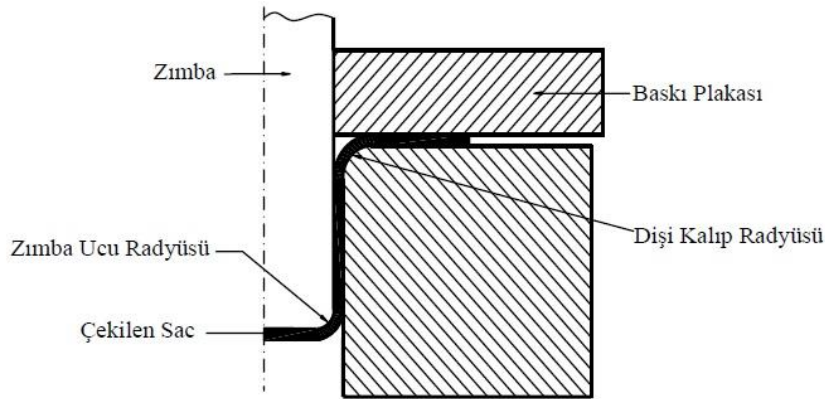


Şekil 3.14. Matris – baskı plakası açısının şematik görünümü [12]

3.5.5. Matris – Zimba Radyüsü

Zimba radyüsü derin çekme işleminde kullanılacak sacın biçimlendirilmesinde en önemli parametrelerden birisidir. Küçük bir zimba radyüsü, sac üzerindeki keskin çizgilerin iyi bir şekilde oluşması için istenilen bir özelliktir. Ancak bu tür keskin hatlar birim şekil değişimi artışını tek bir bölgede toplayacağı için üretimde zorluklara neden olmakta ve hata olasılığını arttırmaktadır. Bu durumda sacda yırtılmalar ve çatlamlar görülebilir [44].

Çekilmiş olan sacın ilk çekme işleminde bir kez bükülüp düzleştiği ve sonraki çekme işleminde iki kere bükülüp düzleştiği dikkate alındığında, zimba ve matris radyüsleri, sac malzemenin kalıba girmesine izin verecek şekilde mümkün olduğunca büyük olmalıdır. Bununla birlikte olması gerekenden daha fazla olan zimba ve matris radyüslerinde, baskı plakası etki yüzeyi azalacağından dolayı, takımın temas etmeyeceği sac malzeme yüzeyini artıracak ve bileşende istenmeyen kırışıklara neden olacaktır. Çekme eğrişi çok düşük tutulursa, sac malzemenin kalıp içinden akması için gereken temas alanı azalır, bu da takımın bir kalıp gibi davranmasını ve malzemeyi daha kolay yırtmasını sağlar [10]. Şekil 3.15’de matris-zimba radyüsünün şematik görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Matris-zimba radyüsünün şematik görünümü [15]

Önerilen matris radyüsü değerleri malzeme kalınlığına göre değişmektedir. Bu değerler matris radyüsünün aralığını belirtmekte olup kalıp elemanları bu tabloya göre ayarlanmalıdır. Böylelikle uygun deney şartları sağlanabilir ve derin çekme işlemindeki matris radyüsünün şekillendirilebilirliğe olan etkisi daha kolay araştırılabilir. Matris radyüsünün olması gereken en fazla değer 10 mm olarak gösterilmektedir. Matris radyüsünün 4 mm’den daha az kullanılması ise önerilmemektedir. Matris radyüsünün malzeme kalınlığına göre önerilen değerler Tablo3.2’ de verilmiştir.

Tablo 3.2. Matris radyüsü için önerilen değerler [15]

Malzeme Kalınlığı (mm)	Matris 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

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

Küçük bir zımba radyüsü cidar zayıflaması etkisi olduğunu gösterir. Cidar azalmasının bir sonucu olarak, malzeme tekrar çekme işlemindeki gerilmelere dayanamaz ve böylelikle yırtılır. Baskı plakalı çekme işleminde, aşağıda gösterildiği gibi matris ve radyüsleri arasındaki ilişkiye göre çekme işlemi gerçekleştirilir [15].

$$\frac{s}{D} 100 > 0,6 \quad \text{ise} \quad r_z = r_k \quad (3.17)$$

$$0,3 < \frac{s}{D} 100 < 0,6 \quad \text{ise} \quad r_z = 1,5r_k \quad (3.18)$$

$$\frac{s}{D} 100 < 0,3 \quad \text{ise} \quad r_z = 2r_k \quad (3.19)$$

Eşitsizlikleri kullanılır. Matris radyüsünün bulunması için Denklem 3.20 kullanılmaktadır.

$$r_k = 0,035[50 + (D - d)]\sqrt{s} \quad (3.20)$$

Burada:

- r_k : Matris radyüsü (mm),
- D : İlkel parça çapı (mm),
- s : Sac malzeme kalınlığı (mm),
- d : Zımba çapı (mm)

olarak verilmiştir [15]. Aynı zamanda matris radyüsü malzeme cinsine göre de Denklem 3.21 ve Denklem 3.22'ye göre hesaplanabilmektedir.

$$\text{Çelik saclarda : } R = 0,8\sqrt{(D - d) \cdot T} \quad (3.21)$$

$$\text{Alüminyum alaşımlarında : } R = 0,9\sqrt{(D - d) \cdot T} \quad (3.22)$$

Eşitlikleri kullanılmaktadır [45].

Pratik uygulamalarda, zımba ucu radyüsü sac malzemenin kalınlığının 3 ila 10 katı olduğu varsayılır. Öte yandan matris radyüsü, sac malzeme kalınlığının 10 katı veya daha fazla olacak şekilde seçilir [15].

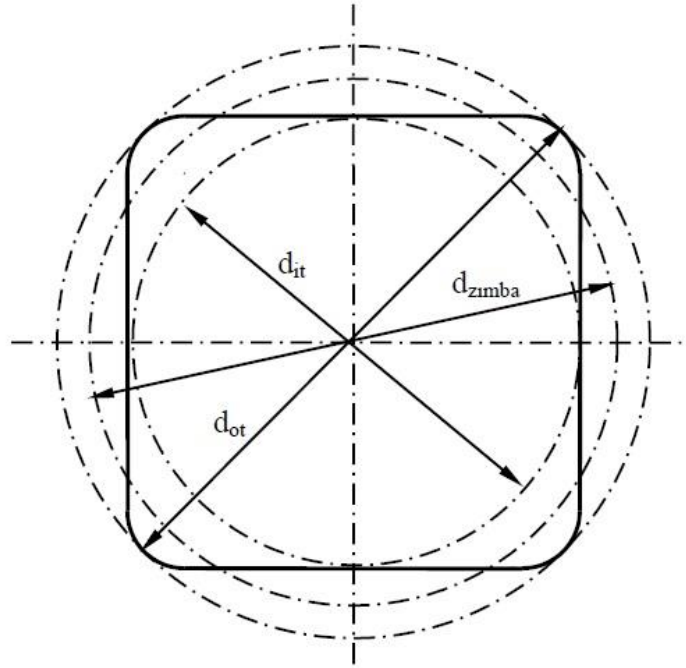
3.5.6. Limit Çekme Oranı

Limit çekme oranı (β), ideal olarak çatlama olmadan çekilebilen dairesel bir iş parçasının maksimum çapı ile işlenmesi beklenen zımba çapı arasındaki oran olarak tanımlanır. Parçanın kırılmadan, çatlama veya hasar görmeden çekilebilen maksimum hammadde çapı, damgalama malzemesini daha az deforme olmasını sağlar ve malzemenin kalıp boşluğunda buruşmasına veya yırtık/yırtılma şeklinde hasar görmesine neden olabilir. Ayrıca kalıp şekli ve geometrisi, malzeme mekanik özellikleri, boş malzeme şekli ve boyutu, kalıp yuvası ile baskı plakası arasındaki sürtünme ve yağlama koşulları, BPK, plaka boşluğu vb. faktörler de işlemin verimliliğini doğrudan etkileyebilir [12,46]. Limit çekme oranı Denklem 3.23 ve Denklem 3.24'de verilmiştir.

$$\beta = \frac{D_{max}}{d} \quad (3.23)$$

$$d_{zımba} = \frac{d_{it} + d_{ot}}{2} \quad (3.24)$$

Bu denklemde, D_{max} ilkel parça çapı, d_{it} ve d_{ot} Şekil 3.16'dakare zımbanın iç ve dış teğet dairelerinin çaplarıdır [47].



Şekil 3.16. Ortalama zimba çapının (d_{zimba}) kare kap için belirlenmesi [47]

3.5.7. Çekme Hızı

Diğer sac şekillendirme işlemlerinden farklı olarak derin çekme işlemi, zimba hızından etkilenen kritik bir parametredir. Derin çekme işleminde zimba; ilkel parçanın kalıp boşluğuna doğru akmasını sağlar. Malzemenin kalıp boşluğuna ilerleme hızı, zimba hızına bağlı olmaktadır. Uygulanması gereken zimba hızı malzeme türüne ve zimbanın vuruş sayısına göre değişkenlik gösterebilmektedir. [48]. Çeşitli malzemelere ait çekme hızları Tablo 3.3’ de verilmiştir.

Tablo 3.3. Çeşitli malzemelerin tek ve çift etkili çekme hızı değerleri [48]

Malzeme	Çekme Hızı (m/sn.)	
	Tek Etkili	Çift Etkili
Çelik	0,3	0,15-0,25
Paslanmaz Çelik	0,2	0,1-0,15
Alüminyum Alaşımı	0,25	0,15-0,2
Bakır	0,75	0,45
Pirinç	0,9	0,50

3.5.8. Çekme Boşluğu

Çekme boşluğu, zımba radyüsü ile kalıp boşluğu radyüsü arasındaki fark olarak tanımlanır. Bu değer, derin çekmede kullanılan ilkel parçanın kalınlığı ile doğru orantılıdır. Çekilmiş parçanın et kalınlığı dışındaki büzülme alanı, işlemin bir baskı plakası ile veya baskı plakası olmadan gerçekleştirilmesine bakılmaksızın, işlem adımlarının sayısını, çekilen parçanın fiziksel özelliklerini, prizmatik veya silindirik çizimin durumunu vb. etkiler [48].

Çeşitli malzemeler için çekme boşluklarının hesaplanmasında Denklem 3.25,3.26,3.27 ve 3.28 kullanılmıştır [49].

$$\text{Çelik için} \quad : w = e + 0,07 \cdot \sqrt{10 \cdot e} \quad (3.25)$$

$$\text{Alüminyum için} \quad : w = e + 0,02 \cdot \sqrt{10 \cdot e} \quad (3.26)$$

$$\text{Isıya dayanıklı alaşımlar için} \quad : w = e + 0,20 \cdot \sqrt{10 \cdot e} \quad (3.27)$$

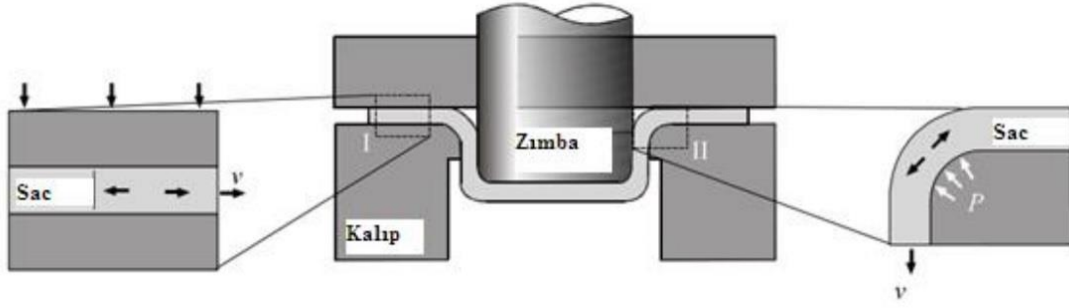
$$\text{Diğer demir dışı malzemeler için} : w = e + 0,04 \cdot \sqrt{10 \cdot e} \quad (3.28)$$

3.5.9. Sıcaklık

Derin çekme işlemi sırasındaki sıcaklık da işleme etki eden başka bir parametredir. Ilık olarak yapılan derin çekme işlemlerinde şekillenebilirlik oranının arttığı ve buna bağlı olarak malzemede oluşabilecek olası hataların azalıp ayrıca derin çekme strokunun da belirli oranda arttığı literatürde geçmektedir. Sıcaklık farkı kullanılan malzemenin mekanik yapısında ve deformasyon sırasındaki parçacık yapısında farklılaşmalara yol açacağından şekillenebilirlik etkisi de buna bağlı olarak değişim göstermektedir [50].

3.5.10. Yağlama

Plastik deformasyon yapan ekipman, kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünme nedeniyle aşınarak performansın düşmesine neden olur. Ayrıca, malzemelerin deforme olabilirliği sürtünme nedeniyle tehlikeye girer. Sürtünmeyi en aza indirmek için yağlama Yağlayıcılar malzemenin fiziksel durumlarına göre dört sınıfa ayrılabilir: katı, yarı katı, sıvı ve gaz yağlayıcılar. Bir yağlayıcı seçerken çalışma koşulları ve yağ kalitesi önemlidir [51]. Şekil 3.17’de bileşen, kalıp, zımba ve baskı plakası arasındaki sürtünme yüzeylerini göstermektedir. Bu temas yüzeylerindeki sürtünme, çekme işleminin verimliliğini büyük ölçüde etkiler.



Şekil 3.17. Derin çekme işlemi ve temas yüzeyleri [51]

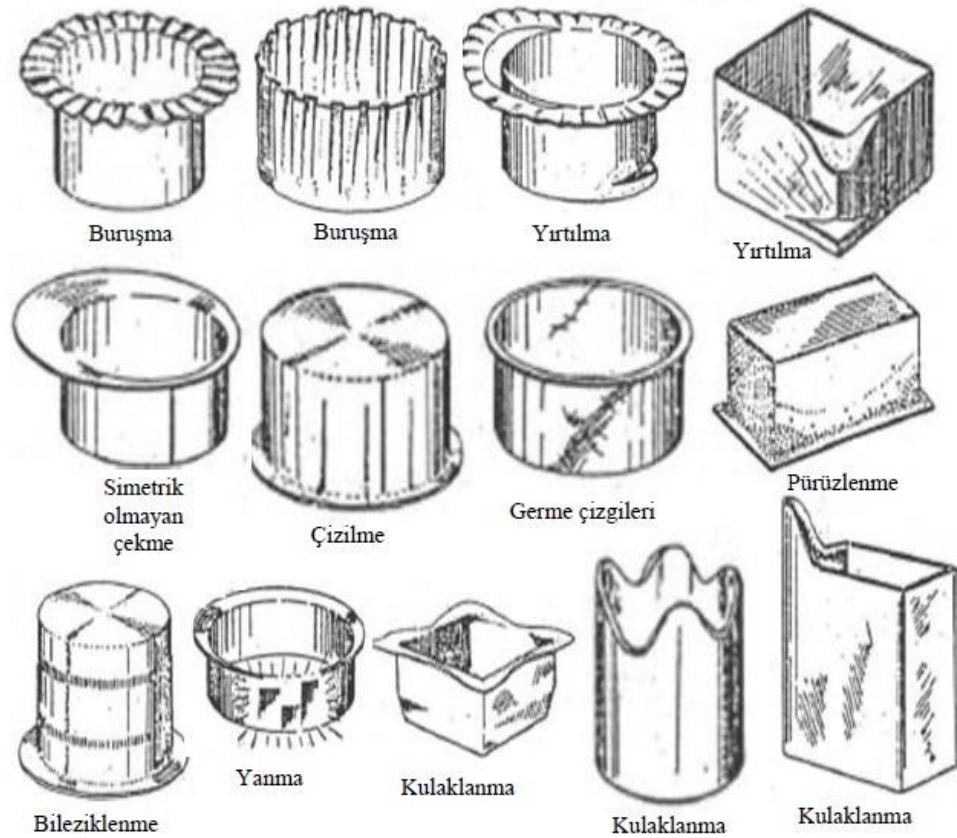
Derin çekmede, malzemenin flanş kısmı kalıba akana kadar sürekli yağlama sağlayabilmek önemlidir. Soğuk derin çekme işleminde, parafin ve polietilen folyo, yeterince kalın ve düzgün bir yağlayıcı film oluşturabilir. Ilık derin çekmede sıcaklığın basınçla el ele gitmesi, yağlayıcıların kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerektiğini gösterir. Yüksek sıcaklıktaki çalışma koşulları için yağlayıcı çalışmaları, bu işlem için en iyi yağlayıcıların Teflon katı yağlayıcılar ve bakır bazlı gresler olduğunu ortaya koymuştur. Ön testler, Teflon (PTFE) katı yağlayıcıların ve bakır içeren greslerin (gres ve sprej formunda mevcuttur) sıcaklık ve basınç altında gerekli ara yüzey yağlamasını sağlayabildiğini göstermiştir. Tüm deneyler, yağlayıcı olarak bakır gres (bakır macunu) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni, bakır içeren gres içindeki bakır parçacıklarının kalıptan iş parçasına ısı transferini kolaylaştırmasıdır. Yağlayıcıların olumsuz özellikleri buharlaşma, koku ve yüksek maliyettir. [52].

3.6. Derin Çekme İşleminde Görülen Hatalar

Derin çekme işlemi esnasında meydana gelen başlıca hatalar; yırtık, incelme, yağlama koşulları, sıcaklık, malzemenin yüzey kalitesi, şekillendirme hızı, BPK çatlak, dalgalanma (pot), girinti izi, kalıp izi (yüzey kalitesi), sac malzeme kaynaklı hatalar olarak sıralanabilir. Malzeme oluşturma sırasında yüzey pürüzlülüğü, akma noktaları, uzama değerleri, kalıp yüzeyleri ve uygun olmayan kuvvet değerlerinden kaynaklanan ayrılmalar kırılmaya verilen arıza modlarının tanımlarıdır. Derin çekme işleminde düzlemsel anizotropi değerinden kaynaklı, malzemenin farklı yönlerde göstereceği farklı mukavemetin etkisi ile derin çekme işlemi sonrası elde edilen farklı yüksekliklerde kulaklanma denilen yapılar oluşmaktadır [50,51,53].

Derin çekmede çoğu zaman zimba radyüsünün hemen üzerindeki alanda çatlaklara neden olur. Zimba veya matris radyüsünün küçük olması, malzeme özelliklerinin işlem için yetersiz olması, büyük derin çekme oranı, yüksek sıkıştırma basıncı, küçük çekme boşluğu, yetersiz yağlama veya uygun yağ tipinin kullanılmaması bu hataya sebep olur. Bazı durumlarda parçanın

üst veya dış kısmında çatlama işlemleri görülebilir. Malzeme kalitesinin daha yüksek olması ve zımba kuvvetini azaltıcı tedbirlerin alınması ile bu hata önlenir. Bazı durumlar çatlama işlemi parçanın üst veya dış kısımlarında görülür. Bunun sebebi ise malzemenin çevresel dış basınca karşı koyamayacak şekilde bulunan zayıf özelliklere sahip olmasıdır. Malzeme üzerinde çizik gibi izlerin varlığı da çatlaklara neden olabilir. Çekme boşluğu büyük olduğunda, BPK yetersiz olduğunda, matris ve zımba radyüsü ve ilkel parça çapı çok büyük olduğunda veya malzeme çok ince olduğunda buruşma olayı meydana gelir. Buruşmalar, gerekli matris geometrisi ve tahmin edilen BPK'nın hassas ayarlanması ile engellenebilir. Şekil 3.18'de derin çekme işleminde karşılaşılan hatalar gösterilmektedir. Ayrıca şekilde verilen sebeplerden dolayı derin çekme işleminde kabın flanş veya ağız kısmı tam olarak elde edilemez [15].



Şekil 3.18. Derin çekme işleminde görülen hatalar [15]

Derin çekme işleminde görülen hataların sebepleri Tablo 3.4' de verilmiştir.

Tablo 3.4. Derin çekme işleminde görülen hatalar ve sebepleri [10]

Hatalar	Olası Sebepleri
Buruşma	Uygunsuz baskı plakası kuvveti Baskı plakası kuvvetinin tüm yüzeylerde eşit olmaması Baskı plakası yüzeyinin düzgün olmaması Sac malzeme kalitesinin düşük olması Matris kavisinin çok büyük olması Çekme boşluğunun çok büyük olması Malzeme yüzeyinin kirli veya çapaklı olması
Parçada Yırtılma ve Kırılma	Aşırı Baskı plakası kuvveti Matris kavisinin çok küçük olması Zimba kavisinin çok küçük olması Çekme boşluğunun çok küçük olması Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması Uygunsuz veya eksik yağlama Sac malzeme kalitesinin düşük olması Pres hızının çok yüksek olması Çekme oranının çok yüksek olması Matris Matris veya baskı plakası üzerinde oluşan çizik veya çentikler Malzeme akışını önleyen keskin köşeler
Düzensiz Çekme veya Kulaklanma	Çekme boşluğunun uygun olmaması Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması Sac malzemenin matris içerisine uygun yerleştirilmemesi Uygunsuz yağlama
Parça kenarlarında yırtılma veya dalgalanma	Çekme boşluğunun uygun olmaması Fazla yağlama Matris kavisinin çok büyük olması Eşit olmayan baskı kuvveti Matris kenarlarının dışa esemesi
Parçanın dip kısımlarında pürüzlenme	Sac malzeme kalitesi Baskı plakasının yetersiz olması Baskı plakası üzerinde yağ birikmesi Hava çıkışının olmaması Parçadaki uygunsuz eseme

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Çalışmanın Amacı

Sac metal kalıpcılığı yönteminde kesme, delme, bükme, şekil verme ve derin çekme gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu neden ile 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 işlemine etkileyen parametreler, zımba ve matris radyüsleri, zımba ve matris açıklığı, baskı hızı, yağlama, BPK ve baskı plakası boşluğu gibi parametrelerdir. Derin çekme işleminde, BPK, ara yüzeyin sürtünme ve yağlama koşulları ve kalıp geometrisi gibi ürünlerin kalitesini etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler arasında, kalıplama kalitesi ve sac metal şekillendirme limiti üzerinde büyük etkisi olan, BPK önemli bir işlem parametresidir. Derin çekme işleminde çoğu zaman baskı plakası ilkel parçaya temas ederek yüzeyine bir kuvvet aktarmaktadır. Böylelikle zımba harekete geçtiği esnada ilkel parça sabit olarak kalacak ve malzeme plastik bölgeye geçerek kalıbın şeklini alacaktır. Fakat BPK uygun şekilde ayarlanmazsa ve ilkel parça yüzeyine çok fazla kuvvet uygularsa zımba harekete geçip kalıp içerisine girmeye başladığında baskı plakasının kuvvet uyguladığı dışarda kalan yüzeylerde yırtılmalar meydana gelir.

Yapılan bu çalışmada belirlenen parametrelerin şekillendirilebilirliğine olan etkisi araştırılmıştır. Buradaki parametreler; matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve baskı plakası kuvvetidir. Yapılan deneysel çalışmalarda matris-baskı plakası yüzeylerine 0° , $\alpha = 5^\circ$, $\alpha = 10^\circ$ ve $\alpha = 15^\circ$ 'lik 4 farklı açı, matris kenarlarına 4 mm, 6 mm ve 8 mm olarak 3 farklı radyüs ve BPK 5500 N, 7950 N, 10400 N olarak 3 farklı değerde verilerek deneyler gerçekleştirilecektir. Bu parametrelerin etkisini tespit etmek için çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçlarını tespit etmek amacıyla deney düzeneği sayısal ortamda modellenip sonlu elemanlar metodu ile analizler yapılmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda matris-baskı plakası açısı değişimi ilkel parça zımba boşluğuna daha rahat akarak oluşan kuvvetlerin azaldığı ve kırışmaların azaldığı görülmüştür. Matris radyüsü değişimi ile ilkel parça matris boşluğuna girerken daha kolay girmiştir ve ondülasyonlar azalmıştır. BPK değişimi ile ilkel parça üzerindeki ondülasyonların doğrudan azaldığı görülmüştür.

4.2. Deneysel Çalışmalar

Yapılan deneysel çalışmalarda ilkel parça olarak 0,8 mm AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sac levha kullanılmıştır. Bu sac levhanın kimyasal bileşenleri özellikleri Tablo 4.1'de, fiziksel özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

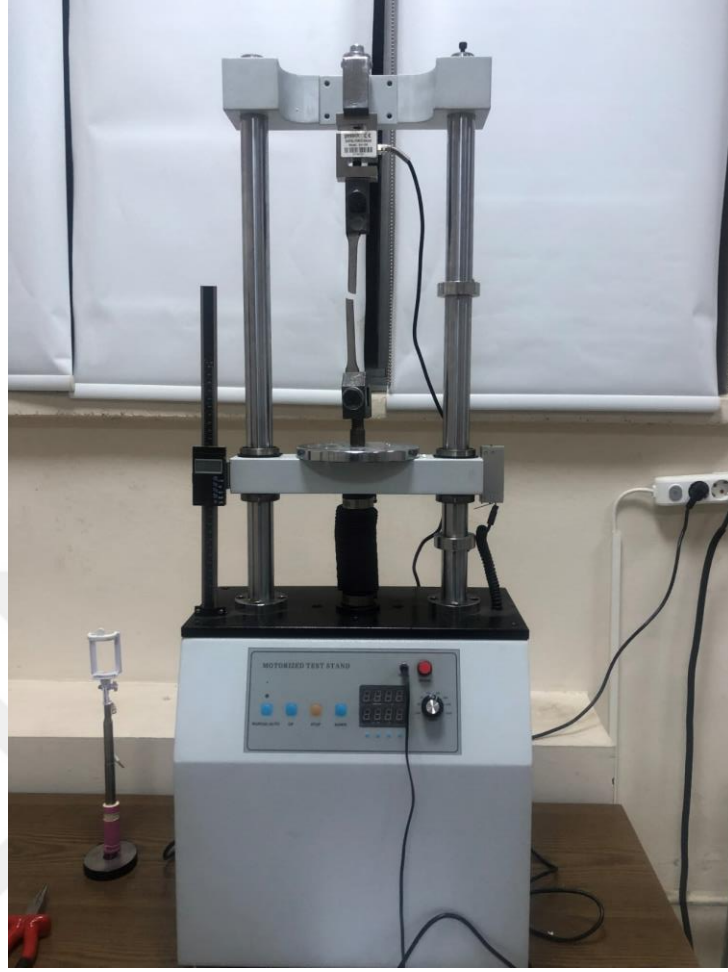
Tablo 4.1. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik kimyasal özellikleri

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Malzeme							
AISI 304	% 0,08 max	% 2,0 max	% 0,045 max	% 0,03 max	% 0,75 max	% 18- 20	% 8-10

Tablo 4.2. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemenin fiziksel özellikleri

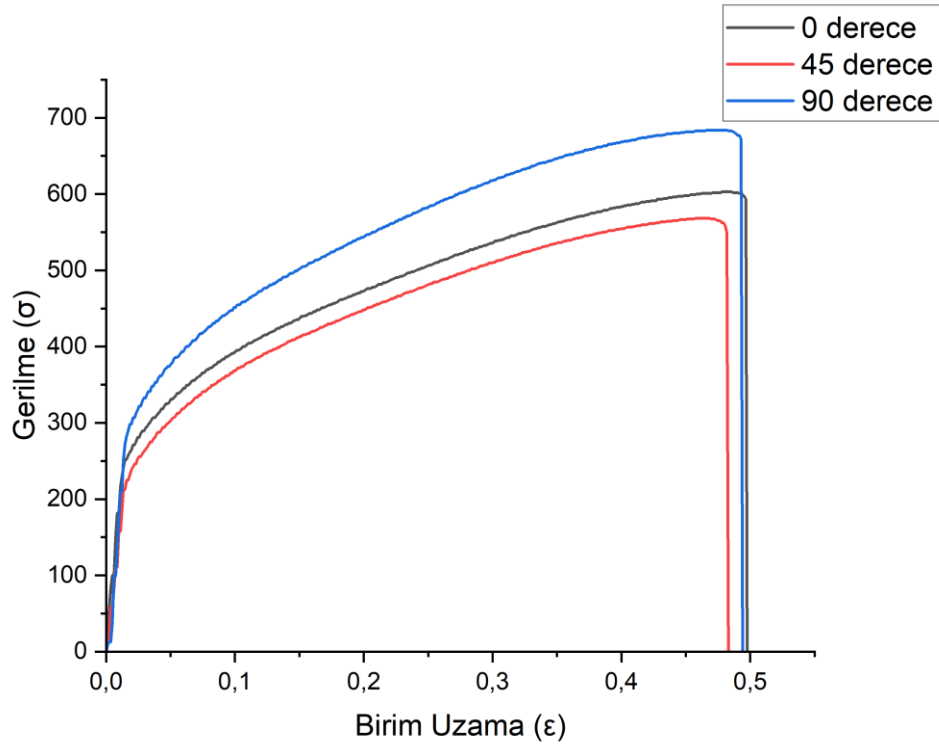
Özellikler	Değerler
Öz kütlesi (kg/m ³)	800 kg/m ³
Erime Sıcaklığı (°C)	1450 °C
Elektriksel direnç miktarı (Ωm)	0,072x10 ⁻⁶ Ωm
Isı geçirgenliği (W/m.K)	17,2 W/m.K

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan sac levhanın mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 30 kN kapasiteli çekme test cihazında 0°, 45°, 90° olmak üzere 3 farklı haddeleme açısıyla toplamda 12 adet çekme deneyi yapılmıştır. Çekme deneylerinin yapıldığı deney seti Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Çekme deneyi test cihazı

Yapılan çekme deneyleri sonucu çekme deneyi test cihazından elde edilen veriler kuvvet-zaman verileri sayısal ortama girilmiştir. Buradaki kuvvet-zaman verileri gerilme-birim uzama verilerine çevrilmiştir. Bunun sonucunda elde edilen çekme grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Çekme deneyi sonrası elde edilen çekme grafikleri

Çekme deneyi sonrası grafikler incelendiğinde hadde açısının değişmesi ile oluşan maksimum kuvvetin arttığı görülmüştür. Numunelerin akma noktası birbirlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Kopma noktası incelendiğinde 45⁰ daha geç kopmuştur ancak maksimum çekme kuvveti 90⁰ 'de gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda malzemenin mekanik özellikleri Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemenin mekanik özellikleri

Hadde Açısı (°)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Yüzde Uzama (%)	Elastisite modülü (kN/mm ²)
0 ⁰	251,9	602,88	50	158
45 ⁰	212,5	568,26	49	142
90 ⁰	298,1	683,65	42	189

Deneyisel çalışmalarda kullanılan parametrelerin değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir. Söz konusu bu deneyler tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi kullanarak parametrelerin değerleri kullanılarak toplam 36 deney parametresi hesaplanmıştır.

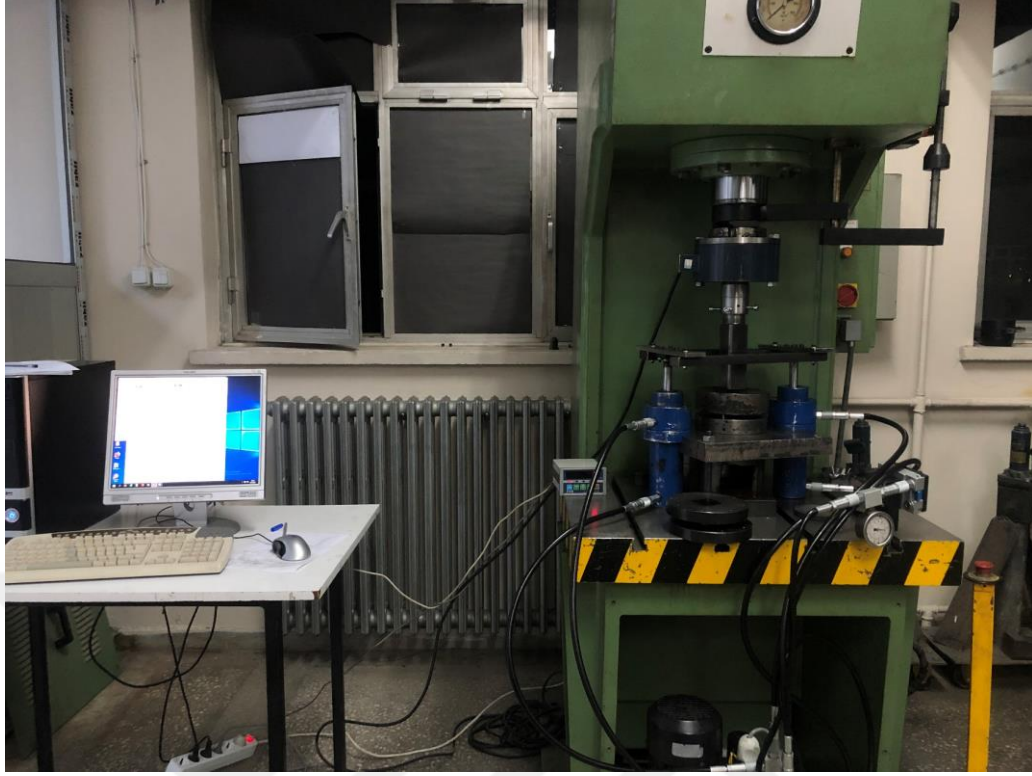
Tablo 4.4. Derin çekme deney parametrelerinin değerleri

Derin çekme deneyi parametreleri	Değerler			
Matris radyüsü (mm)	4	6	8	-
Matris-baskı plakası açısı (°)	0	5	10	15
Baskı plakası kuvveti (N)	5500	7950	10400	-

Derin çekme deneyinde kullanılacak olan ilkel parçalar boyutları belirlendikten sonra 2 boyutlu çizim programı kullanılarak sayısal ortamda çizilmiş ve Ajan marka 3 eksenli CNC plazma kesim makinası kullanılarak ilkel parça boyutlarına getirilmiştir. Aynı zamanda deneyde kullanılan matrisler daha önceden hazır bulunmaktadır. 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. Isıl işlem sonrasında matris ve zımba sertlikleri 58 HRC, baskı plakası sertliği ise 42 HRC sertlik değerlerinde olduğu görülmüştür. Deney elemanlarının ölçüleri Şekil 4.1’ de verilmiştir [15].

Yapılan deneysel çalışmalarda çekme kuvvetini ölçebilmek için 20 ton kapasiteli tek yönlü olarak kuvvet ölçme özelliğinde CAS LS-20T marka yük hücresi kullanılmıştır. Yapılan deney esnasında yük hücresinden okunan değerlerin bilgisayar ortamına kaydedilmesi için CAS 1500A marka indikatör, RS232 bağlantısı ile birlikte DNC bilgisayar programında bilgisayara kaydedilmiştir. Veriler 10^{-1} saniye aralığında program yardımıyla kaydedilmişlerdir.

Deneysel çalışmalar Fırat Üniversitesi, Teknoloji fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü atölyesinde yapılmıştır. Derin çekme deneyleri bu atölyede bulunan Şahinler marka C tipi 60 ton kapasiteli hidrolik pres tezgâhında yapılmıştır. Kalıp seti tezgâha bağlanmıştır ve hidrolik presin çekme hızı 4 mm/s olarak ayarlanmıştır. Derin çekme deney seti Şekil 4.3’ de görülmektedir.

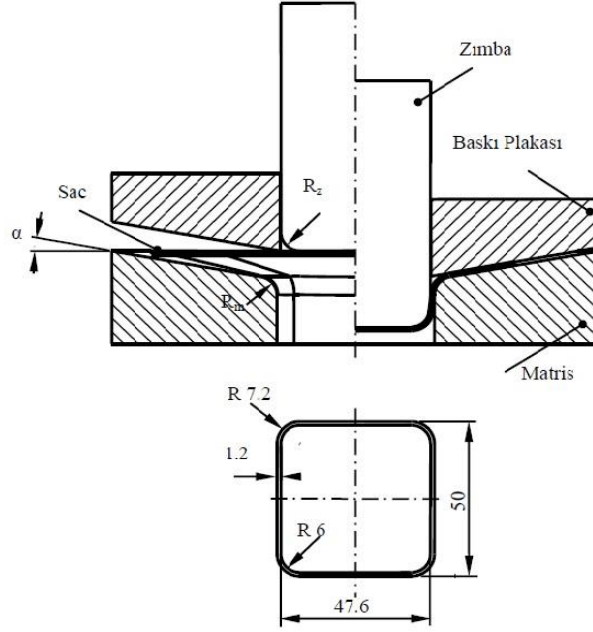


Şekil 4.3. Deney seti ve bağlı olduğu hidrolik pres tezgahı

Deneyisel çalışmalarda BPK'yı ayarlayabilmek için hidrolik bir sistem kullanılmıştır. Bu sistemde hidrolik pompaya bağlı yön kontrol valfi, basınç kontrol valfi, manometre ve iki adet hidrolik piston kullanılmıştır.

Yapılan deneyisel çalışmalarda deney setinde birbirine temas eden matris, baskı plakası, ilkel parça ve zimba arasındaki sürtünmeyi azaltmak için, özellikle östenitik paslanmaz çelik malzemenin kalıp elemanları tarafından çizilmelerini engellemek ve aynı zamanda ilkel parçanın matris içerisine akmasını rahatlatmak adına yağlama yağı kullanılmıştır.

Derin çekme deneyi yapılırken hidrolik pres ilerleme hızı ve baskı plakası sabit tutulmuştur. Yapılan deneyler 4 farklı matris-baskı plakası açısı, 3 farklı matris radyüsü, 3 farklı BPK kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune farklı matris açısı ve matris radyüsünde deneye tabi tutulmuştur. Bu parametreler ile birlikte 3 farklı BPK kullanılarak deneyler tekrarlanmıştır. Bu işlemler yapılarak parametrelerin derin çekme işlemine olan etkisi araştırılmış ve tespit edilmiştir. Her parametre için deformasyon gerçekleşmeden en büyük derin çekme oranı araştırılmış ve en büyük derin çekme oranı elde edilinceye kadar çekilmiştir. Yapılacak olan deneylerde kullanılan deney elemanlarının ölçüleri Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan elemanların ölçüleri

4.3. İlkel Parça Boyutlarının Belirlenmesi

Limit çekme oranının hesabı kare kaplar nezdinde kesin olarak bir hesabı bulunmamaktadır. Burada Denklem 3.23 ve Denklem 3.24 yardımıyla limit çekme oranı belirlenebilmektedir. Yapılan hesaplamalar ile ilkel parça boyutu 100 mm olarak seçilmiştir.

4.4. Sonlu Elemanlar Metodu Analizleri

Deneyisel çalışmalarda kullanılan ilkel parçaların deformasyonlarını belirlemek ve deneyisel çalışmalarla karşılaştırmak için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodu analizleri ANSYS 2022 R1 paket programında yapılmıştır.

Derin çekme deneylerinin sonlu elemanlar metodu ile yapılmasında öncelikle matris, baskı plakası, zimba ve ilkel parça bilgisayar ortamında SOLIDWORKS 2019 programı kullanılarak modellenmiştir. Burada deneylerde kullanılan kalıp elemanlarının bütün geometrik özellikleri dikkate alınarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Sayısal ortamda 3 boyutlu olarak modellenen kalıp elemanları ANSYS Workbench programında kullanılmak üzere Parasolid (.x_t) formatında kaydedilmiştir. Parasolid olarak kaydedilen kalıp seti ANSYS Workbench programına aktarılarak sonlu elemanlar metodunun veri yapısına uygun hale getirilmiştir.

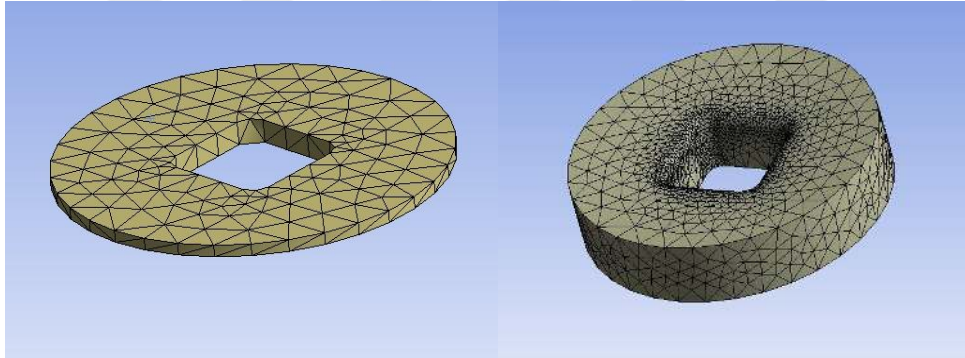
Sonlu elemanlar metodu paket programına aktarılan kalıp seti için öncelikle her bir kalıp parçası için gerekli malzeme ataması yapılır. Bu işlemten sonra derin çekme işleminde kalıp malzemeleri arasında oluşan temaslar programa eklenir. Ardından bütün deney seti için ağ yapıları

oluşturulur. Derin çekme işleminde kullanılan kuvvet ve ilerleme miktarı gibi sınır şartları eklenerek gerekli çözümleme işlemi yapılır. İlkel parça için kullanılacak olan malzeme izotropik bölümden seçilerek alınmıştır. Seçilen malzemenin mekanik özellikleri Tablo 4.5’de verilmiştir.

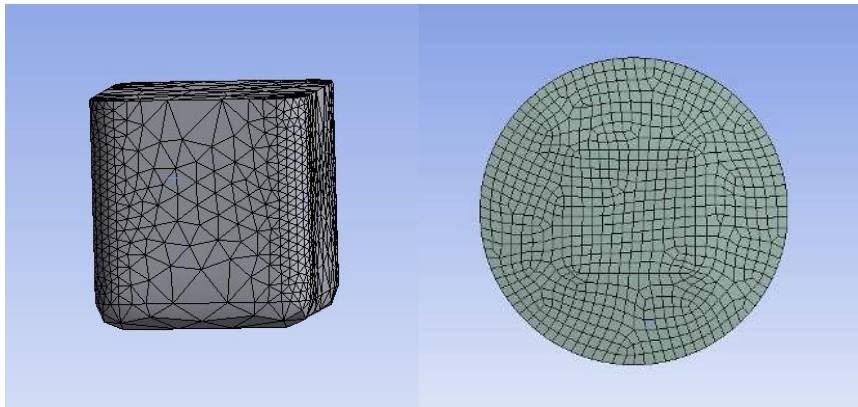
Tablo 4.5. Sonlu elemanlar metodu analizlerinde kullanılan ilkel parça malzemesinin mekanik özellikleri

Özellikler	Değerler
Yoğunluk (kg/m^3)	7900
Elastiklik Modülü (kN/mm^2)	200
Young Modülü (kN/mm^2)	198
Poisson Oranı	0,27
Bulk Modülü (kN/mm^2)	143,48
Shear Modülü (kN/mm^2)	77,953

Sonlu elemanlar metodunda kullanılan matris, baskı plakası, zımba ve ilkel parçaya ait ağ yapıları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

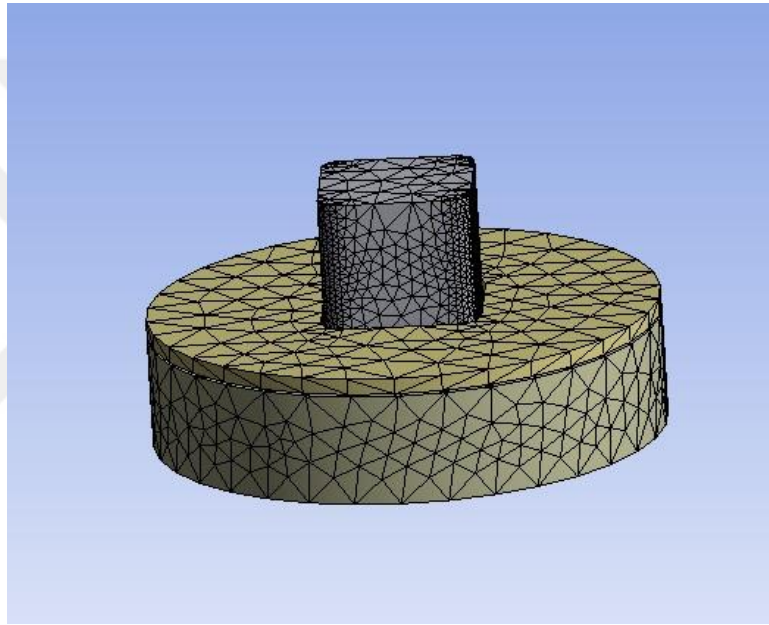


Şekil 4.5. Baskı plakası ve matrisin ağ görünümü



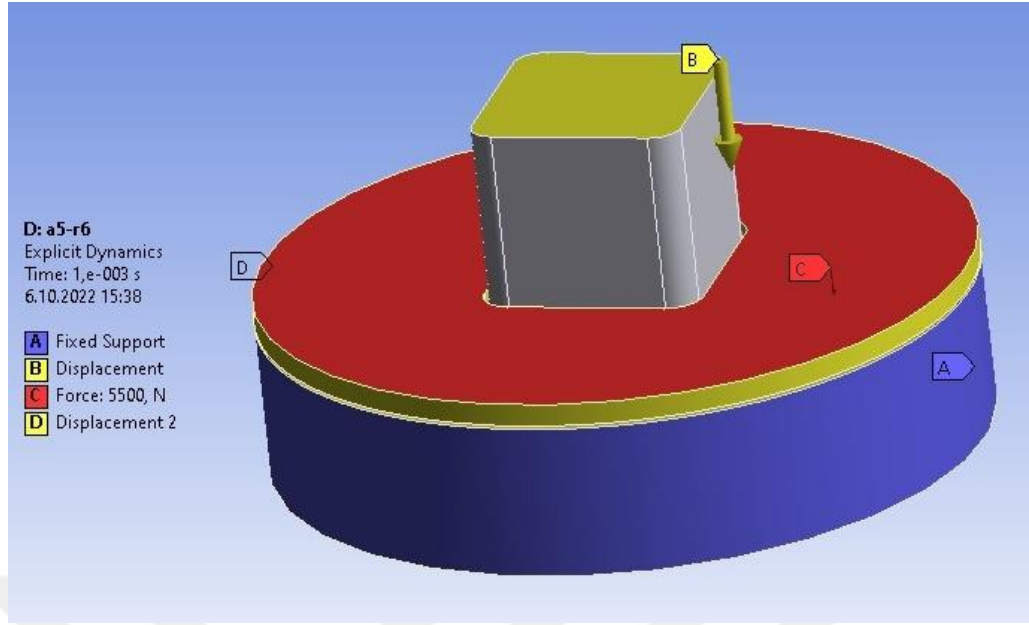
Şekil 4.6. Zımba ve ilkel parçanın ağ görünümü

Yapılan sonlu elemanlar metodu analizinde deney seti elemanlarına uygulanan ağ yapıları farklı ölçülerde seçilmiştir. Matris, baskı plakası, zımba için ağ yapısı 12 mm olarak ve ilkel parça için 3 mm olarak seçilmiştir. Burada ilkel parça harici diğer elemanlarda herhangi bir deformasyon araştırılmadığından dolayı ağ yapısı ölçüleri yüksek seçilmiştir. İlkel parça üzerindeki deformasyonlar ve gerilmeler inceleneceğinden dolayı ağ yapısı aralığı daha düşük ölçüde seçilmiştir. Böylelikle ilkel parçanın şekillendirmesinde oluşan deformasyonları ve gerilmeleri incelemek daha kolay olacaktır. Sayısal ortamda 3 boyutlu olarak modellenen parçaların montaj işlemi yapılmıştır ve her bir parametre için ayrı model olacak şekilde oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Deney elemanlarına ait ağ görüntüsü Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Deney setinin montajlanmış görünümü

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan parametreler ANSYS Workbench uygulaması üzerinde tanımlanmış ve gerekli deney elemanları üzerine uygulanmıştır. Şekil 4.8’de parametrelerin deney seti üzerinde uygulanışı görülmektedir.



Şekil 4.8. Parametrelerin deney seti üzerinde uygulanışı

5. DENEY SONUÇLARI

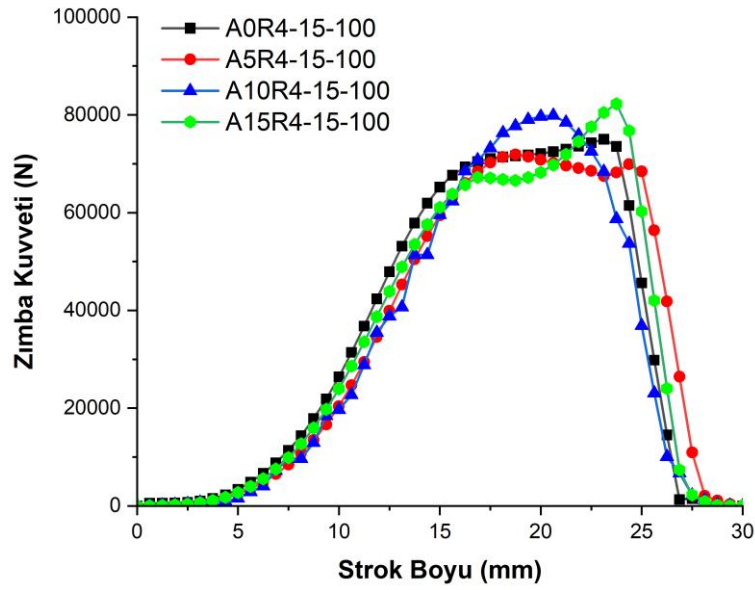
Derin çekme işleminde en önemli sonuçlarından birisi numunenin herhangi bir deformasyona uğramadan oluşmasıdır. Bunun için deney parametrelerinin şekillendirilebilirliğe olan etkisi incelenmiştir. Kalıp boşluğu, matris açısı, matris radyüsü, yağlayıcı gibi derin çekme işlemindeki önemli parametreler hasarsız numuneleri etkilediği için doğrudan şekillendirilebilirliğe etki etmektedir.

5.1. Deney Parametrelerinin Şekillendirilebilirliğe Olan Etkisi

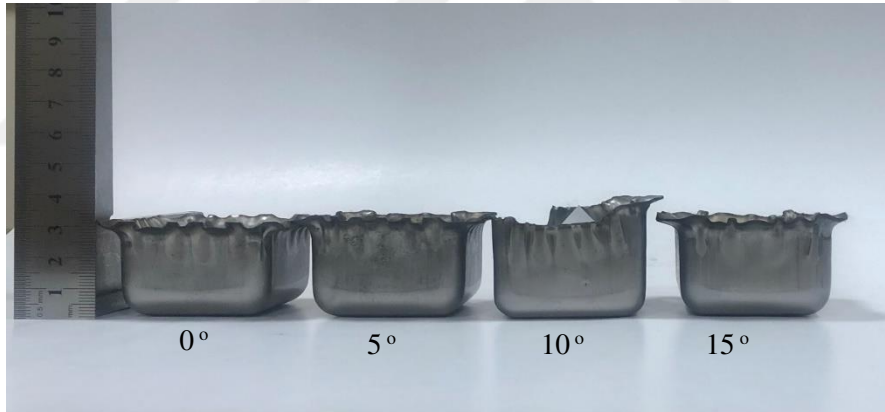
5.1.1. Matris-Baskı Plakası Açısının Şekillendirilebilirliğe Etkisi

Matris-baskı plakası açısının farklı değerleri (0^0 , 5^0 , 10^0 , 15^0) için BPK ve matris radyüsü değerleri değiştirilerek elde edilen sonuçlar maksimum kuvvet açısından değerlendirilmiştir.

Matris radyüsü 4 mm ve BPK 5500 N olarak uygulandığında, matris-baskı plakası açısı 0^0 iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 75026,88 N olarak ölçülmüştür. 5^0 için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 71868,06 N olarak ölçülmüştür. 10^0 için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 79873,02 N olarak ölçülmüştür. 15^0 için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 82266,66 N olarak ölçülmüştür. Matris radyüsü 4 mm ve BPK 5500 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris-baskı plakası açısına bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.1’de ve Şekil 5.2’de verilmiştir. Burada matris-baskı plakası açısı büyüdükçe maksimum kuvvette artış yaşanmıştır. BPK’nın yetersiz gelmesinden dolayı numunelerin üst kısımlarında ondülasyonlar meydana gelmiştir. Aynı zamanda 10^0 ’de yırtılmalar oluşmuştur.



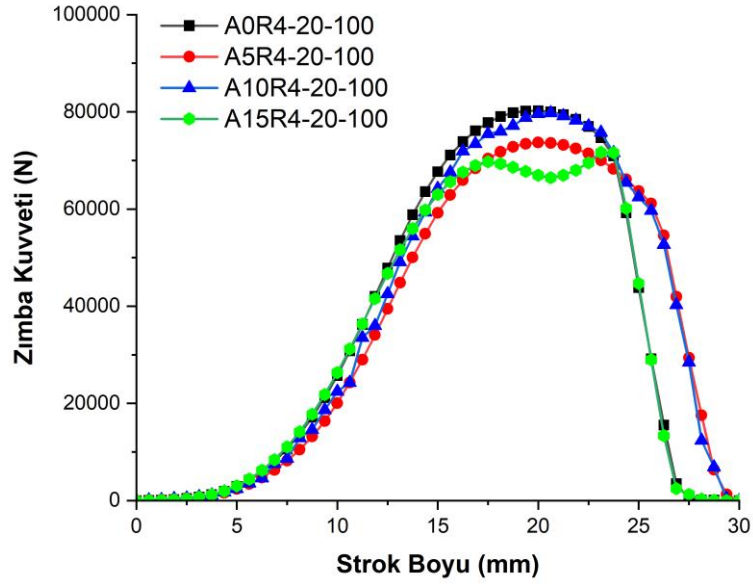
Şekil 5.1. R4 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



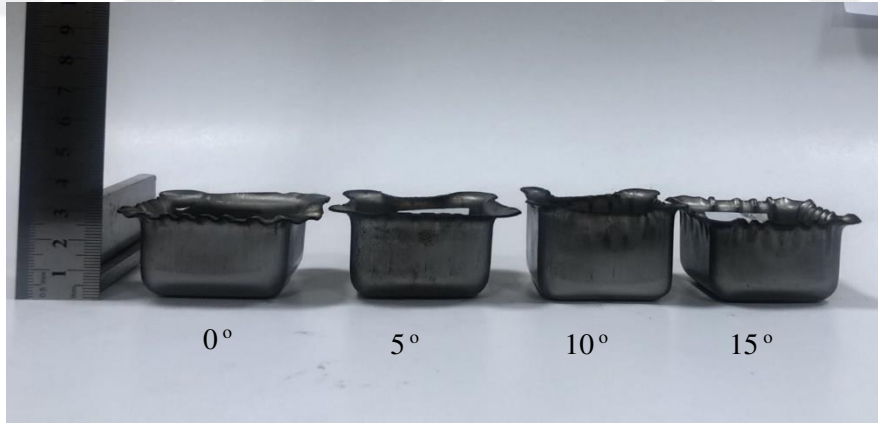
Şekil 5.2. R4 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris radyüsü 4 mm ve BPK 7950 N olarak uygulandığında, matris-baskı plakası açısı 0° iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 80245,8 N olarak ölçülmüştür. 5° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 73692,72 N olarak ölçülmüştür. 10° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 79755,3 N olarak ölçülmüştür. 15° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 71652,24 N olarak ölçülmüştür. Matris radyüsü 4 mm ve BPK 7950 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris-baskı plakası açısına bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.3'de ve Şekil 5.4'de verilmiştir. Burada matris-baskı plakası açısı büyüdükçe maksimum kuvvette azalma yaşanmıştır.

BPK'nın artması ile 5° ve 10° olduğu durumda ondülasyonlar azalmışken 0° ve 15° 'de ondülasyonlar görülmüştür.



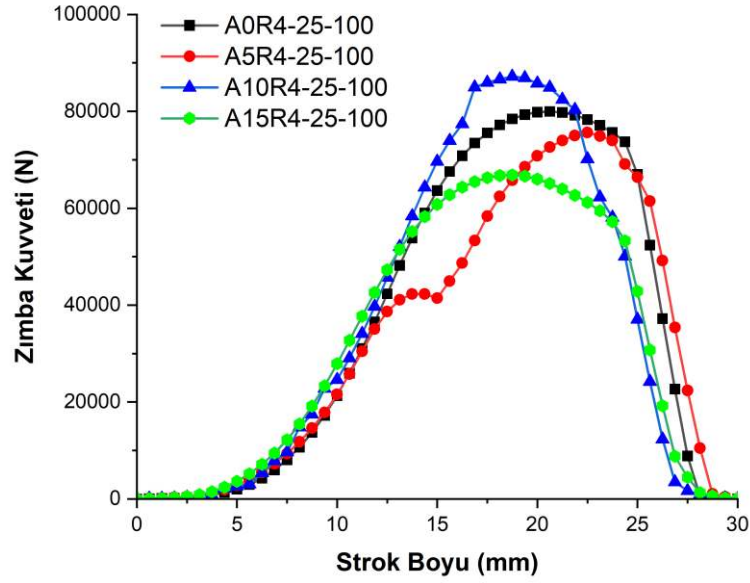
Şekil 5.3. R4 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



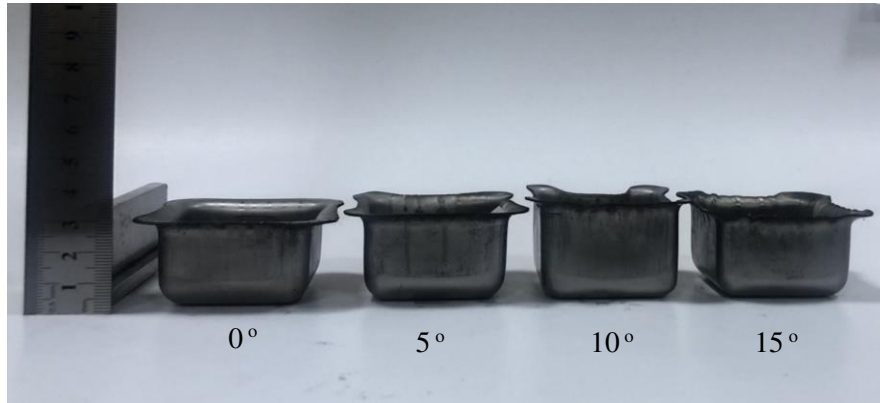
Şekil 5.4. R4 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris radyüsü 4 mm ve BPK 10400 N olarak uygulandığında, matris-baskı plakası açısı 0° iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 79971,12 N olarak ölçülmüştür. 5° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 75635,1 N olarak ölçülmüştür. 10° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 87191,28 N olarak ölçülmüştür. 15° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 66864,96 N olarak ölçülmüştür. Matris radyüsü 4 mm ve BPK 10400 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris-baskı plakası açısına bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.5'de ve Şekil 5.6'da

verilmiştir. Burada matris-baskı plakası açısı büyüdükçe maksimum kuvvette azalma yaşanmıştır. 10^0 durumunda maksimum kuvvet oluşmuştur. BPK'nın yeterli olmasından dolayı ondülasyonlar diğer baskı plakası kuvvetlerine göre ciddi bir azalma yaşamıştır. Aynı zamanda açı arttıkça ondülasyon miktarında bir artış olduğu gözlemlenmiştir.



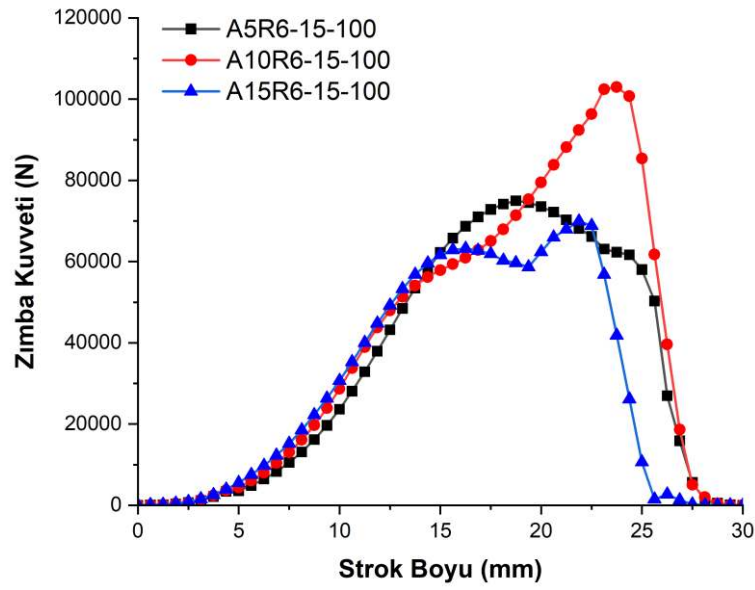
Şekil 5.5. R4 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



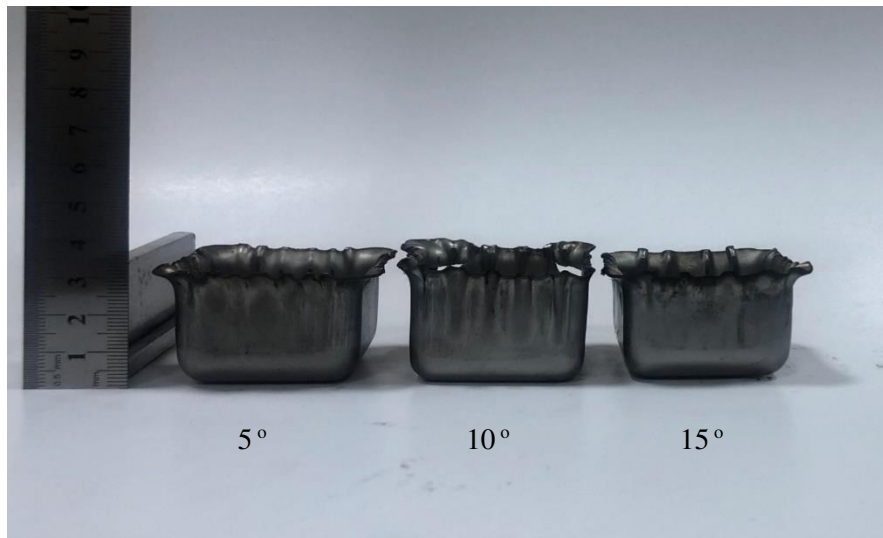
Şekil 5.6. R4 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris radyüsü 6 mm ve BPK 5500 N olarak uygulandığında, matris-baskı plakası açısı 5^0 iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 74968,02 N olarak ölçülmüştür. 0^0 için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 102965,76 N olarak ölçülmüştür. 15^0 için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 69964,92 N olarak ölçülmüştür. Matris

radıysü 6 mm ve BPK 5500 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris-baskı plakası açısına bağlı değişimine ait olan deney numuneleri şekil 5.7’de ve şekil 5.8’de verilmiştir. Burada matris-baskı plakası açısı büyüdükçe maksimum kuvvette azalma yaşanmıştır. Fakat maksimum kuvvet 10^0 ’de gözlemlenmiştir. Bu numune incelendiğinde ise üst köşelerinde yırtılma olmasından kaynaklandığı görülmektedir. BPK yetersiz kaldığından dolayı ondüasyonlar görülmektedir.

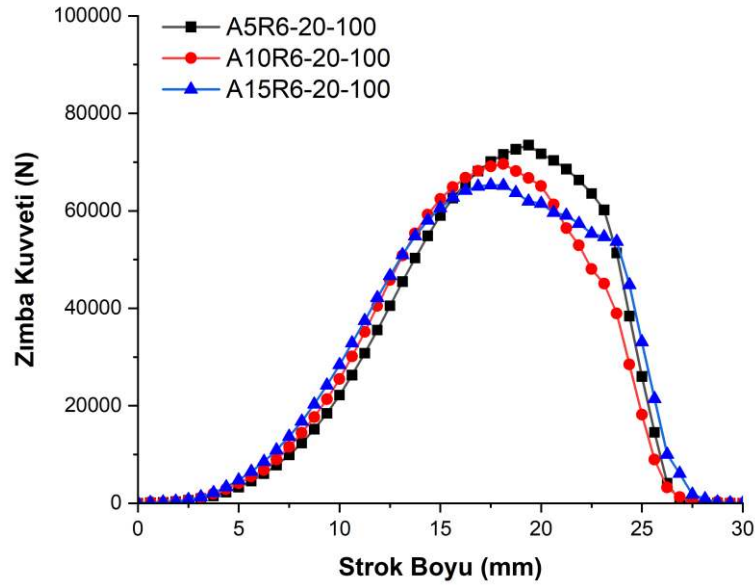


şekil 5.7. R6 için BPK’nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zimba kuvveti

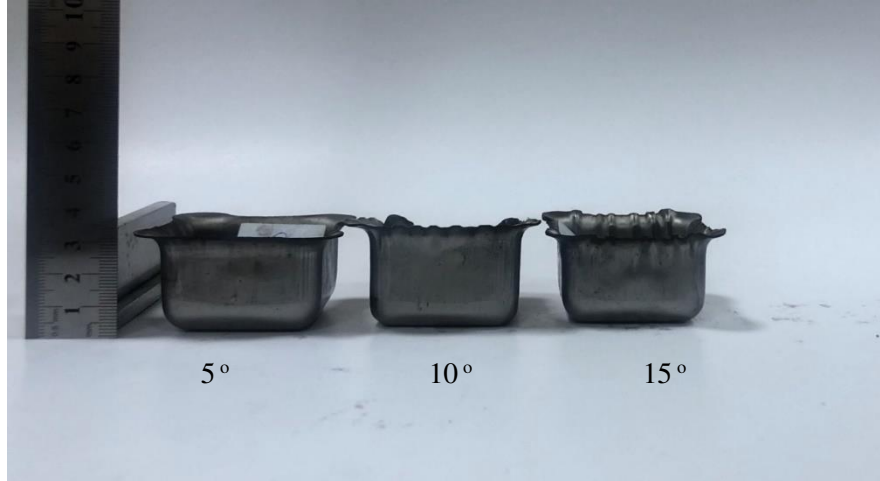


şekil 5.8. R6 için BPK’nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris radyüsü 6 mm ve BPK 7950 N olarak uygulandığında, matris-baskı plakası açısı 5° iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 73746,9 N olarak ölçülmüştür. 10° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 69611,76 N olarak ölçülmüştür. 15° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 65314,98 N olarak ölçülmüştür. Matris radyüsü 6 mm ve BPK 7950 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris-baskı plakası açısına bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.9'da ve Şekil 5.10'da verilmiştir. . Burada matris-baskı plakası açısı büyüdükçe maksimum kuvvette azalma yaşanmıştır. Maksimum kuvvet 5° durumunda oluşmuştur. BPK'nın artmasından dolayı ondülasyonlarda azalma yaşanmış ancak açının artması ile ondülasyonların arttığı gözlemlenmektedir.

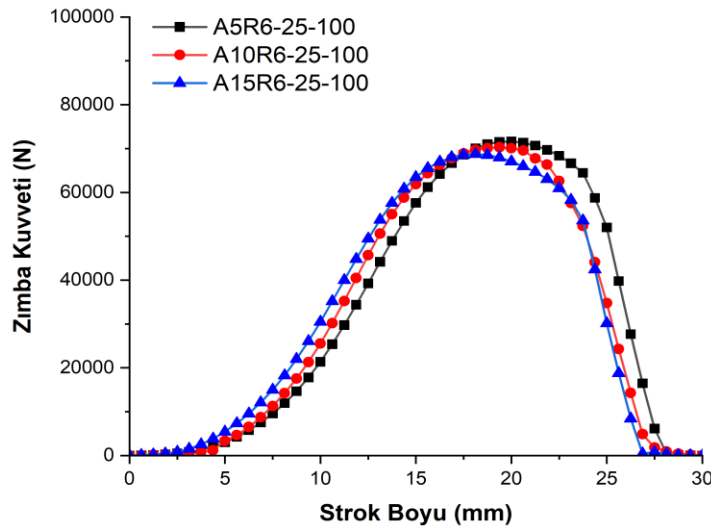


Şekil 5.9. R6 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti

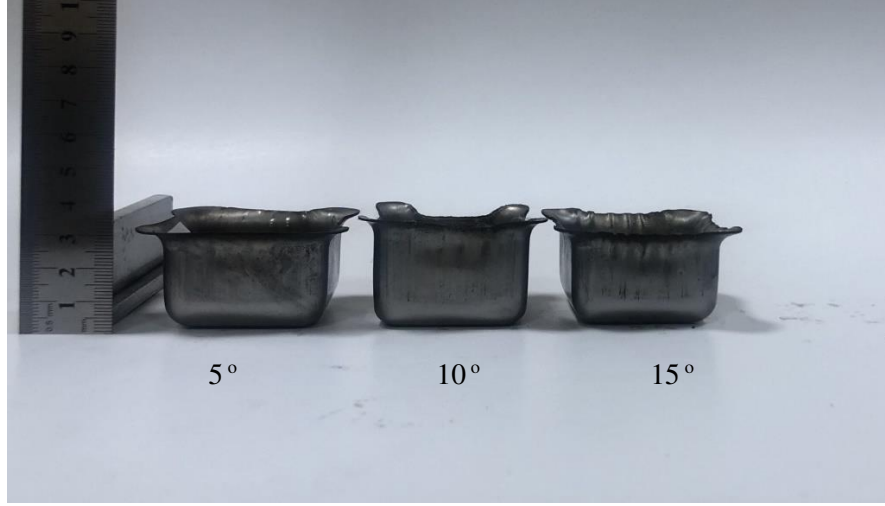


Şekil 5.10. R6 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris radyüsü 6 mm ve BPK 10400 N olarak uygulandığında, matris-baskı plakası açısı 5° iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 71632,62 N olarak ölçülmüştür. 10° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 70278,84 N olarak ölçülmüştür. 15° için ve 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 68768,1 N olarak ölçülmüştür. Matris radyüsü 6 mm ve BPK 10400N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris-baskı plakası açısına bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.11'de ve Şekil 5.12'de verilmiştir. Burada matris-baskı plakası açısı büyüdükçe maksimum kuvvette azalma yaşanmıştır. BPK'nın artması ile ondülasyonlar azalmıştır. 15° matris açısından BPK'nın fazla olması ile numune matris içerisine akmakta zorlanmış ve ondülasyonlar oluşmuştur.

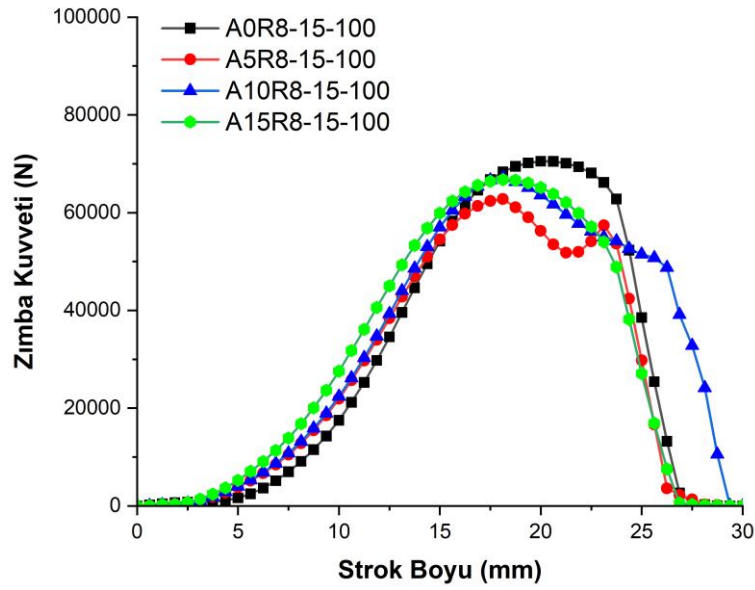


Şekil 5.11. R6 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti

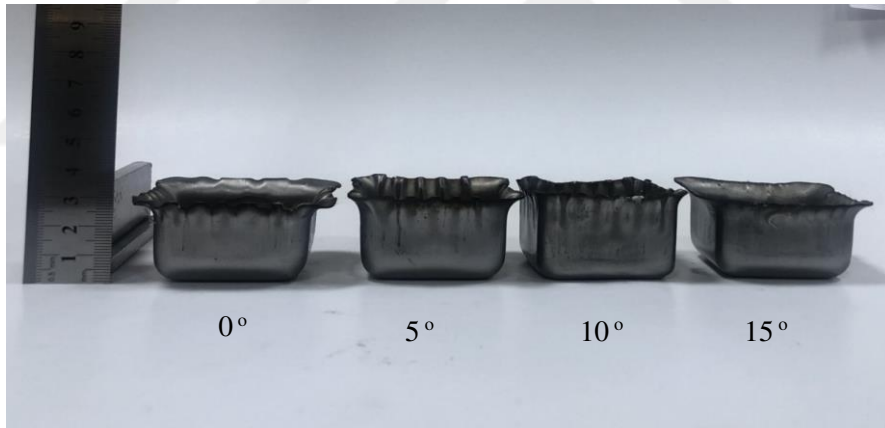


Şekil 5.12. R6 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris radyüsü 8 mm ve BPK 5500 N olarak uygulandığında, matris-baskı plakası açısı 0^0 iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 70514,28 N olarak ölçülmüştür. 5^0 için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 62803,62 N olarak ölçülmüştür. 10^0 için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 67159,26 N olarak ölçülmüştür. 15^0 için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 66747,24 N olarak ölçülmüştür. Matris radyüsü 8 mm ve BPK 5500 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris-baskı plakası açısına bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.13'de ve Şekil 5.14'de verilmiştir. Burada matris-baskı plakası açısı büyümesi ile en yüksek kuvvet 0^0 ve en düşük kuvvet 5^0 durumunda gözlemlenmiştir. Matris radyüsünün artması ile açı arttıkça ondülasyonlar azalmıştır.



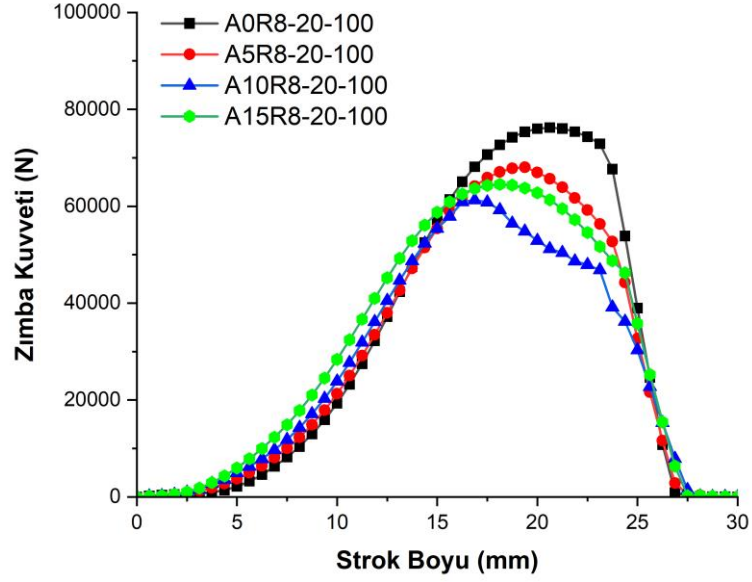
Şekil 5.13. R8 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



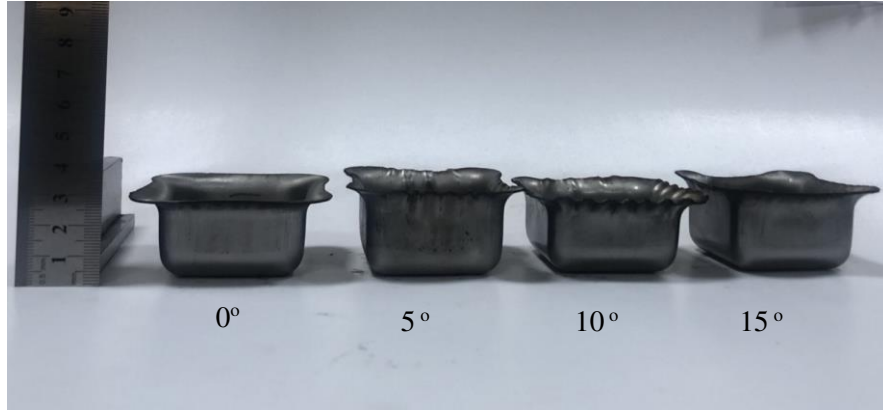
Şekil 5.14. R8 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris radyüsü 8 mm ve BPK 7950 N olarak uygulandığında, matris-baskı plakası açısı 0° iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 76223,7 N olarak ölçülmüştür. 5° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 68042,16 N olarak ölçülmüştür. 10° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 61253,64 N olarak ölçülmüştür. 15° için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 64530,18 N olarak ölçülmüştür. Matris radyüsü 8 mm ve BPK 7950 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris-baskı plakası açısına bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.15'de ve Şekil 5.16'da verilmiştir. Burada matris-baskı plakası açısı büyüdükçe maksimum kuvvette azalma

yaşanmıştır. En düşük kuvvet ise 10^0 olduğu durumda gözlemlenmiş ve ondülasyonlar sadece bu durumda görüntülenmiştir. BPK'nın artması ile ondülasyonlar azalmıştır.



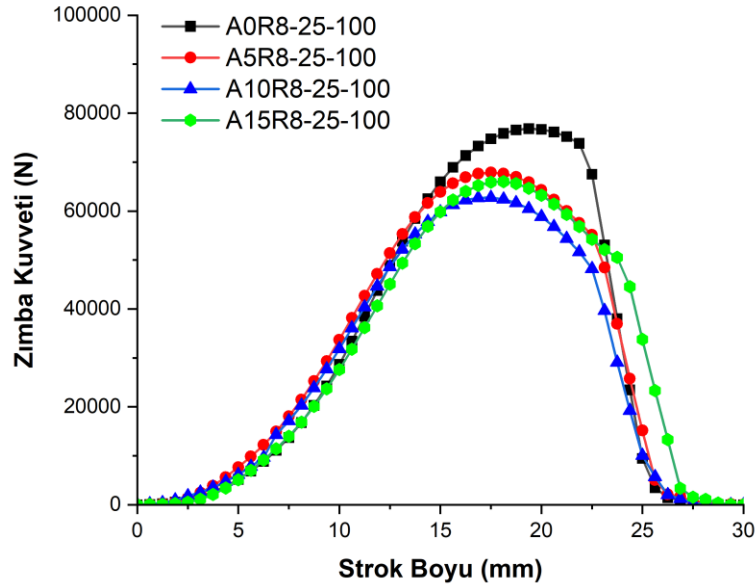
Şekil 5.15. R8 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



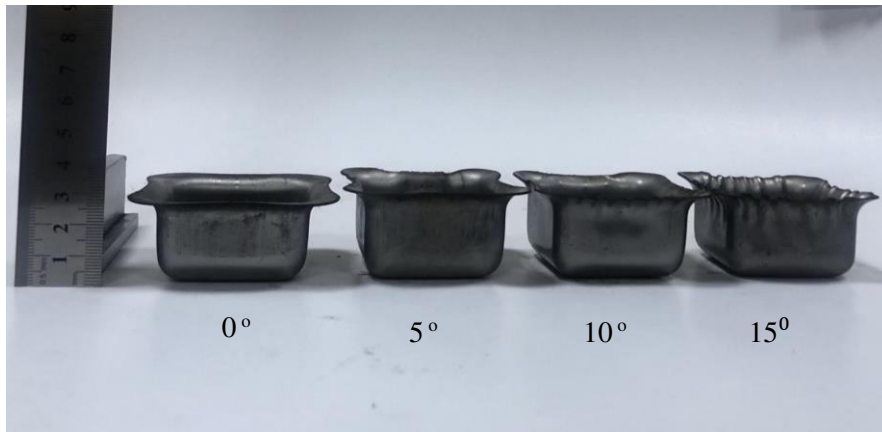
Şekil 5.16. R8 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris radyüsü 8 mm ve BPK 10400 N olarak uygulandığında, matris-baskı plakası açısı 0^0 iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 76812,3 N olarak ölçülmüştür. 5^0 için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 67865,58 N olarak ölçülmüştür. 10^0 için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 62764,38 N olarak ölçülmüştür. 15^0 için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 66021,3 N olarak ölçülmüştür. Matris radyüsü 8 mm ve BPK 10400 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve

matris-baskı plakası açısına bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.17’de ve Şekil 5.18’de verilmiştir. Burada matris-baskı plakası açısı büyüdükçe maksimum kuvvette azalma yaşanmıştır. En düşük kuvvet ise 10^0 olduğu durumda gözlemlenmiştir. 15^0 matris açısından BPK’nın fazla olması ile numune matris içerisine akmakta zorlanmış ve ondülasyonlar oluşmuştur.



Şekil 5.17. R8 için BPK’nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



Şekil 5.18. R8 için BPK’nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler

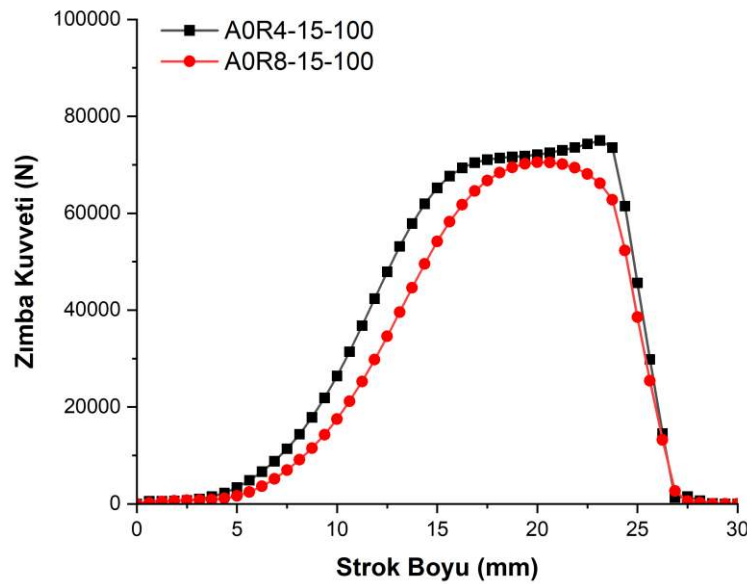
Matris-baskı plakası açısının derin çekme işlemine etkileri incelendiğinde, çekme işlemi esnasında matris-baskı plakası açısının artması ile ilkel parçanın matris yüzeylerine temaslarını azaltarak sürtünmenin azalmasını sağlamıştır. Böylelikle ilkel parça matris içerisine daha rahat

şekilde akmiş ve buruşmalarda azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda matris-baskı plakası açısının artması ile maksimum kuvvette azalma yaşanmıştır.

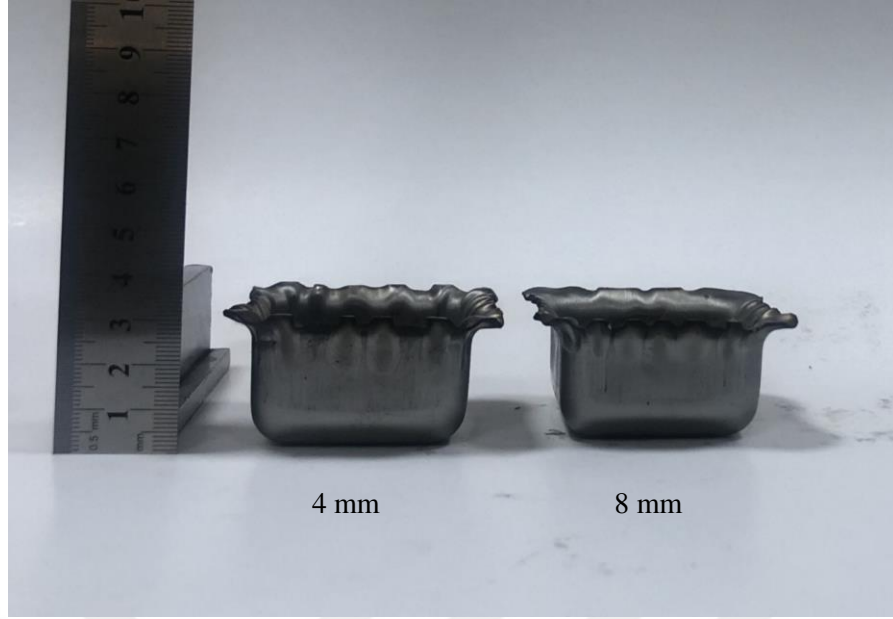
5.1.2. Matris Radyüsünün Şekillendirilebilirliğe Etkisi

Derin çekme işlemine etki eden temel parametrelerden birisi de radyüsdür. Matris radyüsü malzemenin matris içerisine akışını kolaylaştırır ve numunelerin daha az kusurlu çıkmasını sağlamaktadır. Bunu sağlamak adına matrisin üst yüzeyinde farklı değerlerde radyüsler kullanarak bunların limit çekme oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu etkiden dolayı 3 farklı değerde (4,6 ve 8 mm) radyüsler verilmiştir.

Matris-baskı plakası açısı 0^0 ve BPK 5500 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 75026,88 N olarak ölçülmüştür. 8 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 70514,28 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 0^0 ve BPK 5500 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.19'da ve Şekil 5.20'de verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Aynı zamanda radyüsün artması ile ondülasyonlarda azalma gözlemlenmiştir.

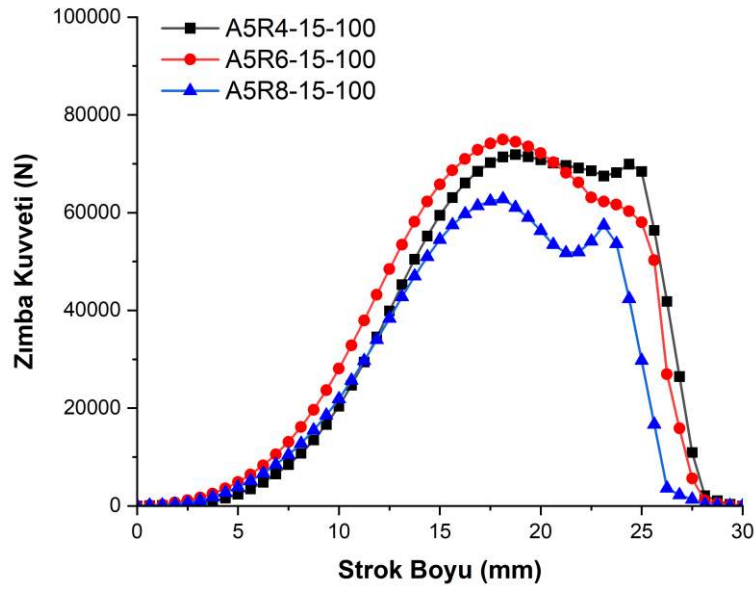


Şekil 5.19. 0^0 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti

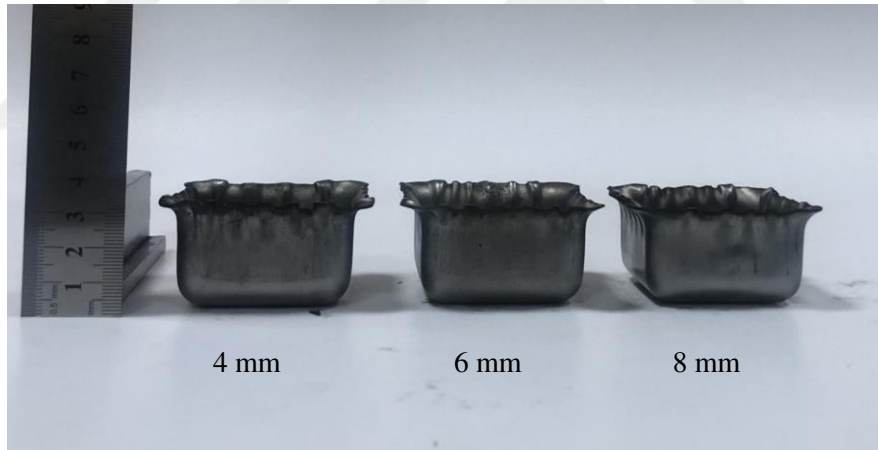


Şekil 5.20. 0° için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 5° ve BPK 5500 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 71868,06 N olarak ölçülmüştür. 6 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 74968,02 N olarak ölçülmüştür. 8 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 62803,62 N olarak ölçülmüştür. Şekilde Matris-baskı plakası açısı 5° ve BPK 5500 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.21'de ve Şekil 5.22'de verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Maksimum kuvvet ise 6 mm durumunda oluşmuştur. Aynı zamanda radyüsün artması ile ondülasyonlarda azalma gözlemlenmiştir.



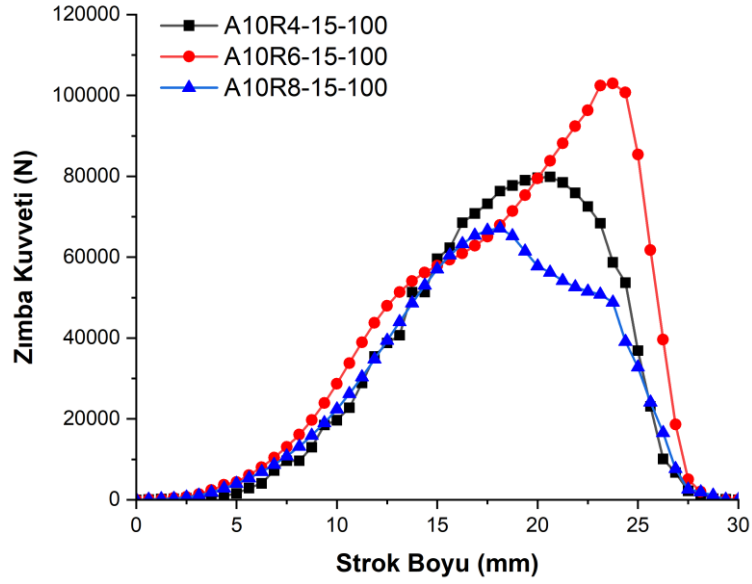
Şekil 5.21. 5° için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zimba kuvveti



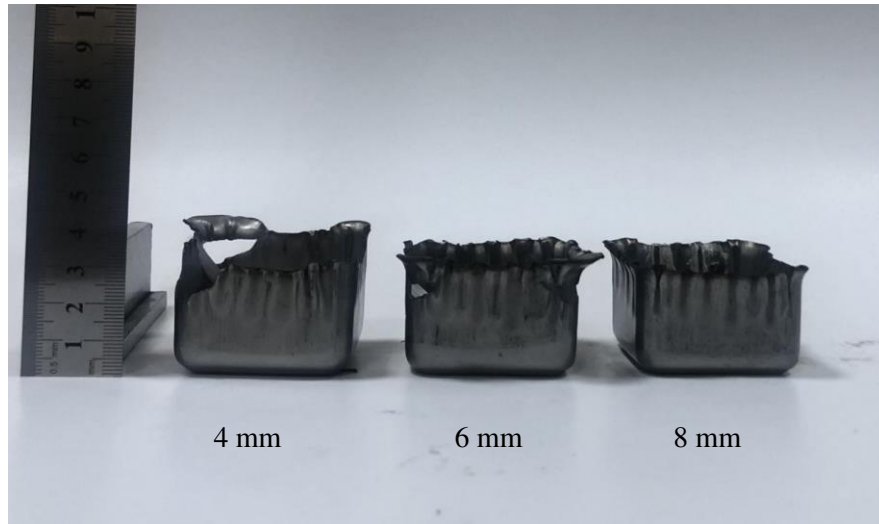
Şekil 5.22. 5° için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 10° ve BPK 5500 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zimba kuvveti 79873,02 N olarak ölçülmüştür. 6 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zimba kuvveti 102965,76 N olarak ölçülmüştür. 8 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zimba kuvveti 67159,26 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 10° ve BPK 5500 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.23'de ve Şekil 5.24'de verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir.

Maksimum kuvvet ise 6 mm durumunda oluşmuştur. 4 mm ve 6 mm durumda numunelerde yırtılmalar meydana gelmiştir.



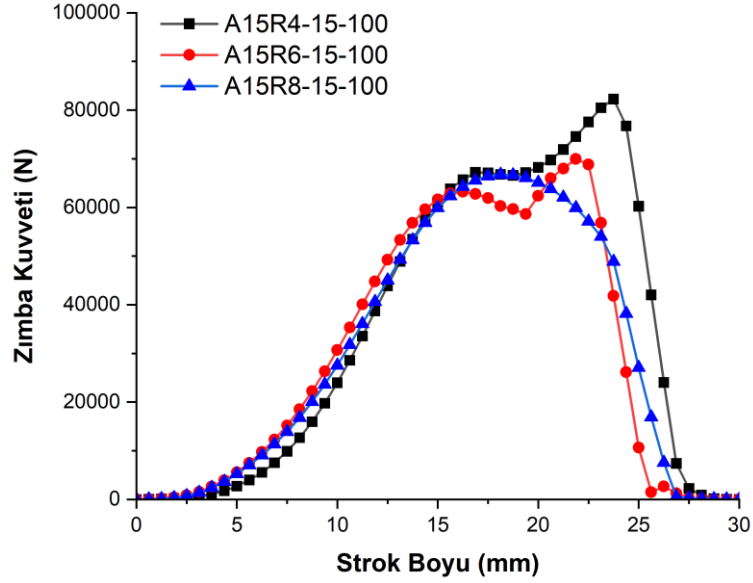
Şekil 5.23. 10^0 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



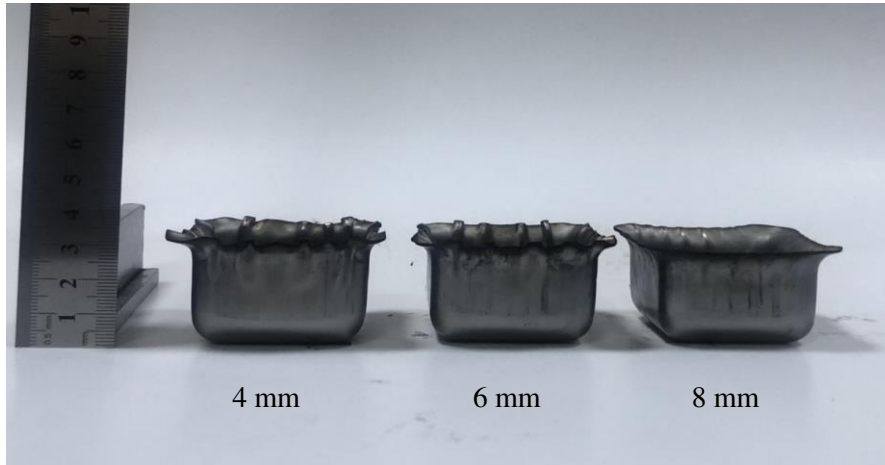
Şekil 5.24. 10^0 için BPK'nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 15^0 ve BPK 5500 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 82266,66 N olarak ölçülmüştür. 6 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 69964,92 N olarak ölçülmüştür. 8 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 66747,24 N olarak ölçülmüştür. Şekilde

Matris-baskı plakası açısı 15^0 ve BPK 5500 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.25’de ve Şekil 5.26’da verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Matris radyüsünün artması ile ondülasyonlarda ciddi bir azalma gözlemlenmiştir.



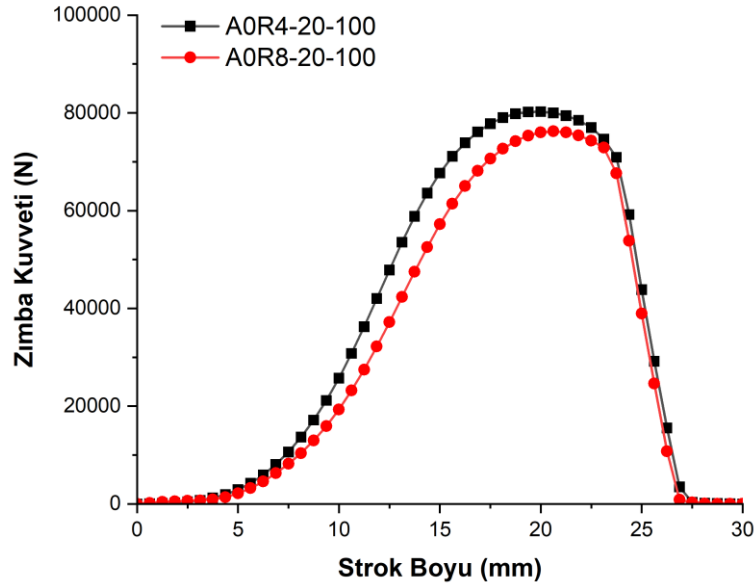
Şekil 5.25. 15^0 için BPK’nın 5500 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



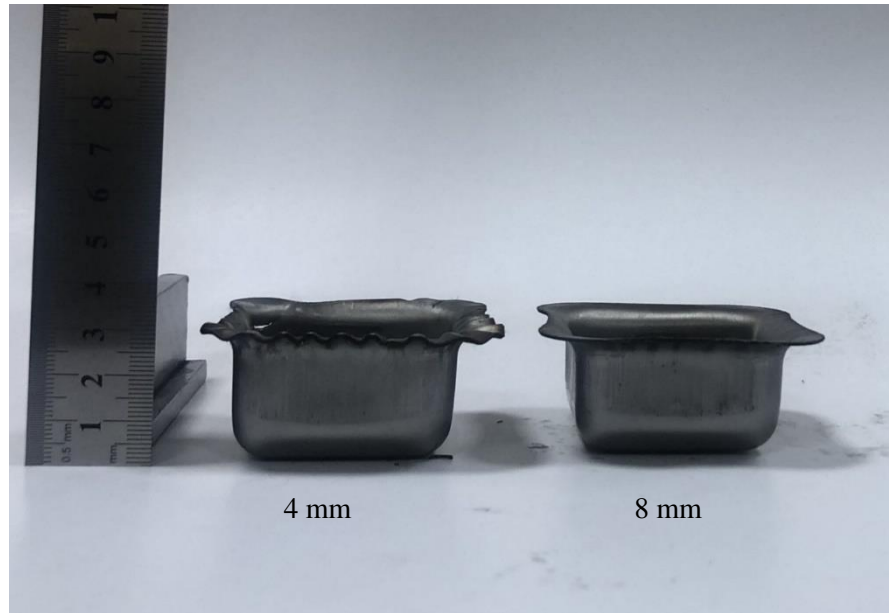
Şekil 5.26. 15^0 için BPK’nın 5500 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 0^0 ve BPK 7950 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 80245,8 N olarak ölçülmüştür. 8 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 76223,7 N olarak ölçülmüştür. Matris-

baskı plakası açısı 0^0 ve BPK 7950 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.27’de ve Şekil 5.28’de verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Matris radyüsünün artması ile ondülasyonlarda ciddi bir azalma gözlemlenmiştir.

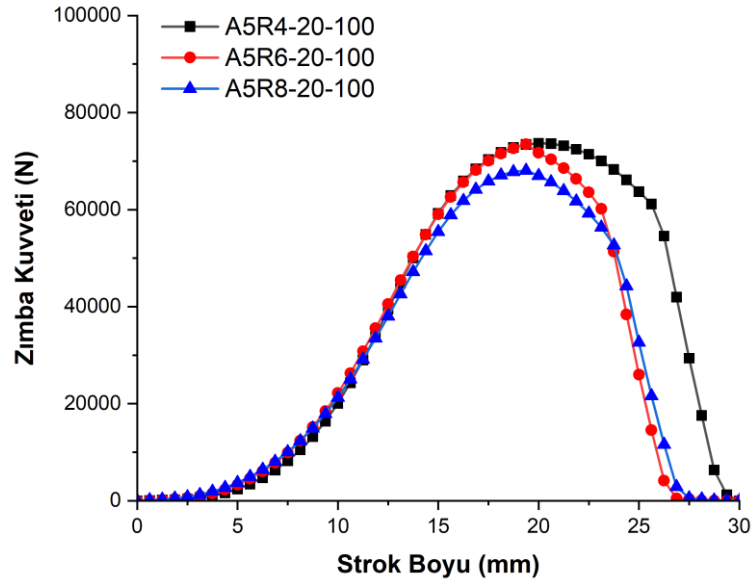


Şekil 5.27. 0^0 için BPK’nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti

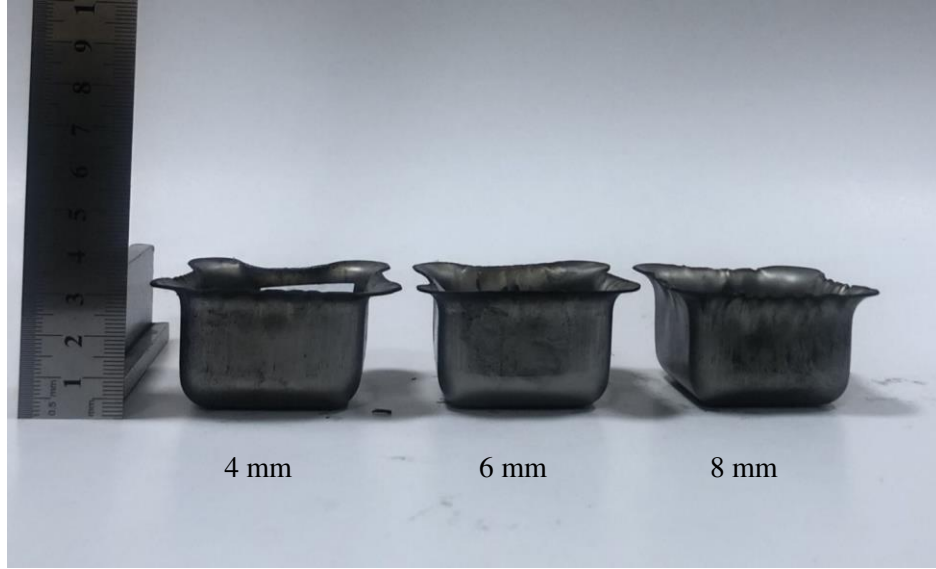


Şekil 5.28. 0^0 için BPK’nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 5^0 ve BPK 7950 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 73692,72 N olarak ölçülmüştür. 6 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 73476,9 N olarak ölçülmüştür. 8 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 68042,16 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 5^0 ve BPK 7950 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.29'da ve Şekil 5.30'da verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Matris radyüsünün artması ile ondülasyonlarda azalma gözlemlenmiştir.

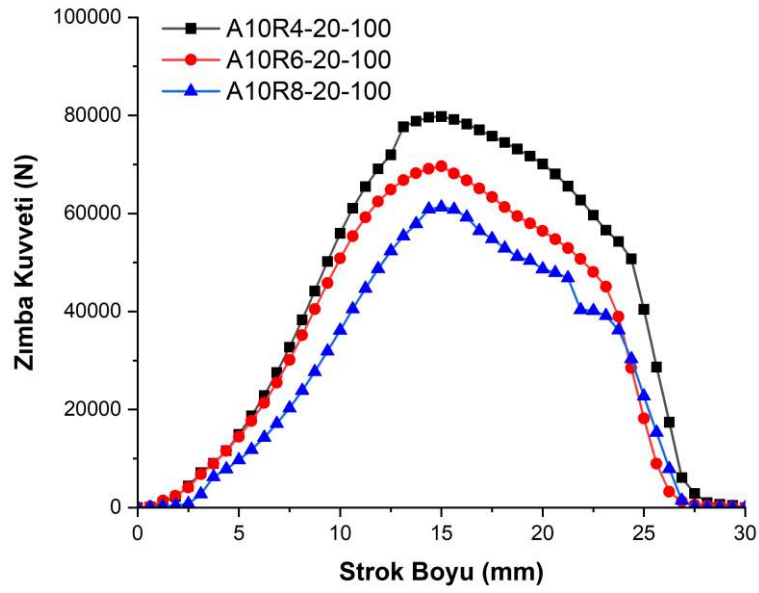


Şekil 5.29. 5^0 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti

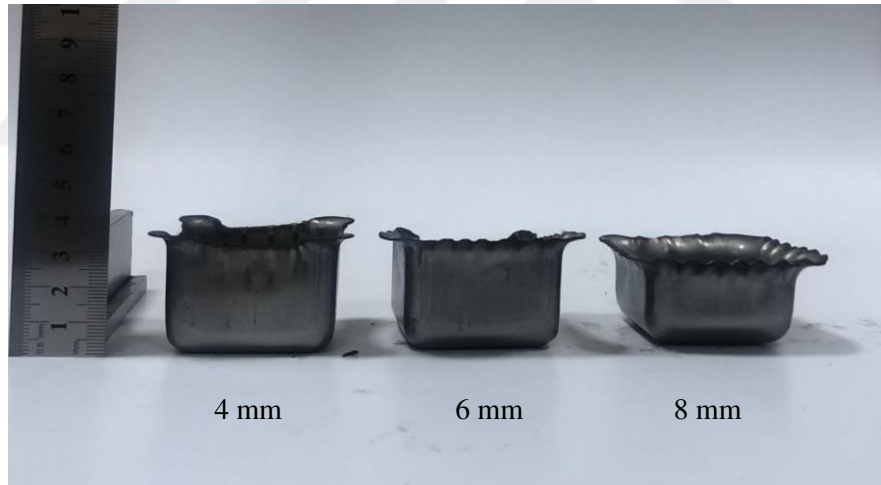


Şekil 5.30. 5° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 10° ve BPK 7950 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 79755,3 N olarak ölçülmüştür. 6 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 69611,76 N olarak ölçülmüştür. 8 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 61253,64 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 10° ve BPK 7950 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.31'de ve Şekil 5.32'de verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Matris radyüsünün artması ile ondülasyonlarda ciddi bir azalma gözlemlenmiştir. 4 mm olduğu durumda kulaklanmalar oluşmuştur. 6 mm'de yırtılmalar oluşmuştur ve 8 mm olduğu durumda ondülasyonlar oluşmuştur.

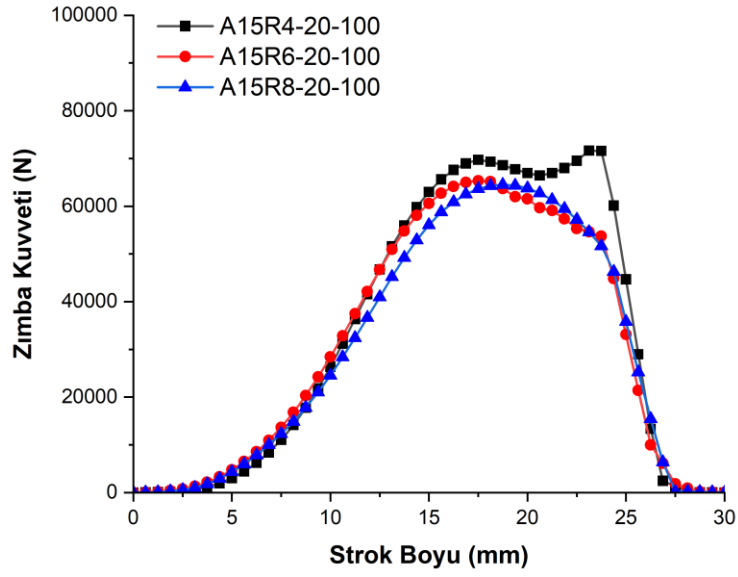


Şekil 5.31. 10^0 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti

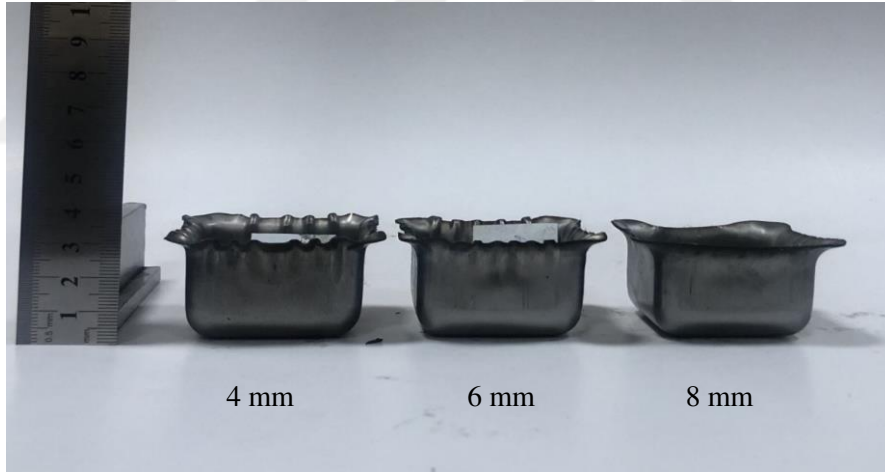


Şekil 5.32. 10^0 için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 15^0 ve BPK 7950 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 71652,24 N olarak ölçülmüştür. 6 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 65314,98 N olarak ölçülmüştür. 8 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 64530,18 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 15^0 ve BPK 7950 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.33'de ve Şekil 5.34'de verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Matris radyüsünün artması ile ondülasyonlarda azalma gözlemlenmiştir.

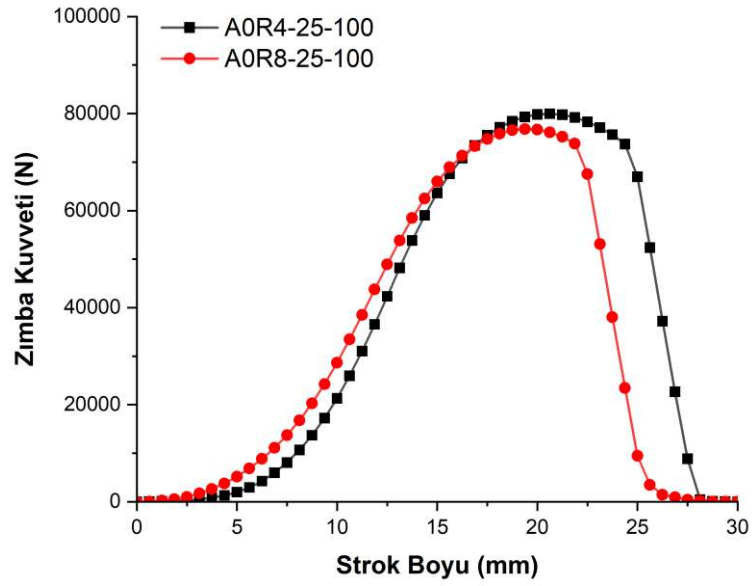


Şekil 5.33. 15° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti

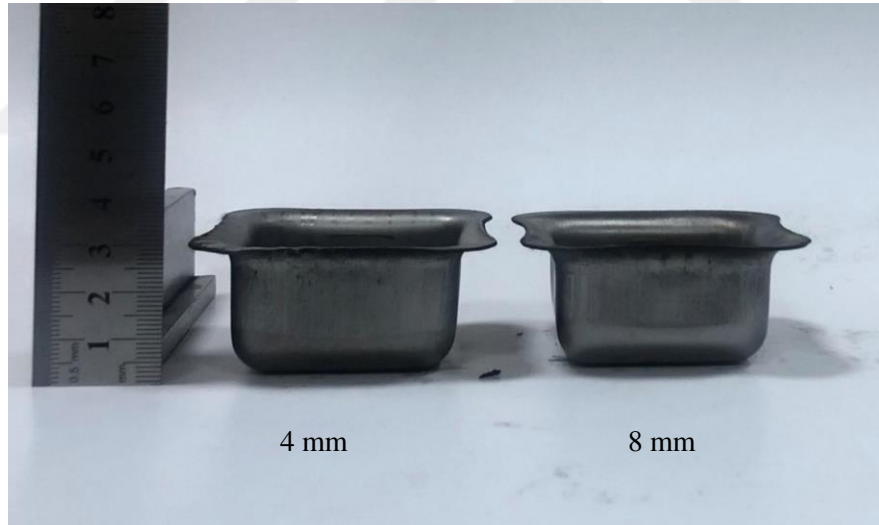


Şekil 5.34. 15° için BPK'nın 7950 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 0° ve BPK 10400 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 79971,12 N olarak ölçülmüştür. 8 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 76812,3 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 0° ve BPK 10400 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.35'de ve Şekil 5.36'da verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Burada numunelerde herhangi bir ondülasyon veya deformasyon oluşmamıştır.



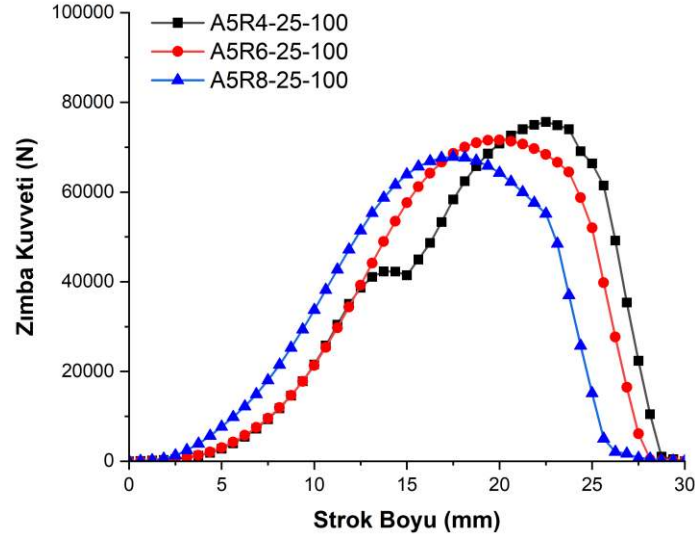
Şekil 5.35. 0^0 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



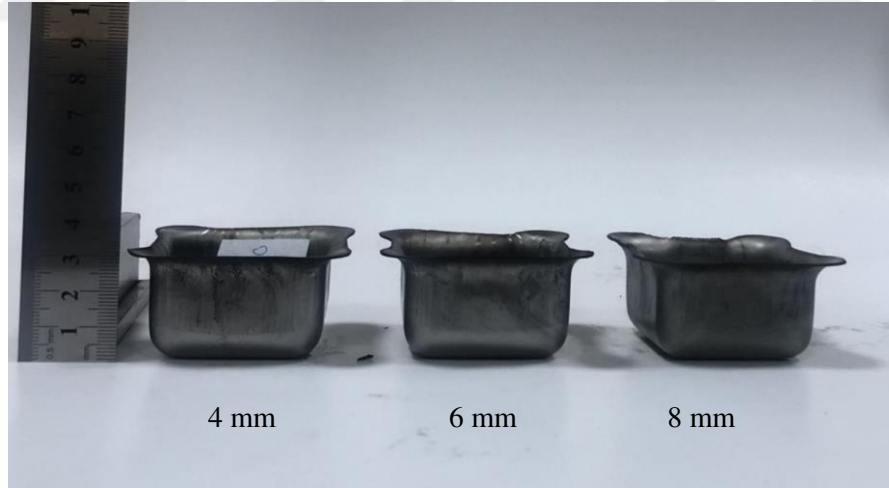
Şekil 5.36. 0^0 için BPK'nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 5^0 ve BPK 10400 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 75635,1 N olarak ölçülmüştür. 6 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 71632,62 N olarak ölçülmüştür. 8 mm 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 67865,58 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 5^0 ve BPK 10400 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.37'de ve Şekil

5.38’de verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Burada numunelerde herhangi bir ondülasyon veya deformasyon oluşmamıştır.



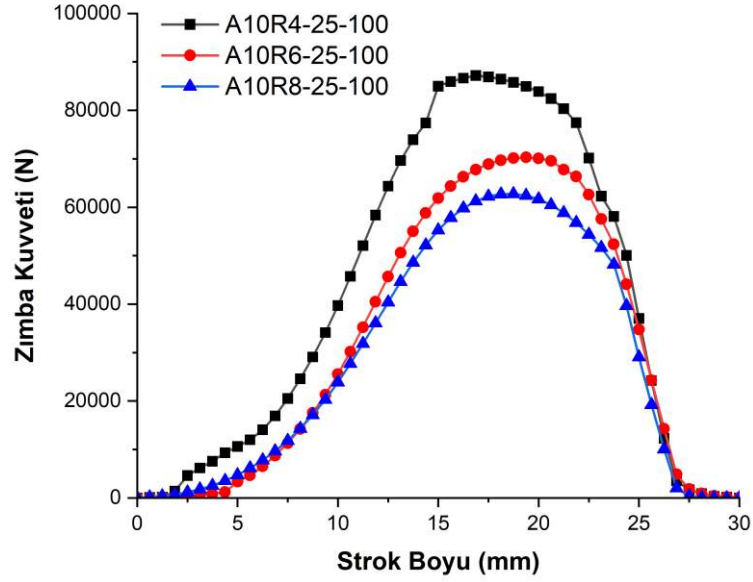
Şekil 5.37. 5^0 için BPK’nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zimba kuvveti



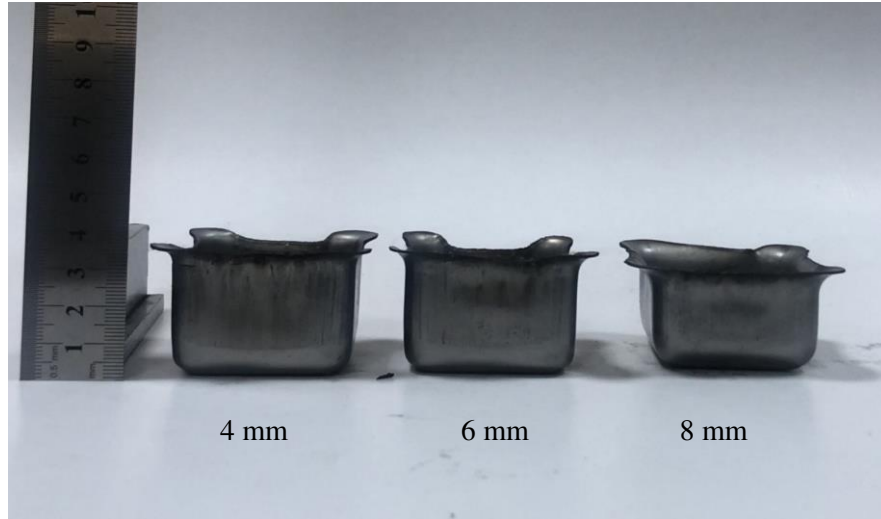
Şekil 5.38. 5^0 için BPK’nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 10^0 ve BPK 10400 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zimba kuvveti 87191,28 N olarak ölçülmüştür. 6 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zimba kuvveti 70278,84 N olarak ölçülmüştür. 8 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zimba kuvveti 62764,38 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 10^0 ve BPK 10400 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan

kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.39’da ve Şekil 5.40’da verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Burada numunelerde sadece kulaklanma oluşmuştur.



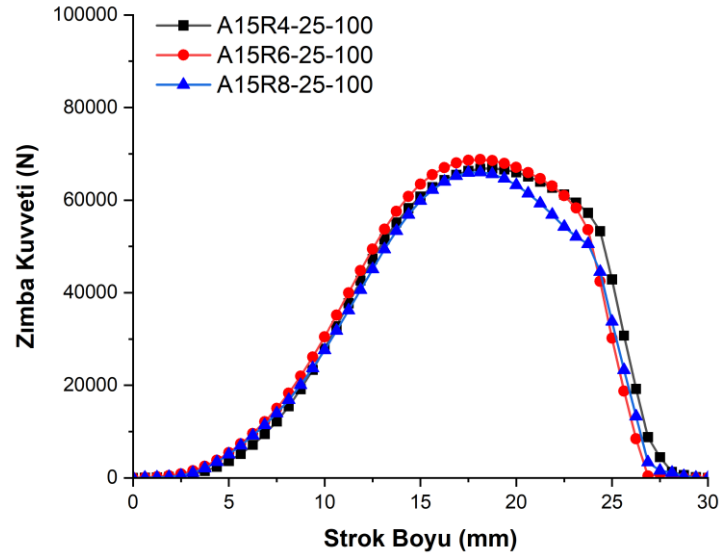
Şekil 5.39. 10^0 için BPK’nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



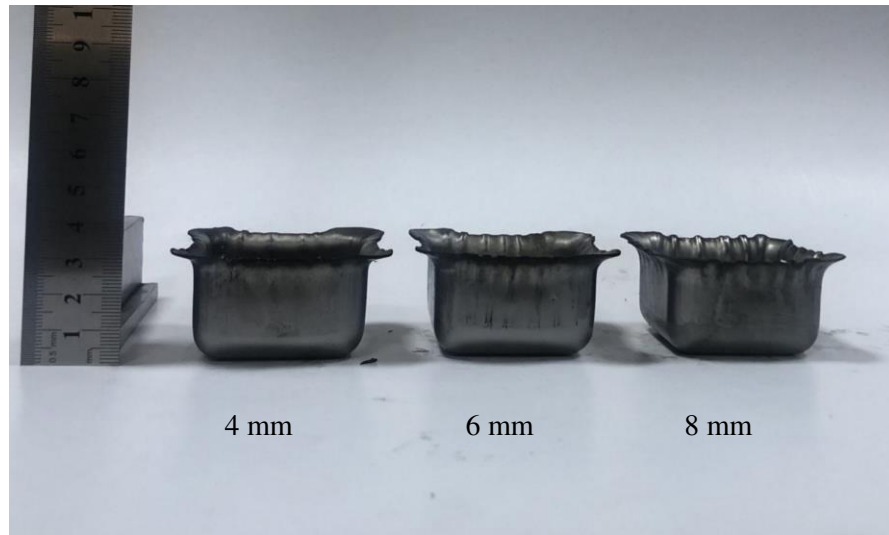
Şekil 5.40. 10^0 için BPK’nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 15° ve BPK 10400 N olarak uygulandığında, matris radyüsü 4 mm iken 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 66864,96 N olarak ölçülmüştür. 6 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 68768,1 N olarak ölçülmüştür.

8 mm için 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 66021,3 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 15^0 ve BPK 10400 N olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve matris radyüsüne bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.41’de ve Şekil 5.42’de verilmiştir. Matris radyüsünün artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Matris radyüsünün artması ile ondülasyonlarda artma meydana gelmiştir.



Şekil 5.41. 15^0 için BPK’nın 10400 N olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



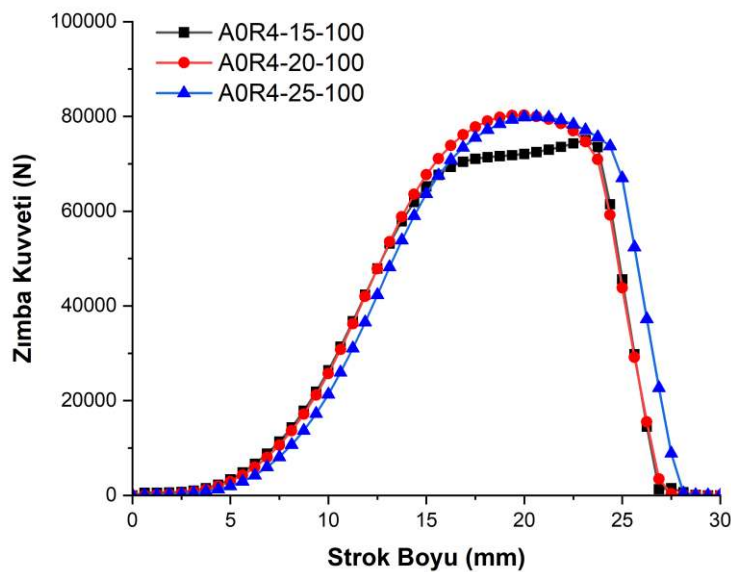
Şekil 5.42. 15^0 için BPK’nın 10400 N olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris radyüsünün derin çekme işlemine etkileri incelendiğinde, genel olarak radyüs arttıkça malzemedeki kulaklanmalar ve ondülasyonlar azalmıştır ve maksimum kuvvet azalmıştır. Bunun temel nedeni ilkel parçanın matris içine akması ne kadar kolay olursa o kadar az kuvvet ve az ondülasyon oluşur. Burada radyüs arttıkça ilkel parçaya uygulanan radyal kuvvetler azalır ve böylelikle numune üzerindeki hasarlar oluşmaz.

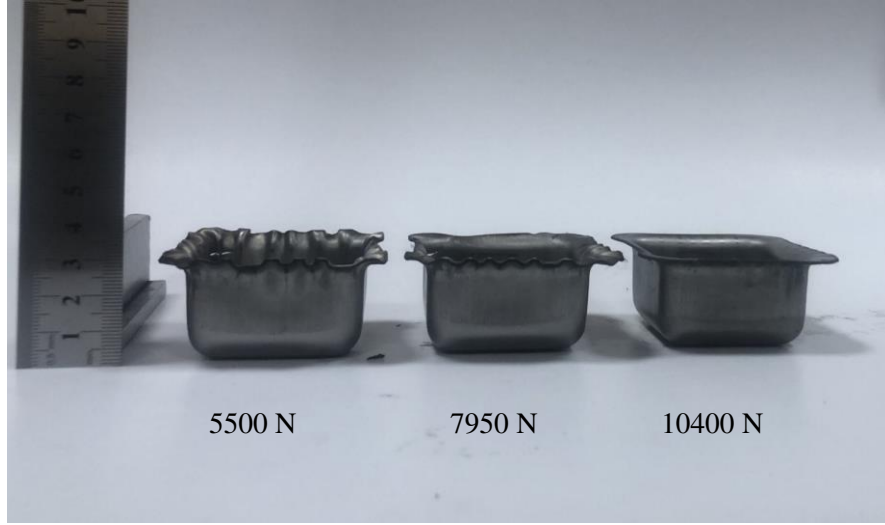
5.1.3. Baskı Plakası Kuvvetinin Şekillendirilebilirliğe Etkisi

Çekme işlemi esnasında belirli bir yük uygulayan cihaz tarafından baskı plakasına aktarılan kuvvetin uygulanması temel olarak malzemenin kırışmasını engellenmek adına uygulanır. Böylelikle düzgün numune elde edilir. Burada uygulanan kuvvetin limit çekme oranına etkisini araştırmak adına 5500 N, 7950 N ve 10400 N olmak üzere 3 farklı seviyede BPK uygulanmıştır.

Matris-baskı plakası açısı 0^0 ve matris radyüsü 4 mm iken BPK 5500 N olacak şekilde uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 75026,88 N olarak ölçülmüştür. BPK 7950 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 80245,8 N olarak ölçülmüştür. BPK 10400 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 79971,12 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 0^0 ve matris radyüsü 4 olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve BPK'ye bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.43'de ve Şekil 5.44'de verilmiştir. BPK'nın artması sonucu numuneler üzerinde oluşan ondülasyonlar azalmıştır. BPK'nın artması ile maksimum kuvvette artışlar meydana gelmiştir.

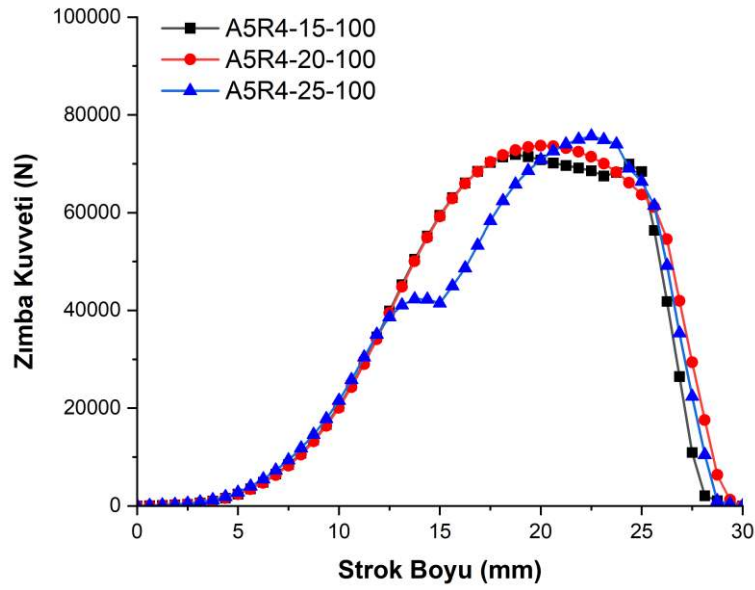


Şekil 5.43. 0^0 ve 4 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti

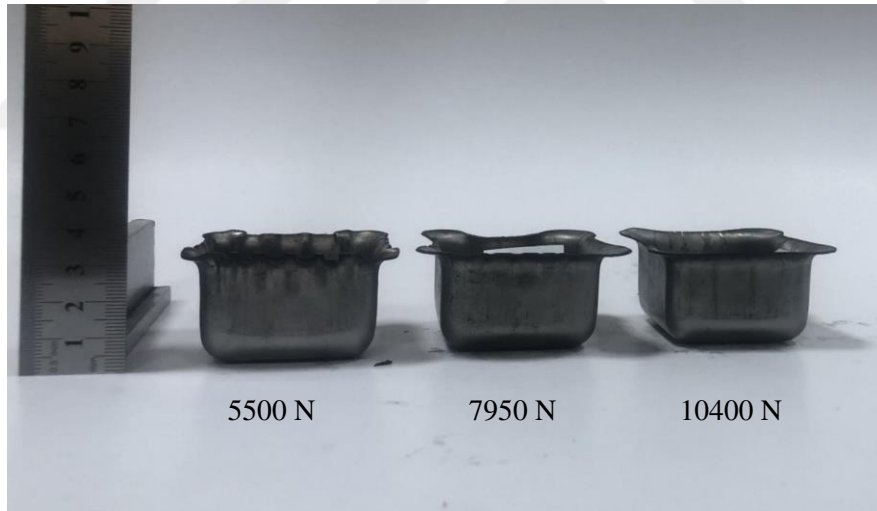


Şekil 5.44. 0° ve 4 mm olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 5° ve matris radyüsü 4 mm iken BPK 5500 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 71868,06 N olarak ölçülmüştür. BPK 7950 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 73692,72 N olarak ölçülmüştür. BPK 10400 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 75635,1 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 5° ve matris radyüsü 4 olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve BPK'ye bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.45'de ve Şekil 5.46'da verilmiştir. BPK'nın artması sonucu numuneler üzerinde oluşan ondülasyonlar azalmıştır. BPK'nın artması ile maksimum kuvvette artışlar meydana gelmiştir.



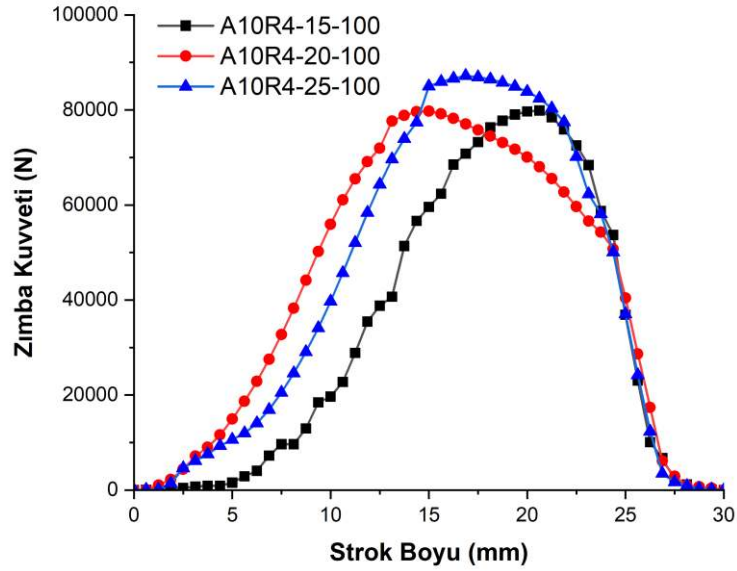
Şekil 5.45. 5^0 ve 4 mm olduğu durumda ölçülen zimba kuvveti



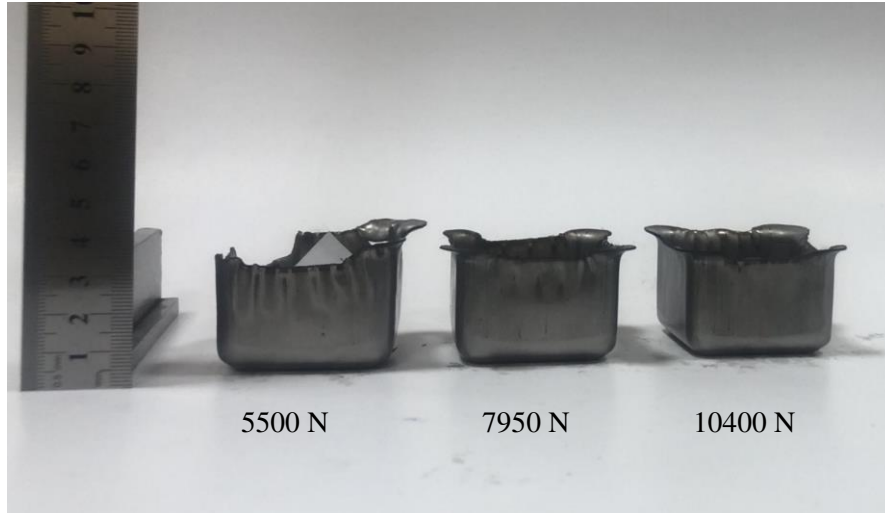
Şekil 5.46. 5^0 ve 4 mm olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 10^0 ve matris radyüsü 4 mm iken BPK 5500 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zimba kuvveti 79873,02 N olarak ölçülmüştür. BPK 7950 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zimba kuvveti 79755,3 N olarak ölçülmüştür. BPK 10400 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zimba kuvveti 87191,28 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 10^0 ve matris radyüsü 4 olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve BPK'ye bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.47'de ve Şekil 5.48'de verilmiştir. BPK'nın artması

sonucu numuneler üzerinde oluşan ondülasyonlar azalmıştır. BPK'nın artması ile maksimum kuvvette artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca BPK'nın en düşük olduğu değerde numunede yırtılmalar meydana gelmiştir.



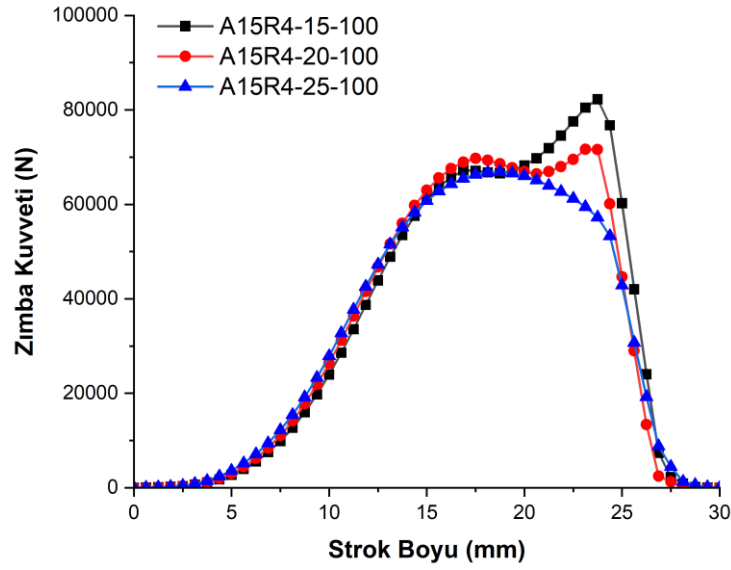
Şekil 5.47. 10^0 ve 4 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



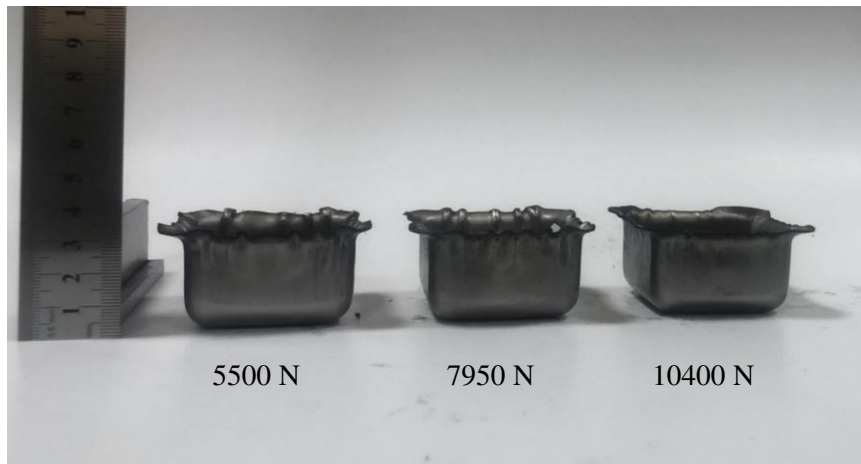
Şekil 5.48. 10^0 ve 4 mm olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 15^0 ve matris radyüsü 4 mm iken BPK 5500 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 82266,66 N olarak ölçülmüştür. BPK 7950 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba

kuvveti 71652,24 N olarak ölçülmüştür. BPK 10400 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 66864,96 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 15^0 ve matris radyüsü 4 olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve BPK'ye bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.49'da ve Şekil 5.50'de verilmiştir. BPK'nın artması sonucu numuneler üzerinde oluşan ondülasyonlar azalmıştır. BPK'nın artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir.



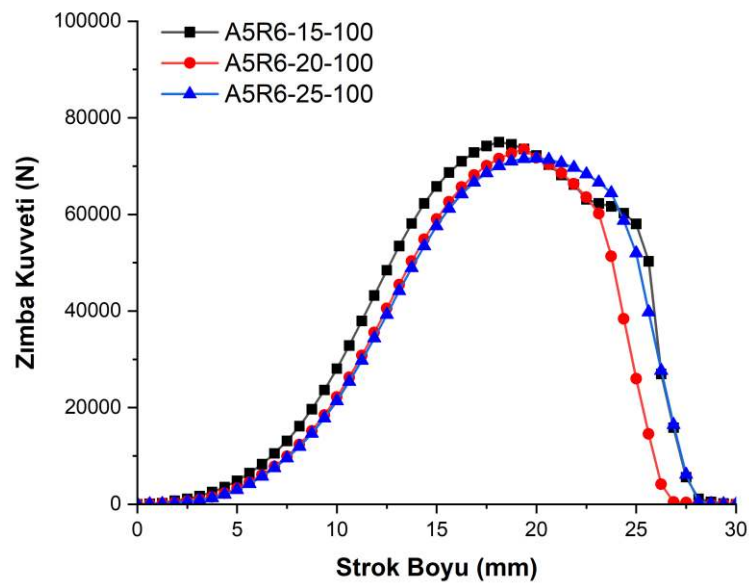
Şekil 5.49. 15^0 ve 4 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



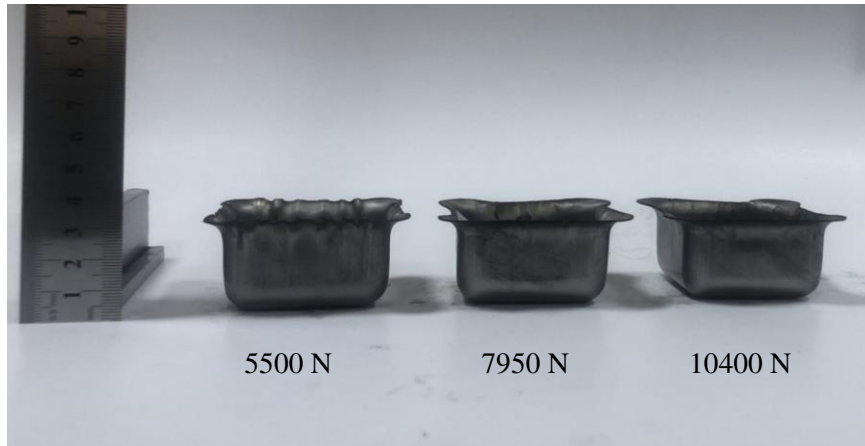
Şekil 5.50. 15^0 ve 4 mm olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 5^0 ve matris radyüsü 6 mm iken BPK 5500 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 74968,02 N olarak

ölçülmüştür. BPK 7950 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 76476,9 N olarak ölçülmüştür. BPK 10400 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 71632,62 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 5^0 ve matris radyüsü 6 olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve BPK'ye bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.51'de ve Şekil 5.52'de verilmiştir. BPK'nın artması sonucu numuneler üzerinde oluşan ondülasyonlar azalmıştır. BPK'nın artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir.

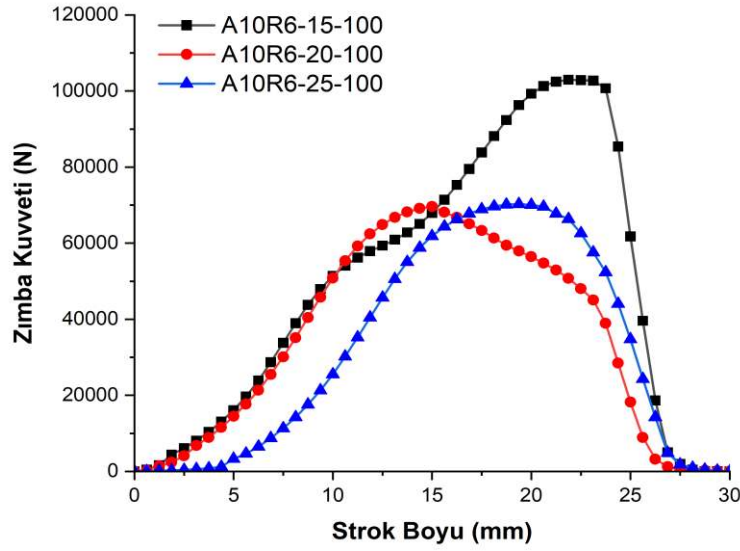


Şekil 5.51. 5^0 ve 6 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti

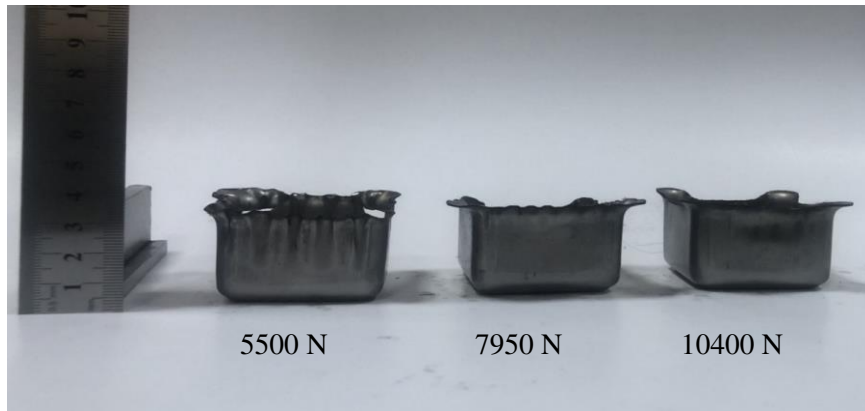


Şekil 5.52. 5^0 ve 6 mm olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 10^0 ve matris radyüsü 6 mm iken BPK 5500 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 102965,76 N olarak ölçülmüştür. BPK 7950 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 69611,76 N olarak ölçülmüştür. BPK 10400 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 70278,84 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 10^0 ve matris radyüsü 6 olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve BPK'ye bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.53'de ve Şekil 5.54'de verilmiştir. BPK'nın artması sonucu numuneler üzerinde oluşan ondülasyonlar azalmıştır. BPK'nın artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca BPK'nın en düşük olduğu değerde numunede yırtılmalar meydana gelmiştir.

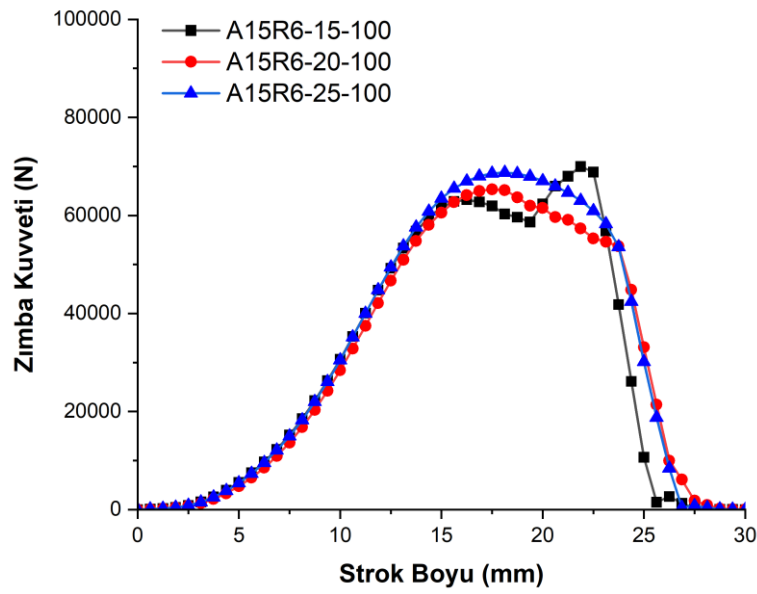


Şekil 5.53. 10^0 ve 6 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti

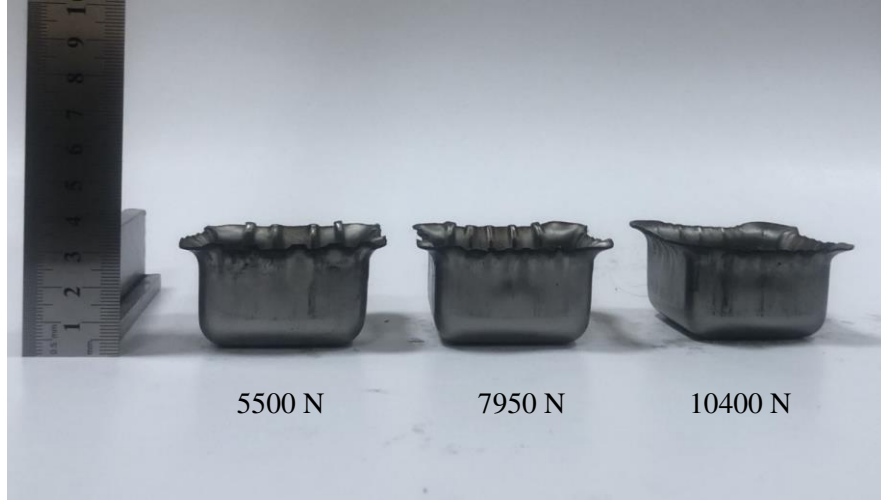


Şekil 5.54. 10^0 ve 6 mm olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 15^0 ve matris radyüsü 6 mm iken BPK 5500 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 69964,92 N olarak ölçülmüştür. BPK 7950 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 65314,98 N olarak ölçülmüştür. BPK 10400 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 68768,1 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 15^0 ve matris radyüsü 6 olduğu yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve BPK'ye bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.55'de ve Şekil 5.56'da verilmiştir. BPK'nın artması sonucu numuneler üzerinde oluşan ondülasyonlar azalmıştır. BPK'nın artması ile maksimum kuvvette artışlar meydana gelmiştir.

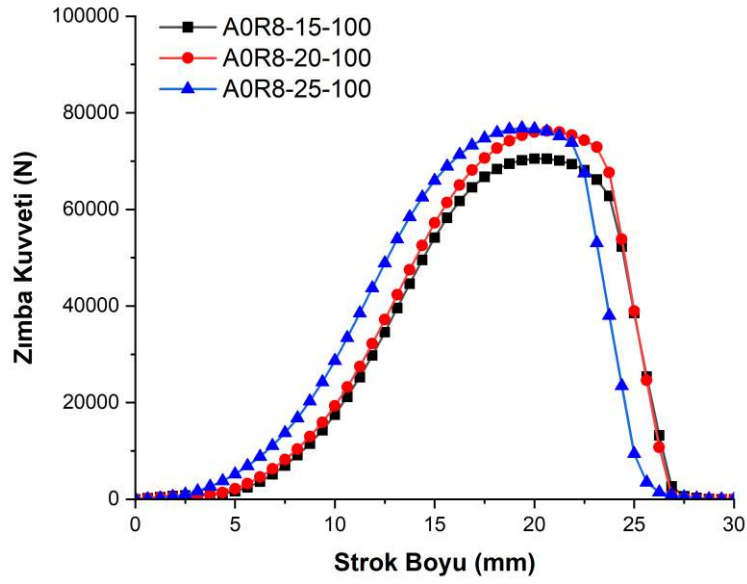


Şekil 5.55. 15^0 ve 6 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti

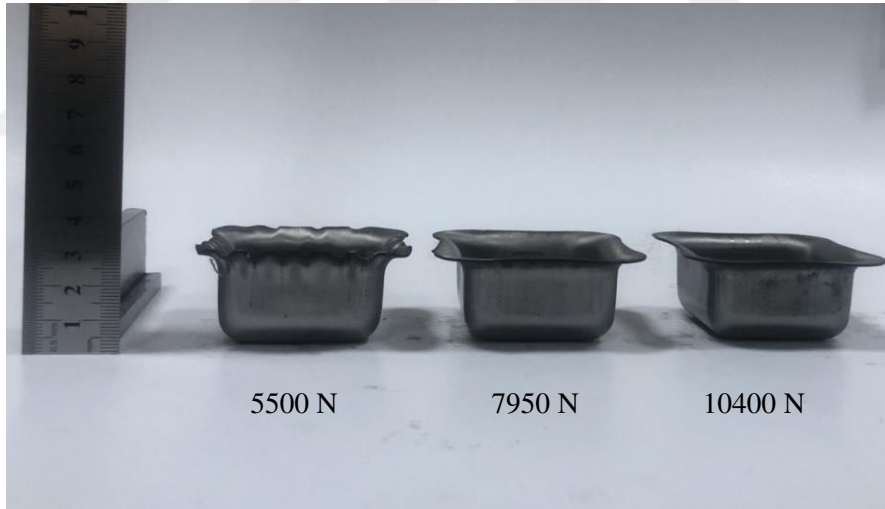


Şekil 5.56. 15° ve 6 mm olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 0° ve matris radyüsü 8 mm iken BPK 5500 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 70514,28 N olarak ölçülmüştür. BPK 7950 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 76223,7 N olarak ölçülmüştür. BPK 10400 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 76812,3 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 0° ve matris radyüsü 8 olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve BPK'ye bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.57'de Şekil 5.58'de verilmiştir. BPK'nın artması sonucu numuneler üzerinde oluşan ondülasyonlar azalmıştır. BPK'nın artması ile maksimum kuvvette artışlar meydana gelmiştir.



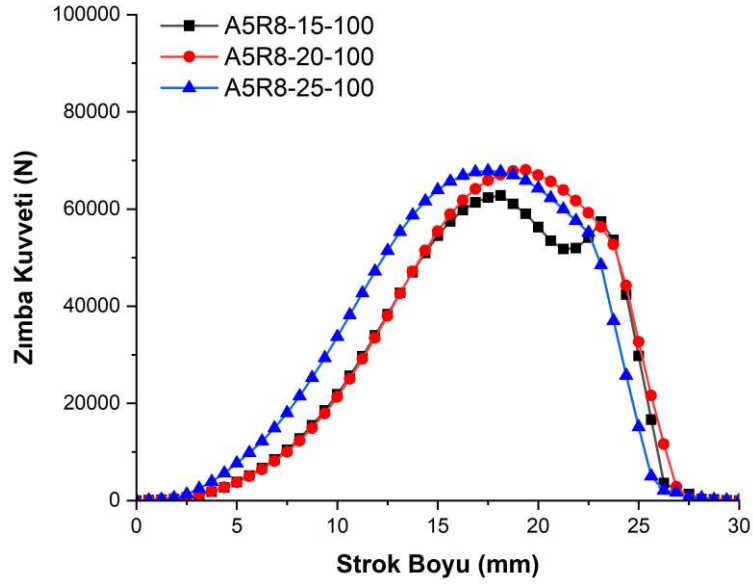
Şekil 5.57. 0° ve 8 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



Şekil 5.58. 0° ve 8 mm olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 5° ve matris radyüsü 8 mm iken BPK 5500 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 62803,62 N olarak ölçülmüştür. BPK 7950 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 68042,16 N olarak ölçülmüştür. BPK 10400 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 67865,58 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 5° ve matris radyüsü 8 olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve BPK'ye bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.59'da ve Şekil 5.60'da verilmiştir. BPK'nın artması

sonucu numuneler üzerinde oluşan ondülasyonlar azalmıştır. BPK'nın artması ile maksimum kuvvette artışlar meydana gelmiştir.



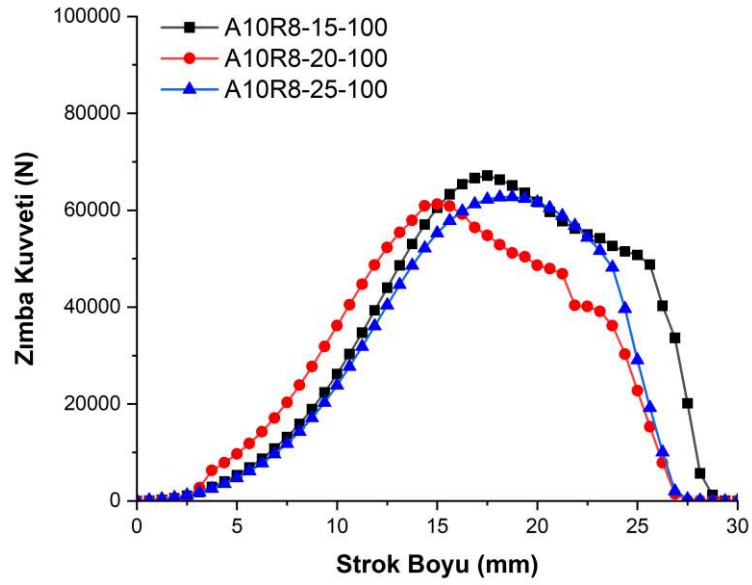
Şekil 5.59. 5° ve 8 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



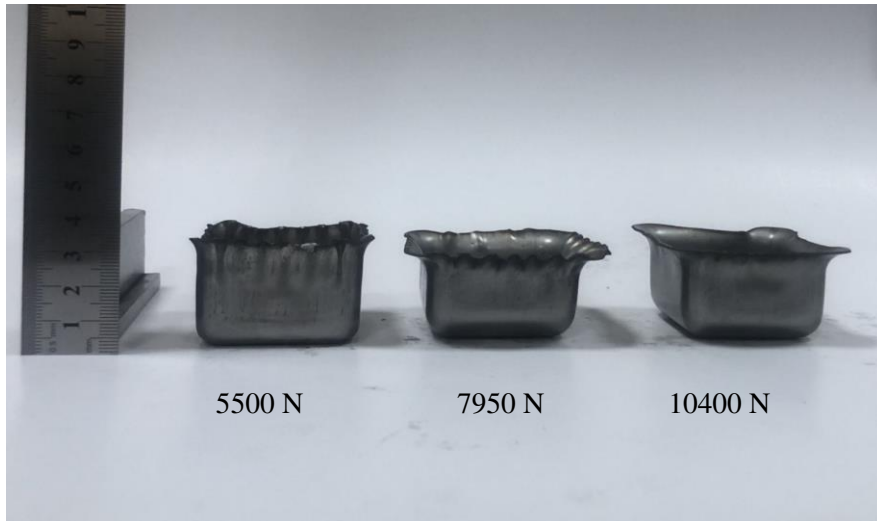
Şekil 5.60. 5° ve 8 mm olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 10° ve matris radyüsü 8 mm iken BPK 5500 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 67159,26 N olarak ölçülmüştür. BPK 7950 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 61253,64 N olarak ölçülmüştür. BPK 10400 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça

apı için maksimum zimba kuvveti 62764,38 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 10^0 ve matris radyüsü 8 olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve BPK'ye bağlı değişimine ait olan deney numuneleri şekil 5.61'de ve şekil 5.62'de verilmiştir. BPK'nın artması sonucu numuneler üzerinde oluşan ondülasyonlar azalmıştır. BPK'nın artması ile maksimum kuvvette azalma gözlemlenmiştir.

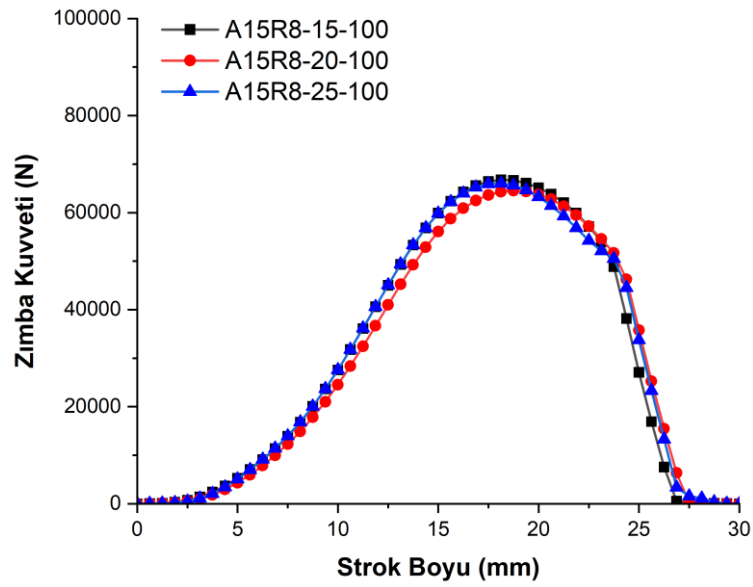


şekil 5.61. 10^0 ve 8 mm olduğu durumda ölçülen zimba kuvveti

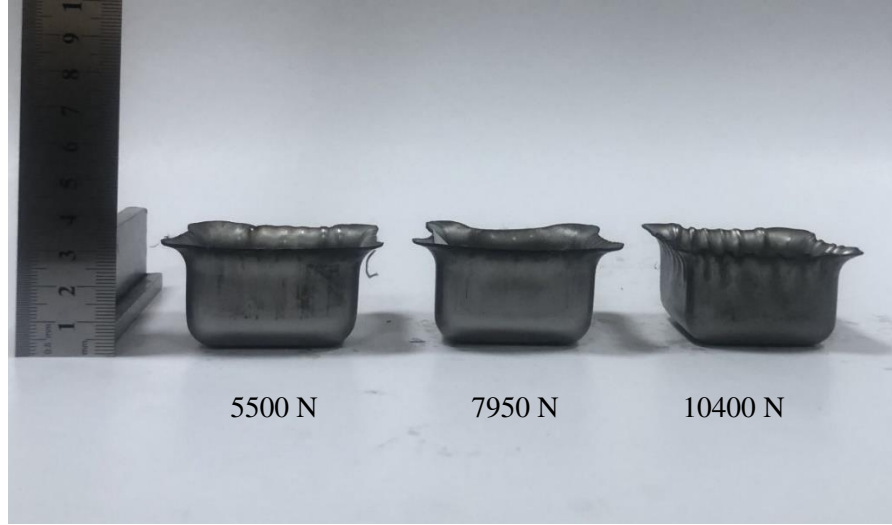


şekil 5.62. 10^0 ve 8 mm olduğu durumda elde edilen numuneler

Matris-baskı plakası açısı 15^0 ve matris radyüsü 8 mm iken BPK 5500 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 66747,24 N olarak ölçülmüştür. BPK 7950 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 64530,18 N olarak ölçülmüştür. BPK 10400 N olarak uygulandığında 100 mm ilkel parça çapı için maksimum zımba kuvveti 66021,3 N olarak ölçülmüştür. Matris-baskı plakası açısı 10^0 ve matris radyüsü 8 olduğu durumda yapılan deneyde oluşan kuvvetlere ait grafik ve BPK'ye bağlı değişimine ait olan deney numuneleri Şekil 5.63'de ve Şekil 5.64'de verilmiştir. BPK'nın artması sonucu numuneler üzerinde oluşan ondülasyonlar artmıştır. BPK'nın artmasına rağmen maksimum kuvvetler birbirine çok yakın çıkmıştır.



Şekil 5.63. 15^0 ve 8 mm olduğu durumda ölçülen zımba kuvveti



Şekil 5.64. 15^0 ve 8 mm olduğu durumda elde edilen numuneler

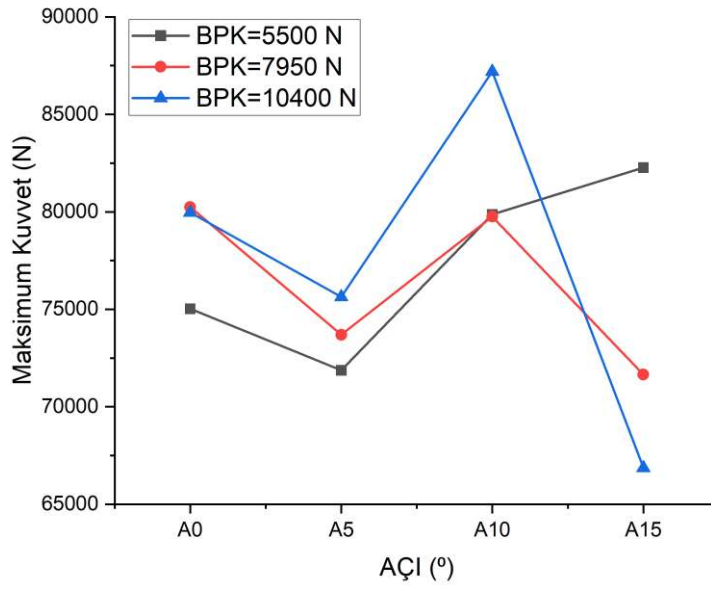
Derin çekme işlemi sırasında BPK'nın etkisi oldukça fazladır. Malzeme zımba tarafından matris içerisine kuvvet yardımıyla basılırken bir yandan da baskı plakası ile ilkel parça üzerine bir kuvvet uygulanmaktadır. İlkel parça bu işlem sırasında basma ve radyal gerilmelerin altındadır. Buradaki gerilmeler, matris-baskı plakası açısı ve matris radyüsü parametreleri ile azaltılarak malzemenin matris içerisine akışını kolaylaştırmaktadır. Ancak malzemedeki plastik deformasyonun oluşması baskı plakası tarafından sağlanmaktadır. BPK'nın artması ile malzeme üzerinde oluşan kulaklanmalar ve ondülasyonların azaldığı deneysel çalışmalar ile tespit edilmiştir.

5.2. Maksimum Kuvvetlerin Karşılaştırılması

Yapılan deneysel çalışmalarda deney numuneleri üzerinde oluşan maksimum kuvvetler matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve BPK'ye göre grafik haline getirilmiştir. Deneyler sırasında ölçümlenen maksimum kuvvetler numuneler üzerindeki deformasyonlar ve ondülasyonlar hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

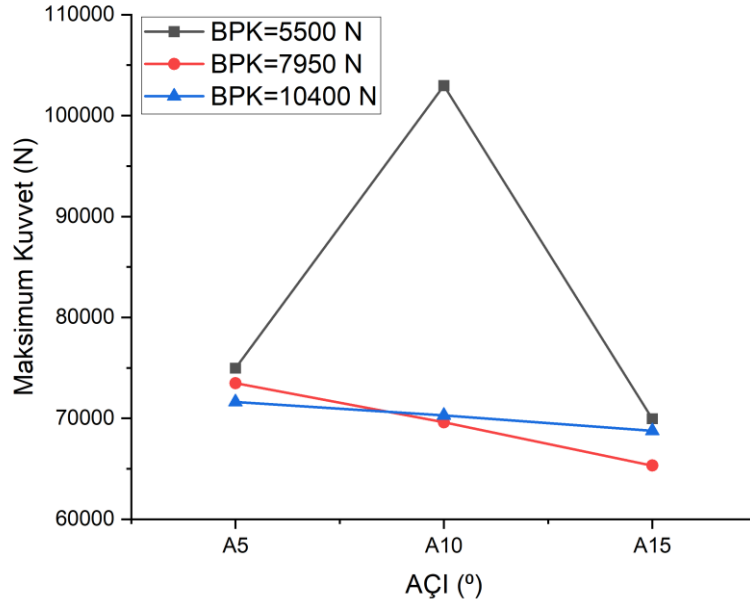
5.2.1. Matris-Baskı Plakası Açısının Maksimum Kuvvet Üzerindeki Etkisi

Yapılan deneysel çalışmalarda matris-baskı plakası açısının maksimum kuvvet üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Oluşturulan grafikler incelendiğinde matris-baskı plakası açısının maksimum kuvvet üzerinde genellikle azaltıcı etkisi olduğu saptanmıştır. Matris radyüsü 4 mm için matris-baskı plakası açısının maksimum kuvvet grafiği Şekil 5.65'de verilmiştir.



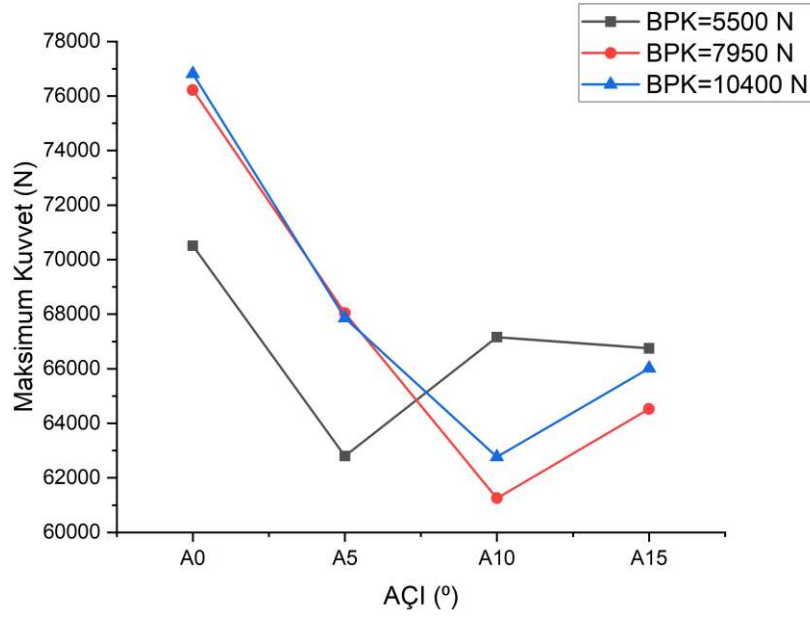
Şekil 5.65. 4 mm için Matris-Baskı plakası açısının maksimum kuvvet üzerindeki etkisi

Oluşan grafik incelendiğinde tüm baskı plakası kuvvetleri için 0^0 'de oluşan maksimum kuvvet 5^0 'ye geçişte azalmıştır. Fakat 10^0 'de tekrardan artış gözlemlenmiştir. Burada yapılan deneysel çalışmalar sonucu oluşan numuneler incelendiğinde numuneler üzerinde deformasyonlar olduğu gözlenmiştir. 10^0 'deki maksimum kuvvetin artışının temel nedeni bu artış olarak tespit edilmiştir. Matris radyüsü 6 mm için matris-baskı plakası açısının maksimum kuvvet grafiği Şekil 5.66'da verilmiştir.



Şekil 5.66. 6 mm için Matris-Baskı plakası açısının maksimum kuvvet üzerindeki etkisi

Oluşan grafik incelendiğinde genel olarak matris-baskı plakası açısının artışına bağlı olarak maksimum kuvvette bir azalma olduğu gözlemlenmektedir. BPK'nın 5500 N olduğu durumda ve matris-baskı plakası açısının 10^0 'deki maksimum kuvvetin artışının temel nedeni ise BPK'nın yetersiz gelip numunede oluşan deformasyonlardır. Matris radyüsü 8 mm için matris-baskı plakası açısının maksimum kuvvet grafiği Şekil 5.67'da verilmiştir.

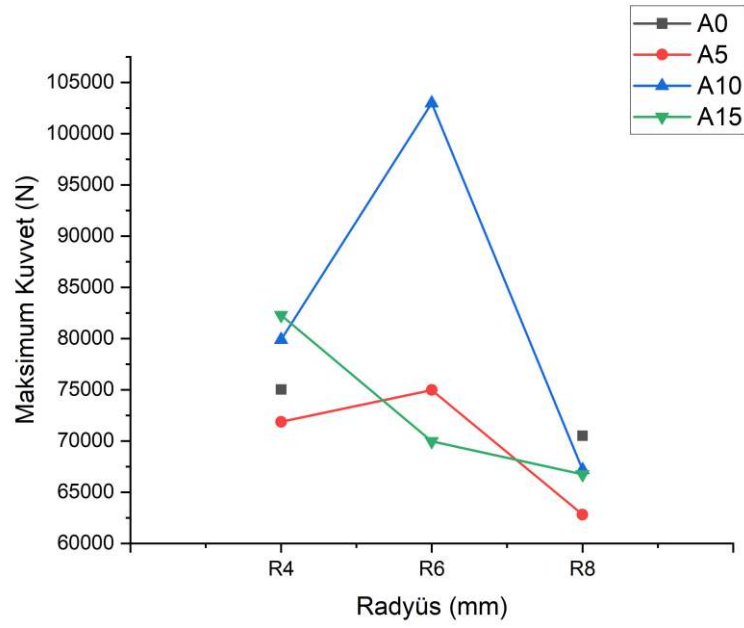


Şekil 5.67. 8 mm için Matris-Baskı plakası açısının maksimum kuvvet üzerindeki etkisi

Şekildeki grafik incelendiğinde BPK'nın 7950 N ve 10400 N olduğu durumlarda maksimum kuvvette ciddi bir azalma olduğu görülmektedir. Matris radyüsünün 8 mm olduğu durumda 4 mm ve 6 mm'ye göre radyüs artışından kaynaklı maksimum kuvvetler daha düşük seviyededir. Matris-baskı plakası açısının 10^0 'den 15^0 'ye çıkmasıyla maksimum kuvvette tekrar bir artış yaşanmıştır. Ancak numunelerde herhangi bir deformasyon oluşmamıştır.

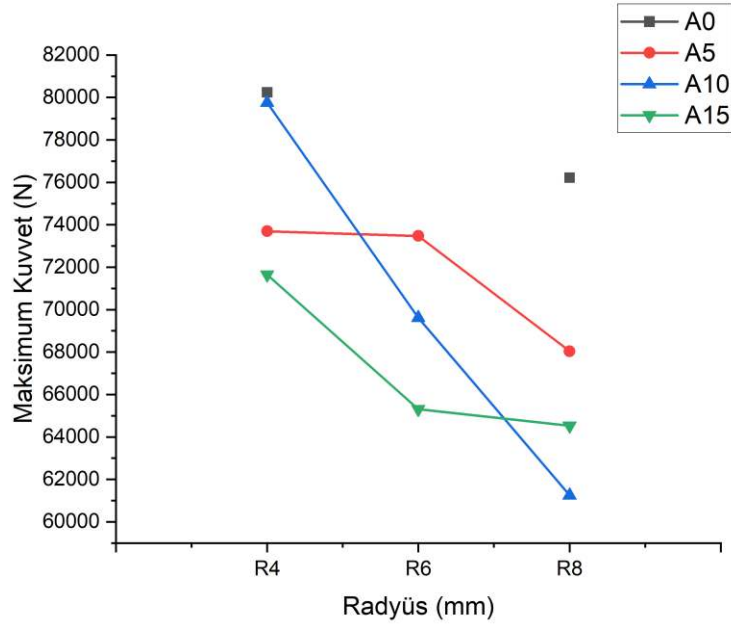
5.2.2. Matris Radyüsünün Maksimum Kuvvet Üzerindeki Etkisi

Yapılan deneysel çalışmalarda matris radyüsünün maksimum kuvvet üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Oluşturulan grafikler incelendiğinde matris-baskı plakası açısının maksimum kuvvet üzerinde genellikle azaltıcı etkisi olduğu saptanmıştır. BPK 5500 N için matris radyüsünün maksimum kuvvet grafiği Şekil 5.68'de verilmiştir.



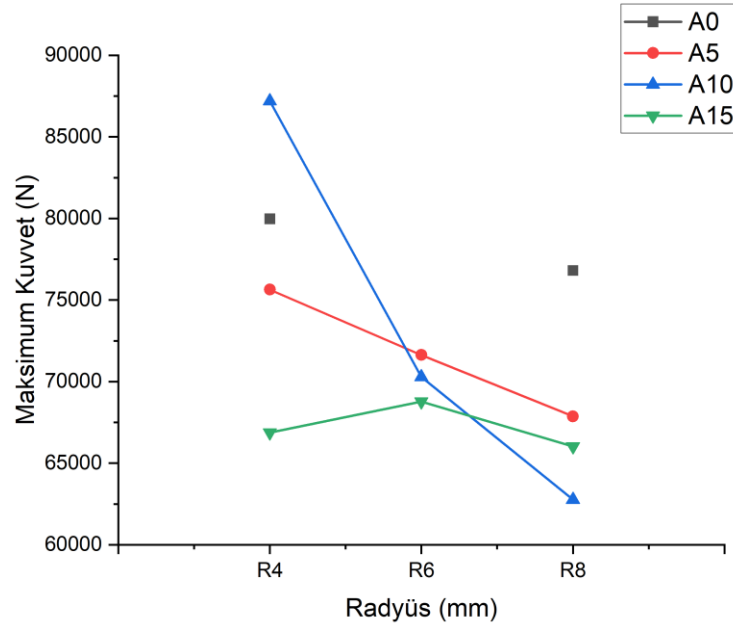
Şekil 5.68. 5500 N için Matris radyüsünün maksimum kuvvet üzerindeki etkisi

Şekildeki grafik incelendiğinde matris radyüsünün 6 mm olduğu matris-baskı plakası açısının 10^0 olduğu durumda maksimum kuvvet ortalamanın çok üzerinde ve grafikte en yüksek olarak ölçülmüştür. Bu durumdaki maksimum kuvvetin çok yüksek olmasının temel nedeni ise numunenin üst köşelerinde yırtılmalar olmasıdır. Buna neden olan temel parametre BPK olarak görünmektedir. Grafik genel olarak incelendiğinde matris radyüsünün 8 mm olduğu durumda maksimum kuvvetlerde azalma olmuştur. BPK 7950 N için matris radyüsünün maksimum kuvvet grafiği Şekil 5.69'da verilmiştir.



Şekil 5.69. 7950 N için Matris radyüsünün maksimum kuvvet üzerindeki etkisi

Şekildeki grafikte matris radyüsünün artışına bağlı olarak maksimum kuvvette azalma olduğu görülmektedir. Burada BPK'nın artışından dolayı bir önceki grafikte gözlemlenen matris-baskı plakası açısının 10^0 'deki gibi yırtılmalar oluşmamıştır. Bundan dolayı maksimum kuvvetler radyüs artışına bağlı olarak azalmıştır. Oluşan en yüksek maksimum kuvvet ise matris-baskı plakası açısının 10^0 ve matris radyüsünün 4 mm olduğu durumda ölçülmüştür. Bu numune incelendiğinde ise üzerinde herhangi bir yırtılma deformasyonu oluşmamıştır. BPK 10400 N için matris radyüsünün maksimum kuvvet grafiği Şekil 5.70'de verilmiştir.

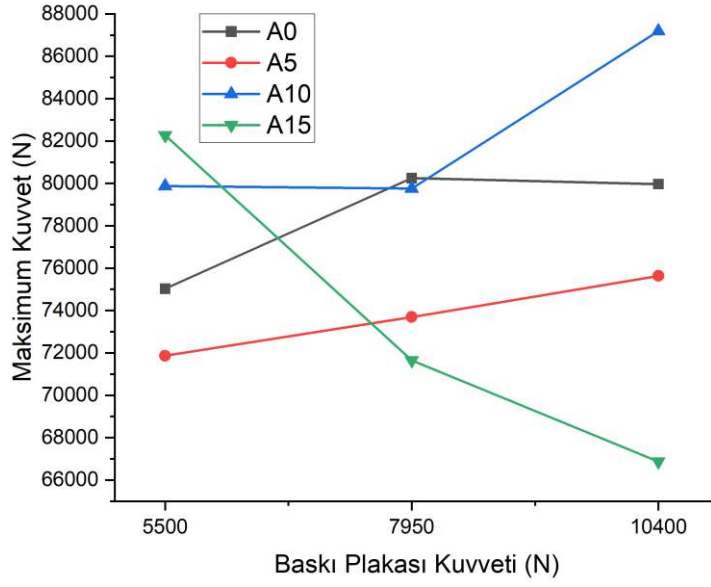


Şekil 5.70. 10400 N için Matris radyüsünün maksimum kuvvet üzerindeki etkisi

Şekildeki grafik incelendiğinde BPK'nın artışından dolayı maksimum kuvvette azalma olduğu gözlemlenmiştir. Burada oluşan en yüksek maksimum kuvvet bir önceki grafikte olduğu gibi matris-baskı plakası açısının 10^0 ve matris radyüsünün 4 mm olduğu durumda gözlemlenmiştir. Bu deney numunesi incelendiğinde ise üzerinde herhangi bir yırtılma deformasyonu oluşmamıştır. Maksimum kuvvetin bu numune üzerinde oluşmasına rağmen üzerinde yırtılma deformasyonu oluşmamasının nedeni ise BPK'nın yeterli olmasıdır.

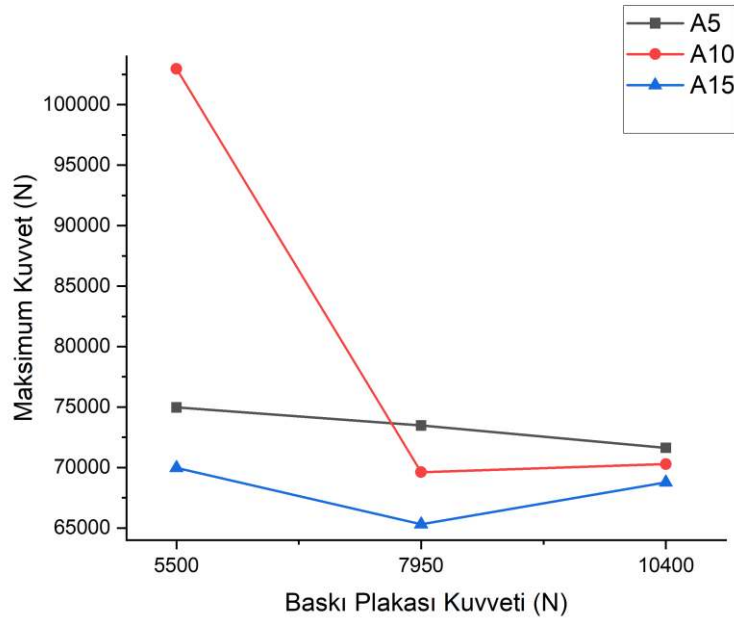
5.2.3. Baskı Plakası Kuvvetinin Maksimum Kuvvet Üzerindeki Etkisi

Yapılan deneysel çalışmalarda BPK'nın maksimum kuvvet üzerindeki etkileri incelenmiştir. Oluşturulan grafikler incelendiğinde matris-baskı plakası açısının maksimum kuvvet üzerinde genellikle azaltıcı etkisi olduğu saptanmıştır. Matris radyüsünün 4 mm için BPK'nın maksimum kuvvet grafiği Şekil 5.71'de verilmiştir.



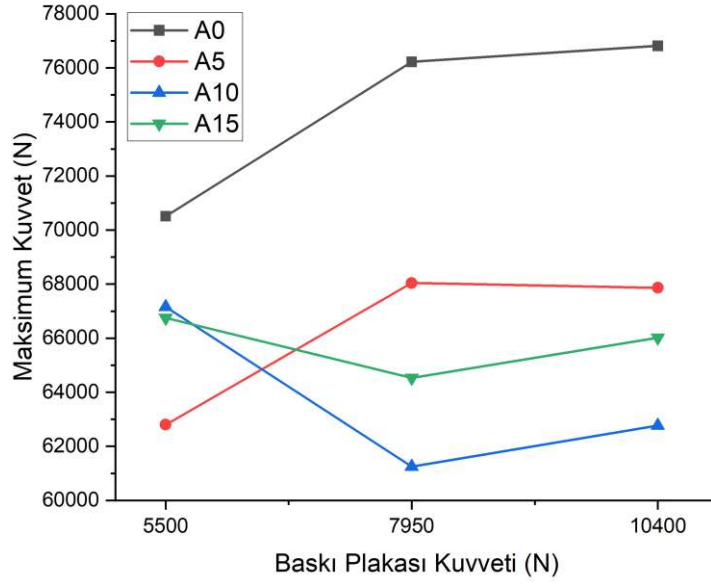
Şekil 5.71. 4 mm için BPK'nın maksimum kuvvet üzerindeki etkisi

Şekildeki grafik incelendiğinde matris-baskı plakası açısının artması ile 0^0 , 5^0 ve 10^0 verilerinde maksimum kuvvet BPK'nın artması ile artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda 15^0 'de maksimum kuvvette azalma görülmüştür. Buradaki numuneler incelendiğinde BPK'nın artması ile numuneler üzerindeki ondülasyonlarda azalmalar gözlemlenmiştir. Aynı zamanda ondülasyonlardaki azalmanın minimum şekilde gözlemlendiği parametre matris-baskı plakası açısının 15^0 ve BPK'nın 10400 N olduğu durumda gözlemlenmiştir. Matris radyüsünün 6 mm için BPK'nın maksimum kuvvet grafiği Şekil 5.72'de verilmiştir.



Şekil 5.72. 6 mm için BPK'nın maksimum kuvvet üzerindeki etkisi

Şekildeki grafik incelendiğinde genel olarak BPK'nın artması ile maksimum kuvvetin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.71'de olduğu gibi matris-baskı plakası açısı 15^0 durumunda BPK'nın artması ile önce azalmış ve daha sonra artış gözlemlenmiştir. Buradaki numuneler incelendiğinde genel olarak numuneler üzerindeki ondülasyonlar azalmıştır. Matris-zımba radyüsünün 10^0 ve BPK'nın 5500 N olduğu durumda maksimum kuvvet en yüksek seviyede oluşmuştur. Bu parametrelere ait olan numune incelendiğinde numunenin üst köşelerinde yırtılma olduğu gözlemlenmiştir. Matris radyüsünün 8 mm için BPK'nın maksimum kuvvet grafiği Şekil 5.73'de verilmiştir.



Şekil 5.73. 8 mm için BPK'nın maksimum kuvvet üzerindeki etkisi

Şekildeki grafik incelendiğinde matris-baskı plakası açısı 0^0 ve 5^0 eğrileri birbirlerine ve 10^0 ve 15^0 eğrileri birbirlerine çok benzerlerdir. Şekil 5.72'de görüldüğü gibi 15^0 'de önce azalma daha sonra artış gözlemlenmiştir. Buradaki numuneler incelendiğinde 15^0 hariç BPK arttıkça numuneler üzerindeki ondülasyonlar azalmıştır. Ancak 15^0 matris-baskı plakası açısında BPK'nın artması ile ondülasyonlar artmıştır.

5.3. İlkel Parça Boyutlarının Numune Deformasyonlarına Olan Etkisi

Derin çekme işleminde oluşan temel hatalar; buruşma, yırtılma, kulaklanma incelme, BPK'den oluşan çatlak, dalgalanma (pot), girinti izi, matris izi, sac malzeme kaynaklı hatalar olarak söylenebilir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu tespit edilen hatalar ise; çekilen numunelerin üst kısımlarında ve yan yüzeylerinde oluşan buruşma, aynı bölgelerde oluşan yırtılma, numune taban yüzeyine paralel olarak yırtılma ve çatlak, taban yüzeyinde bulunan köşelerde incelme olarak gözlemlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde ilkel parça çapı büyüdükçe hidrolik pres tarafından zımba ile aktarılan kuvvetin arttığı ölçülmüştür. Aynı zamanda ilkel parça çapının büyümesi ve uygulanan kuvvetin artması ile numuneler üzerindeki deformasyonların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bu deformasyonu azaltıcı parametreler kullanılmıştır. Örneğin Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar incelendiğinde BPK'nın artması numunelerin üst kısımlarında oluşan ondülasyonu azalttığı gözlemlenmiştir. Ancak BPK'nın ve ilkel parça çapının aynı anda artırıldığı durumlarda numunelerin taban yüzeyine paralel olarak yırtılmalar

gözlemlenmiştir. BPK'nın ve ilkel parça çapının arttığı durumda oluşan deformasyonlar ve taban yüzeyine paralel olarak oluşan yırtılmalar Şekil 5.74'de verilmiştir.



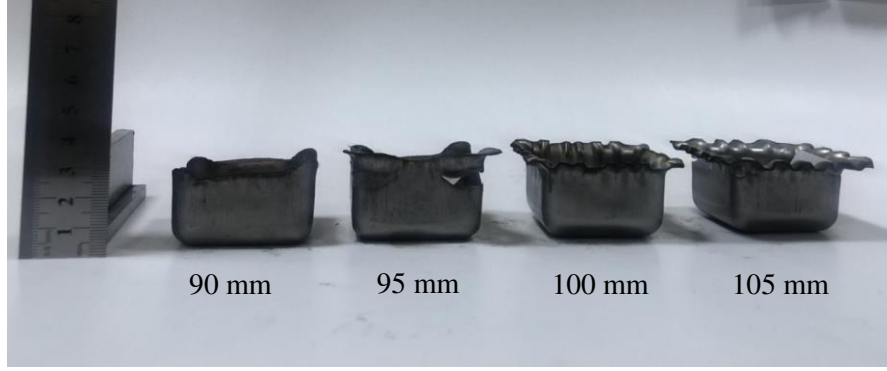
Şekil 5.74. 100 mm ve 105 mm ilkel parça çapında BPK'nın değişimi ile oluşan deformasyonlar

Şekildeki karşılaştırılmalı görseller incelendiğinde aynı şartlarda oluşturulan deney numuneleri incelendiğinde BPK'nın artması ile 100 mm ilkel parça çapındaki değişimler incelendiğinde BPK'nın artması ile numunelerdeki üst kısımlarda oluşan ondülasyonlar azalmıştır. 105 mm ilkel parça çapındaki BPK'nın artması ile numunelerin üst kısımlarındaki ondülasyonlar azalmış BPK'nın 5500 N olduğu durumda üst köşelerde yırtılma ve aynı zamanda tabana paralel şekilde yırtılma görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu oluşan bazı deformasyonlar Şekil 5.75'de verilmiştir.

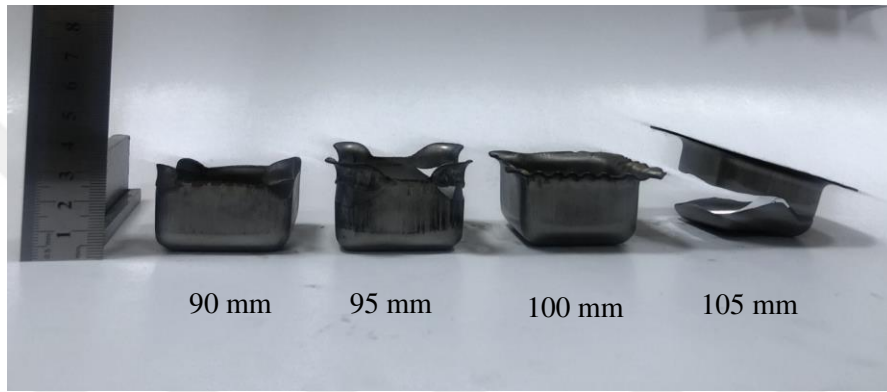


Şekil 5.75. Deneysel çalışmalar sonucunda oluşan çeşitli deformasyonlar ve hatalar

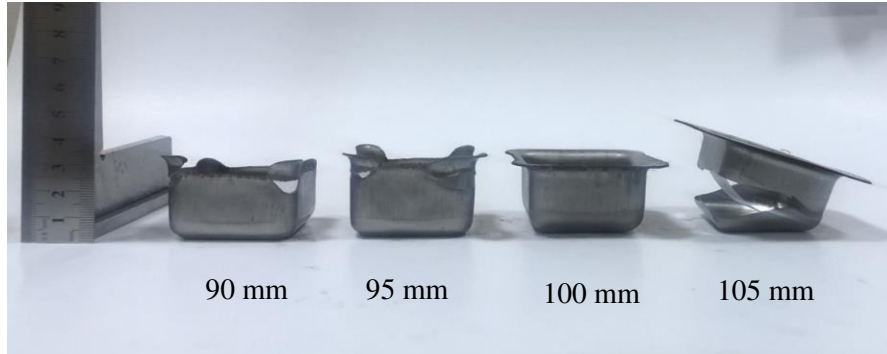
Yapılan deneysel çalışmalarda ilkel parça boyutlarının etkinliğini araştırmak amacıyla matris-baskı plakası açısının 0^0 , matris radyüsünün 4 mm, BPK'nın değiştirilerek hazırlanan deney düzeneğinde 90 mm ve 95 mm ilkel parça çapıyla deneyler yapılmıştır. Bu deneylere ait olan numuneler Şekil 5.76'da, Şekil 5.77'de ve Şekil 5.78'de verilmiştir.



Şekil 5.76. BPK'nın 5500 N olduğu durumda ilkel parça çaplarının şekillendirilebilirliğe olan etkisi



Şekil 5.77. BPK'nın 7950 N olduğu durumda ilkel parça çaplarının şekillendirilebilirliğe olan etkisi



Şekil 5.78. BPK'nın 10400 N olduğu durumda ilkel parça çaplarının şekillendirilebilirliğe olan etkisi

Şekil 5.76'da, Şekil 5.77'de ve Şekil 5.78'de verilen numuneler incelendiğinde BPK'nın 5500 N olduğu durumda oluşturulan numuneler incelendiğinde ilkel parça çapının artması ile kulaklanmalar artmış ve bununla bağlı olarak ondülasyonlar artmıştır. 95 mm ilkel parça çapında ise yırtılmalar oluşmuştur. BPK'nın 7950 N olduğu durumda ilkel parça çapının artması ile kulaklanmalar oluşmuş fakat BPK'nın artmış olmasından dolayı ondülasyonlarda bir azalma görülmüştür. Bir önceki BPK ile aynı olarak 95 mm ilkel parça çapında yırtılmalar oluşmuş ve 105

mm ilkel parça çapında tabana paralel olarak yırtılma gerçekleşmiştir. 10400 N BPK'nın olduğu durumda baskı ilkel parça çapının artması ile kulaklanmalar oluşmuş fakat BPK'nın artmış olmasından dolayı ondülasyonlar gözlemlenmemiştir. BPK'nın fazla gelmesinden dolayı ilkel parça matris içine akma konusunda zorlanmış 90 mm ve 95 mm ilkel parça çaplarında numunelerin üst köşelerinde yırtılmalar oluşmuştur. 105 mm ilkel parça çapında ise numunenin taban yüzeyine paralel bir yırtılma oluşmuştur.

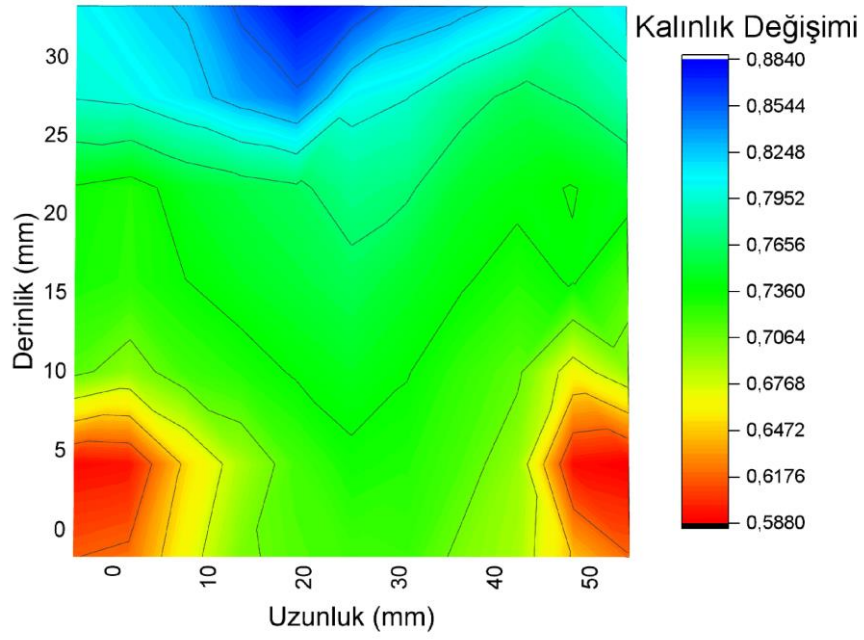
5.4. Deney Parametrelerinin Kalınlığa Etkisi

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen numuneler kalınlık ölçümü yapılması için A-A kesitinde kesitinde kenara yakın olacak şekilde kesilmiştir. Kesilen numunelerin yüzeyinde 5 mm aralıklarla noktalar belirlenmiş ve bu noktalardan mikrometre yardımı ile ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümler bilgisayar ortamına girilerek kalınlık değişim grafiği elde edilmiştir. Kesilen numuneler Şekil 5.79'da verilmiştir.



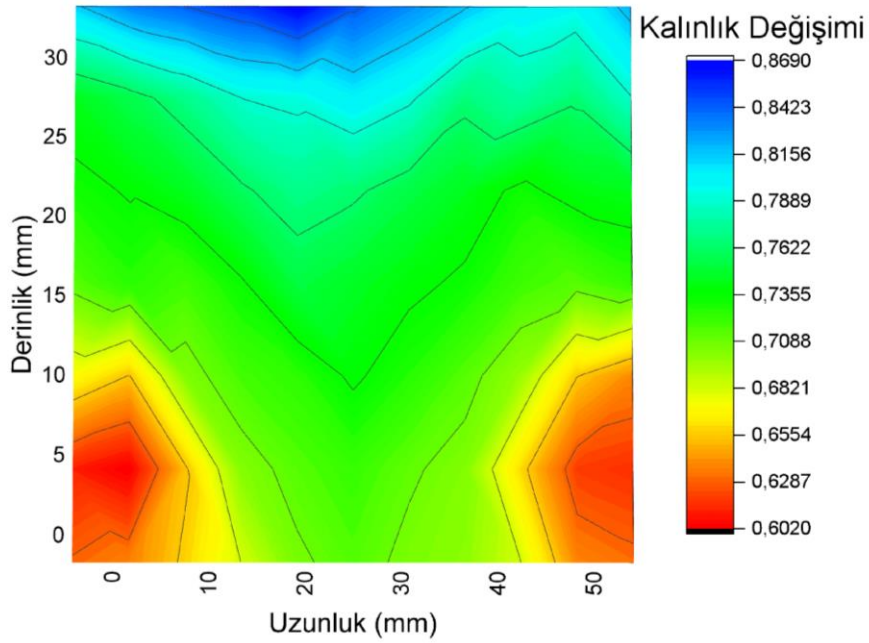
Şekil 5.79. Deneysel alışmalar sonucu elde edilen numunenin kalınlık ölçümüne hazırlanması

BPK'nın 5500 N olduğu durumdaki kalınlık değişimleri Şekil 5.80'de verilmiştir. Buradaki grafik incelendiğinde zımbanın temas ettiği köşelerde kalınlık azalmışken numunenin duvar yüzeyinde kalınlık artışı yaşanmıştır.



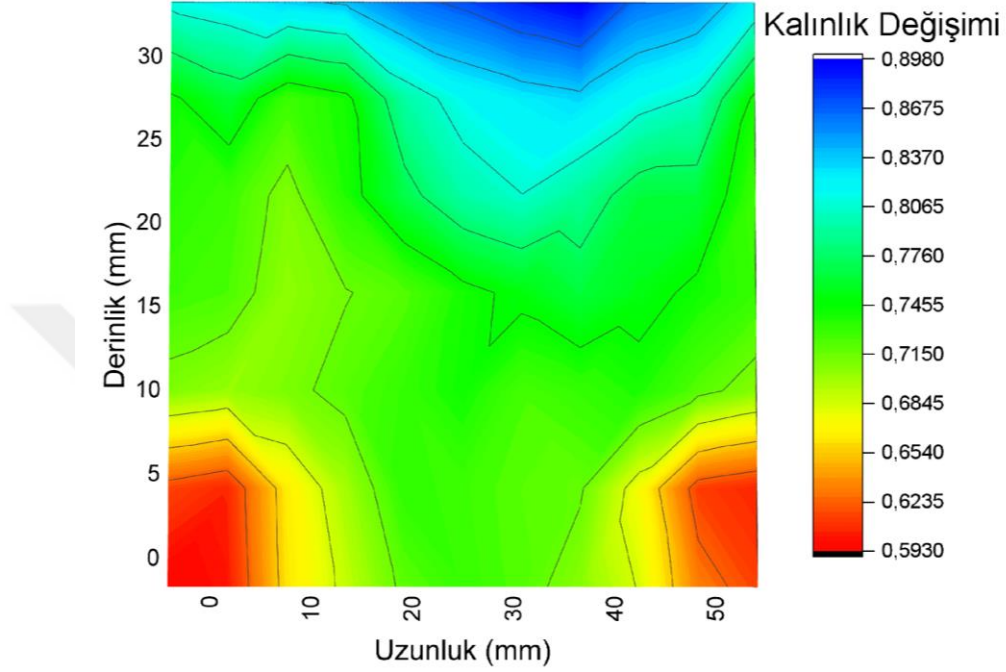
Şekil 5.80. 5500 N için kalınlık değişimi

BPK'nın 7950 N olduğu durumdaki kalınlık değişimleri Şekil 5.81'de verilmiştir. Buradaki grafik incelendiğinde zımbanın temas ettiği köşelerde kalınlık azalmışken numunenin duvar yüzeyinde kalınlık artışı yaşanmıştır.



Şekil 5.81. 7950 N için kalınlık değişimi

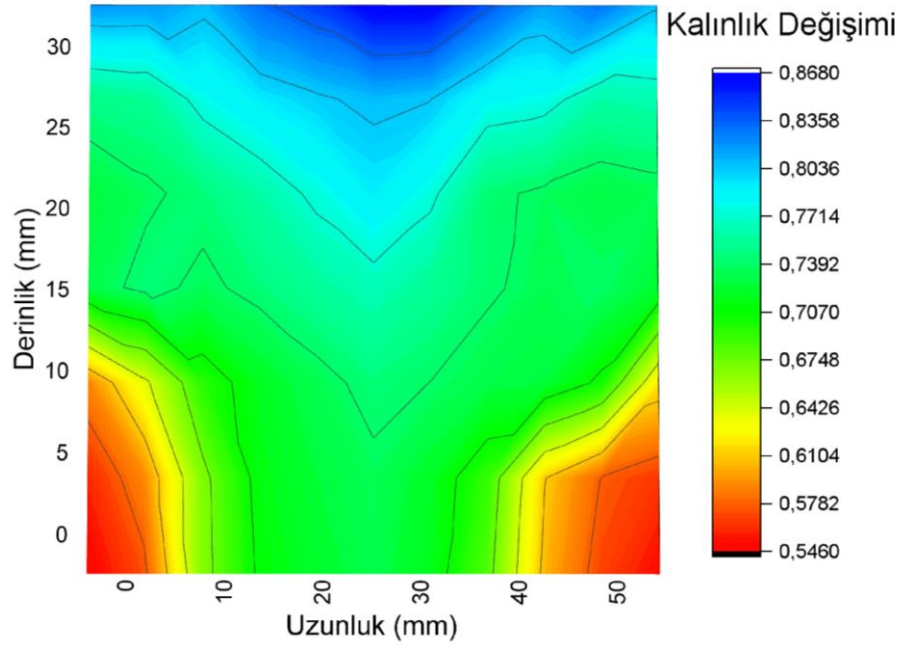
BPK'nın 10400 N olduğu durumdaki kalınlık değişimleri Şekil 5.82'de verilmiştir. Buradaki grafik incelendiğinde zımbanın temas ettiği köşelerde kalınlık azalmışken numunenin duvar yüzeyinde kalınlık artışı yaşanmıştır.



Şekil 5.82. 10400 N için kalınlık değişimi

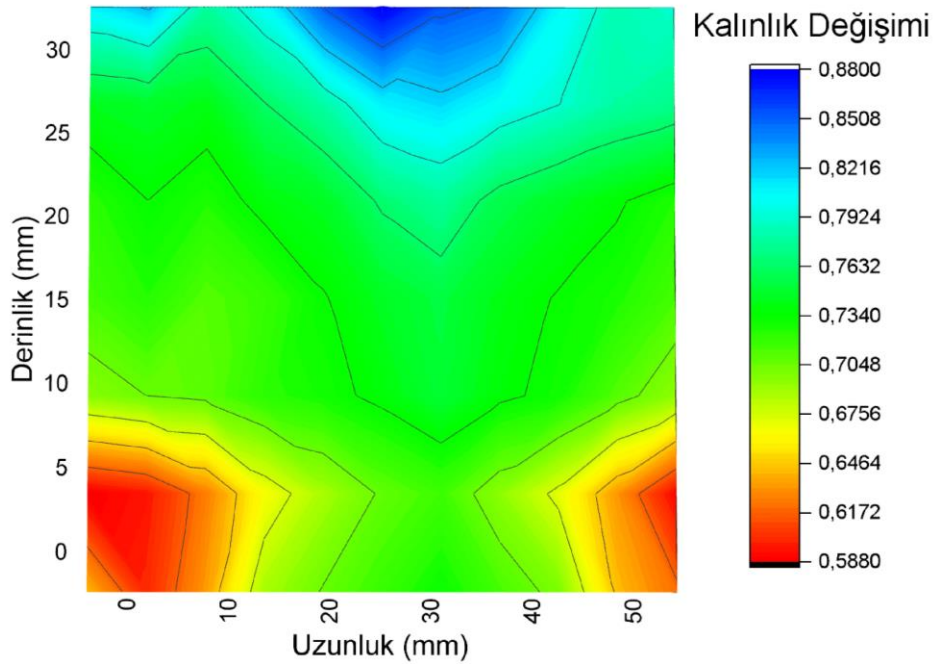
Genel olarak grafikler incelendiğinde baskı plakası kuvvetinin artması ile incelme bölgesi azalmış ve kalınlaşma olan bölgeler artmıştır.

Matris-baskı plakası açısının 0^0 olduğu durumdaki kalınlık değişimleri Şekil 5.83'de verilmiştir. Buradaki grafik incelendiğinde zımbanın temas ettiği köşelerde kalınlık azalmışken numunenin duvar yüzeyinde kalınlık artışı yaşanmıştır.



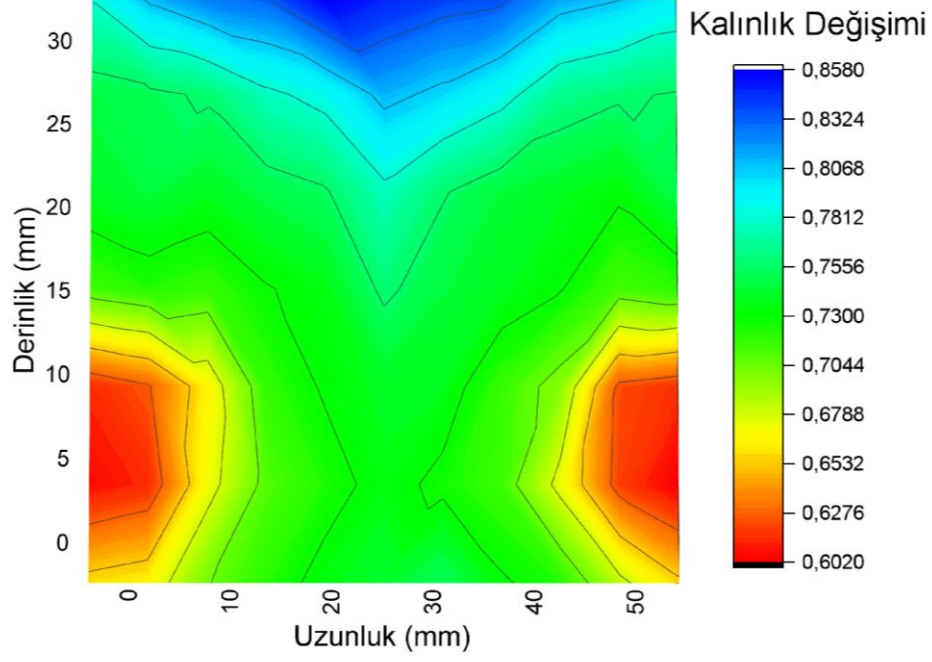
Şekil 5.83. 0° için kalınlık değişimi

Matris-baskı plakası açısının 5° olduğu durumdaki kalınlık değişimleri Şekil 5.84’de verilmiştir. Buradaki grafik incelendiğinde zımbanın temas ettiği köşelerde kalınlık azalmışken numunenin duvar yüzeyinde kalınlık artışı yaşanmıştır.



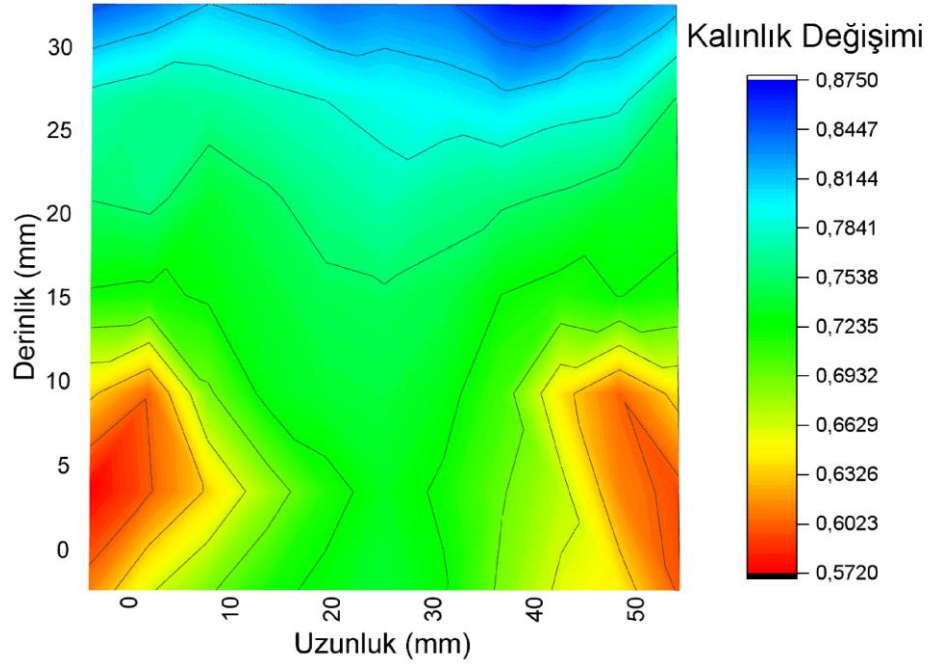
Şekil 5.84. 5° için kalınlık değişimi

Matris-baskı plakası açısının 10^0 olduğu durumdaki kalınlık değişimleri Şekil 5.85’de verilmiştir. Buradaki grafik incelendiğinde zımbanın temas ettiği köşelerde kalınlık azalmışken numunenin duvar yüzeyinde kalınlık artışı yaşanmıştır.



Şekil 5.85. 10^0 için kalınlık değişimi

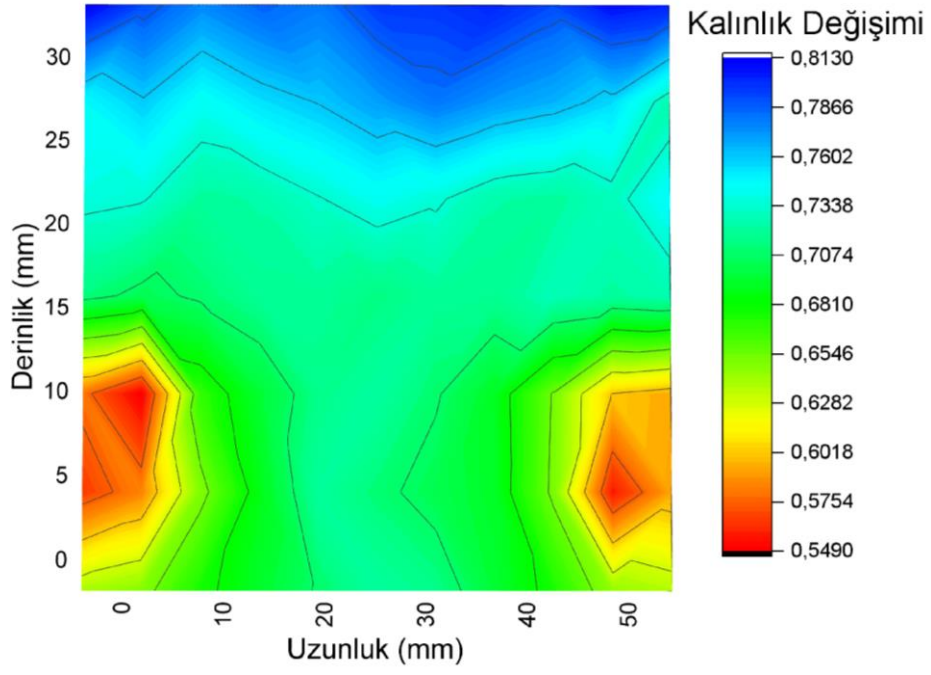
Matris-baskı plakası açısının 15^0 olduğu durumdaki kalınlık değişimleri Şekil 5.86’de verilmiştir. Buradaki grafik incelendiğinde zımbanın temas ettiği köşelerde kalınlık azalmışken numunenin duvar yüzeyinde kalınlık artışı yaşanmıştır.



Şekil 5.86. 15° için kalınlık değişimi

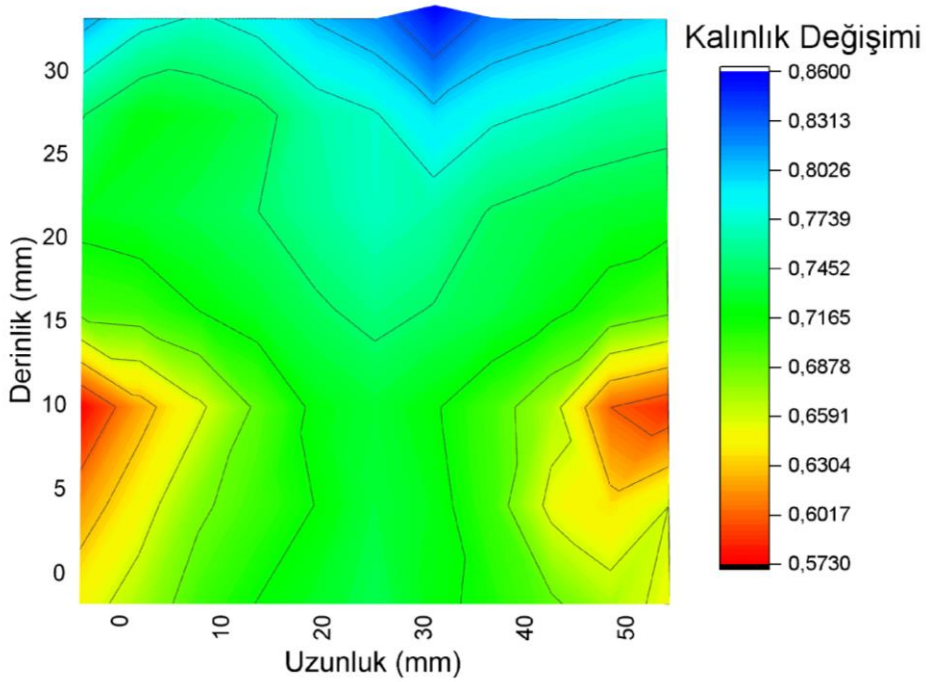
Genel olarak grafikler incelendiğinde açının artması ile incelme yaşanan bölgeler artmıştır. 5° olduğu durumda incelme bölgeleri yatay olarak genişlemiştir. Açının artması ile kalınlaşma bölgeleri artmış ve yüzeye dağılmıştır.

Matris radyüsünün $R=4$ mm olduğu durumdaki kalınlık değişimleri Şekil 5.87’de verilmiştir. Buradaki grafik incelendiğinde zımbanın temas ettiği köşelerde kalınlık azalmışken numunenin duvar yüzeyinde kalınlık artışı yaşanmıştır.



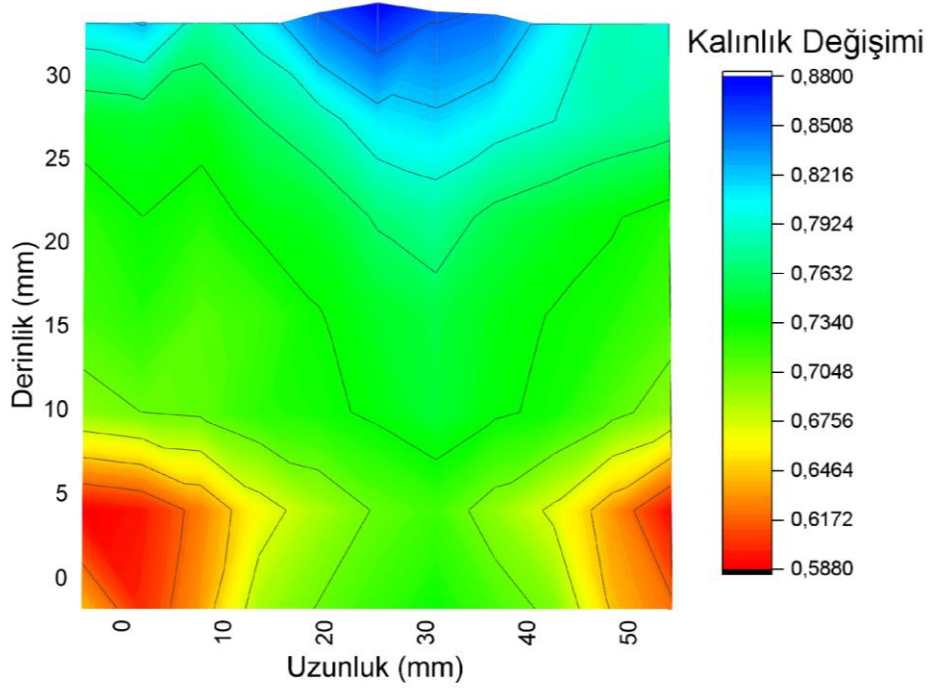
Şekil 5.87. R=4 mm için kalınlık değişimi

Matris radyüsünün R=6 mm olduğu durumdaki kalınlık değişimleri Şekil 5.88’de verilmiştir. Buradaki grafik incelendiğinde zımbanın temas ettiği köşelerde kalınlık azalmışken numunenin duvar yüzeyinde kalınlık artışı yaşanmıştır.



Şekil 5.88. R=6 mm için kalınlık değişimi

Matris radyüsünün $R=8$ mm olduğu durumdaki kalınlık değişimleri Şekil 5.89’da verilmiştir. Buradaki grafik incelendiğinde zımbanın temas ettiği köşelerde kalınlık azalmışken numunenin duvar yüzeyinde kalınlık artışı yaşanmıştır.



Şekil 5.89. $R=8$ mm için kalınlık değişimi

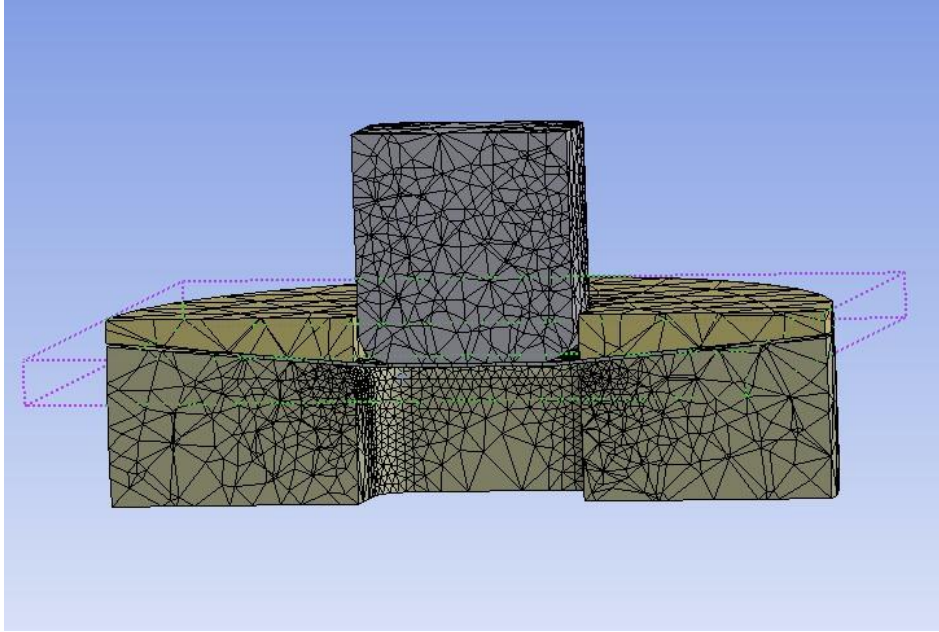
Matris radyüsünün artması ile numuneler üzerindeki kalınlaşma artmıştır. Aynı zamanda köşelerde yaşanan incelmeler radyüsün artması ile artmıştır

6. SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZ

Yapılmış olan deneysel çalışmaların sonucunun doğruluğunun kanıtlanması deneysel çalışmalar için oldukça önemlidir. Bu bölümde yapılan deneysel çalışmalar sayısal ortamda modellenerek sonlu elemanlar metodu ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar metodu çeşitli endüstrilerde ve uygulamalarda karşılaşılan problemlerin çözümünde büyük kolaylık sağlamaktadır.

Sonlu elemanlar metodunun uygulanmasında ANSYS 2022 R1 paket programı kullanılmıştır. Burada deneylerde matris, baskı plakası, zımba ve ilkel parça 3 boyutlu çizim programı kullanılarak birebir ölçüde modellenmiştir. Bununla birlikte deney parametreleri olan matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve BPK dikkate alınmıştır ve sonlu elemanlar metodu ile her bir parametre için ayrı ayrı çözümler oluşturulmuştur. Aynı zamanda ilkel parça çapı 100 mm olarak alınmıştır.

3 boyutlu çizim programında oluşturulan ve montajlanıp deney düzeneği haline gelen geometrik unsurların ağ görüntüsü Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Geometrik unsurları oluşturan ağ görüntüsü

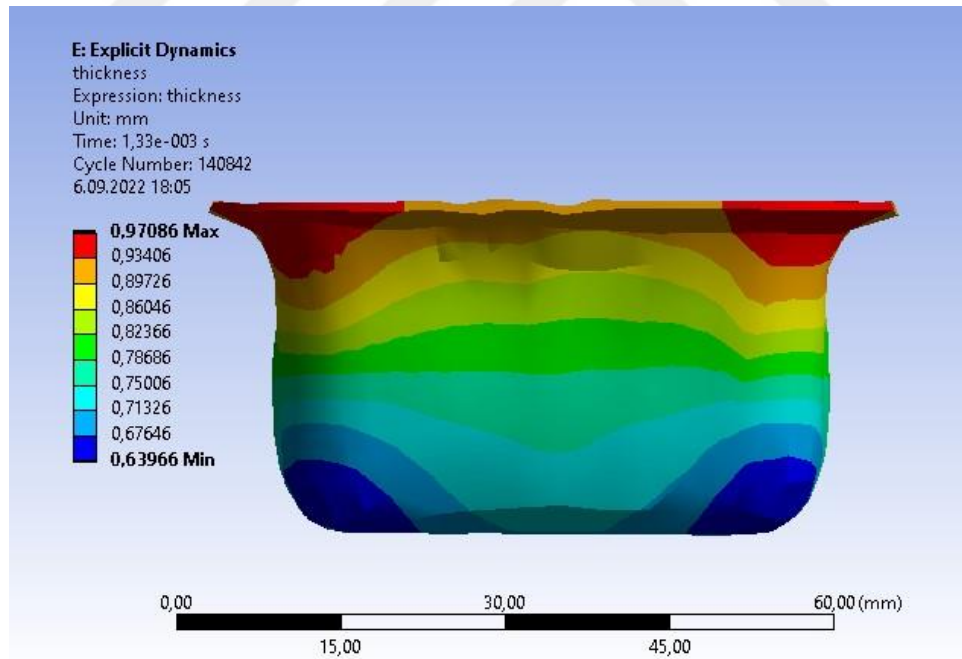
Sonlu elemanlar metodu ile hazırlanan deney düzeneği işlem parametreleri ve yüklemeler yapılarak çözümlmeleri gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan çözümlmeler sonucu numunelerin kalınlık değişimi, tepki kuvveti ve gerilmeleri elde edilmiştir.

6.1. Sonlu Elemanlar Metodu Parametrelerinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda görülmüştür ki ilkel parça matrisin içine akarken çekme ve basma gerilmelerine maruz kalmıştır. Bunun sonucunda ilkel parça akarken zımba radyüsünün etki ettiği alt köşelerde incelme oluşurken malzemenin duvar kenarlarında kalınlaşmalar gerçekleşmiştir. Numunelerin et kalınlığı ölçümü yapıldığında bu kalınlık değişimi tespit edilmiştir. BPK matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü gibi parametrelerin malzemenin et kalınlığı değişimi üzerinde önemli bir etkisi olmaktadır. Deneysel çalışmaların doğruluğunu kanıtlamak amacı ile sonlu elemanlar metodu ile kalınlık ölçümü yapılmıştır.

6.1.1. Matris-Baskı Plakası Açısının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

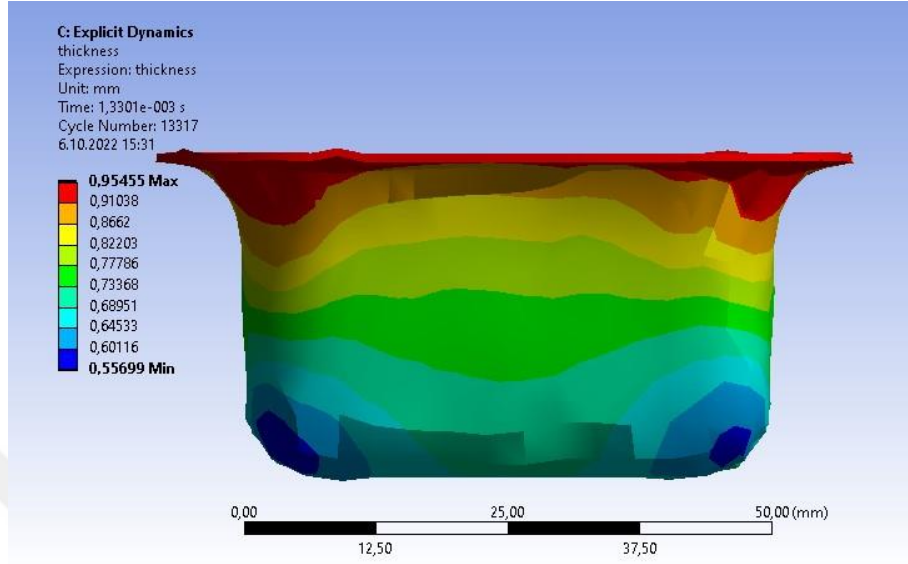
Yapılan sonlu elemanlar metodu analizleri ile Şekil 6.2’de Matris radyüsü sabit 8 mm ve BPK 10400 N olduğu durumda matris-baskı plakası açısı 0^0 için et kalınlığının değişimi görülmektedir. Burada minimum et kalınlığı 0,63966 mm olarak taban köşelerinde görülürken maksimum et kalınlığı 0,97086 mm olarak numunenin kulaklanma bölgesindeki köşelerde oluşmuştur. Aynı zamanda kalınlaşmalar duvar kenarlarında da görülmüştür.



Şekil 6.2. Matris-baskı plakası açısının 0^0 olduğu durumda et kalınlığı değişimi

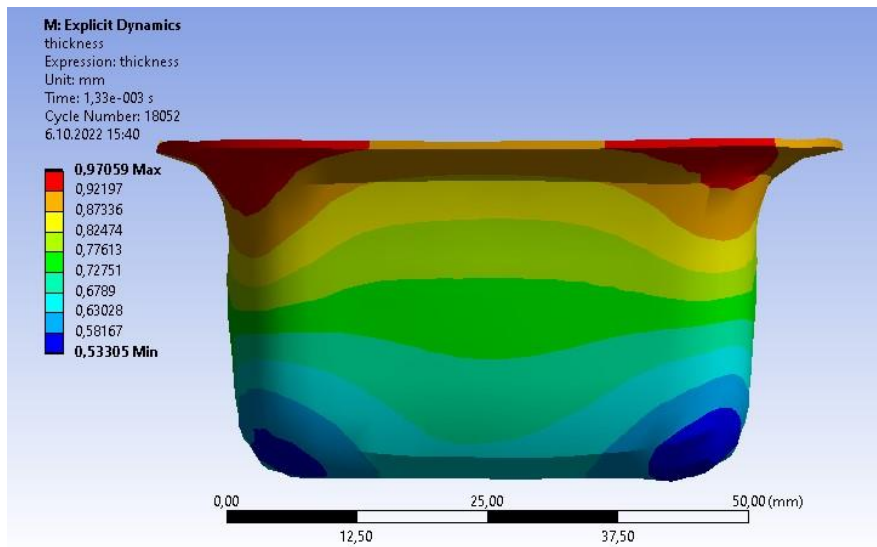
Şekil 6.3’de Matris radyüsü sabit 8mm ve BPK 10400 N olduğu durumda matris-baskı plakası açısı 5^0 için et kalınlığının değişimi görülmektedir. Burada minimum et kalınlığı 0,5569 mm olarak taban köşelerinde görülürken maksimum et kalınlığı 0,9545 mm olarak numunenin

kulaklanma bölgesindeki köşelerde ve üst yüzeyde oluşmuştur. Aynı zamanda kalınlaşmalar duvar kenarlarında da görülmüştür.



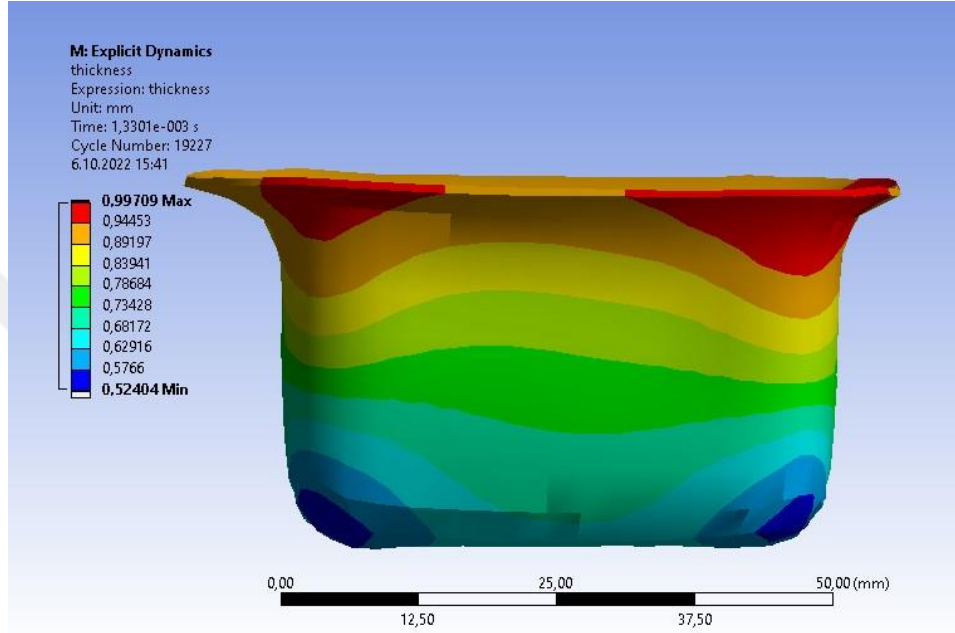
Şekil 6.3. Matris-baskı plakası açısının 5^0 olduğu durumda et kalınlığı değişimi

Şekil 6.4’de Matris radyüsü sabit 8 mm ve BPK 10400 N olduğu durumda matris-baskı plakası açısı 10^0 için et kalınlığının değişimi görülmektedir. Burada minimum et kalınlığı 0,5330 mm olarak taban köşelerinde görülürken maksimum et kalınlığı 0,9705 mm olarak numunenin kulaklanma bölgesindeki köşelerde ve üst yüzeyde oluşmuştur. Aynı zamanda kalınlaşmalar duvar kenarlarında da görülmüştür.



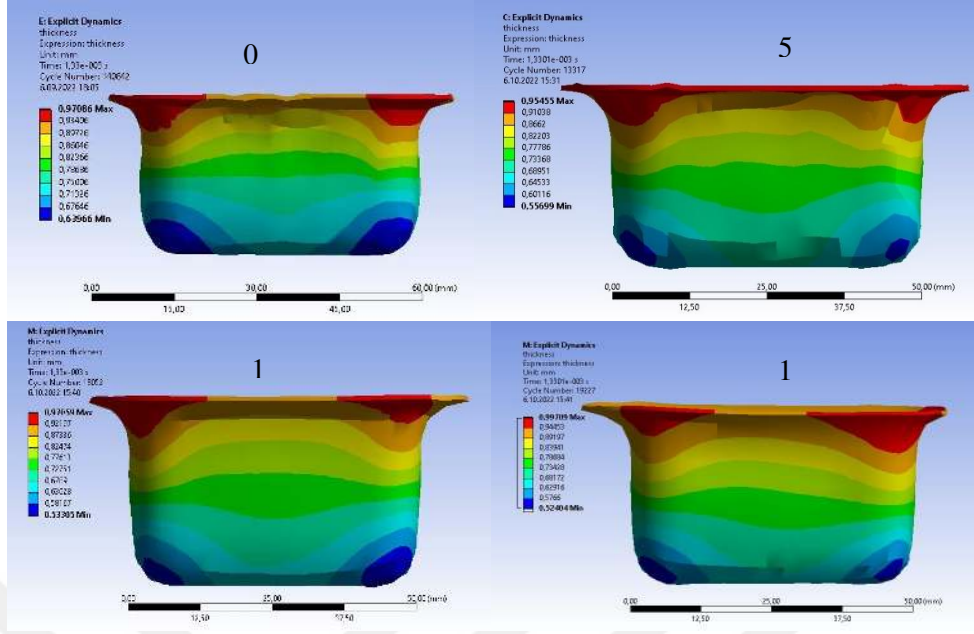
Şekil 6.4. Matris-baskı plakası açısının 10^0 olduğu durumda et kalınlığı değişimi

Şekil 6.5’de Matris radyüsü sabit 8 mm ve BPK 10400 N olduğu durumda matris-baskı plakası açısı 15° için et kalınlığının değişimi görülmektedir. Burada minimum et kalınlığı 0,5240 mm olarak taban köşelerinde görülürken maksimum et kalınlığı 0,9970 mm olarak numunenin kulaklanma bölgesindeki köşelerde ve üst yüzeyde oluşmuştur. Aynı zamanda kalınlaşmalar duvar kenarlarında da görülmüştür.



Şekil 6.5. Matris-baskı plakası açısının 15° olduğu durumda et kalınlığı değişimi

Şekil 6.6’da matris radyüsü sabit 8 mm ve BPK 10400 N olduğu durumda matris-baskı plakası açısının değişimi sonucu elde edilen et kalınlıkları incelendiğinde minimum kalınlık 0° için 0,6396 iken 5° için 0,5569’e düşmüştür. Buradaki düşüş yaklaşık % 13 olarak hesaplanmıştır. Diğer değişimler incelendiğinde 5° ’den 10° ’ye geçişte 0,55569’dan 0,5330’e düşmüştür. 10° ’den 15° ’ye geçişte ise 0,5330’dan 0,5240’ye düşmüştür. Burada 0° ’den 15° ’ye kalınlık değişimi hesaplandığında bu değer %18 olmuştur. Derin çekme işleminde kullanılan ilkel parçanın kalınlığının 0,8 mm olduğu göz önüne alındığında incelleme yaklaşık olarak 0,6 mm ile 0,5 aralığındadır. Kalınlaşma incelendiğinde ise yaklaşık olarak 0,9 mm ile 1 mm aralığındadır.

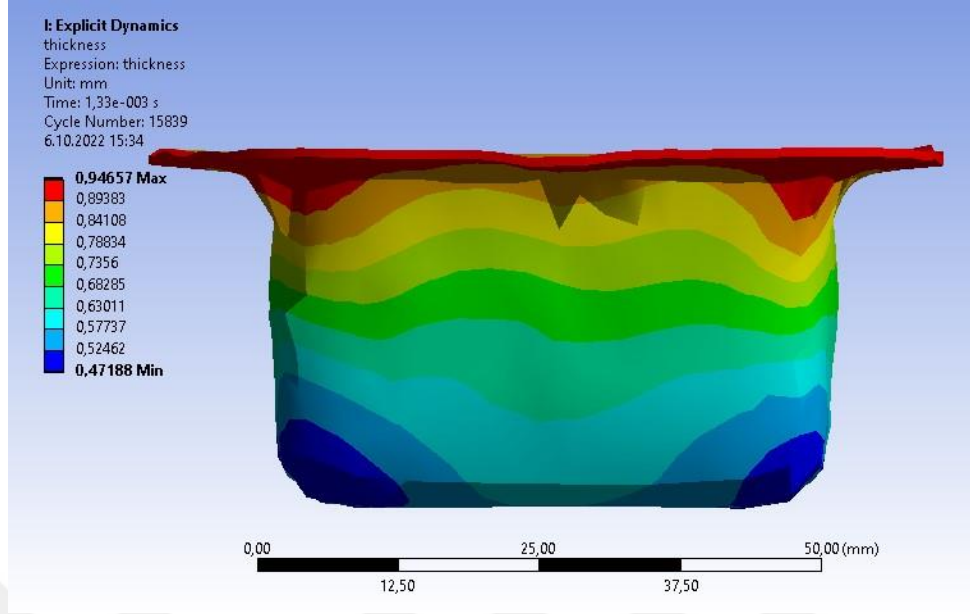


Şekil 6.6. Matris-baskı plakası açısının değişimi ile et kalınlığı değişimi

Matris-baskı plakası açısı değişimi ile et kalınlığı değişiminde minimum et kalınlığı en düşük 15^0 'de 0,5240 olarak hesaplanmışken en yüksek 0^0 'de 0,63966 olarak hesaplanmıştır. Maksimum et kalınlığı değişimi incelendiğinde en düşük 0^0 'de 0,97086 olarak hesaplanmışken en yüksek 15^0 'de 0,9970 olarak hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak kalınlığın en düşük seviyede olmasının temel nedeni çekme gerilmelerinin yükselmesidir. Bununla beraber çekme kuvvetinin artması nedeniyle en düşük kalınlıklar zımba radyüsünün temas ettiği numunenin alt köşeleridir. Dolayısıyla matris açısının artması ile kalınlık değişiminin azaldığı yapılan çalışmalardan görülmüştür.

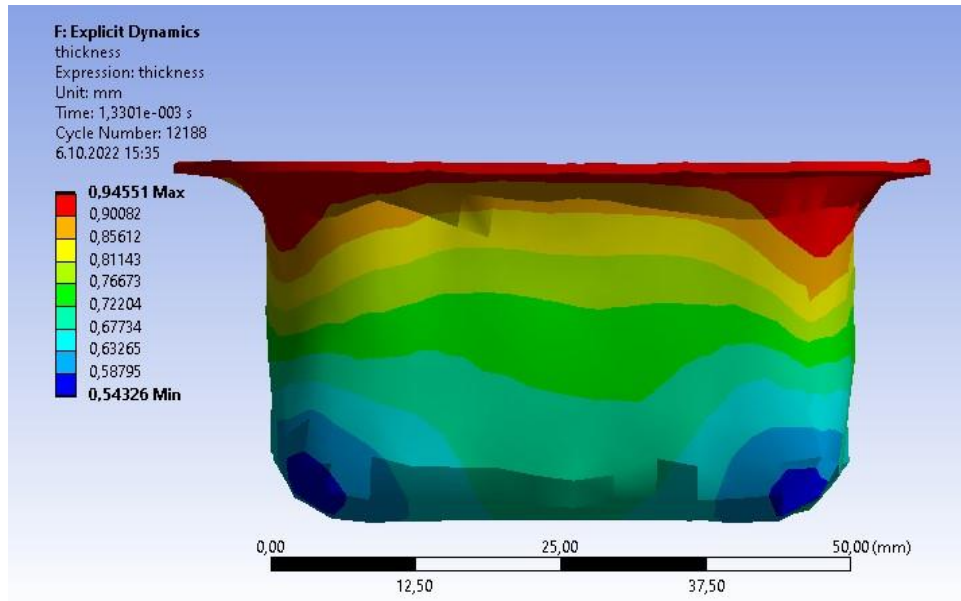
6.1.2. Matris Radyüsünün Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Yapılan sonlu elemanlar metodu analizleri ile Şekil 6.7'de Matris-baskı plakası açısının sabit 5^0 ve BPK 10400 N olduğu durumda matris radyüsü 4 mm için et kalınlığının değişimi görülmektedir. Burada minimum et kalınlığı 0,4718 mm olarak taban köşelerinde görülürken maksimum et kalınlığı 0,9465 mm olarak numunenin kulaklanma bölgesindeki köşelerde oluşmuştur. Aynı zamanda kalınlaşmalar duvar kenarlarında da görülmüştür.



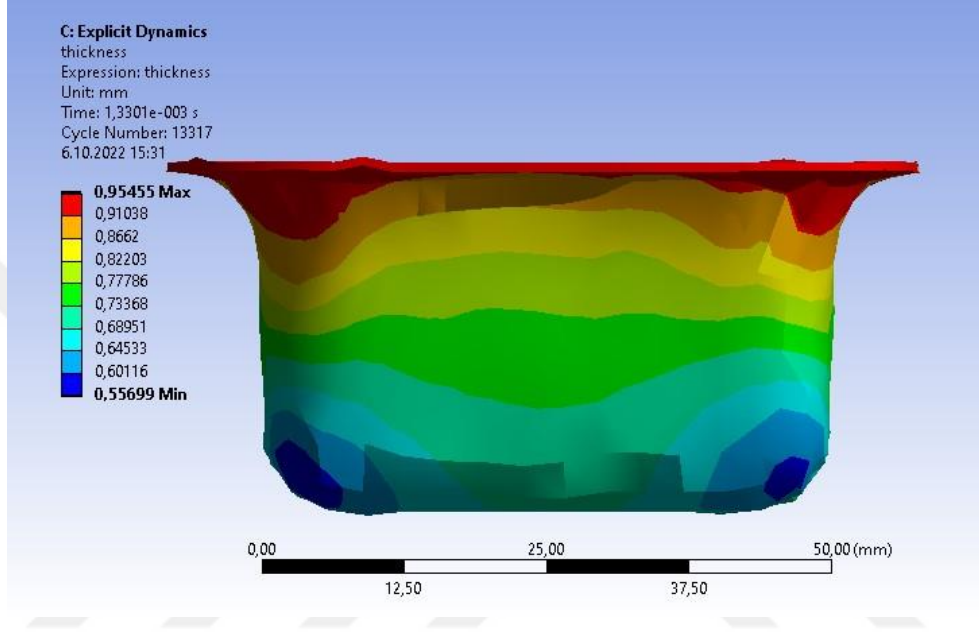
Şekil 6.7. Matris radyüsünün 4 mm olduğu durumda et kalınlığı değişimi

Şekil 6.8’de Matris-baskı plakası açısının sabit 5^0 ve BPK 10400 N olduğu durumda matris radyüsü 6 mm için et kalınlığının değişimi görülmektedir. Burada minimum et kalınlığı 0,5432 mm olarak taban köşelerinde görülürken maksimum et kalınlığı 0,9455 mm olarak numunenin kulaklanma bölgesindeki köşelerde oluşmuştur. Aynı zamanda kalınlaşmalar duvar kenarlarında da görülmüştür.



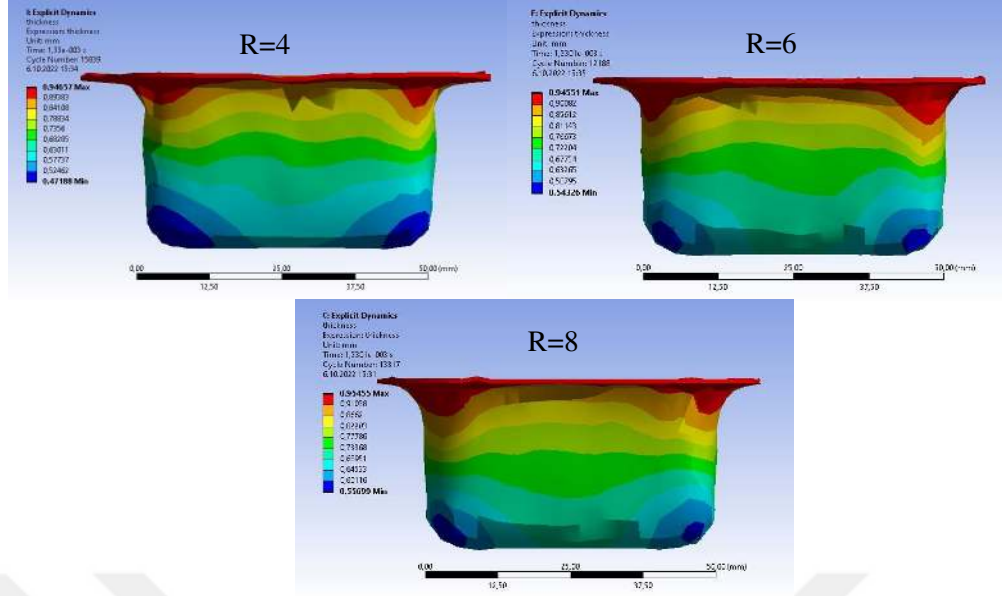
Şekil 6.8. Matris radyüsünün 6 mm olduğu durumda et kalınlığı değişimi

Şekil 6.9’da Matris-baskı plakası açısının sabit 10^0 ve BPK 7950 N olduğu durumda matris radyüsü 8 mm için et kalınlığının değişimi görülmektedir. Burada minimum et kalınlığı 0,55569 mm olarak taban köşelerinde görülürken maksimum et kalınlığı 0,9545 mm olarak numunenin kulaklanma bölgesindeki köşelerde oluşmuştur. Aynı zamanda kalınlaşmalar duvar kenarlarında da görülmüştür.



Şekil 6.9. Matris radyüsünün 8 mm olduğu durumda et kalınlığı değişimi

Şekil 6.10’da matris-baskı plakası açısı sabit 5^0 ve BPK 10400 N olduğu durumda matris radyüsünün değişimi sonucu elde edilen et kalınlıkları incelendiğinde minimum kalınlık 4 mm için 0,4718 iken 6 mm için 0,5432’ye yükselmiştir. Buradaki yükseliş yaklaşık % 13 olarak hesaplanmıştır. Diğer değişimler incelendiğinde 6 mm’den 8 mm’ ye geçişte 0,5432’den 0,5569’a yükselmiştir. Bu iki radyüs değişimi arasındaki yüzdesel fark ise yaklaşık % 2 olarak hesaplanmıştır. Burada 4 mm’den 8 mm’ye kalınlık değişimi hesaplandığında bu değer %15 olmuştur. Derin çekme işleminde kullanılan ilkel parçanın kalınlığının 0,8 mm olduğu göz önüne alındığında incelmeye yaklaşık olarak 0,6 mm ile 0,4 aralığındadır. Kalınlaşma incelendiğinde ise yaklaşık olarak 0,9 mm ile 1 mm aralığındadır.

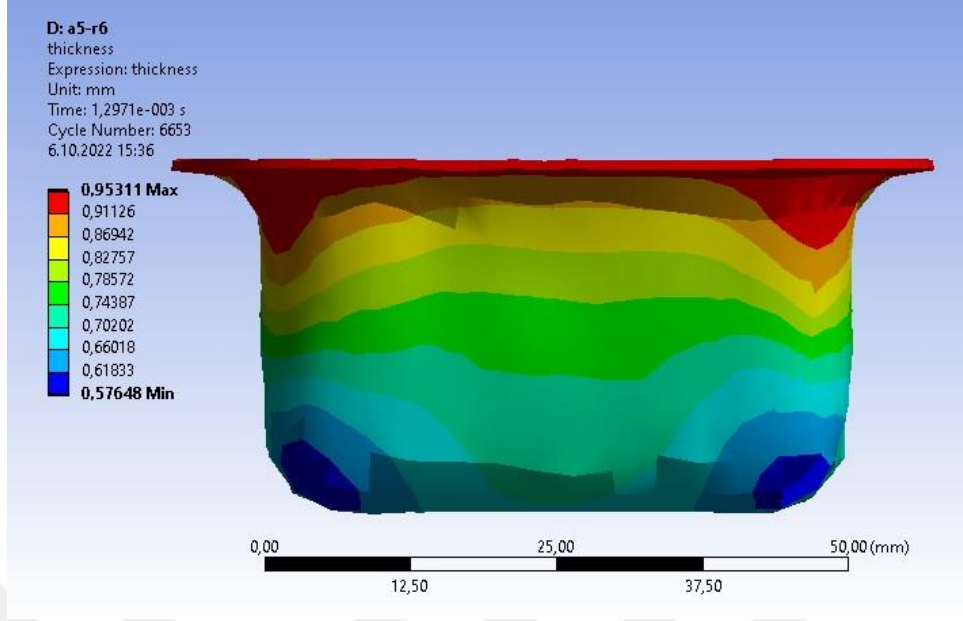


Şekil 6.10. Matris-radyüsünün değişimi ile et kalınlığı değişimi

Matris radyüsünün değişimi ile et kalınlığı değişiminde minimum et kalınlığı değişimine bağlı olarak kalınlığın artması ilkel parçanın matris içerisine akarken radyüsün daha geniş olması ile ilkel parça matris içerisine daha kolay akmıştır. İlkel parça matris içerisine daha kolay aktığı için kalınlığın BPK'nın ve matris-baskı plakası açısının tam tersi olarak arttığı sonuçlarda görülmektedir. Dolayısıyla matris radyüsünün artması ile kalınlık değişiminin arttığı yapılan çalışmalardan görülmüştür.

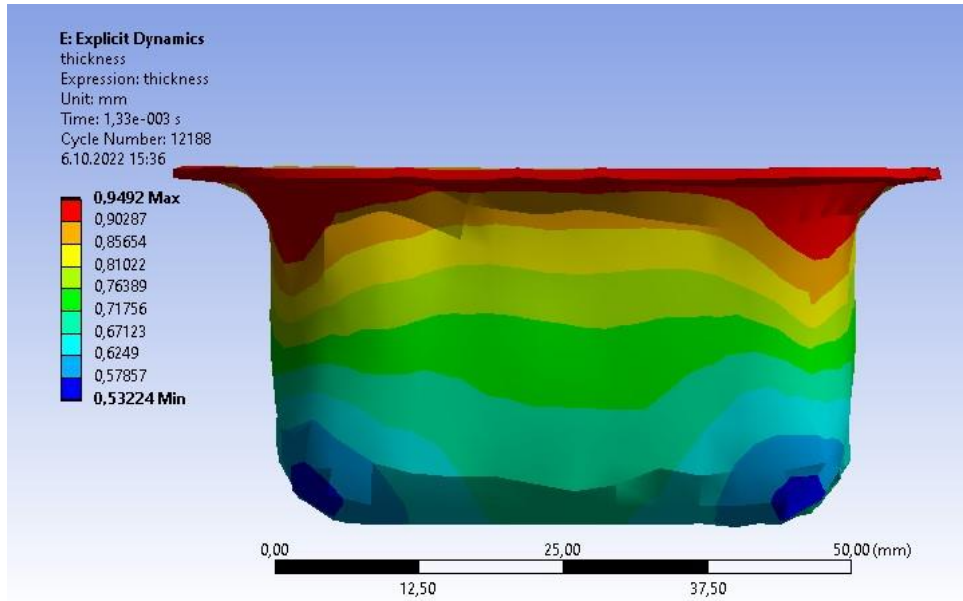
6.1.3. Baskı Plakası Kuvvetinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Yapılan sonlu elemanlar metodu analizleri ile Şekil 6.11'de Matris radyüsü sabit 6 mm ve matris-baskı plakası açısı 5° olduğu durumda BPK 5500 N için et kalınlığının değişimi görülmektedir. Burada minimum et kalınlığı 0,5764 mm olarak taban köşelerinde görülürken maksimum et kalınlığı 0,9531 mm olarak numunenin kulaklanma bölgesindeki köşe kısımlarda oluşmuştur. Aynı zamanda kalınlaşmalar duvar kenarlarında da görülmüştür.



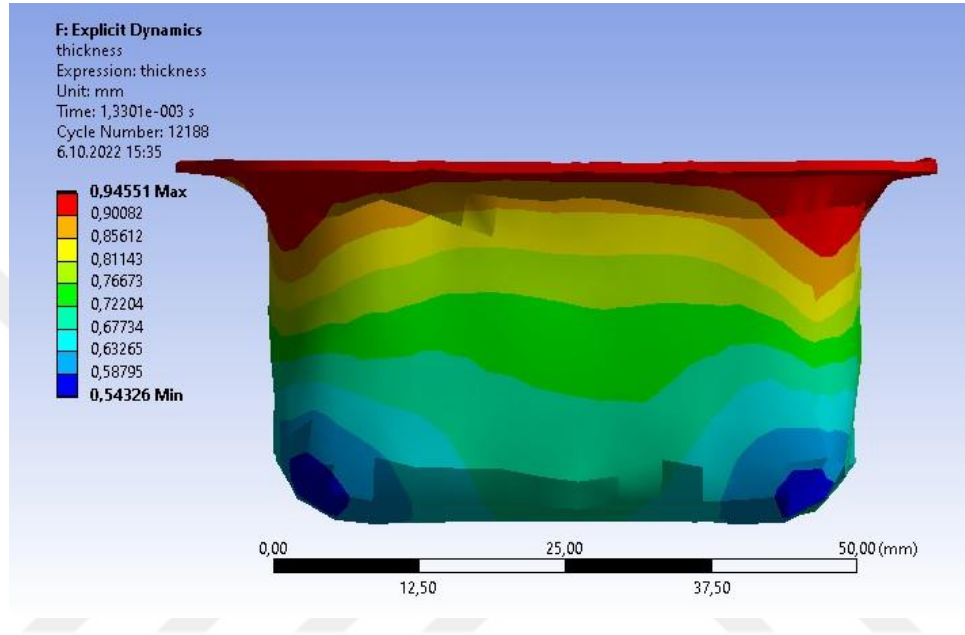
Şekil 6.11. BPK'nın 5500 N olduğu durumda et kalınlığı değişimi

Yapılan sonlu elemanlar metodu analizleri ile Şekil 6.12'de Matris radyüsü sabit 6 mm ve matris-baskı plakası açısı 5^0 olduğu durumda BPK 7950 N için et kalınlığının değişimi görülmektedir. Burada minimum et kalınlığı 0,5322 mm olarak taban köşelerinde görülürken maksimum et kalınlığı 0,9492 mm olarak numunenin kulaklanma bölgesindeki köşelerde oluşmuştur. Aynı zamanda kalınlaşmalar duvar kenarlarında da görülmüştür.



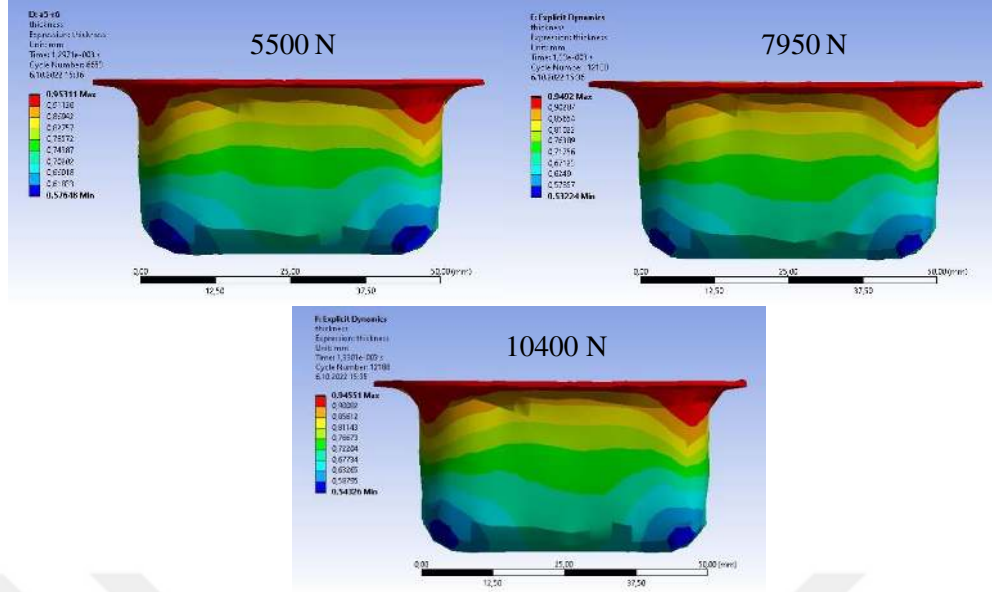
Şekil 6.12. BPK'nın 7950 N olduğu durumda et kalınlığı değişimi

Yapılan sonlu elemanlar metodu analizleri ile Şekil 6.13’de Matris radyüsü sabit 6 mm ve matris-baskı plakası açısı 5^0 olduğu durumda BPK 10400 N için et kalınlığının değişimi görülmektedir. Burada minimum et kalınlığı 0,5432 mm olarak taban köşelerinde görülürken maksimum et kalınlığı 0,9455 mm olarak numunenin kulaklanma bölgesindeki köşelerde oluşmuştur. Aynı zamanda kalınlaşmalar duvar kenarlarında da görülmüştür.



Şekil 6.13. BPK’nın 10400 N olduğu durumda et kalınlığı değişimi

Şekil 6.14’de matris-baskı plakası açısı sabit 5^0 , matris radyüsü sabit 6 mm olduğu durumda BPK’nın değişimi sonucu elde edilen et kalınlıkları incelendiğinde minimum kalınlık BPK=5500 N için 0,5764 iken BPK=7950 N için 0,5322’ye düşmüştür. Buradaki düşüş yaklaşık % 8 olarak hesaplanmıştır. Diğer değişimler incelendiğinde BPK=7950 N’den BPK=10400 N’ye geçişte 0,5322’den 0,5432’ye yükselmiştir. Buradaki BPK arasındaki yüzdesel fark ise yaklaşık % 2 olarak hesaplanmıştır. BPK=5500 N’den BPK=10400 N’ye kalınlık değişimi hesaplandığında bu değer %6 olmuştur. Derin çekme işleminde kullanılan ilkel parçanın kalınlığının 0,8 mm olduğu göz önüne alındığında inceltme yaklaşık olarak 0,6 mm ile 0,5 aralığındadır. Kalınlaşma incelendiğinde ise yaklaşık olarak 0,9 mm ile 1 mm aralığındadır.



Şekil 6.14. BPK'nın değişimi ile et kalınlığı değişimi

BPK değişimi ile et kalınlığı değişiminde minimum et kalınlığı değişimine bağlı olarak kalınlığın azalması baskı kuvvetinin yükselmesi sonucu baskı plakası ilkel parçayı tutmuştur ve ilkel parçanın matris içerisine akması esnasında sürtünme kuvvetinin yükselmesinden kaynaklandığı sonuçlara bakılarak söylenebilir. Dolayısıyla BPK'nın artması ile kalınlık değişiminin azaldığı yapılan çalışmalardan görülmüştür.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucu işlem parametrelerini şekillendirilebilirliğe olan etkisi sonuçlar kısmında verilmiştir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar ile literatürde elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılacaktır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda düşük BPK'nın numune üzerinde kırışmalara neden olacağı gözlemlenmiştir. Yüksek BPK'nın uygulanması ile malzemede herhangi bir deformasyon olduğu gözlemlenmemiştir. Wifi S. A. ve diğerleri yapmış oldukları araştırmalarda ise yüksek BPK'nın numune üzerinde kırılmalara neden olacağı söylenmiştir. Dwivedi R. ve Agnihtori G. İse düşük BPK'nın numune üzerinde kırışıklıklara yol açacağını söylemiştir. [27,54].

Bu çalışmada yer alan deneysel ve sayısal çalışmalar sabit oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Takalkar A. S. ve diğerleri farklı sıcaklıklarda deney malzemeleri ile yapılan derin çekme işlemi sonucunda çelik malzeme daha iyi şekil alabilir ve daha yüksek limit çekme oranına sahip olduğu görülmüştür. Alüminyum malzeme için ise kalınlık dağılımı ve şekillendirme limit gerilimi, takımları daha yüksek bir sıcaklıkta tutarak veya sıcaklık gradyanını artırarak iyileştirileceği sonucuna varmıştır [23].

Deneysel çalışmalar incelendiğinde matris radyüsünün malzeme üzerine etkiyen radyal kuvvetleri azalttığını böylelikle numune üzerindeki kırışıklıkları önlendiğini ve aynı zamanda ilkel parçanın malzeme içerisine daha kolay aktığı görülmüştür. Bir diğer olarak ise matris radyüsünün radyal kuvvetleri azaltması ile malzemenin zımbanın temas ettiği köşelerinde incelme ve duvar kısmında kalınlaşma olduğu görülmüştür. Swapna D. ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada numune üzerine etki eden gerilmelerin, çekilmiş kaptaki kalınlık değişimi üzerinde etkili olduğunu söylemişlerdir. Birincil deformasyon, radyal gerilime ve çevresel sıkıştırmaya maruz kalan deforme olan kabın flanşında meydana gelir. Bu nedenle flanş kısmında kalınlık artar. İkinci deformasyon bölgesi, matris radyüsü etrafındaki bükülme iken üçüncü deformasyon bölgesi, metalin incelmeye neden olan kap duvarındaki tek eksenli gerilme olduğunu söylemişleridir. Zaid A. ise Genel olarak, kalınlık zımbanın alt yüzeyinde üniform, zımba radyüsünde ve dikey yüzeyde minimum ve flanş alanında daha kalındır. Oluşturma aşamasından itibaren kalınlık çeşitliliğinin varlığı, hasar sisteminin hızlanmasına neden olan parça ile basınç sabitlemesine neden olabileceğini düşünmüştür. Gowtham K. ve diğerleri ise belirli bir sabit sürtünme için, matris radyüsündeki artışla gerekli kuvvetin arttığını söylemiştir. Bunun nedeni, daha büyük matris radyüsleri için işlenmemiş parça ile matris arasındaki temas uzunluğunun yüksek olması, dolayısıyla önemli ölçüde yüksek sürtünme kayıplarına neden olması, dolayısıyla gereken yükün yüksek olmasıdır. [55–57].

Yapılan deneysel çalışmalarda maksimum kuvvet ölçümü yapılmıştır. Derin çekme işlemi sırasında oluşan maksimum kuvvet grafikler halinde sonuçlar kısmında verilmiştir. Maksimum

kuvvet de işlem parametrelerine göre değişiklik göstermektedir. BPK'nın artması ile maksimum kuvvette azalma olduğu görülmüştür. Tiwari P. R. ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada yaklaşık 17 mm zımba hareketine kadar monotonik artışları gösterdiğini; bu noktada, çekme kuvveti maksimum büyüklüğüne ulaştığını görmüşlerdir. Şekillendirme makinelerini seçmek için, maksimum çekme kuvvetleri doğru bir şekilde değerlendirilmelisi gerektiğini söylemişlerdir [58].

Yapılan deneysel çalışmalar sadece AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sac kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmalarda da aynı malzeme gerekli kütüphanede seçilerek yapılmıştır. Matris-baskı plakası açısının malzemelerin şekillendirilebilirliğine önemli etkileri olduğu görülmüştür. Yüksek matris açısı ile malzeme matrise daha az temas ederek matris boşluğuna daha kolay akmıştır. Reddy P. V. ve diğerleri farklı malzemeler kullanarak parametrelerin etkilerini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Bu çalışmalarının sonucunda ise Pirinç ve paslanmaz çelik için gereken zımba kuvvetinin aynı olduğu, alüminyumun daha az kuvvet gerektirdiği sonucuna varılmıştır. Pirinç saclarda, Paslanmaz çelik sac ve Alüminyum saclara göre gerinim oluşumu daha fazladır. Alüminyum sac için paslanmaz Çelik sac ve Pirinç saclara göre stres oluşumu daha yüksektir. Pirinç levha, ancak kırışıklık oluşumu SS304 için daha fazladır, bu nedenle zımba kuvveti de SS304 için daha fazladır. Köşeli matrislere sahip düz matrislerle karşılaştırıldığında, açısız matrisler için zımba kuvveti ve şekillendirilebilirlik gibi sonuçlar daha iyi olduğu gibi sonuçlara ulaşmışlardır [59].

Literatür çalışmaları ile elde edilen deneysel sonuçlar ve sayısal sonuçlar incelendiğinde çalışmaların literatüre paralel sonuçlarda çıktığı incelenen parametrelerin şekillendirilebilirliğe olan etkisi literatürde tespit edildiği gibi çıkmıştır. Bu yönden çalışmanın literatürle eş sonuçlar vermesi çalışmanın doğruluğunu kanıtlamaktadır.

8. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada derin çekme işlemine etki eden parametrelerin şekillendirilebilirliğe olan etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda 0,8 mm kalınlığında AISI 304 östenitik paslanmaz çelik sac malzeme kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda matris-baskı plakası açısı, matris radyüsü ve BPK parametreleri değiştirilerek zımba kuvveti, et kalınlığı değişimleri incelenmiştir. Bu girdi parametreleri farklı seviyelerde ve değerlerde değiştirilip derin çekme işleminde ilkel parçalar üzerine uygulanmıştır. Deneysel çalışmaların etkinliğini doğrulamak amacı ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Bu analizler, deneysel çalışmalarda kullanılan parametreleri kullanarak aynı seviyelerde kullanarak bilgisayar ortamına aktarılmış ve kalınlık değişimi ve zımba kuvveti gibi çıkış parametrelerine bakılarak deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Matris-baskı plakası açısının artması sonucunda ilkel parçanın matrise temas yüzeyi azalmıştır. Böylelikle ilkel parçanın matris içerisine akması daha kolaylaşmıştır. Matris-baskı plakası açısının artması ile maksimum kuvvette azalma olurken 10^0 'de tekrardan artış gözlemlenmiş ve bu açı değerinden sonra yeniden azalma olduğu görülmüştür. BPK'nın matris-baskı plakası açısının birlikte artmasıyla ondülasyonların azalmıştır.

Matris radyüsünün artması sonucunda matris boşluğunun artması ile ilkel parça boşluk köşelerinden daha rahat akar ve şekillendirilebilirliği daha kolay hale gelmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde radyüsün artması ile maksimum kuvvette azalma yaşanmış ve ilkel parça üzerinde oluşan deformasyonlar azalmıştır. Matris-baskı plakasının matris radyüsü ile aynı anda arttığı sonuçlar incelendiğinde 10^0 ve 6 mm olduğu durumda maksimum kuvvette çok büyük bir artış yaşanmış ve 100000 N üzerine çıkmıştır. Bunun temel nedeni deney sırasında ilkel parça üzerinde büyük bir yırtılma oluşmuş ve bu yırtılmadan kaynaklı numune matris içerisine sıkışmıştır. Bu sıkışmadan dolayı zımba hareket edememiş ve kuvvet yükselmiştir.

BPK'nın ilkel parça üzerindeki kalınlıklara doğrudan etkisi bulunmaktadır. BPK ilkel parçanın matrisle baskı plakası arasında sabit durmasını ve malzemede oluşan ondülasyonlarını engellediği deneysel çalışmalarla kanıtlanmıştır. BPK'nın artması ondülasyonları azaltmış ve daha optimal numuneler elde edilmiştir. Maksimum kuvvet grafikleri incelendiğinde 10^0 'de BPK'nın artması ile maksimum kuvvet de artmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan bütün parametreler sonlu elemanlar metodu ile sayısal ortama aktararak analizler yapılmıştır. Bu analizlerde deneysel sonuçlara paralel sonuçlar elde edilmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile numuneler üzerindeki kalınlık değişimi ölçülmüştür. Buradaki sonuçlar irdelendiğinde deneysel sonuçlarla aynı olarak zımba radyüsünün temas ettiği bölgelerde yani numunenin taban bölgesindeki köşelerde belirli bir oranda incelmeye yaşanmışken numunenin duvarlarında belirli bir oranda kalınlaşma oluşmuştur. Maksimum incelmeye en çok

etki eden parametre matris-baskı plakası açısı değişimidir. Buradaki maksimum incelmeye %18 olarak hesaplanmıştır. Bu maksimum incelmeye matris-baskı plakası açısı değişiminde 0^0 ile 15^0 arasında olmuştur. Matris radyüsünün değişimi ile maksimum incelmeye % 15 ve BPK değişimi ile maksimum incelmeye % 6 olarak ve olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen numunelerin kalınlıkları incelendiğinde zımba radyüsünün temas ettiği köşe bölgelerde incelmeye ve numunenin duvarlarında kalınlaşma oluşmuştur. Deney parametrelerinin kalınlaşmaya ve incelmeye etkileri incelendiğinde her bir parametrenin artışı ile incelmeye ve kalınlaşmaya doğru orantılı şekilde etki etmiştir.

Yapılan kalınlık ölçümleri ile sonlu elemanlar metodu ile elde edilen kalınlık ölçümü incelendiğinde sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır. Ancak deneysel çalışmalar ile sayısal çalışmalar arasında yaklaşık olarak 0,1 mm değişim farkı olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedenlerinden birisi deneysel çalışmalarda kullanılan sac malzemenin sayısal ortamda tam olarak simüle edilememesidir. Aynı zamanda sayısal analizlerde kırışıklıkların oluşmaması da bu farkı etkilediği görülmüştür.

Bütün deneysel çalışmalar sonucunda şekillendirilebilirliğe etki eden ideal parametreler; matris-baskı plakası açısı için 15^0 , matris-zımba radyüsü için 8 mm ve baskı plakası kuvveti için 10400 N olduğu tespit edilmiştir.

ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasının devamı olarak aşağıda verilen öneriler uygulanabilir ve elde edilen sonuçları bu tez çalışmasıyla karşılaştırılabilir;

- Yapılan çalışmaya ek olarak kullanılan parametrelerin limit çekme oranının etkisi araştırılabilir.
- Derin çekme işlemi esnasında kullanılan yağ çeşitleri değiştirilerek şekillendirilebilirliğe olan etkisi araştırılabilir ve kalıp elemanları üzerindeki aşınmaları ve sertlik değişimleri ölçülebilir.
- Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler ile farklı malzemelerin derin çekme işlemindeki etkisi östenitik paslanmaz çelik sac ile kıyaslanabilir.
- Farklı çekme hızlarını parametre olarak kullanıp bunun limit çekme oranı ve şekillendirilebilirliğe olan etkisi araştırılabilir.
- Deneysel çalışmalar sabit oda sıcaklığında yapılmış olup ilkel parça sıcaklıkları değiştirilerek sıcaklığın derin çekme üzerine olan etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılabilir.
- Matris ve zimba arasındaki kalıp boşluğu değiştirilerek kalıp boşluğun ondülasyonlara olan etkisi deneysel olarak araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Kayhan, E., Kaftanoğlu, B. (2016). Yüksek Mukavemet Çeliklerinin Derin Çekme Oranlarının Geliştirilmesi İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar, *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, C. 14(2), 77–87,
- [2] Luo, L., Wei, D., Zu, G., Jiang, Z. (2021). Influence of blank holder-die gap on micro-deep drawing of SUS304 cups, *International Journal of Mechanical Sciences*, Elsevier Ltd. C. 191, 106065, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106065>
- [3] Dal, S.R. (2019). *Analysis Of Wrinkling In Deep Drawing Processes*, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences.
- [4] Gallée, S., Pilvin, P. (2010). Deep drawing simulation of a metastable austenitic stainless steel using a two-phase model, *Journal of Materials Processing Technology*, C. 210(6–7), 835–43, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.01.008>
- [5] Collins, D.A., Carter, E.L., Timothy, G.L., Byun, T.S. (2021). A comprehensive study of the effects of long-term thermal aging on the fracture resistance of cast austenitic stainless steels, *Nuclear Engineering and Technology*, Elsevier Ltd. C. (xxxx)<https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.022>
- [6] Zhang, H., Li, C., Xu, M., Dai, W., Kumar, P., Liu, Z., Li, Z., Zhang, Y. (2021). The fatigue performance evaluation of additively manufactured 304L austenitic stainless steels, *Materials Science and Engineering A*, Elsevier B.V. C. 802(December 2020), 140640, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140640>
- [7] Tekaslan, Ö. (2007). *AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerde İşlenebilirliğe Bağlı Olarak Kalıcı Gerilme Problemlerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [8] Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U. (2008). *AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerinin araştırılması*, *BAÜ FBE Dergisi*, C. 10(2), 3–12,
- [9] Takuda, H., Mori, K., Masachika, T., Yamazaki, E., Watanabe, Y. (2003). Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, s. 242–8 [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00348-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00348-0)
- [10] Koçar, O. (2014). *Derin Çekme İşleminde Ürün Kalitesinin Tahmini ve Kontrolü*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [11] Özek, C., Bal, M. (2013). Derin Çekme Kalıplarında Matris-Zımba Radyüsü Ve Çekme Oranının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, C. 24(1), 0, <https://doi.org/10.17341/gummfd.70500>
- [12] Özek, C., Ünal, E. (2012). Kare Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp/Baskı Plakası Açısının Limit Çekme Oranı Ve Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, C. 27(3), 615–22, <https://doi.org/10.17341/gummfd.11097>
- [13] Özek, C., Taşdemir, V. (2017). AA 5754-O alaşımının ilik derin çekilmesi üzerine kalıp yüzey açısı ve baskı plakası kuvvetinin etkisinin deneysel araştırılması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, C. 32(1), 193–201, <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.300608>
- [14] Gülen, M. (2019). *Derin Çekmede Geri Yaylanmanın Etkisinin Sonlu Elemanlar Metodu İle İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [15] Ünal, E. (2011). *Kare Kesitli Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi Ve Radyüsünün Çekme Oranına Etkisinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] Gavas, M., Izciler, M. (2007). Effect of blank holder gap on deep drawing of square cups, *Materials and Design*, C. 28(5), 1641–6, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.03.024>
- [17] Hassan, M., Hezam, L., El-Sebaie, M., Purbolaksono, J. (2014). Deep drawing characteristics of square cups through conical dies, *Procedia Engineering*, Elsevier B.V. C. 81(October), 873–80, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.091>
- [18] Khairnar, Y.S., Deshmukh, D., Dhembre, K., Sawant, G., Bhosale, A. (2018). Review on

- Optimization of process parameter in square shaped components in deep drawing process ., *Journal of Mechanical and Civil Engineering(IOSR-JMCE)*, C. , 30–4,
- [19] Venkateshwar Reddy, P., Ramesha, J., Rao, P.S., Janaki Ramulu, P. (2018). Experimental and numerical analysis on deep drawing rectangular cups made of different anisotropic materials, *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd. C. 5(13), 27171–7, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.09.028>
- [20] Sener, B., Kurtaran, H. (2016). Modeling the deep drawing of an AISI 304 stainless-steel rectangular cup using the finite-element method and an experimental validation, *Materiali in Tehnologije*, C. 50(6), 961–5, <https://doi.org/10.17222/mit.2015.278>
- [21] Özek, C., Ünal, E. (2017). A study on the wall thickness in the angular deep drawing process, *Materialpruefung/Materials Testing*, C. 59(2), 178–82, <https://doi.org/10.3139/120.110980>
- [22] Shafiee, S.A., Domitner, J., Öksüz, K.I., Hodžić, E., Torres, H., Rodríguez Ripoll, M., Sommitsch, C. (2021). Tribological investigations on aluminum alloys at different contact conditions for simulation of deep drawing processes, *Journal of Manufacturing Processes*, C. 68(June), 546–57, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.050>
- [23] Takalkar, A.S., Mailan Chinnapandi, L.B. (2019). Deep drawing process at the elevated temperature: A critical review and future research directions, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, CIRP. C. 27, 56–67, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.08.002>
- [24] Choudhari, C.S., Khasbage, S.S. (2020). Experimental investigation of forming parameters for square cup deep drawing process, *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd. C. 44, 4261–7, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.543>
- [25] Rivas-Menchi, A., Medellín-Castillo, H.I., de Lange, D.F., García-Zugasti, P. de J. (2018). Performance evaluation of analytical expressions for cylindrical and rectangular deep drawing force estimation, *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier. C. 36(November), 340–50, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.10.033>
- [26] Mahmood, Z.H., Irthia, I.K., Ahmed, A.K. (2020). Optimization of initial blank shape for flexible micro deep drawing of square parts, *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd. C. 20, 555–9, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.188>
- [27] Dwivedi, R., Agnihotri, G. (2017). Study of Deep Drawing Process Parameters, *Materials Today: Proceedings*, C. 4(2), 820–6, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.091>
- [28] Choubey, A.K., Agnihotri, G., Sasikumar, C., Singh, M. (2017). Analysis of Die Angle in Deep Drawing Process Using FEM, *Materials Today: Proceedings*, C. 4(2), 2511–5, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.104>
- [29] Gharehchahi, H., Kazemzadeh-Parsi, M.J., Afsari, A., Mohammadi, M. (2021). Optimum blank shape design in deep drawing process using a new boundary updating formula, *International Journal of Material Forming*, International Journal of Material Forming. C. 14(6), 1375–89, <https://doi.org/10.1007/s12289-021-01627-7>
- [30] Ballıkaya, H. (2017). *Matris Açılı Derin Çekme Kalıplama Yönteminin Hidro-Mekanik Derin Çekme Yöntemine Uygulanması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [31] Dudhat, P., Bagasariya, S., Khun, A., Koladiya, A., Hirpara, J. (2017). Study of Deep Drawing Process – A Review, *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, C. 3(08), 103–6,
- [32] Patil, P.N., Inamdar, K.H. (2018). A Review on Deep Drawing of Rectangular Shaped Parts, *Asian Journal of Convergence in Technology(AJCT)*, C. 2(3), 1–3,
- [33] Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., Alves, J.L., Menezes, L.F. (2007). Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel, *Finite Elements in Analysis and Design*, C. 43(14), 1062–7, <https://doi.org/10.1016/j.finel.2007.06.011>
- [34] Lal, R.K., Choubey, V.K., Dwivedi, J.P., Kumar, S. (2018). Study of factors affecting Springback in Sheet Metal Forming and Deep Drawing Process, *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd. C. 5(2), 4353–8, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.002>

- [35] Totik, Y. Talaşsız Üretim Yöntemleri, Atatürk Üniversitesi Ders Notları.
- [36] Çelik, S. (2020). *Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinde Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [37] Özek, C., Bal, M. (2009). The effect of die/blank holder and punch radiuses on limit drawing ratio in angular deep-drawing dies, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, C. 40(11–12), 1077–83, <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1435-3>
- [38] Yalçın, C. (2021). *Derin Çekmede İş Malzemesi ve Proses Parametrelerinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [39] Feng, Y., Hong, Z., Gao, Y., Lu, R., Wang, Y., Tan, J. (2019). Optimization of variable blank holder force in deep drawing based on support vector regression model and trust region, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. C. 105(10), 4265–78, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04477-5>
- [40] Akın, B. (2021). *Açılı Derin Çekme Kalıplarında Çekme Parametrelerinin Bulanık Mantık İle Modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi.
- [41] Hosseini, A., Kadkhodayan, M. (2014). A hybrid NN-FE approach to adjust blank holder gap over punch stroke in deep drawing process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, C. 71(1–4), 337–55, <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5479-7>
- [42] Blala, H., Lang, L., Li, L., Sherkatghanad, E., Alexandrov, S. (2020). Investigation on the effect of blank holder gap in the hydroforming of cylindrical cups, made of fiber metal laminate, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. C. 108(9–10), 2727–40, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05467-8>
- [43] Ballıkaya, H., Savas, V., Ozay, C. (2020). The limit drawing ratio in die angled hydromechanical deep drawing method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. C. 106(1–2), 791–801, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04624-y>
- [44] Taşdemir, V. (2016). *Açılı Derin Çekme Kalıplarında Sıcaklığın Limit Çekme Oranına Etkisinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [45] Megep. (2006). Çekme Kalıpları 1, Ankara.
- [46] Aytaç, F. (2007). *Matris Açılı Derin Çekme Kalıplarında Alüminyum Derin Çekilmesinde Açılı Değişiminin Çekme Oranı Üzerine Etkisinin Deneysel Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [47] Özek, C., Ünal, E. (2011). Optimization and modeling of angular deep drawing process for square cups, *Materials and Manufacturing Processes*, C. 26(9), 1117–25, <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.532526>
- [48] Yıldız, B. (2017). *Derin Çekme İşleminde Kalıp Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [49] Özek, C. Plastik Şekil Değiştirme Teknolojisi, Fırat Üniversitesi, Ders Notları.
- [50] Tunç, O. (2021). *Dkp ve Hrp Sacların Prizmatik Derin Çekme İşleminde Biçimlendirilebilirlik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [51] Özdiilli, Ö. (2018). *Polimer Kaplı Metal Sacların Derin Çekme Davranışının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [52] Çetin, M.H. (2015). *Ilık Derin Çekme Prosesi İçin Şekillendirme Sıcaklıklarının Belirlenmesi ve Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [53] Mısırlı, M.B. (2021). *Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Sade Karbonlu Çeliklerde Üretilen Gövde İç Panellerinin Derin Çekme Proses Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi.
- [54] Wifi, A.S., Abdelmaguid, T.F., El-Ghandour, A.I. (2007). A review of the optimization techniques applied to the Deep Drawing process, *37th International Conference on Computers and Industrial*

Engineering 2007, C. 1, 97–107,

- [55] Swapna, D., Rao, C.S., Radhika, S. (2018). A Review on Deep Drawing Process, *International Journal of Emerging Research in Management and Technology*, C. 6(6), 146, <https://doi.org/10.23956/ijermt.v6i6.260>
- [56] Zaid, A.I.O. (2017). Effect of Different Lubricants on Deep Drawing of Galvanized Steel, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, C. 8(1), 1584–9,
- [57] Gowtham, K., Srikanth, K.V.N.S., Murty, K.L.N. (2012). Simulation of the Effect of Die Radius on Deep Drawing Process, *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*, C. (1), 237–42, <https://doi.org/10.47893/ijarme.2012.1043>
- [58] Tiwari, P.R., Rathore, A., Bodkhe, M.G. (2022). Factors affecting the deep drawing process – A review, *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd. C. 56, 2902–8, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.189>
- [59] Reddy, P.V., Ramulu, P.J., Madhuri, G.S., Govardhan, D., Prasad, P.V.S.R. (2016). Design and Analysis of Deep Drawing Process on angular Deep Drawing Dies for Different Anisotropic Materials, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, C. 149(1)<https://doi.org/10.1088/1757-899X/149/1/012142>