

**KÜRESEL KESİTLİ KAPLARIN DERİN ÇEKİLMESİNDE
KALIP GEOMETRİSİNİN ÇEKME ORANINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Veysel ÖZBAY

Yüksek Lisans Tezi

**Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Talaşlı Üretim Bilim Dalı**

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cebeli ÖZEK

OCAK-2012

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

**KÜRESEL KESİTLİ KAPLARIN DERİN ÇEKİLMESİNDE KALIP
GEOMETRİSİNİN ÇEKME ORANINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Veysel ÖZBAY

(091119103)

Anabilim Dalı: Makine Eğitimi

Programı: Talaşlı Üretim

ELAZIĞ-2012

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

**KÜRESEL KESİTLİ KAPLARIN DERİN ÇEKİLMESİNDE KALIP
GEOMETRİSİNİN ÇEKME ORANINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Veysel ÖZBAY

(091119103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23.12.2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 17.01.2012

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Cebeli ÖZEK (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeler : Prof. Dr. Niyazi ÖZDEMİR

Doç. Dr. Vedat SAVAŞ

OCAK-2012

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesinde bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım danışman hocam Sayın öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Cebeli ÖZEK'e teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Çalışmalarım esnasında her zaman yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın öğretim üyesi Doç. Dr. Vedat SAVAS'a, Sn. Doç. Dr. Ulaş Çaydaş'a, Sn. Arş. Gör. Dr. Engin ÜNAL' a, Sn. Yrd. Doç. Dr. Faruk KARACA ve değerli arkadaşlarım Dr. Tanju TEKER'e, Hasan BALLIKAYA ve Sedat KAFDAĞLI'ya teşekkür ederim.

Tüm yaşantım boyunca bana verdikleri emeklerinin karşılığını asla ödeyemeyeceğim değerli anne ve babama ve ayrıca, çalışmalarım boyunca ihmal ettiğim çocuklarım Ertuğrul ve İkbal'e sevgi ve saygılarımı sunarım.

Veysel ÖZBAY
Elazığ, 2012

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. GENEL BİLGİLER	11
3.1. PLASTİK DEFORMASYON	11
3.2. İLKEL PARÇA BOYUTLARININ BELİRLENMESİ	19
3.3. LİMİT ÇEKME ORANI.....	20
3.3.1 SİLİNDİRİK PARÇALAR İÇİN DERİN ÇEKME ADIMLARI.....	21
3.3.2 DİKDÖRTGEN PARÇALAR İÇİN DERİN ÇEKME ADIMLARI.....	22
3.4. ÇEKME KUVVETİ	25
3.5. BASKI PLAKASI KUVVETİ (BPK).....	23
3.6. KALIP KENAR RADYÜSÜ VE ZIMBA UCU RADYÜSLERİ	24
3.7. ÇEKME HIZI	26
3.8. ÇEKME BOŞLUĞU	26
3.9. DERİN ÇEKMEDE KULLANILAN SACLAR	27
3.10. DERİN ÇEKME İŞEMİNDE GÖRÜLEN HATALAR	28
3.11. SONLU ELEMANLAR METODU	29
3.11.1. İMPLİSİT YÖNTEM	31
3.11.2. EKSPLİSİT YÖNTEM.....	32
3.11.3. İMPLİSİT VE EKSPLİSİT YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI	33
4. MATERYAL VE METOT	34
4.1. ÇALIŞMANIN AMACI.....	34
4.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41

4.3.	ANALİZ ÇALIŞMALARI.....	40
5.	DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	43
5.1.	MATRİS/BASKI PLAKASI AÇISININ ÇEKME ORANI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	45
5.2.	BASKI PLAKASI KUVVETİNİN (BPK) ÇEKME ORANI (B) ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	52
5.3.	DERİN ÇEKME PARAMETRELERİNİN ET KALINLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	63
5.3.1.	MATRİS/BASKI PLAKASI AÇISININ ET KALINLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	67
5.3.2.	BASKI PLAKASI KUVVETİNİN ET KALINLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	67
5.4.	İLKE PARÇA ÇAPININ KAP HASARLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	68
5.5.	ZIMBA KURS MESAFESİNİN GERİLMEME ETKİSİ.....	69
6.	GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	73
6.1.	GENEL SONUÇLAR.....	73
6.2.	ÖNERİLER	74
	KAYNAKLAR	75
	ÖZGEÇMİŞ	80

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi
KÜRESEL KESİTLİ KAPLARIN DERİN ÇEKİLMESİNDE KALIP
GEOMETRİSİNİN ÇEKME ORANI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Veysel ÖZBAY

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cebeli ÖZEK

Yıl: 2012, Sayfa: 91

Bu çalışmada, sanayide oldukça yaygın kullanım alanı olan dekape sacının açılı derin çekme kalıplarında şekillendirilebilirliği deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmada, mevcut literatürden farklı olarak, küresel geometriye sahip bir zımba kullanılmıştır. Çekme ve plastik şekil verme işlemlerini kolaylaştırmak amacıyla dişi kalıp ve malzemeye akma anında baskı yaparak kılavuzluk eden plakalara karşılıklı olarak 0° , $-2,5^\circ$, -5° , $-7,5^\circ$, -10° , $-12,5^\circ$, -15° ’lar verilmiştir. Çekme anında, eğilme gerilmelerinin yoğunlaşmalarını engellemek amacıyla dişi kalıbın kenarları 6 mm yarıçapında işlenmiştir. Baskı plakasının sac malzemeye uyguladığı kuvvetler, 2450N, 4900N, 7350N ve 9800N olarak seçilmiştir. Açı ve kuvvet parametrelerinin seviyelerine bağlı olarak, tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır.

Derin çekme işlemi esnasında zımbanın malzemeye uyguladığı kuvvetler, zamana bağlı olarak bir yük hücresi yardımıyla ölçülmüştür. Elde edilen kapların limit çekme oranları ve et kalınlıklarındaki değişimler belirlenmiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen veriler, bilgisayar ortamında ANSYS paket programı yardımıyla analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, bilgisayar analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçların birbirlerine yakın oldukları tespit edilmiştir. Sonuç olarak, matris düzlüklerine açı verilmesi ile elde edilen limit çekme oranı değerlerinin, geleneksel kalıplardan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Açı verilmeyen kalıplarda en yüksek limit çekme oranı değeri 1,98 iken, matris açısının 15° olması durumunda bu değer 2,42 olarak ölçülmüştür. Böylece açılı kalıplar kullanıldığında, limit çekme oranının yaklaşık olarak %20 kadar arttırılabileceği görülmüştür. Benzer şekilde, numunelerin et kalınlık değerlerinin de matris açısının artmasıyla artma eğiliminde oldukları belirlenmiştir. 0° ’de 0.7 mm olan et kalınlığı değeri, 15° ’de 0.84 mm olarak ölçülmüştür.

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

SUMMARY
MSc Thesis
THE EFFECTS OF DIE GEOMETRY ON THE LIMIT DRAWING RATIO IN
DEEP DRAWING PROCESS OF SPHERICAL CUPS

Veysel ÖZBAY

Firat University

Institute of Science

Department of Mechanical Education

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Cebeli ÖZEK

Year: 2012, Page: 91

In this study, the formability of dekafe sheet metals which has very wide usage areas in the industry was investigated experimentally and numerically. Spherical punch geometry was used different from the novel literature. In order to make easy the plastic deformation process, the die and impression plates were machined with 0° , $2,5^\circ$, 5° , $7,5^\circ$, 10° , $12,5^\circ$, 15° angle values. Die edges were also filleted in 6 mm radius to avoid the bending stress concentration. The impression forces were selected as 2450 N, 4900 N, 7350 N and 9800 N, respectively. According to force and angles' factor levels, a full factorial experimental design method was used.

The punch forces during deep drawing process were measured with a load cell based on the time. The limit drawing ratio and wall thickness of the cups were determined. The experimental gathered data was analyzed with the help of ANSYS computer package programme. The experimental results were compared with computer analysis results and a good agreement between them was observed. As a consequence, the limit drawing ratio values observed with angular dies were higher than the non – angular dies. The highest limit drawing ratios were measured as 1.98 and 2.42 for 0° and 15° angle values, respectively. Thus, it is concluded that it is possible to enhance the limit drawing ratio as 20% by using angular dies. Similarly, it was seen that the wall thickness values of samples were tendency of increase with angle values, too. The wall thickness values were measured as 0.7 and 0.84 for 0 and 15 degree values, respectively.

Key Words: Spherical Cups, Angular Deep Drawing, Limit Drawing Ratio, Finite Element Method

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Temel şekil değişimi [44]; a) Basma, b) Çekme, c) Kayma.....	11
Şekil 3.2. Derin çekme işlemi, a. Şematik, b. Perspektif.....	17
Şekil 3.3. Derin çekmenin mekaniği.....	18
Şekil 3.4. Derin çekme esnasında parçada boylamsal kısımlarda meydana gelen gerilmeler.....	19
Şekil 3.5. Dikdörtgen veya kare kapların köşe gerilme analizi	19
Şekil 3.6. Alan metodu ile ilkel çapın bulunması.....	20
Şekil 3.7. Zımba ucu ve kalıp radyüsü.....	24
Şekil 3.8. Derin çekme işleminde görülen çekme hataları.....	29
Şekil 3.9. Bir problemin sonlu elemanlar modeli.....	30
Şekil 3.10. Eksplisit yöntem kullanılan dinamik durumlar.....	31
Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan kalıp geometrileri.....	36
Şekil 4.2. Fanuc O-T CNC torna tezgahında imal edilen Matris/baskı plakası ve zımba.....	36
Şekil 4.3. Kalıp imalatı yapılan Fanuc O-T CNC torna tezgahı.....	37
Şekil 4.4. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçüldüğü Mitutoyo SJ-210 model ölçüm cihazı.....	38
Şekil 4.5. Deneysel çalışmaların yapıldığı pres tezgâhı ve kalıp seti.....	40
Şekil 4.6. Matris ve zımbaya ait ağ yapıları.....	41
Şekil 4.7. Baskı plakası ve sac malzemeye ait ağ yapılar.....	42
Şekil 4.8. Kalıp elemanlarının oluşturulması.....	43
Şekil 4.9. Kalıp elemanlarının parametrelerinin belirlenmesi.....	43
Şekil 5.1. Derin çekme işleminde meydana gelen gerilmeler.....	44
Şekil 5.2. Derin çekmede zımba kuvveti- kurs mesafesi ilişkisi.....	45
Şekil 5.3. Kalıp açısının kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a: Deneysel, b: Sayısal, c: BPK: 2450.....	46
Şekil 5.4. Zımba kurs mesafesinin zımba kuvvetine etkisi (BPK:2450 N).....	46
Şekil 5.5. Kalıp açısının kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a: Deneysel, b: Sayısal; BPK: 4900N).....	47
Şekil 5.6. Zımba kurs mesafesinin zımba kuvvetine etkisi (BPK:4900 N).....	48
Şekil 5.7. Kalıp açısının kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneysel, b:Sayısal; BPK:7350N).....	49
Şekil 5.8. Zımba kurs mesafesinin zımba kuvvetine etkisi(BPK:7350 N).....	49
Şekil 5.9. Kalıp açısının kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneysel, b:Sayısal; BPK:9800N).....	50
Şekil 5.10. Zımba kurs mesafesinin zımba kuvvetine etkisi (BPK:9800 N).....	51
Şekil 5.11. Matris/Baskı plakası açısının limit çekme oranı (β) üzerine etkisi.....	52
Şekil 5.12. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a: Deneysel, b:Sayısal: $\alpha=0^\circ$).....	53
Şekil 5.13. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımbakuvvetleri ($\alpha=0^\circ$).....	53
Şekil 5.14. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneysel, b:Sayısal: $\alpha=2,5^\circ$).....	54

Şekil 5.16. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneysel, b:Sayısal: $\alpha=5^\circ$).....	55
Şekil 5.17. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=5^\circ$).....	56
Şekil 5.18. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneysel, b:Sayısal: $\alpha=7,5^\circ$).....	57
Şekil 5.19. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=7,5^\circ$).....	58
Şekil 5.20. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneysel, b:Sayısal: $\alpha=10^\circ$).....	59
Şekil 5.21. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=10^\circ$).....	59
Şekil 5.22. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneysel, b:Sayısal: $\alpha=12,5^\circ$).....	60
Şekil 5.23. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=12,5^\circ$).....	60
Şekil 5.24. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneysel, b:Sayısal: $\alpha=15^\circ$).....	61
Şekil 5.25.Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=15^\circ$).....	62
Şekil 5.26. Baskı plakası kuvvetlerinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi.....	62
Şekil 5.27. Etkalnlığı ölçümü için hazırlanan numune.....	63
Şekil 5.28. Et kalınlığının ölçülmesi.....	64
Şekil 5.29. α açısı değişiminin et kalınlığı üzerindeki etkisi.....	65
Şekil 5.30. Matris baskı plakası açısının et kalınlığı üzerindeki bilgisayar analizi sonucu ($\beta=2,30$ ve BPK=4900 N).....	66
Şekil 5.31. Baskı plaka kuvvetinin (BPK) et kalınlığı üzerindeki etkisi.....	67
Şekil 5.32. Matris baskı plakası kuvvetinin et kalınlığı üzerindeki bilgisayar analizi sonucu ($\beta=2,30$ ve $\alpha=15^\circ$).....	68
Şekil 5.33.Farklı ilkel parça çaplarında çekilen numunelerde meydana gelen değişik yırtılma ve çatlak hasarları.....	69
Şekil 5.34. Farklı ilkel parça çaplarında çekilen numunelerin kulaklanmış kısımlarının traşlandıktan sonraki görünümü.....	69

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Çeşitli metallerin kristal yapısı.....	13
Tablo 3.2. Zımba çapı ve sac kalınlığına bağlı olarak ortalama β_0 değerleri.....	21
Tablo 3.3. Kalıp radyüsü için önerilen değerler.....	25
Tablo 3.4. Silindirik çekmelerde malzemelerin cinsine göre çekme hızları	26
Tablo4.1. DINEN 10130-1999 Çelik Sacının Kimyasal Analizi.....	25
Tablo 4.2. Deney numunesinin mekanik özellikleri.....	25
Tablo 4.3. İlkel parça çaplarına karşılık gelen limit çekme oranları.....	25
Tablo 4.4. Matris, zımba ve baskı plakası yüzey pürüzlülük değerleri.....	37
Tablo 4.5. Derin çekme parametreleri.....	39
Tablo 4.6. Analizde kullanılan sac malzeme özellikleri.....	41
Tablo 5.1. Zımba kurs mesafesine bağlı olarak sayısal analiz metodu ile elde edilen numunelerde meydana gelen gerilmelerin değişimi.....	70

1. GİRİŞ

Sac metal kalıpcılığı tekniği, parçaların kesilerek veya bükülerek biçimlendirilmesi esasına dayanan bir imal usulüdür. Bu imal usulleri içerisinde, derin çekme kalıpları, içi boş, dikişsiz kap ve farklı geometrilere sahip kutuların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, levha halindeki malzemeler, zımba denilen itici kalıp elamanı ile kalıp boşluğuna belirli bir kuvvet ve hızda itilmektedir. Bu işlem sonucunda, belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçalar elde edilmektedir. Bir sacın bir defada kopmadan, yırtılmadan ve hasara uğramadan çekilebilmesi için ilkel parçanın sahip olması gereken en büyük çapın, zımba çapına oranına limit çekme oranı denir. Sabit baskı plakası kuvveti ve kalıp geometrisi şartlarında, ilkel parça çapında meydana gelen bir değişiklik, limit çekme oranını belirlemektedir. Bu oranın en yüksek olabilmesi için ilkel parça çapı deneme yanılma veya ön deneyler yardımıyla belirlenmektedir. Çekme işlemi ile elde edilmesi öngörülen derin kaplar, birden fazla operasyonluda oluşturabilirler.

Bu yöntemde, şekillendirilen parçaların kalitesi, kalıp boşluğu içerisine itilen malzeme miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Malzeme miktarının fazla ya da az olması durumlarında, elde edilen üründe buruşukluk veya çatlaklar oluşabilmektedir. Dolayısıyla, kalıp içine itilen malzemenin miktarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu kontrol, baskı plakası denilen kalıp elemanının ilkel parça yüzeyine belirli bir kuvvet ile baskı yapmasıyla sağlanmaktadır. Bu yüzden baskı plakası kuvveti, malzemenin kalıp içerisine daha düzenli bir şekilde akmasını sağlayan önemli bir parametredir. Baskı kuvvetinin yanı sıra, zımba ve matris radyüsleri, zımba kuvveti, çekilecek malzemenin ilkel şekli ve hadde yönü gibi faktörler işlemin verimliliğini önemli derecede etkilemektedir.

Derin çekme işleminde kullanılacak malzemenin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi gibi bazı teknik değerlerinin bilinmesi, üretim esnasında ürün tasarrufu açısından üreticiye kolaylık sağlamaktadır.

Üretici; çekilecek malzeme cinsine göre yeterli mukavemete sahip kalıp elemanlarının seçimi, bu elemanların sahip olması gereken ısı işlem şartlarının belirlenmesi ve uygun yüzey pürüzlülük değerlerinde işlenmesini sağlamalıdır. Çekme işlemini etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi de, malzemenin matris içerisine akışının kontrol edilmesini sağlamaktır. Bunu sağlayabilmek için, günümüzde matris ve zımba geometrilerinin farklı açılarda işlenmesi, çeşitli araştırmalara konu olmaktadır.

Bu çalışmada, sanayide oldukça yaygın kullanım alanı olan DIN EN 10130-1999 sac malzemenin derin çekme yöntemi ile şekillendirilebilirliği deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneylerde, baskı plakası kuvveti ve matris/baskı plakası açıları belirli sınırlar içerisinde değiştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen ürünlerin (kapların) limit çekme oranları ve et kalınlıkları belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca çekme anında, zımba kuvvetleri de zamana bağlı olarak llmştr. Sonuç olarak, tam küresel kapların derin çekilmesi işleminde, kalıp düzlüklerine aı vermek suretiyle malzemenin kalıp içerisine akışı kontrol edilmiş ve böylece geleneksel kalıplara nazaran daha yüksek ve hasarsız kapların elde edilebileceği görülmüştür. Deneysel sonuçlardan elde edilen veriler, bilgisayar ortamında ANSYS paket programı yardımıyla analiz edilmiş ve sonuçların benzer eğilim gösterdiği tespit edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

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

Savaş ve Seçkin [1], baskı plakası ile kalıp arasına 0° , $2,5^\circ$, 5° , 10° ve 15° olmak üzere beş farklı açı vermek suretiyle, silindirik kapların çekme oranlarının artırılması, dolayısıyla derin çekmedeki işlem sayısının azaltılarak maliyetin düşürülmesini hedeflemişlerdir. 0° açı değerinde 1,75 olarak tespit edilen limit çekme oranı, 15° açı değerinde 2,175' olarak ölçülmüştür.

Özek ve Bal [2], dairesel kesitli kapların derin çekilmesinde, matris ve zımbaya farklı radyüsler, matris/baskı plakasına ise farklı açı değerleri vererek radyüs ve açının limit çekme oranı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada 1 mm kalınlığında St37 sac malzeme kullanılmış, artan matris/zimba radyüsü ve matris/baskı plakası açı değerlerine bağlı olarak limit çekme oranının da arttığı belirlenmiştir.

Özek ve Ünal [3], kare kesitli kapların derin çekilmesinde, kalıp geometrisi ve radyüsünün limit çekme oranına etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, matris/baskı plakası yüzeylerine verilen açının artmasıyla, malzemenin kalıp içerisine akışının kolaylaştığı ve limit çekme oranının da arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, artan açı değerlerinin radyal kuvvetleri azalttığı ve buna bağlı olarak çekme işlemi sırasında ölçülen maksimum zimba kuvvetinin de azaldığı gözlemlenmiştir.

Lin vd. [4], basınçlı hidro mekanik derin çekme kalıbı için farklı bir zimba tasarlayarak, harici bir basınç kaynağına ihtiyaç duyulmadan kalıplama basıncının bir avantaj olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Herrera vd. [5], orta karbonlu SAE 1050 çeliğinin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla soğuk haddeme ve ısıtma işlemleri uygulamışlardır. Haddeme sonucunda malzemede meydana gelen uzamanın %2'den az olduğu ve çekme gerilmesinin 1400 MPa olarak ölçüldüğü, optik ve mekanik incelemeler neticesinde soğuk haddemenin derin çekme işleminde daha az bir etkisinin olduğunu, ancak ısıtma işleminin daha etkili sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir.

Van den Bosch vd. [6], polimer kaplı metal levhaların derin çekme işlemi esnasında tabaka kalınlığını önceden hesaplamak için sayısal bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada metal polimer ara yüzeyinin özelliğini kaybetmeden ne kadar bir kalınlığa erişebileceğini ve bunun kalıplama radyüsü, matris/zımba arasındaki düzleme etkisini araştırmışlardır. Kaplama kalınlığının artmasıyla elde edilen numunenin yüzey kalitesinin bozulduğunu gözlemlemişlerdir.

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

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

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

Lin ve Kwan [10], yaptıkları çalışmada eliptik bir şeklin kulaklaşma olmadan derin çekilebilirliğini, deneysel ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Teorik yöntemde, limit çekme oranı ve malzeme akış karakteristiklerini incelemişlerdir.

Çalışma neticesinde sonuçlar karşılaştırıldığında deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyumun olduğunu belirlemişlerdir.

Padmanabhan vd. [11], kare kapların derin çekme yöntemi ile şekillendirme işleminde, ilkel parça boyutlarının üretilen parça kalitesi üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada NURBS (Non-uniform rational basis spline) sayısal yöntemini ve simülasyon için de DD3IMP programını kullanarak optimum ilkel parça boyutlarını hesaplamışlardır. Geliştirilen metodun, ilkel parça geometrisini ve meydana gelecek çeşitli deformasyonları rahatlıkla hesaplayabildiğini görmüşlerdir. Bastos ve Simões [12], yüzeyi çinko, fosfat ve organik filmle kaplanmış galvanizli çelik levhalarda derin çekme işlemi sonucu oluşan korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler karşılaştırıldığında, korozyon direncinin kaplı numunelerde daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

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

Hwang vd. [14], kesme, bükme ve derin çekme olmak üzere çok amaçlı bir birleşik kalıp geliştirmişlerdir. Geliştirilen sistem için, plastisite teorisi, deneysel sonuçlar ve uzman deneyimlerinden faydalanarak çeşitli bağıntılar elde edilmiştir. Sistemde ürün geometrisi, numune ve kalıp yerleşimi olmak üzere 3 temel kısım bulunmaktadır. Çalışmada, ilkel parça geometrisi, zımba profilleri, derin çekme, eğme, kesme, malzeme tipi ve ürün kalınlığı gibi faktörler sistem tasarımı için göz önüne alınmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen sistemin tasarım ve üretim alanındaki uygulamalarda verimli bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Le Port vd. [15], saf titanyum malzemesinin derin çekilmesinde kalıplama parametrelerini optimize etmek için sonlu elemanlar modeli kullanmışlardır. deneysel ve sonlu eleman modeli ile Kalıp boşluğuna akan malzemenin et kalınlığının ve kalıp - sac malzeme arasındaki sürtünme katsayısının önemli bir etkiye sahip olduğu belirlemiştir.

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

oluşan oksit parçalarını elektrolitik yöntemle kaldırarak derin çekme işleminin daha verimli hale geldiğini göstermişlerdir.

Vollertsen vd. [17], mekanik yöntemlerden farklı olarak darbeli lazer yöntemi kullanarak mikro derin çekme deneyleri yapmışlardır. Bu yöntemde çekilecek plaka üzerine bir plazma şok dalgası göndererek çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 20 ve 50 μm kalınlıklarında saf titanyum, bakır ve paslanmaz çelik plakalar kullanılmıştır. Yöntemde ayrıca enerji yoğunluğunu arttırmaksızın, bir noktaya çok sayıda darbelerin gönderilmesi ile yüksek çekme miktarlarına ulaşılmıştır. Yüzeye gönderilen şok dalgasının basıncı ölçülmüş ve optimize edilmiştir. Sonuç olarak, darbeli lazer yöntemi ile plakaların tek adımla şekillendirilebileceğini tespit etmişlerdir.

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

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

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

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

Mizuno ve Li [22], analitik hesaplama, deneysel analiz ve sonlu elemanlar analizi yöntemlerini kullanarak dikdörtgen kesitli kapların derin çekilmesi işleminde meydana

gelen gerilmeleri tespit ederek sonuçları karşılaştırmışlardır. Her üç yöntemde de basınç dağılımının etkili olduğu görülmüş, kalıplamadaki bazı özel noktalarda yöntemlerin birbirlerinden farklı sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Kalıp radyüsü ve baskı plakası kuvvetinin belirlenmesinde sonlu elemanlar yönteminden ziyade üçlü analiz yönteminin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

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

Zhang vd. [24], hidro mekanik derin çekme yönteminde, sonlu elemanlarla elde edilen şekillendirme–limit çekme diyagramı ile tane kenarlarındaki çatlakların etkisini incelemişlerdir.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Bu çalışmada, mevcut çalışmalardan farklı olarak küresel kesitli bir zımba kullanılmıştır. Matris/ baskı plakası yüzeylerine 0°- 2,5°- 5°-7,5°- 10°- 12,5°- 15°'lik açılar verilerek malzemenin kalıp boşluğuna içerisine akışının daha kolay hale gelmesi sağlanmıştır. Ayrıca malzeme akışı ve kalıp içerisindeki şekillendirme işleminin kontrolünü sağlamak için baskı plakasına 2450 N, 4900 N, 7350 N ve 9800 N'luk kuvvetler uygulanmıştır. Böylece limit çekme oranı 1,98 den 2,42'ye ve et kalınlığının ise, 0,7 mm'den 0,84 mm'ye yükseltilmeleri sağlanmıştır.

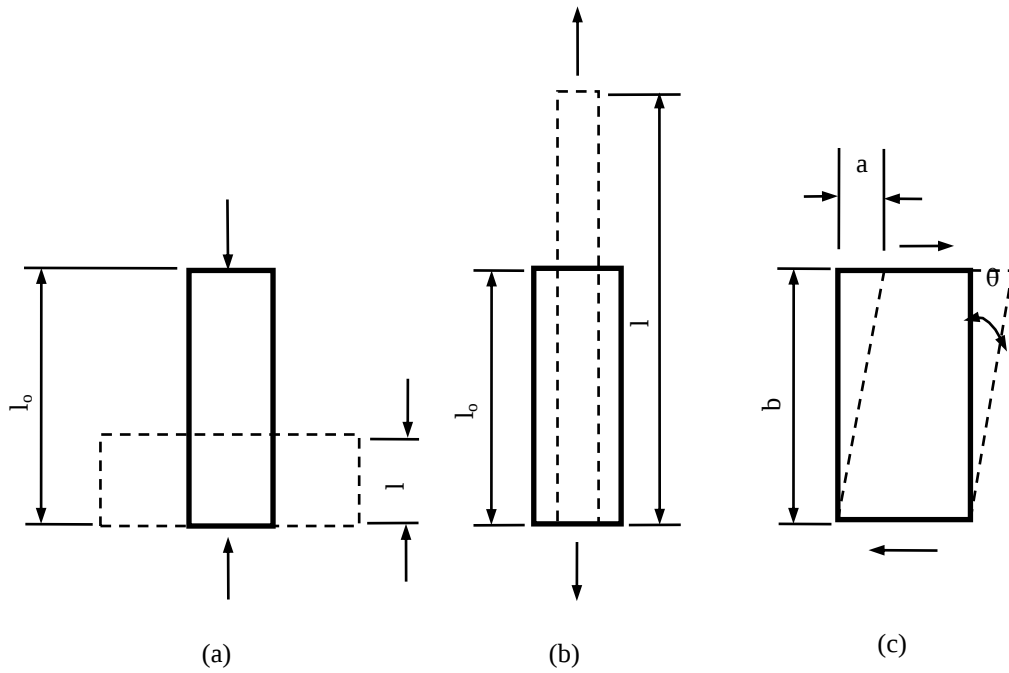
Çalışmada ayrıca sonlu elemanlar yöntemi de kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın, kalıpçılık sektöründeki uygulamaların yanı sıra akademik çalışmalara da katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Plastik Deformasyon

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

Karbonlu ve alaşımlı çelik, alüminyum, çinko, bakır ve bunların alaşımları gibi bir çok metalik malzeme plastik şekil verme yöntemleri ile işlenebilmektedir [44]. Tüm plastik şekil verme işlemlerinde malzeme, çekme, basma ve kayma gibi üç temel şekil değişiminden birinin veya birkaçının etkisinde kalır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Temel plastik şekil değişimi mekanizmaları; a) Basma, b) Çekme, c) Kayma [44].

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

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

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

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

şeklinde ifade edilir [44].

Kristal yapıdaki malzemelerde en önemli deformasyon mekanizması olan kayma, kayma gerilmesi etkisiyle atom düzlemlerinden birinin diğer komşu atom düzlemlerinin herhangi biri üzerinde hareket etmesi ile gerçekleşir. Plastik deformasyona en büyük kayma gerilmesi (τ_{max}); teorik olarak

$$\tau_{max} = G \cdot \gamma \quad \text{şeklin de ifade edilir.} \quad (3.3)$$

Burada, G , kristalin kayma modülü' dür. Teorik olarak çekme mukavemeti (σ_{max}) ise;

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

alınabilir.

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

Kristal yapıli malzemelerde kayma, atom yoğunluğunun en fazla olduğu düzlemlerde (kayma düzlemi) ve kayma düzlemi üzerinde atomların en sık bulundukları doğrultularda (kayma yönü) dislokasyonların hareketi ile gerçekleşmektedir [45].

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

$$\tau_r = \sigma \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3.5)$$

eşitliğı ile bulunabilir. Burada, σ kristale uygulanan normal gerilme ve θ kayma açısıdır.

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

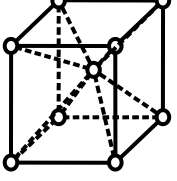
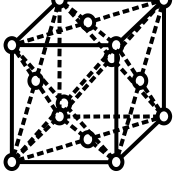
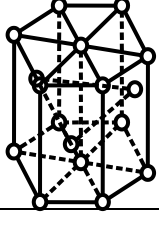
Hook kanunu olarak ifade edilir.

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

Metallerin tek kristallerinde plastik şekil değişiminde, $\tau_r > \tau_{kr}$ olmak şartıyla ve denklem 3.5'e göre, en büyük τ_{rmax} kayma gerilmesi bileşeninin olduğu kayma sisteminde gerçekleşir. Ancak; kristal şekil değiştirdiğinde deformasyon sertleşmesi nedeniyle, mukavemet artar ve daha fazla şekil değişimi için, uygulanan gerilmeyi artırmak gerekir [45].

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

Tablo 3.1. Çeşitli metallerin kristal yapısı [45].

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

Bir kristalde kritik kayma gerilmesini artırıcı yönde etkide bulunan faktörler, mukavemetin artmasına sebep olurlar. Metallerde artık gerilme miktarı, alaşım elementlerinin miktarı ve kristal yapı hatalarının (özellikle dislokasyonlar) yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Buna bağlı olarak kayma gerilmesi de artmaktadır. Sıcaklık ve deformasyon hızı gibi deformasyon parametreleri de kritik kayma gerilmesini etkilemektedir. Genelde deformasyon sıcaklığının azalması ve deformasyon hızının artmasıyla kritik kayma gerilmesi artmaktadır. Metalik malzemelerin plastik deformasyon kabiliyeti, kimyasal bileşim ve metalürjik yapı tarafından kontrol edilen mekanik özelliklerin yanı sıra deformasyon koşullarına da bağlıdır [45].

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

Klasik sınıflandırmada, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı (T_{yk}) ile deformasyon sıcaklığı kıyaslanır. Metalik malzemelerin yeniden kristalleşme sıcaklığı yaklaşık olarak mutlak ergime sıcaklığının 0.4 katıdır. $T > T_{yk}$ ise sıcak işlem, $T < T_{yk}$ ise soğuk işlem olarak tanımlanır.

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

$T/T_m > 0,5$ ise sıcak işlem,

$0,5 > T/T_m > 0,3$ ise ılık işlem,

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

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

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

şeklindeki Holloman eşitliği ile ifade edilmektedir [45].

Burada;

σ_g : Gerçek gerilme (N/mm²),

K : Mukavemet katsayısı (N/mm²),

ε : Gerçek birim şekil değiştirme,

n : Deformasyon sertleşmesi üssü dür.

Soğuk işlem etkisiyle malzemenin iç yapısı, özellikle tane şekli değişikliğine uğramaktadır. Plastik deformasyon sırasında tanelerin deformasyon yönünde uzaması sonucu malzeme özellikleri yöne bağımlı hale gelir. Metalik malzemelerde bu yönelmeler, kristalografik uzama ve mekanik fiberleşme olmak üzere ikiye ayrılır.

Soğuk şekil verme işlemlerinde, malzeme yapısında iç gerilmeler de oluşmaktadır. Buna karşın, malzemenin işlem gören yüzeylerinin düzgün olması ve istenen boyut toleranslarında ürün elde edilebilmesi ise soğuk işlemin avantajlarıdır. Soğuk işlemin malzeme yapısında oluşturduğu etkilerden kaçınmak, deformasyon sertleşmesi nedeniyle azalan sünekliği artırmak için soğuk işlem sırasında ara tavlamaların yapılması zorunlu

olabilir. Tavlama sonunda, elde edilmek istenen özelliklere göre tavlama sıcaklığı, yeniden kristalleşme sıcaklığının altında veya üstünde seçilebilir.

Sıcak işlemde ise, deformasyon sertleşmesi ve bozulan tane yapısı, deformasyon sırasında oluşan yeniden kristalleşme sonucu yeni tanelerin oluşumu ile giderilerek büyük eksenli taneler haline dönüşür. Sıcak işlem yüksek sıcaklıklarda yapıldığından tavlama işlemi maliyeti artırır ve aynı zamanda malzeme yüzeyinin oksitlenmesine de sebep olur. Bu oksitlenme nedeniyle iyi yüzey elde etmek oldukça güçtür. Boyut toleransları, sıcak işlem görmüş ürünlerde soğuk işlem uygulanmışlara nazaran daha fazladır. Sıcak işlem koşullarında, malzemede deformasyon sertleşmesi olmadığından, deformasyon sabit gerilme altında gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda ($T > 0,5 T_m$) deformasyon hızının etkisi oldukça fazladır. Deformasyon hızının mukavemet üzerindeki etkisi; (3.7)' deki eşitlik ile ifade edilmektedir [45].

Burada,

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

Deformasyon hızının, artmasıyla malzemelerin mukavemeti artarken, sünekliği azalır. HMK metaller diğer kristal yapıları malzemelere göre deformasyon hızına daha duyarlıdır. Birim zamanda malzemeye uygulanan deformasyon miktarını belirten deformasyon hızı, mühendislik deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) ve gerçek deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) olmak üzere iki ayrı sembolle ifade edilmektedir [45].

$$e' = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d\left[\frac{L-L_0}{L_0}\right]}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0} \quad (3.8)$$

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

Burada;

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

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

$$\dot{\epsilon}' = \frac{\dot{\epsilon}}{1+\epsilon} \quad (3. 10)$$

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

$$\sigma = D \cdot \epsilon'^m \cdot \epsilon^n \quad (3. 11)$$

şeklindeki genel bir eşitliğin kullanılması öngörülmüştür [45].

Burada; D : Malzeme sabitidir.

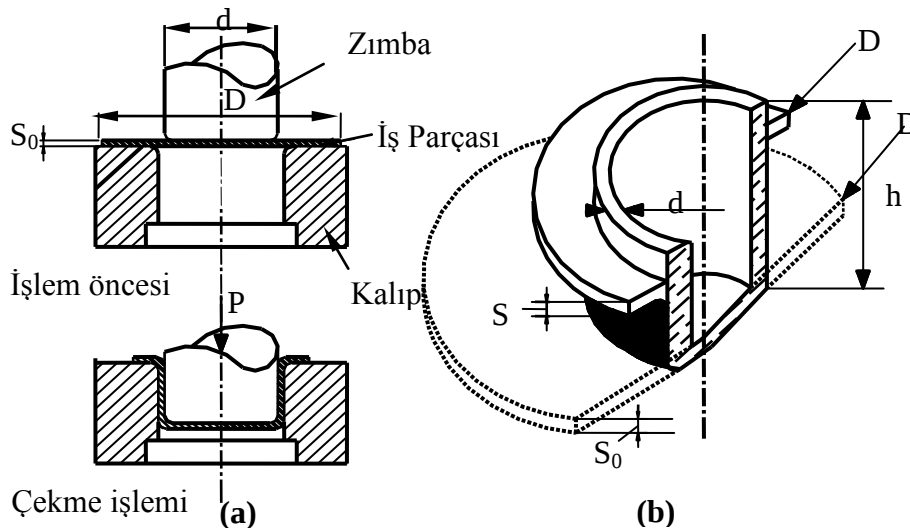
Ilık işlemin sıcak ve soğuk işleme göre bir takım avantajları vardır. Sıcak işleme göre en önemli avantajı enerji tasarrufudur. Soğuk işleme göre en önemli avantajı ise, gerçekleştirilebilen toplam deformasyon oranının soğuk işlemdekinden fazla olması, aynı zamanda soğuk işlenmiş malzeme mukavemetine yakın mukavemetlerde ürün elde edilmesidir. Ilık işlemde, deformasyon sertleşmesinin etkisi soğuk işlemdeki etkisinden daha azdır. Ilık işlemde, malzemede yeniden kristalleşme olmaz, dinamik toparlanma olur. Metalik malzemelerin plastik deformasyon kabiliyeti, malzeme özellikleri, deformasyon sıcaklığı, deformasyon miktarı ve deformasyon hızının yanı sıra, sürtünme ve yağlama, hidrostatik basınç, kalıntı gerilmeler ve geometrik faktörler gibi diğer faktörlere de bağlıdır [45].

Derin çekme yönteminde, plastik şekil anında kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünme, aşınma ve güç kaybına sebep olur. Ayrıca malzemenin deformasyon kabiliyeti, sürtünmeden olumsuz yönde etkilenir. Sürtünmeyi en aza indirmek için yağlama yapmak gerekir. Yağlayıcı maddeler fiziksel durumlarına göre katı, sıvı, yarı katı ve gaz yağlayıcılar olarak dört gruba ayrılmaktadır. Yağların seçiminde özellikle çalışma şartları ve yağın kalitesi göz önüne alınır. Plastik deformasyon işlemleri sırasında iş parçasına hidrostatik basınç uygulanması, mikro boşluk oluşumunu engellediğinden özellikle kırılma ile sınırlanmış deformasyon işlemlerinde iş parçasının deformasyon kabiliyeti üzerine olumlu etkide bulunur. Boyun verme ile sınırlanmış deformasyon işlemlerinde ise,

hidrostatik basıncın şekil değiştirmeye süneklik açısından olumlu etkisi hemen hemen yoktur. Plastik şekil verme işlemlerinde malzemeler düzenli deformasyona uğrayamadıklarında, yapılarında kalıntı gerilmeler oluşur. Kalıntı gerilmeler elastik gerilmeler olup, en fazla malzemenin akma mukavemeti değerine erişebilirler. Kalıntı gerilmeler, ısıtma işlemi veya plastik şekil değişimi ile azaltılabilir veya yok edilebilirler. Şekillendirilecek metalin işlem öncesi şekli, kalıbın şekli, metalin istenilen şekli alması için deformasyon sırasındaki metal akışının durumu, plastik deformasyonu etkileyen geometrik faktörlerdir [45].

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

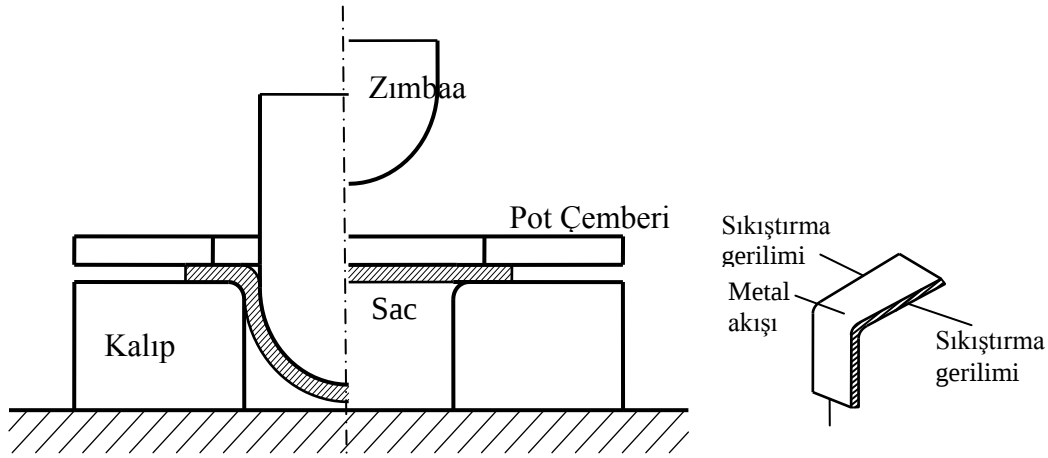
Şekil 3.2’de, dairesel iş parçasından d çapına sahip silindirik bir kabın çekme işlemiyle elde edilmesi şematik olarak verilmektedir.



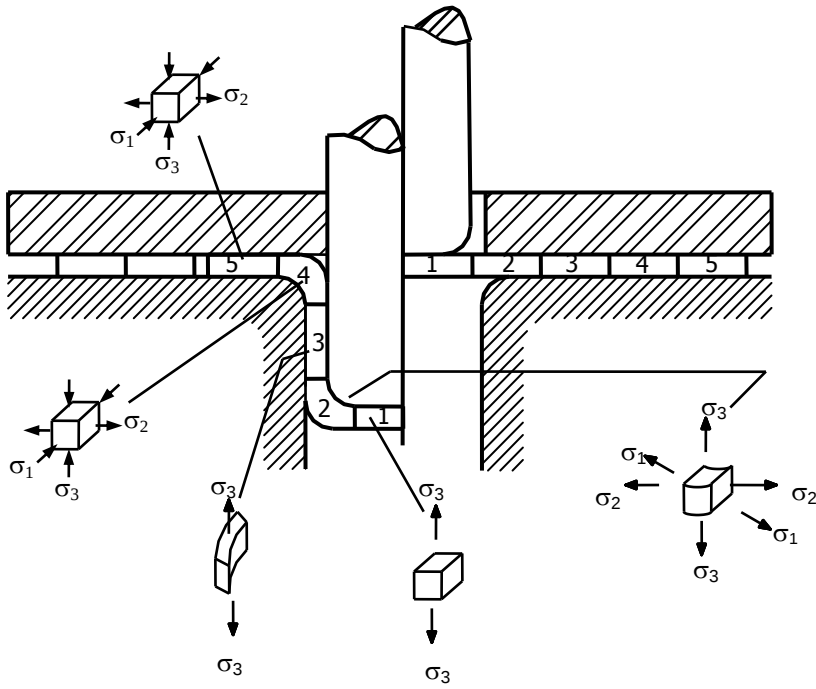
Şekilde görüldüğü gibi, başlangıçta S_0 kalınlığı ve D çapına sahip düzlemsel bir levha, d çapındaki bir zımba yardımıyla kalıp (matris) içine itilmek suretiyle, altı düz, silindirik bir parça haline getirilmektedir [47]. Çekme olayında zımbanın sac levhaya baskı

yapması ile sac levha kalıp kenarlarındaki radyüsler (kalıp kavis yarıçapı) üzerine doğru eğilerek kalıp boşluğuna girmeye başlar. Zımbanın ileri hareketi ile sac levha zımba ile kalıp arasında halka şeklinde bulunan çekme boşluğundan kalıp içine doğru hareket ederek düz düşey duvar oluşturur.

Son aşamada sac levhanın kalan kısmı radyal olarak akarak kalıp boşluğuna otururken, sac levhanın kalıp üstünde yani baskı plakasının altında kalan kısmı sürtünme kuvveti oluşturarak bu olayı engellemeye çalışır. Başlangıçta statik olan sürtünme kuvvetleri, sac levhanın hareket etmeye başlamasıyla azalır. Şekil 3.3’de ki gibi çekilmekte olan bir sac parçası için, sac levha radyal olarak akmaya başladığında kalınlığı azalmaya başlar ve geniş olan dış çevresi küçük olan kalıp çapına göre şekillenmeye başlayarak düşey duvarlar oluşturur. Bu olay levha yüzeyinde dairesel sıkıştırma gerilimine sebep olur. Zımbanın ilerleyen hareketi ile sac levhanın büyük bir kısmı kalıp boşluğunda küçük dairesel flanş oluşturur. Şekil 3.4’den de anlaşıldığı gibi düşey duvarlarda kalıp dibine doğru gittikçe büyüyen tek eksenli gerilmeler oluşturur [48].

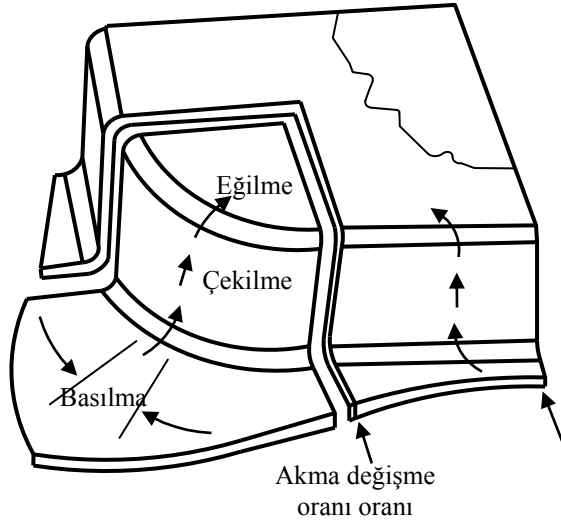


Şekil 3.3. Derin çekmenin mekanik modeli [48].



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

Diğer yandan kare kapların çekilmesi durumunda ise çekilen kabın köşelerinde eğilme, çekme ve basılma gerilmeleri meydana gelir (Şekil 3.5) [49].



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

3.3. İlkel Parça Boyutlarının Belirlenmesi

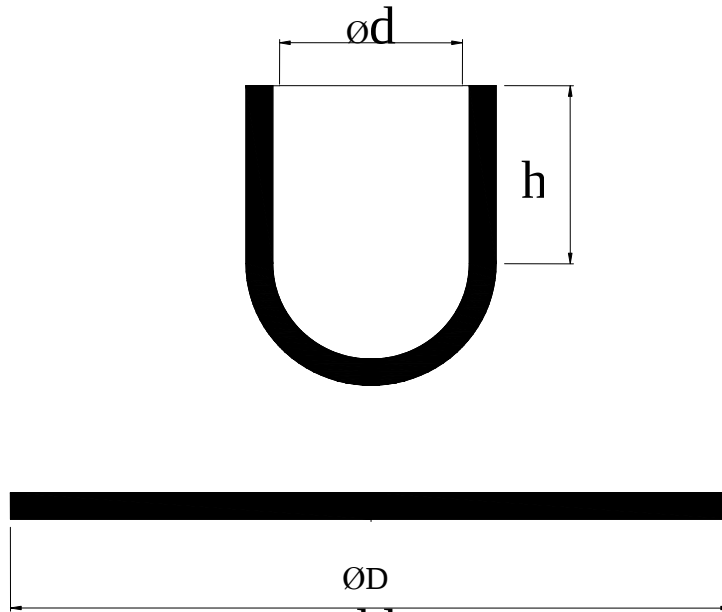
Çekme işleminin tasarımına çekme öncesi parça boyutlarının ve şeklinin belirlenmesiyle başlanmaktadır. Çekme işlemi süresince, sac malzeme eğilme, basılma ve çekilme gerilmelerine uğrar. Her plastik şekil verme işleminde olduğu gibi çekme işleminde de, çekme öncesi parça hacmiyle çekme sonrası parça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

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

$$\frac{D^2\pi}{4} = \frac{d^2\pi}{4} + \pi \cdot d \cdot h \quad (3.12)$$

$$D = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} \quad \text{mm olarak bulunur.}$$

(3.13)



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

3.4. Limit Çekme Oranı

Limit çekme oranı, yırtılmadan ideal şekilde çekilebilecek en büyük dairesel iş parçası çapının, bu işlemi gerçekleştirebilmesi öngörülen zımba çapına oranı, şeklinde tarif edilir [51]. Bu oran;

$$\beta = \frac{D_{max}}{d} \quad (3.14)$$

Şeklinde hesaplanır [47].

Silindirik derin çekme işleminde kullanılan dairesel iş parçası çapının, bu işlemde kullanılacak zımbanın çapına tekabül eden limit çekme oranını aşacak değerler alması durumunda parça yırtılarak hasara uğrar. Zira iş parçasının başlangıç çapı büyüdükçe çekme işlemini gerçekleştirmek için ihtiyaç duyulan zımba kuvveti de artmaktadır. Artan zımba kuvvetinden dolayı oluşacak bir hasar genellikle kabın yan duvar (veya cidar) kısmında ve zımba yuvarlatma yarıçapının başlangıç bölgesinde oluşmaktadır [47].

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

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

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

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

d/s	30	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600
β_0	2.1	2.05	2.0	1.95	1.9	1.85	1.8	1.75	1.7	1.65	1.60	1.5

Gerçek limit çekme oranı daima $\beta_{gerçek} \leq \beta_0$ olmalıdır.

3.4.1. Silindirik Parçalar İçin Derin Çekme Adımları

1. çekme $d_1 = \frac{D}{\beta_0}$
2. çekme $d_2 = \frac{d_1}{\beta_1}$
3. çekme $d_3 = \frac{d_2}{\beta_1}$
- n. çekme $d_n = \frac{d_{n-1}}{\beta_1}$

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

$$n \cong \frac{h_n}{d_n} = \frac{D^2 - d_n^2}{4 \cdot d_n^2} \quad (3. 15)$$

Burada;

- n : gereken çekme sayısı
 h_n : n'inci çekim sonrası kap yüksekliği (mm)
 d_n : n'inci çekim sonrası kap çapı (mm)
 D : ilkel parça çapı (mm)

3.4.2. Dikdörtgen Parçalar İçin Derin Çekme Adımları

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

1. çekme $r_1 = 1,2 \cdot q \cdot R_1$
2. çekme $r_2 = 0,6 \cdot r_1$
3. çekme $r_3 = 0,6 \cdot r_2$
- n. çekme $r_n = 0,6 \cdot r_{n-1}$

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

3.5. Çekme Kuvveti

Çekme kuvveti, zımba çapına, sac malzemenin kalınlığına ve cinsine bağlıdır. Ayrıca, baskı plakasının uyguladığı basınç, çekme hızı, kalıp ve zımba radyüsleri, ilkel parça çapı, çekme boşluğu ve yağlama da çekme kuvvetine etki etmektedir [46]. Çekme kuvvetinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikten faydalanılmaktadır [51].

Silindirik parçalar için:

$$F_z = \pi \cdot d \cdot s R_m \cdot n \quad (\text{N}) \quad (3. 16)$$

Dikdörtgen parçalar için:

$$F_z = \left(2 \cdot r_e \cdot \pi + \frac{4 \cdot (a+b)}{2} \right) \cdot s \cdot R_m \cdot n \quad (\text{N}) \quad (3.17)$$

Burada;

F_z : Çekme kuvveti (N),

d : Zımba çapı (mm),

s : Sac malzeme kalınlığı (mm),

R_m : Sac malzemenin çekme dayanımı (N/mm²),

n : Katsayı,

r_e : Köşe radyüsü (mm)' dir.

3.6. Baskı Plakası Kuvveti (BPK)

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

Derin çekme işlemi için gerekli BPK aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir.

$$F_B = \frac{\pi}{4} [D^2 - (d + 2 \cdot r)^2] \cdot p \quad (3.18)$$

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

$$F_B \approx \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot p \quad (3.19)$$

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

$$p = \left[\left(\beta_{gerçek} - 1 \right)^2 + \frac{d}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{R_m}{400} \quad \text{N/mm}^2 \quad (3.20)$$

Burada;

p : Baskı plakası basıncı (N/mm^2),

d : Zımba çapı (mm),

D : İlk çap (mm),

s : Sac kalınlığı (mm),

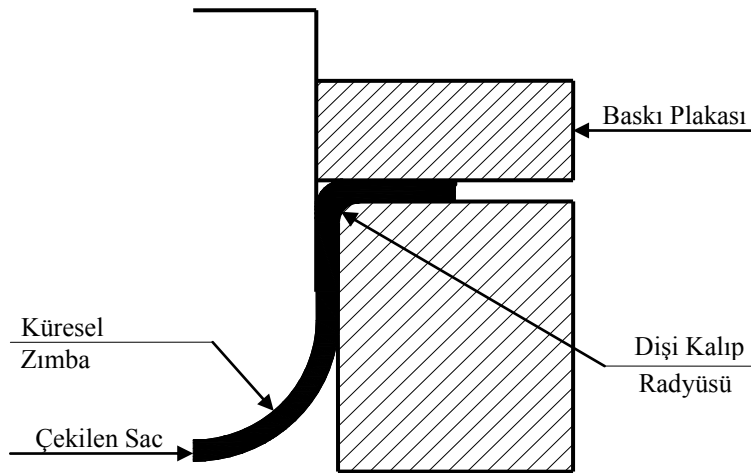
R_m : Çekme dayanımı (N/mm^2),

$\beta_{\text{gerçek}}$: Gerçek çekme oranı (ilk çekme)' dir.

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

3.7. Kalıp Kenar Radyüsü ve Zımba Ucu Radyüsleri

Çekilen sacın ilk çekmede bir kere bükülüp doğrulduğu, müteakip çekmelerde ise iki kere bükülüp doğrulduğu dikkate alındığında, çekme işleminde sac malzemenin kalıp içerisine akışını kolaylaştırmak için zımba ve dişi kalıp radyüslerinin mümkün olduğu kadar büyük tutulması gerektiği düşünülmektedir. Ancak, gereğinden büyük tutulmuş zımba ve dişi kalıp radyüslerinde, baskı plakası etki yüzeyi küçüleceğinden, sac malzemenin takım ile temas etmeyen yüzeyi büyümekte ve parça üzerinde istenmeyen kırışıklıklar oluşmaktadır. Çekme kavislerinin çok düşük tutulması durumunda ise, sac malzemenin kalıp içerisinde akışı için gerekli olan temas alanı küçüleceğinden dolayı, takım kesme kalıbı gibi çalışmakta ve malzemenin yırtılması kolaylaşmaktadır [46, 53]. Zımba ucu radyüsü ve dişi kalıp radyüsü Şekil 3.7'de gösterilmiştir [46].



Şekil 3.7. Zımba ucu ve kalıp radyüsü [46].

Malzeme kalınlığına bağılı olarak önerilen değerler Tablo 3.3’de verilmiştir.

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

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

Kalıp yarıçapının bulunması için kullanılan eşitlik aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$r_k = 0,035[50 + (D - d)]\sqrt{s} \quad (3. 21)$$

Burada;

- r_k : Kalıp radyüsü (mm),
 D : İlkel parça çapı (mm),
 s : Sac malzeme kalınlığı (mm),
 d : Zimba çapı (mm), olarak verilmiştir.

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

Küçük zimba radyüsü cidar zayıflaması etkisi göstermektedir. Cidar zayıflaması sonucu, parça tekrar çekme işlemlerindeki gerilmelere dayanamamakta ve yırtılmaktadır. Baskı plakalı çekme işleminde, başarılı bir çekme gerçekteşmesi için kalıp ve zimba radyüsleri arasında aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır [46, 50].

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

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

3.8. Çekme Hızı

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

Tablo 3.4. Silindirik çekmelerde malzemelerin cinsine göre çekme hızları [54].

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

3.9. Çekme Boşluğu

Çekme işleminde çekme boşluğunun az olması, sürtünmenin artmasına, ısı oluşumuna ve takımın aşınmasına fazla olması ise yumuşak malzemelerde çekilen parça cidarının bozulmasına, ince malzemelerde buruşmalara yol açar. Bu nedenle zımba ile kalıp arasında belirli toleranslarda bir boşluk bulunmalıdır [55].

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

Çekme boşluğunun belirlenmesinde kullanılan eşitlikler aşağıdaki gibidir [46].

Çelik için, $w = s + 0,07\sqrt{10s}$ (3. 22)

Alüminyum için, $w = s + 0,02\sqrt{10s}$ (3. 23)

Demir olmayan metaller için, $w = s + 0,04\sqrt{10s}$ (3. 24)

3.10. Derin Çekmede Kullanılan Saclar

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

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

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

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

olacağından tercih edilebilir. Boyut toleranslarındaki hassasiyet açısından soğuk haddelenmiş saclar sıcak haddelenmiş saclardan üstündür [46].

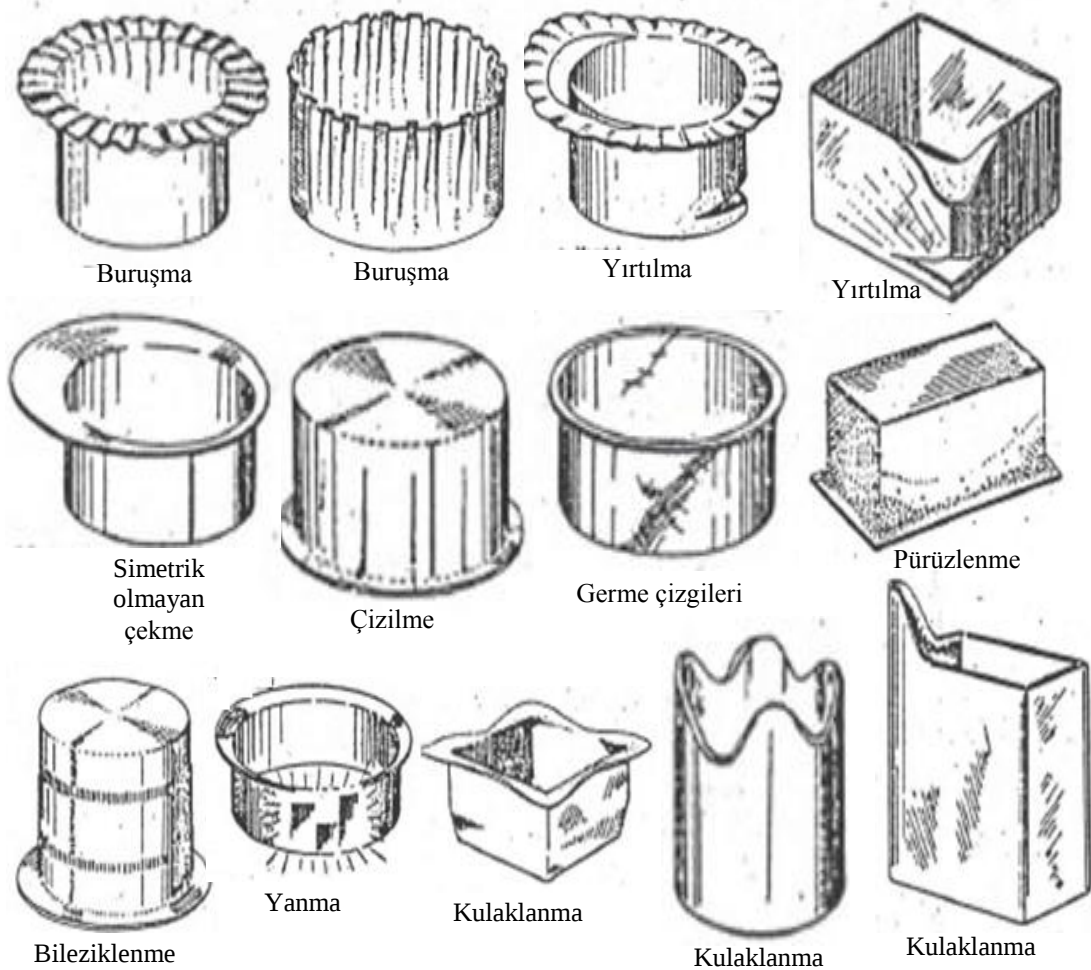
3.11. Derin Çekilme İşleminde Görülen Hatalar

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

Derin çekme işleminde çatlama olayı genellikle zımba radyüsünün hemen üstündeki bölgede oluşur. Zımba veya matris radyüsünün az olması, malzeme özelliklerinin yetersiz olması, derin çekme oranının büyük seçilmesi, sıkıştırma basıncının yüksek olması, çekme boşluğunun küçük olması, yağlamanın yetersiz veya uygun yağ çeşidinin kullanılmaması bu hataya sebep olur [56]. Bu faktörlerin yetersizliği sonucunda zımba kuvveti artar ve malzemenin kritik bölgede incelerek kopması meydana gelir. Daha kaliteli malzeme kullanımı ve zımba kuvvetini azaltıcı tedbirlerin alınması ile bu hata önlenir. Bazı durumlarda çatlama işlemi parçanın üst veya dış kısımlarında görülür. Bunun sebebi ise malzemenin çevresel dış basınca karşı koyamayacak zayıflıkta özelliklere sahip olmasıdır. Malzeme üzerinde çentik gibi izlerin olması da çatlama yol açabilir. Buruşma olayı ise, çekme boşluğunun büyük olması, baskı plakası kuvvetinin yeterli olmaması, matris ve zımba radyüsleri ile taslak çapının gereğinden büyük olması veya malzemenin çok ince olduğu durumlarda görülür. Gerekli kalıp geometrisinin ve öngörülen baskı plakası kuvvetinin hassas ayarlanması ile buruşma engellenebilir. Şekil 3.8’de derin çekme işleminde rastlanan hatalar gösterilmektedir. Bunların yanında derin çekme işleminde genellikle aşağıdaki nedenlerden dolayı kabın flanş veya ağız kısmı düzgün olarak elde edilemez [57].

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

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

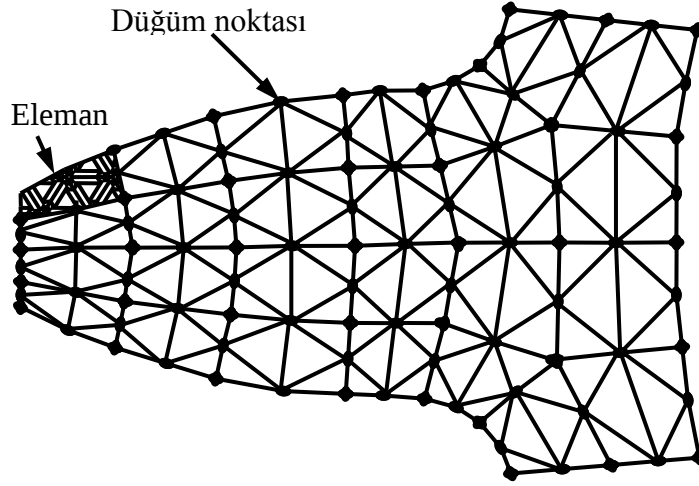


Şekil 3.8. Derin çekme işleminde görülen çekme hataları [57].

3.12. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu (SEM) ya da sonlu elemanlar analizi (SEA) günlük yaşamda birçok problemin çözümünde kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodunda

problem daha önce belirlenmiş parçalara (elemanlara) ayrılarak basitleştirilir (Şekil 3.9). Her elemanın yüklemeye vereceği tepkiyi ifade eden bir denklemi vardır. Bu elemanların tepkilerinin toplamı, tasarımın yüklemeye vereceği tepkiyi gösterir. Elemanlar sonlu sayıda bilinmeyen içerdiğinden bu metoda sonlu elemanlar metodu denir.



Şekil 3.9. Bir problemin sonlu elemanlar modeli [59].

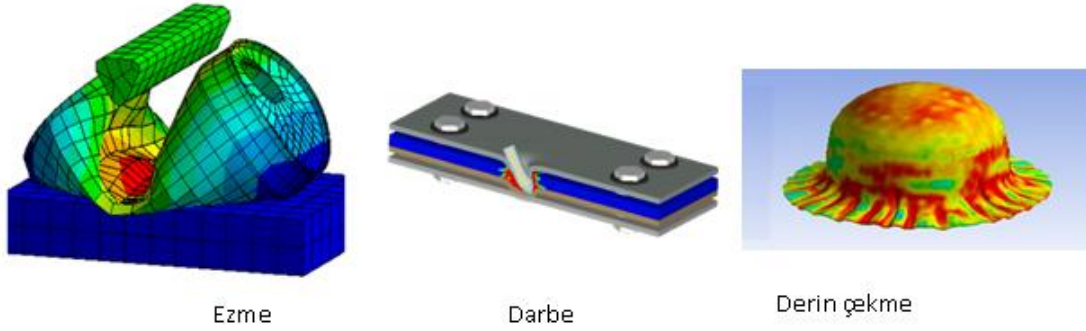
Sonlu sayıda bilinmeyeni olan sonlu elemanlar modeli sonsuz miktarda bilinmeyen içeren fiziki modellerle yalnızca benzeşim yapar, asla gerçeğin yerini tutmaz. Sistemin başarısı hangi sistemin simüle edildiğine ve simülasyon için nelerin kullanıldığına bağlıdır [59].

Mühendislikte FEM'in uygulama alanları başlıklar halinde sıralanacak olursa;
Makine, Uçay, İnşaat ve Otomotiv endüstrisinde,
Yapısal analizlerde (statik/ dinamik, linear/nonlinear),
Isıl ve Akış analizlerinde,
Elektromanyetik alanlarda,
Geometrik yapılarda,
Biyomekanik ve benzeri alanlarda geniş bir şekilde uygulanmaktadır [60].

Günümüzde metalleri biçimlendirme konusunda dünya çapında 60'a yakın benzeşim (simülasyon) yazılımı mevcuttur. Bunların %90'ı üniversite ve araştırma kuruluşlarında gerçekleştirilmiş olup yalnızca % 10'u ticari amaçlı olup kullanıma açıktır [61].

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çözümlemeler statik, yarı statik ve dinamik durumlar için ayrı ayrı değerlendirilir ve duruma uygun çözüm yöntemi seçilir. Statik durumlar için implisit yöntem kullanılırken, dinamik durumlar için eksplisit yöntemi daha

uygun ve doğru çözümler sunmaktadır. Derin çekme yönteminde malzemenin kalıp içerisine akışı ve bir takım dinamik yüklemelere maruz kalması dikkate alındığında, eksplisit yönteminin kullanılması daha uygun olacaktır. Şekil 3.10'de dinamik durumlar için bu yöntemin uygulamalarından bazı örnekler verilmiştir.



Şekil 3.10. Eksplisit yöntem kullanılan dinamik durumlar [62, 63].

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

3.12.1. İmplicit Yöntem

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

$$\Delta u^{(i+1)} = \Delta u^{(i)} + K_t^{-1}(F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (3.25)$$

Burada, K_t bilinen teğetsel direngenlik matrisi, F dış kuvvetlerin vektörü, I ise iç kuvvetlerin vektörü olup, Δu bir zaman adımıdaki deplasmanların vektörüdür. Bu yöntemde her iterasyon adımıda teğetsel direngenlik matrisinin yeniden oluşturulması ve ayrıştırılması gerekir. Yöntem teoride iki artış arasındaki adım aralığı istenen büyüklükte seçilebilmesine karşın pratikte nonlinear temas şartları nedeni ile sınırlıdır. Çözümde bir yakınsama kriterine ulaşıldığında hesaplama durur [48].

3.12.2. Eksplisit yöntem

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

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} u'^{(i+\frac{1}{2})}$$
$$u'^{(i+\frac{1}{2})} = u'^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+\frac{1}{2})} + \Delta t^i}{2} u''^{(i)} \quad (3.26)$$

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

$$u''^{(i)} = M^{-1}(F^{(i)} - I^{(I)}) \quad (3.27)$$

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

l : karakteristik sonlu elaman büyüklüğü,

c : malzemedeki ses hızı,

olmak üzere kararlı bir zaman adımı yaklaşık olarak

$$\Delta t = \frac{l}{c} \quad (3.28)$$

eşitliği ile bulunur. Yani bir zaman adımı içinde bir dalga en fazla bir sonraki sonlu elemana ulaşabilir. Ağ yoğunluğunda mm seviyesinde eleman büyüklükleri kullanıldığında μs mertebesinde zaman adımları elde edilir. Bu demektir ki bir derin çekme işleminin simülasyonu $10^5 - 10^6$ kadar zaman adımına gerek duyulabilir. Bu da doğrudan hesaplama zamanına yansır. Bu problemi gidermek için şekillendirme işlemleri gerçekte olduğundan daha hızlı şekilde oluyormuş gibi benzeştirilir. Benzeşim sırasında ortaya çıkabilecek atalet etkilerini gidermek için (örneğin sönüm elemanları kullanmak gibi) önlemler alınmalıdır. Yapılan araştırmalar, işlem hızının sonuçları etkilemeden on kata kadar çıkarılabileceğini göstermiştir. Malzeme özelliklerinin ve katsayıların şekil değiştirme hızına bağlı olduğu malzeme modelleri için ise hızın değiştirilmesi söz konusu olamaz. Alternatif bir yöntem de işlem hızı sabit tutularak malzemenin yoğunluğunun arttırılması ve buna bağlı olarak

malzeme içindeki ses hızı küçültülmesidir. Yoğunluğun 100 kat arttırılması ses hızını 10 kat düşürür ve problem 10 kat hızlı çözülür [60].

3.12.3. İmplicit ve Eksplisit Yöntemlerin Karşılaştırılması

1. Eksplisit Yöntem (EY) mevcut durumda daha az hesap zamanına ve hafızaya gerek duymaktadır. Yalnız bu tip programların (Kişisel Bilgisayar-Personel Computer) PC bilgisayar teknolojisindeki gelişmeye paralel geliştirildiği unutulmamalıdır. İmplicit Yöntem (IY) ise mevcut yazılımların geliştirilmesi ile oluşturulmuştur.
2. EY'ler çarpma gibi kısa süreli dinamik problemlerin çözümü için çok elverişlidir. Ancak çok sayıda zaman adımına gerek duyarlar. IY'lerde adım aralığı teorik olarak sınırsızdır. Hesap zamanını kısaltmak için EY'lerde yapay olarak bir ivmelendirmeye veya yoğunluğu arttırmaya gidilir. Bunun sonucu ortaya çıkacak kütle etkileri ancak yazılım çok iyi tanıyan kullanıcılar tarafından alınacak önlemlerle giderilebilir. IY'lerde fiziksel sistemi değiştirmek gerekmez, çünkü çözüm zaten iterativ olarak yapılmaktadır.
3. EY'ler nümerik açıdan oldukça kararlıdır. Temas şartları küçük zaman adımları sayesinde tam anlamı ile tarif edilebilir. Pot oluşması gibi kararsızlık olguları kolayca belirlenir ve yakınsama problemleri ile karşılaşmaz. IY'ler ise bu durumda işlemeyebilir veya burkulma sonrası gibi ek hesaplara gereksinim duyulabilir.
4. Geriye yaylanma ve iç gerilmeler konusunda IY'ler daha üstündür. Bu tip hesaplamalarda takım parçalarının birbirlerinden uzaklaştırılmasının simülasyonu çok önemlidir. Bu yükleme boşaltması EY'lerde ancak iş parçası hareketini tamamlamışsa, yani dinamik etkiler sönülmüş ise uygulanabilir. Hesap zamanını azaltma kaygısı, elemanlarda kullanılan düşük dereceli integrasyon gerilmelerinin hassas hatta doğru hesaplanmasını engeller. Ancak, geriye yaylanmanın temel şartı ise gerilmelerin doğru hesaplanmasıdır. Dolayısıyla EY'lerle elde edilen geriye yaylanmalar ancak tendense olarak doğru sonuç verir. Eleman integrasyon derecesi yükseltilerek buna karşı gelinebilir, ancak hesap zamanı oldukça artar ve IY'lere karşı olan avantaj kaybedilir [60].

4. MATERYAL ve METOT

4.1. Çalışmanın Amacı

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

Bu çalışmanın amacı; matris/baskı plakası yüzeylerine verilen açılar, çekme oranı üzerindeki etkisini belirlemektir. Bunun için, matris iç kenarlarına $r = 6$ mm'lik radyüs verilip, zımba ise küresel olarak işlenmiştir. Matris/baskı plakası yüzeylerine $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 2,5^\circ$, $\alpha = 5^\circ$, $\alpha = 7,5^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 12,5^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ 'lik yedi farklı açı değeri verilmiş olup, sac malzemenin kalıp içerisine akışının kontrolü 2450 N, 4900 N, 7350 N ve 9800 N'luk baskı plakası kuvvetleri uygulanarak sağlanmıştır. Verilen açı ve radyüslerin etkisini tespit etmek için, bir dizi deney yapılmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak bilgisayar destekli analiz çalışması yapılmış ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Matris/baskı plakası açısının artması ile LÇÖ' nın da arttığı deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir.

4.2. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada; 0,9 mm kalınlığında DIN EN 10130-1999 sacı kullanılmıştır. Bu malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 4.1'de verilmiştir. Sac malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 5000 kN kapasiteli SHIMATZU marka çekme test cihazında 5 mm/dak. çekme hızında 0° , 45° ve 90° olmak üzere üç farklı haddelene yönünde toplam 9 numune çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme deneyi sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir.

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

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

Tablo 4.2. Deney

özellikleri

numunesinin mekanik

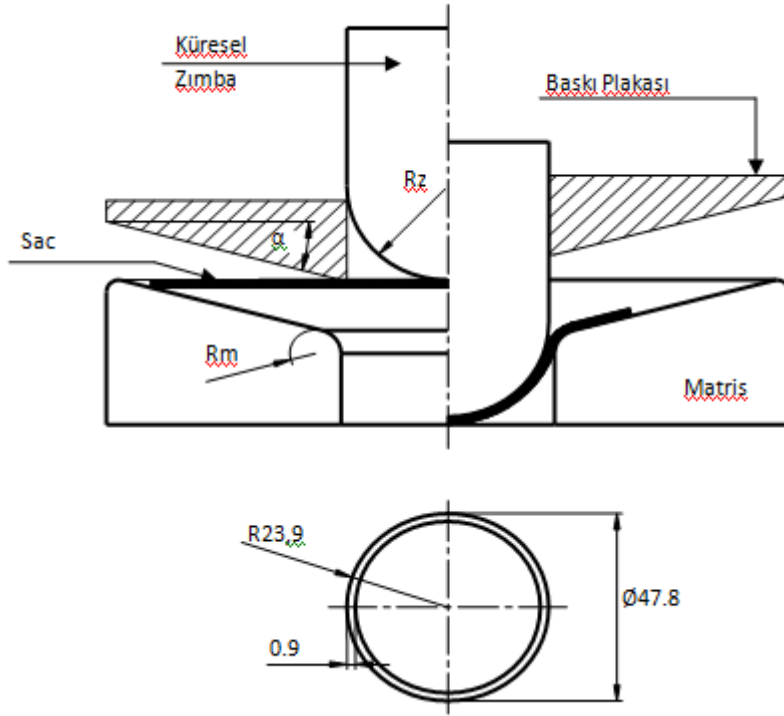
Hadde yönü (°)	Akma dayanımı (N/mm ²)	Çekme dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)	Elastikiyet modülü (kN/mm ²)	Poission oranı
0	180.53	315.83	36.99	195	0.3
45	208.34	328.79	33.08		
90	194.46	309.53	35.22		

Limit çekme oranlarını belirlemek amacıyla Ø85-120 mm aralığında derin çekme levhaları torna tezgahında işlenerek elde edilmiştir. Tablo 4.3’de ilkel parça çaplarına karşılık gelen limit çekme oranları verilmiştir.

Tablo 4.3. İlkel parça çaplarına karşılık gelen limit çekme oranları.

İlkel Parça Çapı (mm)	Limit Çekme Oranı (β)
85	1,77
90	1,88
95	1,98
100	2,09
105	2,19
107,5	2,24
110	2,30
112,5	2,35
114	2,38
115	2,40
116	2,42

Matrisler DIN 1.2080, zimbalar DIN 1.2842 soğuk iş takım çeliği ve baskı plakaları ise CK45 çeliği kullanılarak, Fanuc O-T CNC torna tezgâhında matris ve baskı plakalarının işleme yönleri kalıp merkezinden dışarı doğru olacak şekilde işlenerek imal edilmiştir. Kalıp elemanlarının teknik resimleri Şekil 4.1’de, imalat sonrası fotoğraflar ise Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan kalıp geometrileri.



Şekil 4.2. Fanuc O-T CNC torna tezgahında imal edilen Matris/baskı plakası ve zimba

Kalıp imalatının yapıldığı CNC torna tezgahının resmi Şekil 4.3’de verilmiştir.

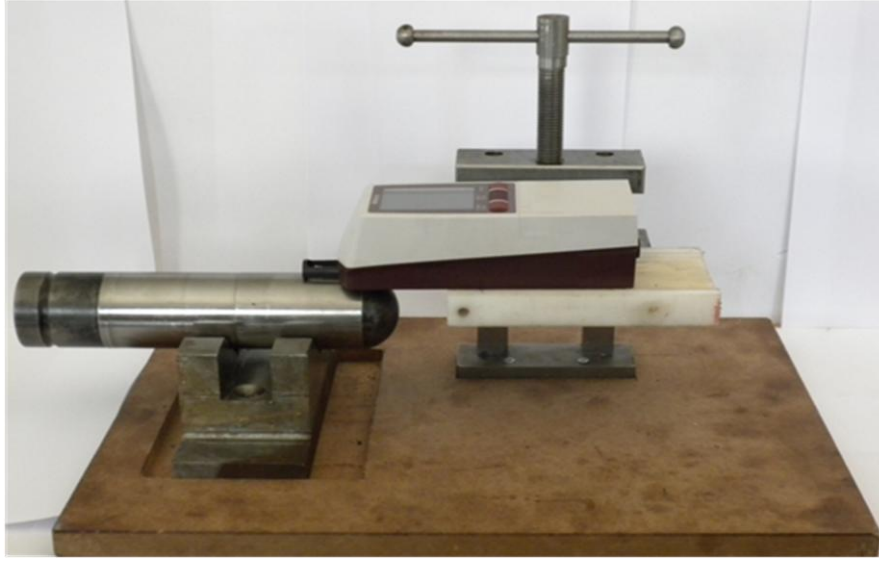


Şekil 4.3. Kalıp imalatı yapılan Fanuc O-T CNC torna tezgahı

Derin çekme işleminde kalıp elemanlarının yüzey pürüzlülükleri sürtünmeyi önemli ölçüde etkilemektedir. İmalatı tamamlanan matris, zımba ve baskı plakası yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo SJ-210 model ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar (Tablo 4.4) de, yüzey pürüzlülük cihazı ve pürüzlülük ölçüm fotoğrafı Şekil 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. Matris, zımba ve baskı plakası yüzey pürüzlülük değerleri.

Ortalama yüzey pürüzlülüğü		Ra, μm
Zımba	Yan yüzey	0,453
Matris	Üst yüzey	1,260
	İç yüzey	1,345
Baskı plakası	Üst yüzey	1,120



Şekil 4.4. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçüldüğü Mitutoyo SJ-210 model ölçüm cihazı

Zımbaya gelen kuvvet 20 ton kapasiteli CAS LS – 20T marka bir yük hücresi yardımıyla ölçülmüştür. Kuvvetin hassas olarak ölçülebilmesi için yük hücresinin, çekme eksenine dik ve çakışık yerleştirilmiş olması önemlidir.

Yük hücresinden elde edilen sonuçlar CAS 1500A marka indikatör, RS232 bağlantısı kullanılarak bilgisayar ortamına 10^{-1} saniye aralığında aktarılmıştır. Deneylerde kullanılan parametreler Tablo 4.5’de verilmiştir. Tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi kullanılarak toplam 28 deney yapılmıştır.

Çekme deneylerinde kullanılan çekme parametre değerleri Tablo 4.5’de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi ile toplam 28 deney parametresi oluşturulmuştur.

Tablo 4.5. Derin çekme parametreleri

Deney No	Baskı Plaka kuvveti (N)	Matris Baskı Plaka Açısı (°)
1	2450	0
2	2450	2,5
3	2450	5
4	2450	7,5
5	2450	10
6	2450	12,5
7	2450	15
8	4900	0
9	4900	2,5
10	4900	5
11	4900	7,5
12	4900	10
13	4900	12,5
14	4900	15
15	7350	0
16	7350	2,5
17	7350	5
18	7350	7,5
19	7350	10
20	7350	12,5
21	7350	15
22	9800	0
23	9800	2,5
24	9800	5
25	9800	7,5
26	9800	10
27	9800	12,5
28	9800	15

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

Deneyler; Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü Atölyesinde bulunan 600 kN basma kapasiteli C tipi Şahinler marka hidrolik pres tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Çekme hızı sabit 4 mm/s olarak ayarlanmış ve MECHAOPTO Dijital Takometre ile pres piston hızı ölçülmüştür. Şekil 4.5’de deney setinin fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.5. Deneysel çalışmaların yapıldığı pres tezgâhı ve kalıp seti

Çekme işlemi sırasında sac malzeme, baskı plakası, matris ve zımba arasında meydana gelen sürtünmeleri azaltmak, sac malzemenin takım yüzeyinde daha kolay kaymasını sağlamak ve kalıp elemanlarının aşınmalarını önlemek amacıyla, yoğunluğu 883 kg/m^3 olan Shell Tellus 68 numara yağ kullanılmıştır.

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

4.3. Analiz Çalışmaları

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

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

Kalıp elemanlarının modelleri SolidWorks 2010 paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen katı model dosyaları, analiz programında kalıp geometrisini

oluşturmak amacıyla Parasolid (x-t) uzantılı olarak kaydedilmiştir. Kalıp seti için SolidWorks'de kullanılan koordinat sistemi esas alınmış, ANSYS Workbench paket programı için oluşturulan modeller çağırılarak paket programın veri yapısına dönüştürülmüştür [63,64].

Analizler öncesinde, kalıp elemanlarının modellenmesinin ardından, çözümlemede kullanılacak olan sac malzeme modelleri oluşturulmuştur. Bunun için Multilinear Isotropic Hardening malzeme modeli seçilmiştir. Malzeme modeli için gerekli olan akma ve çekme mukavemet değerleri çekme deneyi sonucundan; elastisite modülü (E), poisson oranı (ν), yoğunluğu (G), hacimsel (bulk) ve kayma modülü değerleri ise paket programdan hazır olarak seçilmiştir. Tablo 4.6'da analizlerde kullanılan sac malzeme için alınan E , ν ve G değerleri verilmiştir.

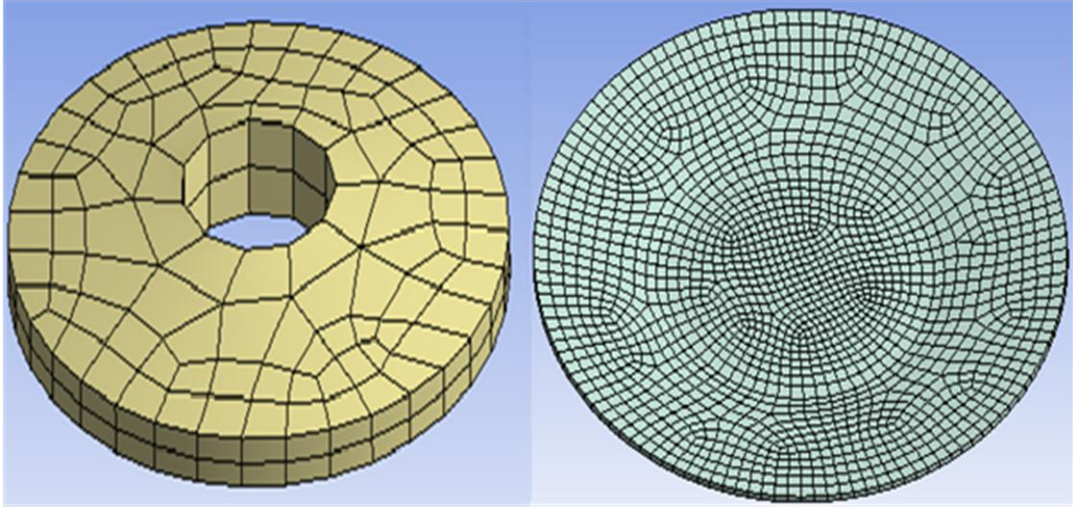
Tablo 4.6. Analizde kullanılan sac malzeme özellikleri.

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

Matris, zimba, baskı plakası ve sac malzeme için ağ yapıları oluşturularak analiz işlemi öncesi hazırlıklar tamamlanmıştır. Matris ve zimbaya ait ağ yapıları Şekil 4.6'da ve baskı plakası ve sac malzemeye ait ağ yapıları ise Şekil 4.7'de verilmiştir.



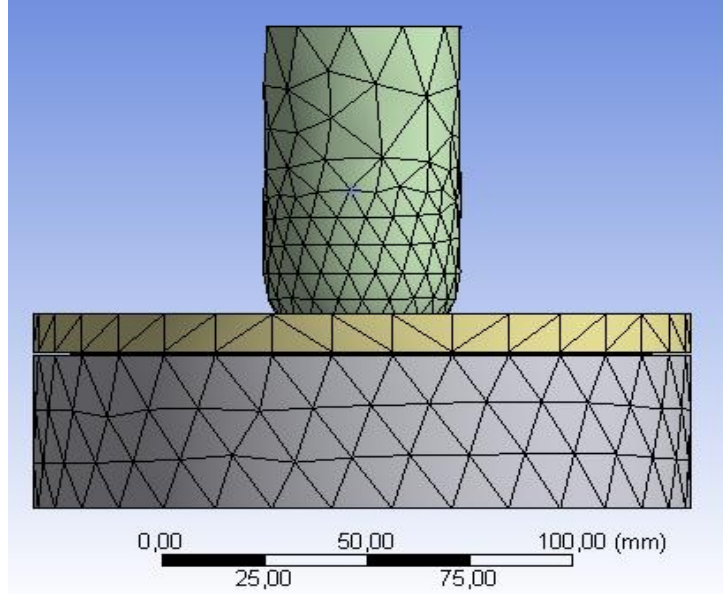
Şekil 4.6. Matris ve zimbaya ait ağ yapıları



Şekil 4.7. Baskı plakası ve sac malzemeye ait ağ yapılar

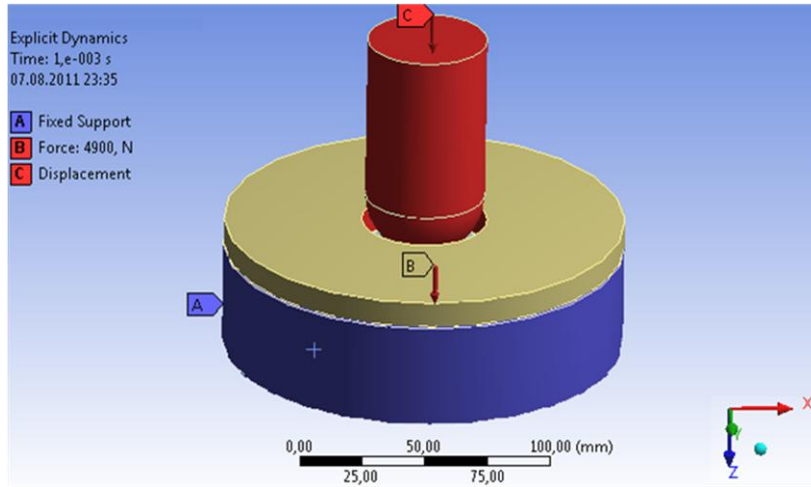
Ağ yapılarının oluşturulması esnasında; baskı plakası, zımba ve matrisin ağ aralıkları 10 mm, sac malzemede ise ağ aralığı 3 mm olarak alınmıştır. Çalışmada; sac malzemedeki deformasyon işleminin incelenmesi esas hedef olduğundan, kalıp elemanlarının ağ yapıları zaman kaybını önlemek amacıyla daha büyük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

Analizlerde çalışmalarında; kalıplama şekli, deneysel çalışmalarla uyumlu olarak, tek etkili preste çekme işlemine göre ayarlanmıştır (Şekil 4.8). Matris/ baskı plakası açısı ve matris/zımba radyüslerinin her bir değeri için farklı modeller oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Malzeme özellikleri, baskı plakası kuvveti, zımba hızı gibi parametreler program içerisinde tanımlanmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Kalıp elemanlarının oluşturulması.

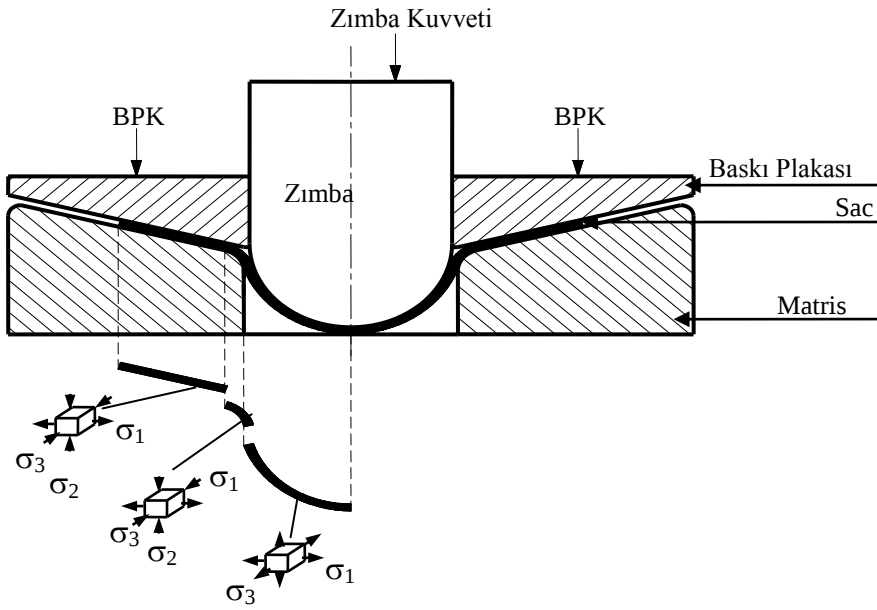
Malzeme özellikleri, baskı plakası kuvveti, zımba hızı gibi parametreler program içerisinde tanımlanarak çekme işlemi modellenmiştir (Şekil 4.9).



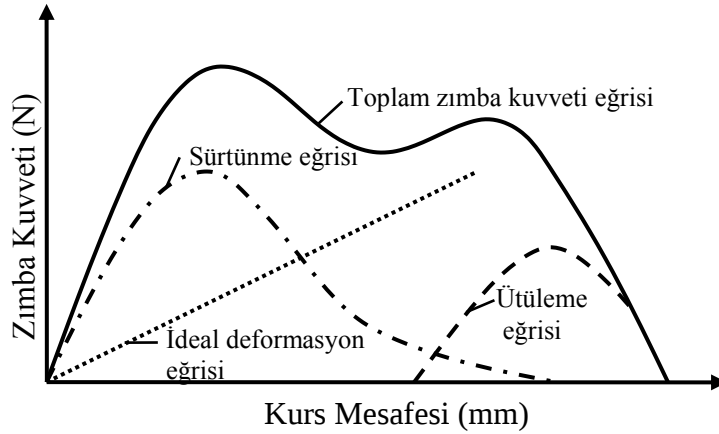
Şekil 4.9. Kalıp elemanlarının parametrelerinin belirlenmesi

5. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

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



Şekil 5.1. Derin çekme işleminde meydana gelen gerilmeler



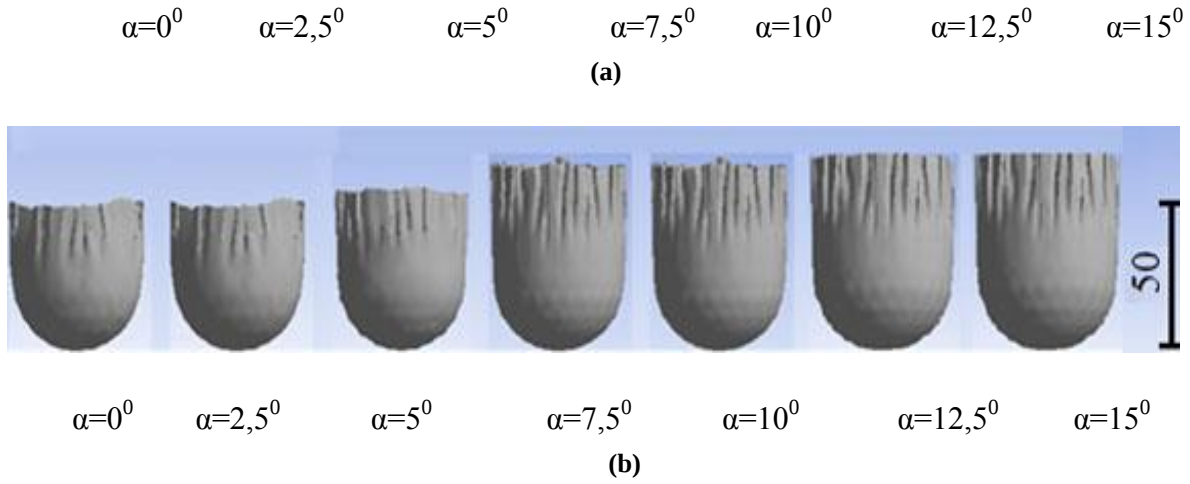
Şekil 5.2. Derin çekmede zımba kuvveti- kurs mesafesi ilişkisi [67].

5.1. Matris/Baskı Plakası Açısının limit Çekme Oranı Üzerindeki Etkisi

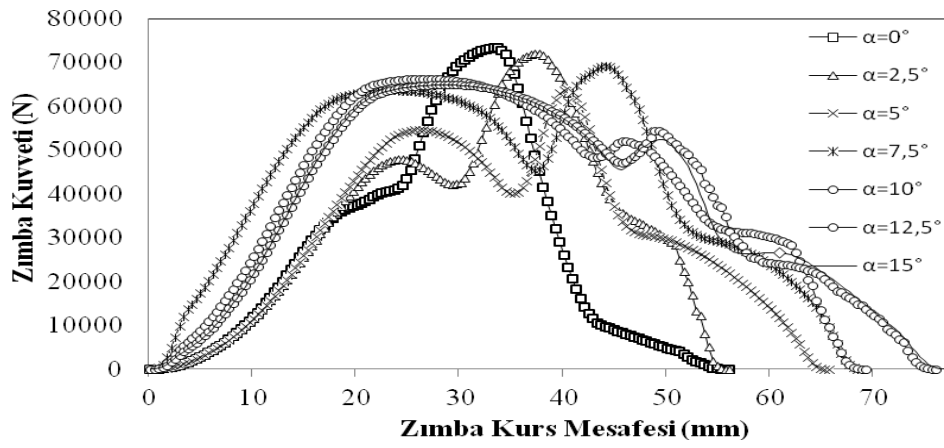
Baskı plakası kuvvetinin 2450 N olduğu durumda, matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı LÇO $\beta=1,98$ ve en büyük zımba kuvveti (EBZK) 73418,04 N; $\alpha=2,5^\circ$ için LÇO $\beta=1,98$ ve EBZK 72103,5 N; $\alpha=5^\circ$ için LÇO $\beta=2,09$ ve EBZK 63784,62 N; $\alpha=7,5^\circ$ için LÇO $\beta=2,35$ ve EBZK 63588,42 N; $\alpha=10^\circ$ için LÇO $\beta=2,35$ ve EBZK 62276,36 N; $\alpha=12,5^\circ$ için LÇO $\beta=2,40$ ve EBZK 64942,2 N; $\alpha=15^\circ$ için LÇO $\beta=2,42$ ve EBZK 64804,86 N olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.3’de baskı plakası kuvvetinin (BPK:2450 N) sabit olduğu şartlarda, matris açısının kap yüksekliği üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, kalıp açısının artmasıyla, limit çekme oranı da artma eğilimindedir. Özellikle α ’nın 0° - $7,5^\circ$ olduğu aralıkta, numunelerin üst kısımlarında kırışıklıkların meydana geldiği, daha yüksek α değerlerinde ise daha düzgün ve hasarsız kapların elde edildiği görülmektedir. Bu durum, yüksek açılar değerlerinde malzemenin kalıp içerisine akışının kolaylaşması ile ilişkilendirilebilir. En büyük kap yüksekliği α ’nın 15° olduğu deney şartlarında elde edilmiştir. Bu deneyde $\beta=2,42$ olarak ölçülmüştür.





Şekil 5.3. Kalıp açısının kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a: Deneysel, b: Sayısal, c: BPK: 2450N)



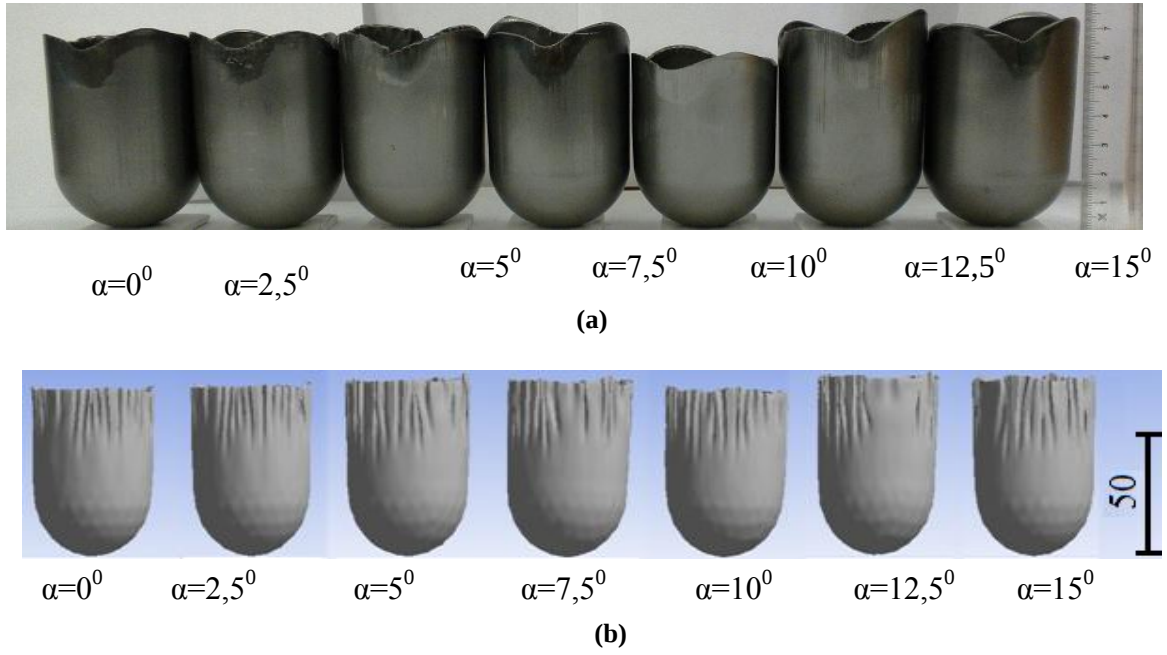
Şekil 5.4. Zımba kurs mesafesinin zımba kuvvetine etkisi (BPK: 2450 N)

Aynı deneylerde ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.4’de görülmektedir. Şekil incelendiğinde, eğilim çizgilerinde iki adet tepe noktası olduğu görülmektedir. Birinci nokta kesit daralmasının başlangıç noktası, ikinci nokta ise düşük baskı plakası kuvvetinden dolayı çekilen sac malzemenin kenarında oluşan kırışıklıkların (ondülasyonların) kalıp boşluğuna sıkışmasından kaynaklanan kuvvet artışını göstermektedir. α açısının artmasıyla, çekme esnasında malzeme yüzeyinde meydana gelen radyal kuvvetlerde azalmaktadır. α ’nın $7,5^0$ ’den büyük olduğu durumlarda matris/baskı plakası açılarına bağlı olarak zımba kuvvetlerinin belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Sonuç olarak, kuvvetteki bu azalma ve matris açısının artmasıyla kırışıklıklar ortadan kalkmaktadır.

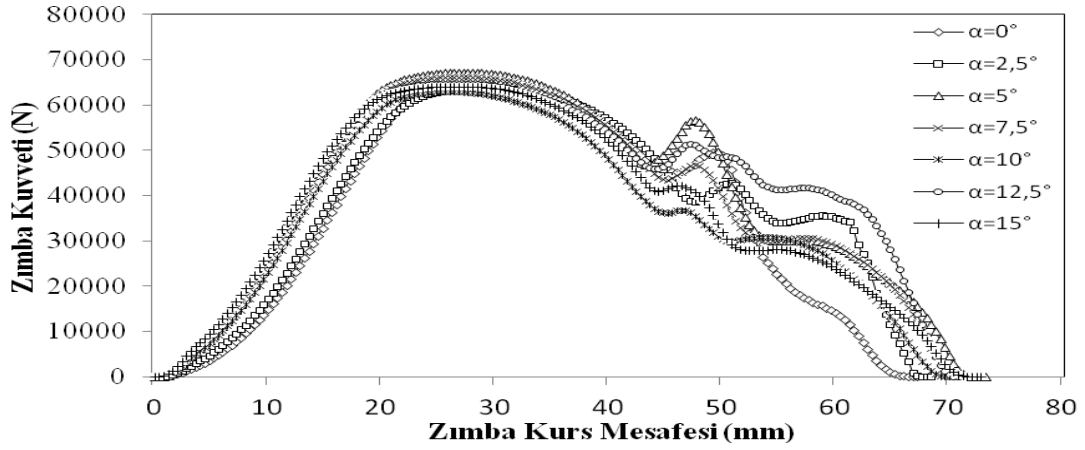
Baskı plakası kuvveti 4900 N olarak uygulandığında matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^0$ için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 64451,7 N; $\alpha=2,5^0$ için $\beta=2,30$ ve en EBZK 63863,1 N; $\alpha=5^0$

için LÇO $\beta=2,35$ ve en EBZK 67237,74 N; $\alpha=7,5^\circ$ için LÇO $\beta=2,35$ ve en EBZK 66139,02 N; $\alpha=10^\circ$ için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 62999,82 N; $\alpha=12,5^\circ$ için LÇO $\beta=2,38$ ve EBZK 64706,76 N; $\alpha=15^\circ$ için LÇO $\beta=2,38$ ve EBZK 64098,54 N olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.5’de baskı plakası kuvvetinin 2450 N’dan, 4900 N’a yükseltilmesi ile farklı matris açılarındaki yapılan deneyler sonucunda elde edilen kapların gerçek ve analiz görüntüleri verilmiştir. Görüntüler birlikte değerlendirildiğinde, matris açısının tüm değerleri için takriben aynı yükseklikte kapların elde edildiği, ancak α ’nın 10° olduğu deneylerde elde edilen kap yüksekliğinin nipten daha düşük olduğu görülmektedir. $\alpha=12,5^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ ’de aynı çekme oranı ($\beta=2,38$) elde edilmiştir. Dolayısıyla BPK’nin 4900 N olması durumunda, matris açısının LÇO üzerinde belirgi bir etkisinin olmadığı söylenebilir. Ancak elde edilen kapların daha düzgün ve pürüzsüz oldukları görülmektedir.



Şekil 5.5. Kalıp açısının kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a: Deneysel, b: Sayısal; BPK: 4900 N)

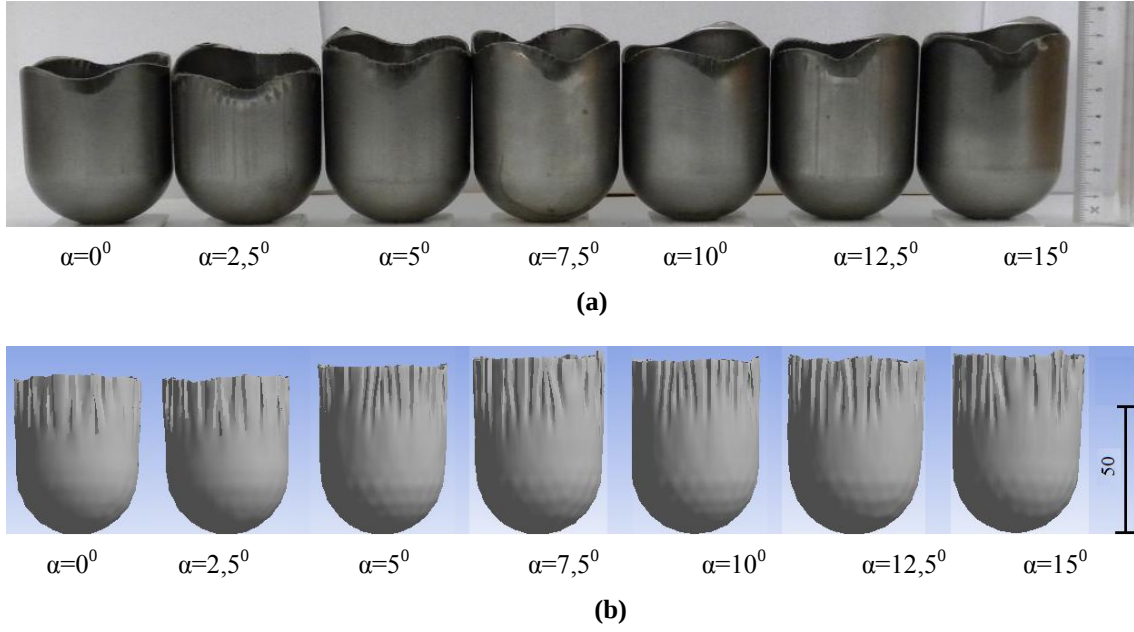


Şekil 5.6. Zımba kurs mesafesinin zımba kuvvetine etkisi (BPK:4900 N)

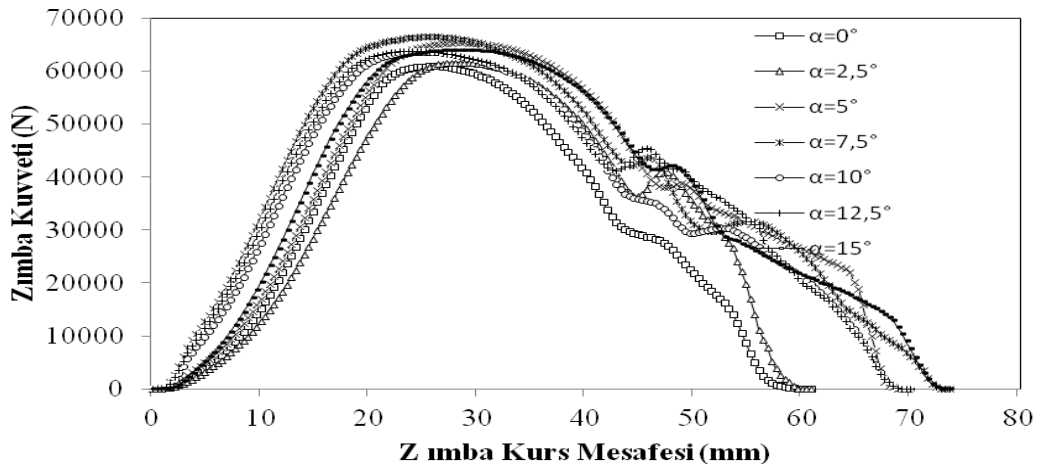
Aynı deneylerde ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.6'da görülmektedir. Şekil incelendiğinde, matris açısının tüm değerleri için 25 mm kurs mesafesi boyunca zımba kuvvetlerinin de doğrusal olarak arttığı, daha sonra deformasyon hızı ve birim kesitteki gerilme değerlerine bağlı olarak çekme kuvvetlerinin yine doğrusal olarak azaldığı görülmektedir. Maksimum çekme kuvvetinin 60000-70000 N aralığında değiştiği görülmektedir. $\alpha=0^\circ$ için LÇO $\beta=2,30$ olduğu durumda EBZK 64451 N iken, $\alpha=15^\circ$ için LÇO $\beta=2,38$ olduğu durumda EBZK 64098 N olmaktadır. Dolayısıyla, matris açısının artması ile malzemeyi deformasyona uğratmak için gerekli zımba kuvvetleri de azalmaktadır. Böylece numunelerde oluşan çatlak ve yırtılmalar yüksek açı değerleri ve düşük zımba kuvvetlerinde önemli derecede azaltılmaktadır.

Baskı plakası kuvveti 7350 N olarak uygulandığında matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için LÇO $\beta=2,19$ ve EBZK 60920,1 N; $\alpha=2,5^\circ$ için LÇO $\beta=2,19$ ve EBZK 60606,8 N; $\alpha=5^\circ$ için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 65314,98 N; $\alpha=7,5^\circ$ için LÇO $\beta=2,35$ ve en EBZK 66472,56 N; $\alpha=10^\circ$ için LÇO $\beta=2,30$ ve en EBZK 63627,66 N; $\alpha=12,5^\circ$ için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 60549 N; $\alpha=15^\circ$ için LÇO $\beta=2,35$ ve EBZK 63980,82 N olarak elde edilmiştir.

BPK'nın 7350 N'a yükseltilmesi ile yine matris açısına bağlı olarak elde edilen kapların deneysel ve analiz sonuçları Şekil 5.7'de görülmektedir. En büyük β değeri $\alpha=7,5^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ 'de 2,35 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla BPK'nın 7350 N değeri için α 'nın $7,5^\circ$ olmasının yeterli olacağı ve daha yüksek açı değerlerinin β üzerinde etkilerinin olmadığı söylenebilir.



Şekil 5.7. Kalıp açısının kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:DeneySEL, b: Sayısal; BPK:7350 N)



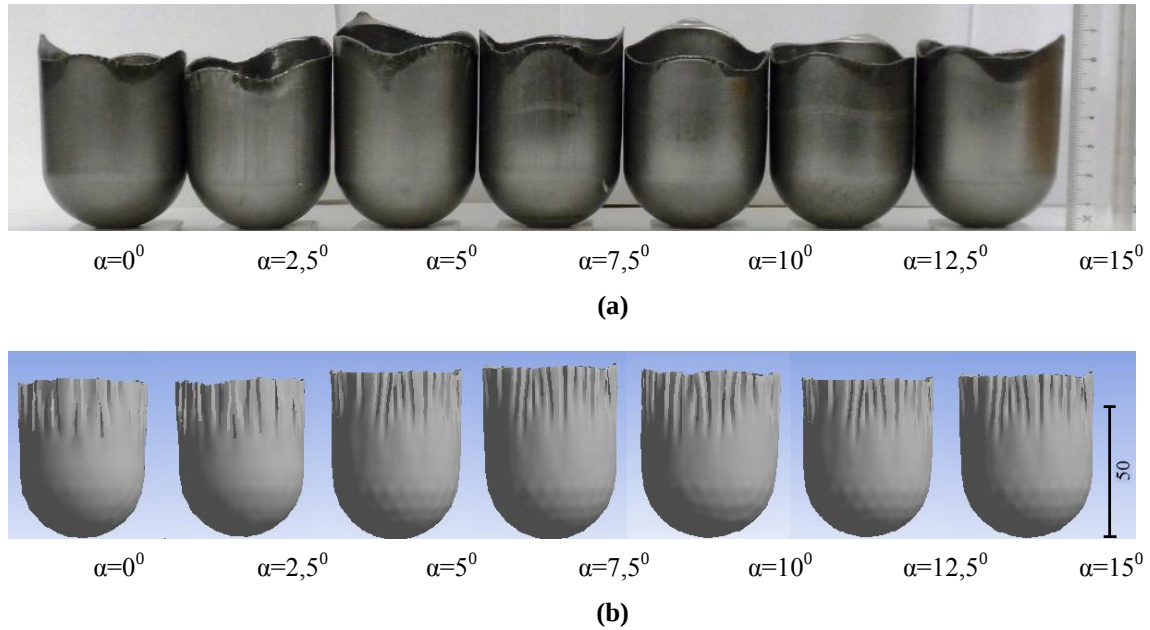
Şekil 5.8. Zımba kurs mesafesinin zımba kuvvetine etkisi (BPK:7350 N)

Aynı deneylerde ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.8’de görülmektedir. Şekil incelendiğinde, matris açısının tüm değerleri için 25 mm kurs mesafesi boyunca zımba kuvvetlerinin de doğrusal olarak arttığı, daha sonra deformasyon hızı ve birim kesitteki gerilme değerlerine bağlı olarak çekme kuvvetlerinin yine doğrusal olarak azaldığı görülmektedir. Maksimum çekme kuvvetinin 60000-70000 N aralığında değiştiği görülmektedir. Kurs mesafesinin 50 mm olduğu durumda meydana gelen dalgalanmanın ütüleme kuvveti olduğu görülmüştür. $\alpha=0^\circ$ için $\beta=2,19$ olduğu durumda EBZK 60920 N iken, $\alpha=15^\circ$ için $\beta=2,35$ olduğu durumda EBZK 63980 N olmaktadır. β ’nın önemli ölçüde

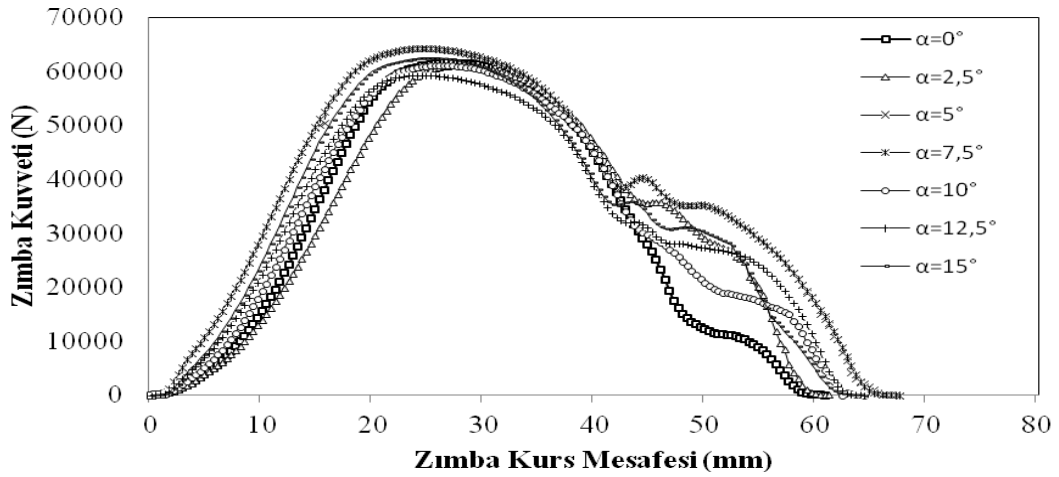
artmasına rağmen, zımba kuvvetlerinin bu artışa paralel olmadığı görülmüştür. Buda artan açı değerlerinin malzemenin matris içerisine akışını kolaylaştırmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Baskı plakası kuvveti 9800 N olarak uygulandığında matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ için LÇO $\beta=2,19$ ve EBZK 61626,42 N; $\alpha=2,5^\circ$ için LÇO $\beta=2,19$ ve EBZK 61116,3 N; $\alpha=5^\circ$ için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 66225,5 N; $\alpha=7,5^\circ$ için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 64025,5 N; $\alpha=10^\circ$ için LÇO $\beta=2,24$ ve EBZK 61116,3 N; $\alpha=12,5^\circ$ için LÇO $\beta=2,24$ ve EBZK 59272,02 N; $\alpha=15^\circ$ için LÇO $\beta=2,24$ ve EBZK 58940 N olarak elde edilmiştir.

BPK'nın 9800 N'a yükseltilmesi ile yine matris açısına bağlı olarak elde edilen kapların deneysel ve analiz sonuçları Şekil 5.9'de görülmektedir. En büyük β değeri $\alpha=5^\circ$ ve $\alpha=7,5^\circ$ 'de 2,30 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla BPK'nın 9800 N değeri için α 'nın $7,5^\circ$ olmasının yeterli olacağı ve daha yüksek açı değerlerinin β üzerinde etkilerinin olmadığı söylenebilir.



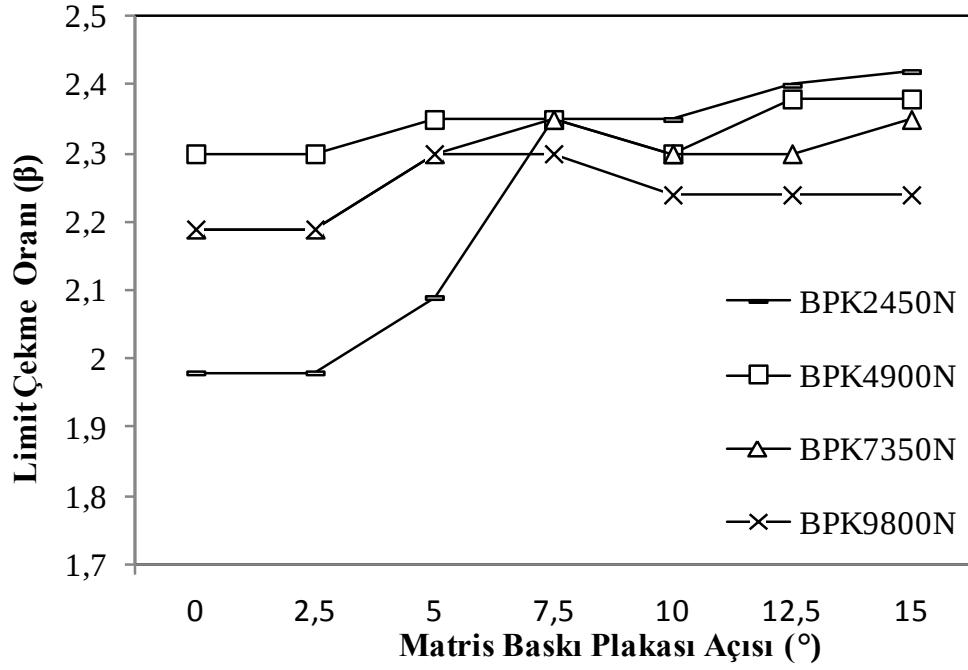
Şekil 5.9. Kalıp açısının kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneysel, b: Sayısal; BPK:9800N)



Şekil 5.10. Zımba kurs mesafesinin zımba kuvvetine etkisi (BPK:9800 N)

Aynı deneylerde ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.10'de görülmektedir. Şekilden, zımba kurs mesafesinin 40 mm 'yi aştığı yüksekliklerde, çekme kuvvetlerinin maksimum 40000 N olduğu ve giderek azaldığı görülmektedir. BPK'nin 9800 N olması ile, ilkel parçaya uygulanan kontrollü akma işlemi sayesinde, kapların üst bölgesinde oluşan kırışıklıklar, önemli derecede azaltılmıştır.

Farklı baskı plaka kuvvet değerleri için α 'nın β üzerindeki etkisi Şekil 5.11'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi α 'nın artması ile β değerleri de artma eğilimindedir. Bu durum, yüksek matris açısı değerlerinde oluşan radyal gerilmelerin azalması ve sac malzemenin kalıp içerisine daha kolay bir şekilde akması ile ilişkilendirilebilir. Radyal gerilmelerin azalması sonucu zımba kuvvetleri de azalmaktadır. α açısının artmasıyla, yetersiz olan baskı plaka kuvveti, radyal kuvvetlerdeki azalmalara bağlı olarak iş parçasına daha büyük bir şekilde etki etmekte ve sonuç olarak limit çekme oranı değişmektedir. 2450 N'luk baskı plakası kuvvetinin uygulandığı $\alpha=0^\circ$ olan kalıpta LÇO $\beta=1,98$ ve EBZK 73418,04 N olarak ölçülürken, $\alpha=15^\circ$ olan kalıpta LÇO $\beta=2,42$ ve EBZK ise 64804,86 N olarak elde edilmiştir.



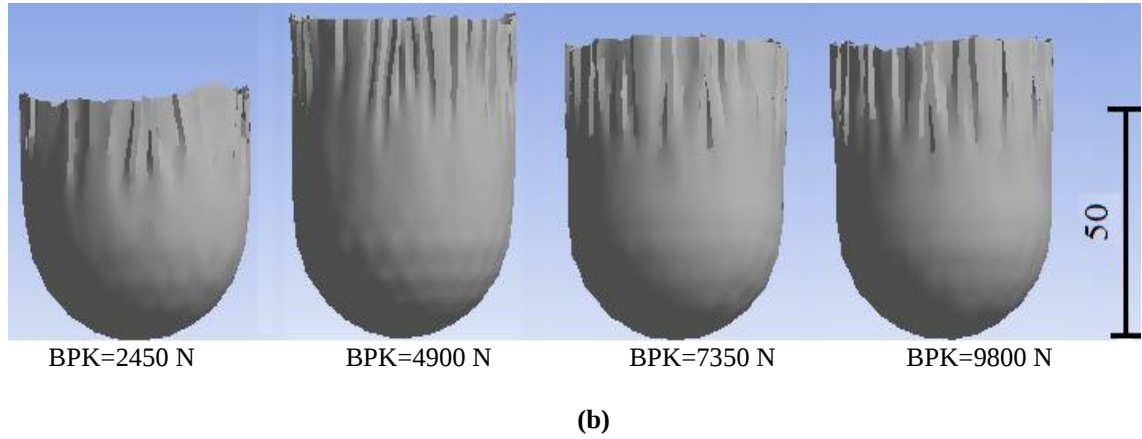
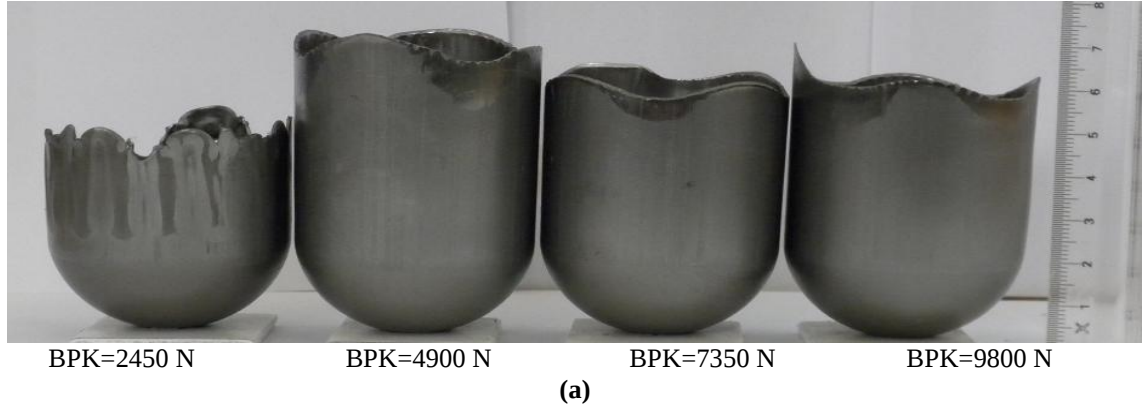
Şekil 5.11. Matris/Baskı plakası açısının limit çekme oranı (β) üzerine etkisi

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

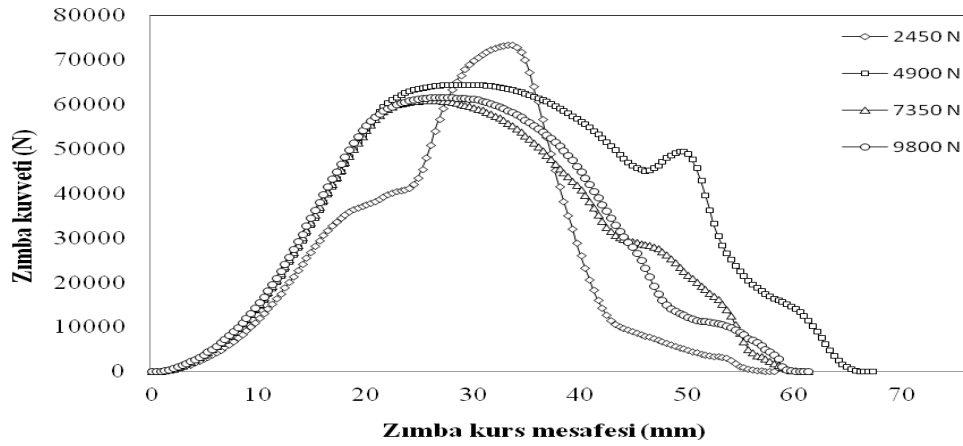
Çekme işlemi sırasında, çekilecek olan malzeme yüzeyine baskı plakası tarafından belirli bir kuvvet uygulanmakta ve üründe oluşabilecek kırıksıklıklar engellenmektedir. Çekme işleminin düzenli bir şekilde gerçekleşmesi baskı plakası kuvvetinin yeterli ve doğru bir şekilde uygulanması ile sağlanabilir. Baskı plakası kuvvetinin çekme oranı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, deneylerde dört farklı kuvvet uygulanmıştır.

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=0^\circ$ olan kalıpta, BPK=2450 N için LÇO $\beta=1,98$ ve EBZK 73418,04 N; BPK=4900 N için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 64451,7 N; BPK=7350 N için LÇO $\beta=2,19$ ve EBZK 60920,1 N; BPK=9800 N için LÇO $\beta=2,19$ ve EBZK 61626,42 N olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.12’de Matris/baskı plakası açısının sabit olduğu şartlarda, ($\alpha=0^\circ$) baskı plakası kuvvetlerinin kap yüksekliği üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi en büyük çekme oranı, baskı plakası kuvvetinin 4900 N olduğu durumda LÇO $\beta=2,30$ olarak elde edilmiştir. Baskı plaka kuvvetinin daha yüksek olduğu durumlarda ise limit çekme oranının düştüğü görülmektedir.



Şekil 5.12. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a: Deneysel, b: Sayısal: $\alpha=0^\circ$)



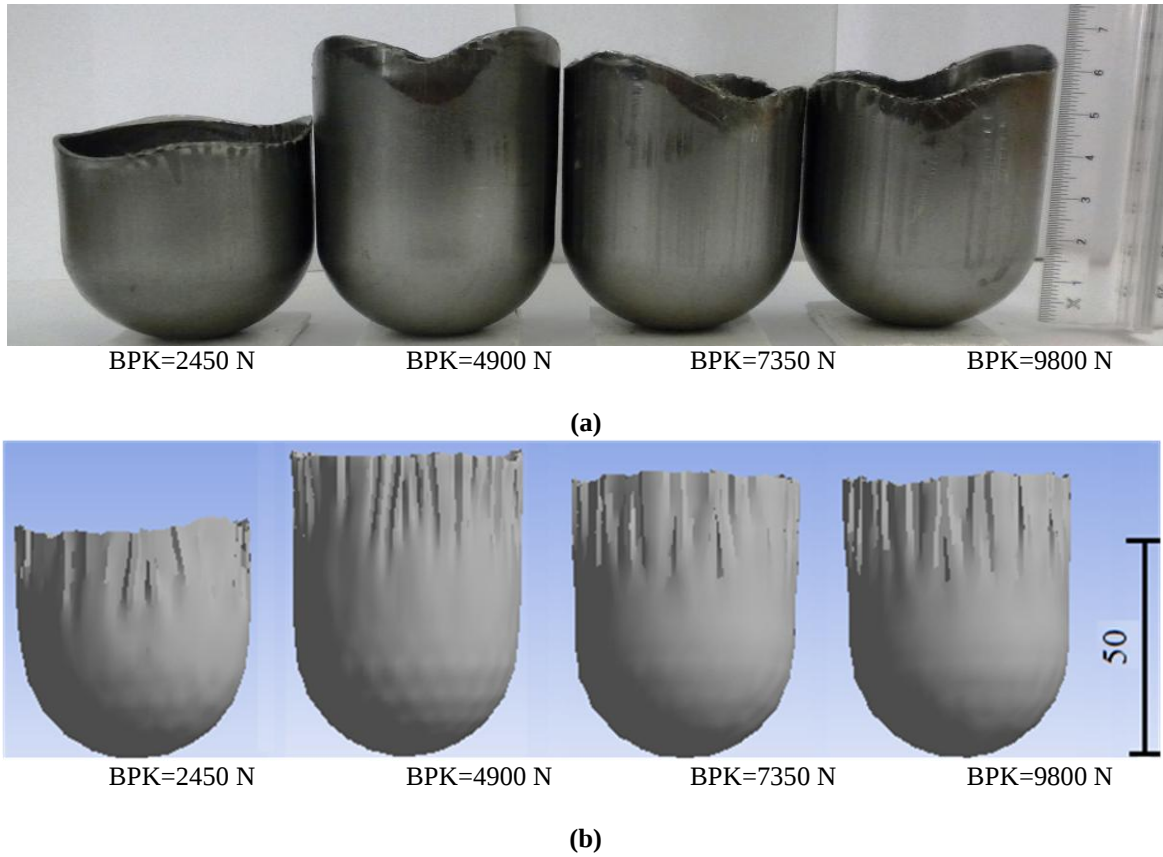
Şekil 5.13. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=0^\circ$)

Aynı deneylerde ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.13’de görülmektedir. Şekil incelendiğinde, baskı plaka kuvvetinin BPK=2450 N olduğu deneyde kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetindeki değişimin diğer BPK değerlerinden farklı olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Zımba kuvvetlerindeki bu ani artışlar, kesit daralması ve yetersiz baskı kuvvetlerinden dolayı oluşan kırışıklıkların kalıp boşluğuna

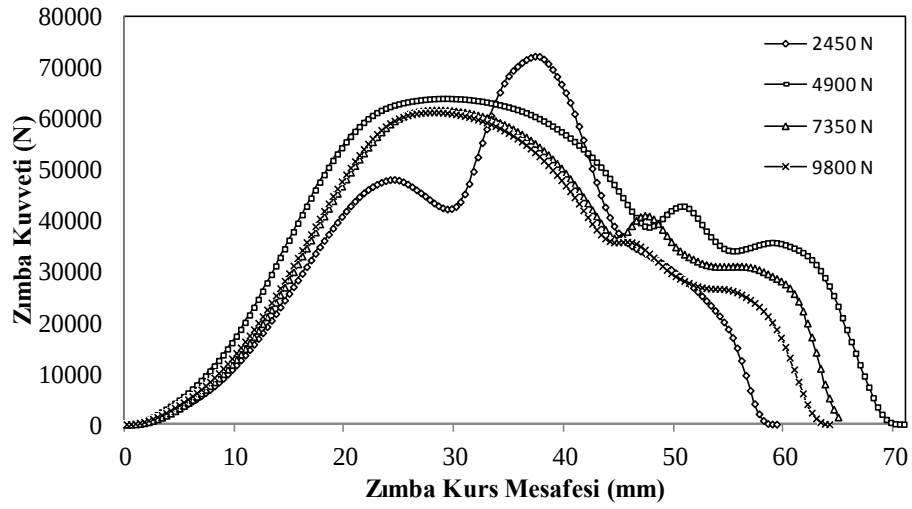
sıkışmasından kaynaklanmaktadır. Baskı plaka kuvvetinin artmasıyla, bu durumun ortadan kalktığı görülmektedir.

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=2,5^\circ$ olan kalıpta, BPK=2450 N için LÇO $\beta=1,98$ ve EBZK 72103,5 N; BPK=4900 N için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 63863,1 N; BPK=7350 N için LÇO $\beta=2,19$ ve EBZK 60606,8 N; BPK=9800 N için LÇO $\beta=2,19$ ve EBZK 60913,3 N olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.14’de Matris/baskı plakası açısının $\alpha=2,5^\circ$ olduğu şartlarda, baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak verilmiştir. Matris açısının $2,5^\circ$ olduğu bu deneyde de 0° açısı değeri ile aynı limit çekme oranı sonuçları elde edilmiş ve en büyük çekme oranı 4900 N BPK değerinde LÇO $\beta=2,30$ olarak ölçülmüştür. Ancak, 2450 N BPK kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen kaplar karşılaştırıldıklarında, α ’nın $2,5^\circ$ olması ile numunede oluşan kırışıklıkların tamamen yok edildiği görülmektedir.



Şekil 5.14. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneysel, b:Sayısal: $\alpha=2,5^\circ$)

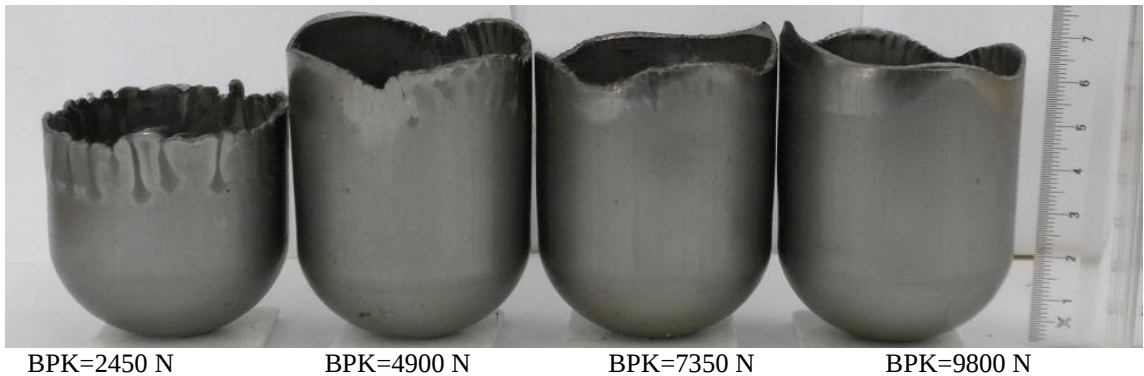


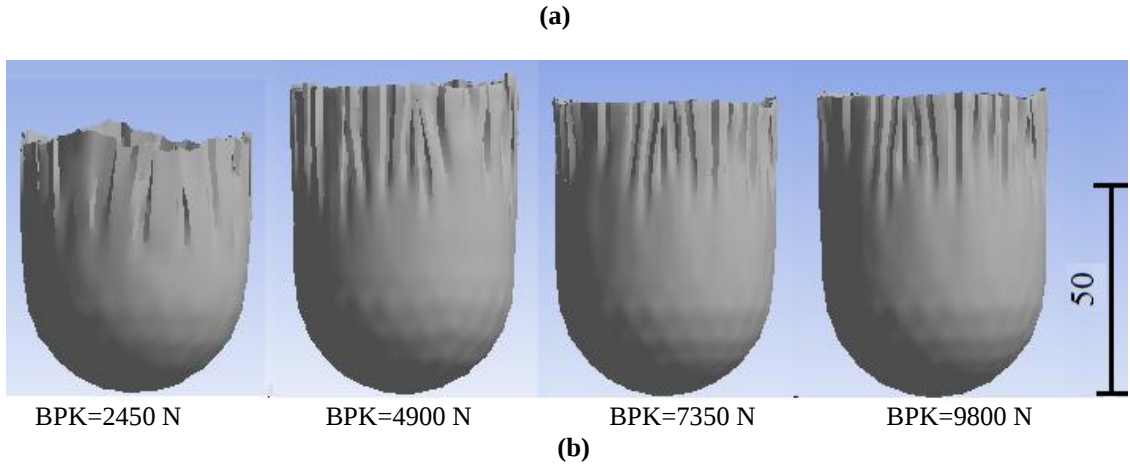
Şekil 5.15. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=2,5^\circ$)

Aynı deneylerde ölçülen zımba kuvvetleri ise şekil 5,15’da görülmektedir. Şekil incelendiğinde, baskı plakası kuvvetinin 2450 N olduğu durumlarda zımba kuvvetinin de arttığı görülmektedir.

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=5^\circ$ olan kalıpta, baskı plakası kuvveti BPK=2450 N için LÇO $\beta=2,09$ ve EBZK 63784,62 N; BPK=4900 N için LÇO $\beta=2,35$ ve EBZK 67237,74 N; BPK=7350 N için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 65314,98 N; BPK=9800 N için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 66225,5 N olarak elde edilmiştir.

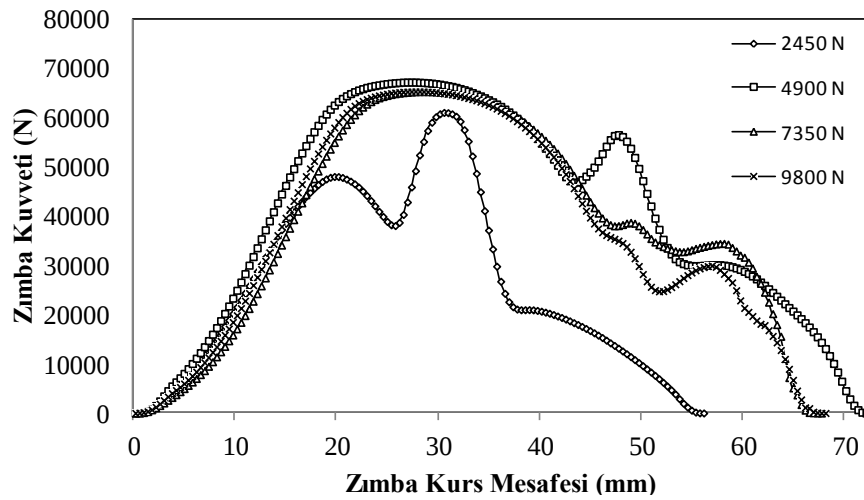
Şekil 5.16’da Matris/baskı plakası açısının $\alpha=5^\circ$ olduğu şartlarda, baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak verilmiştir





Şekil 5.16. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneyssel, b:Sayısal: $\alpha=5^\circ$)

Aynı deneylerde ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.17’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi maksimum çekme oranı, baskı plakası kuvvetinin 4900 N olduğu durumda LÇÖ $\beta=2,35$ olarak elde edilmiştir. Baskı plaka kuvvetinin artmasıyla limit çekme oranının da arttığı ve kırışıklıkların ortadan kalktığı görülmektedir.

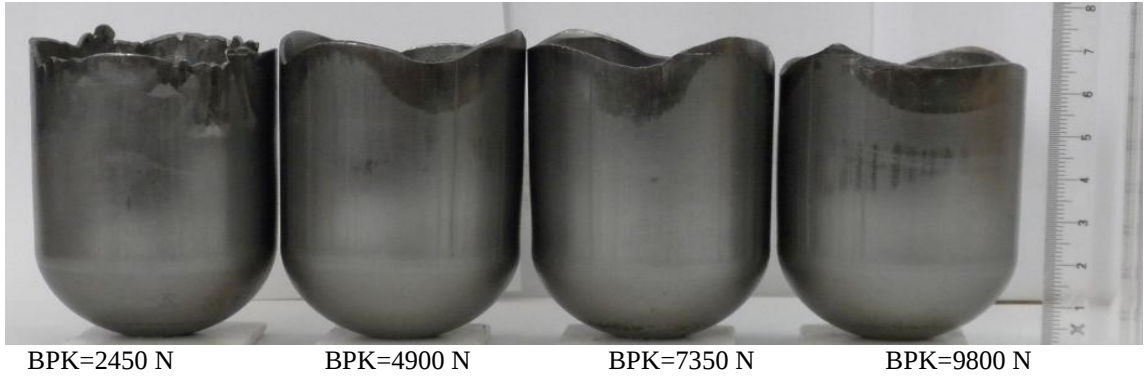


Şekil 5.17. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=5^\circ$)

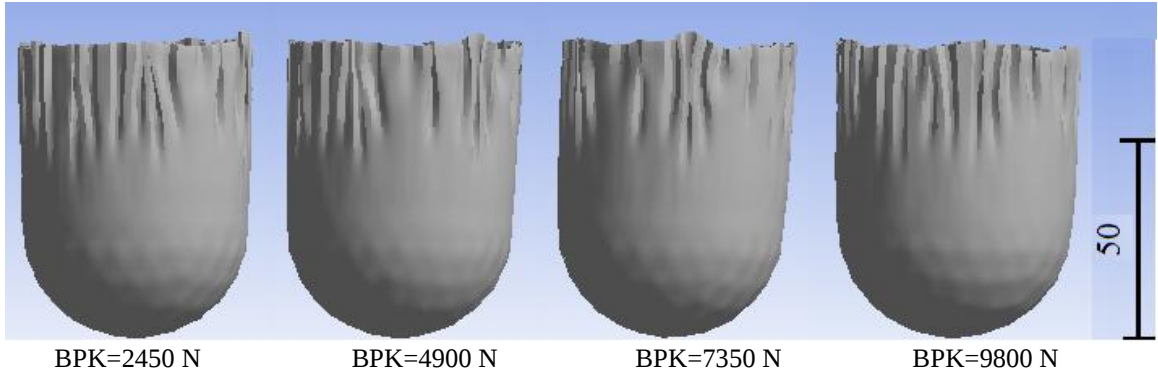
Matris/baskı plakası açısı $\alpha=7,5^\circ$ olan kalıpta, BPK=2450 N için LÇÖ $\beta=2,35$ ve EBZK 63588,42 N; BPK=4900 N için LÇÖ $\beta=2,35$ ve en EBZK 66139,02 N; BPK=7350 N için LÇÖ $\beta=2,35$ ve EBZK 66472,56 N; BPK=9800 N için LÇÖ $\beta=2,30$ ve EBZK 64225,5 N olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.18’de Matris/baskı plakası açısının $\alpha=7,5^\circ$ olduğu şartlarda, baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi deneyssel ve sayısal olarak verilmiştir. Aynı

deneylerde ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.19’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi açının artmasıyla limit çekme oranları belirgin bir şekilde artmaktadır. limit çekme oranları 2450 N, 4900 N ve 7350 N BPK değerlerinde LÇO $\beta=2,35$ olarak ölçülmüştür. Burada aynı limit çekme değeri elde edilmesine rağmen, 2450 N baskı plakası kuvvetinin yeterli baskıyı sağlayamaması nedeniyle bu kuvvet değerinde elde edilen numunelerde kırışıklıklar oluşmaktadır.

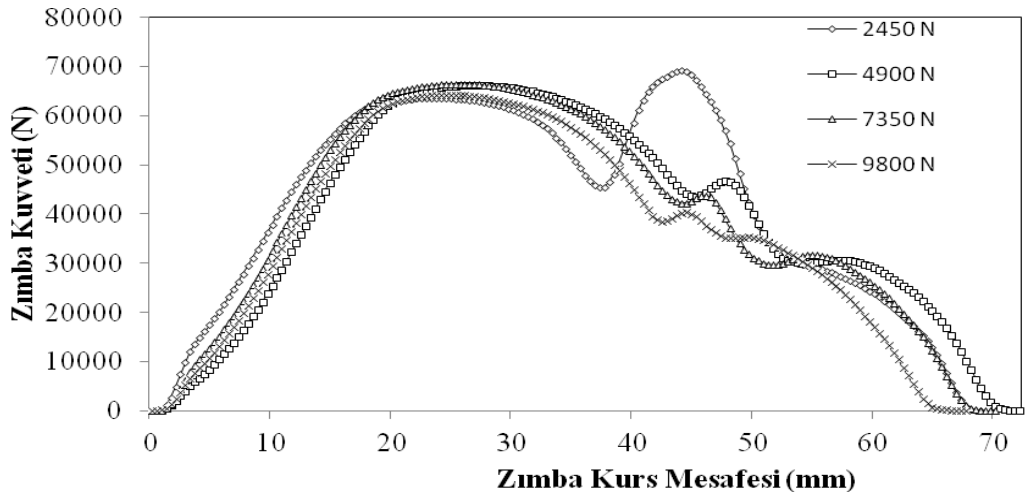


(a)



(b)

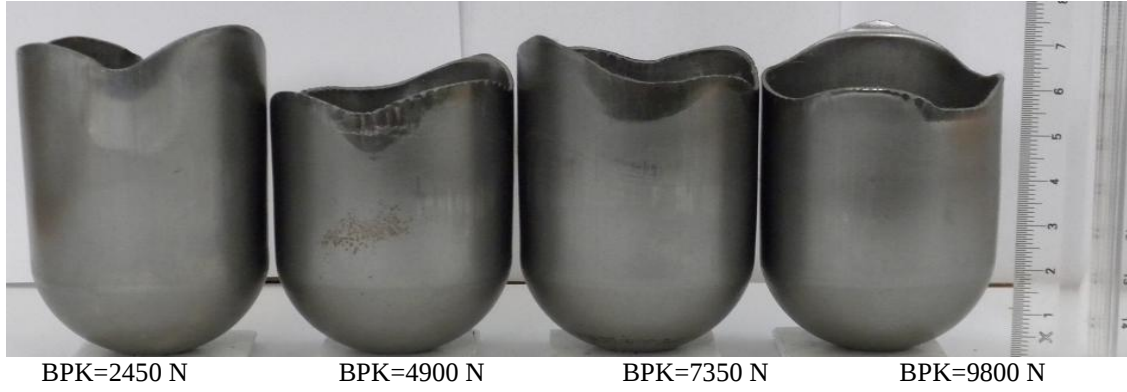
Şekil 5.18. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:Deneyssel, b:Sayısal: $\alpha=7,5^\circ$)



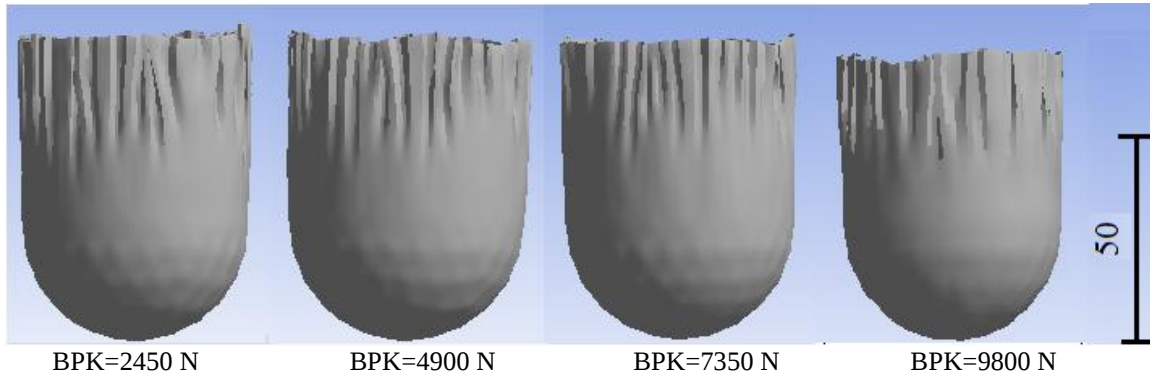
Şekil 5.19. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=7,5^\circ$)

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ olan kalıpta, baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için LÇO $\beta=2,35$ ve EBZK 62276,36 N; $BPK=4900$ N için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 62999,82 N; $BPK=7350$ N için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 63627,66 N; $BPK=9800$ N için LÇO $\beta=2,24$ ve EBZK 61116,3 N olarak elde edilmiştir.

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=10^\circ$ olan kalıpta, farklı BPK' kullanılarak elde edilen deney numuneleri Şekil 5.20'de ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.21'de verilmiştir. Numuneler değerlendirildiğinde, en büyük limit çekme oranının 2450 N değerinde elde edildiği görülmektedir. Bu deneyde LÇO $\beta=2,35$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuç çekme kuvvetleri ölçüm sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde, özellikle yüksek matris aç değerlerinde radyal kuvvetlerdeki azalmaya bağlı olarak BPK'lerinin de nispeten artması ile ilişkilendirilebilir. Düşük aç değerlerinde yetersiz olan 2450 N'luk baskı kuvveti, α 'nın 10° olması ile numune yüzeyine daha homojen bir baskı sağlamakta ve sonuç olarak yırtılma olmadan LÇO değeri de artmaktadır.

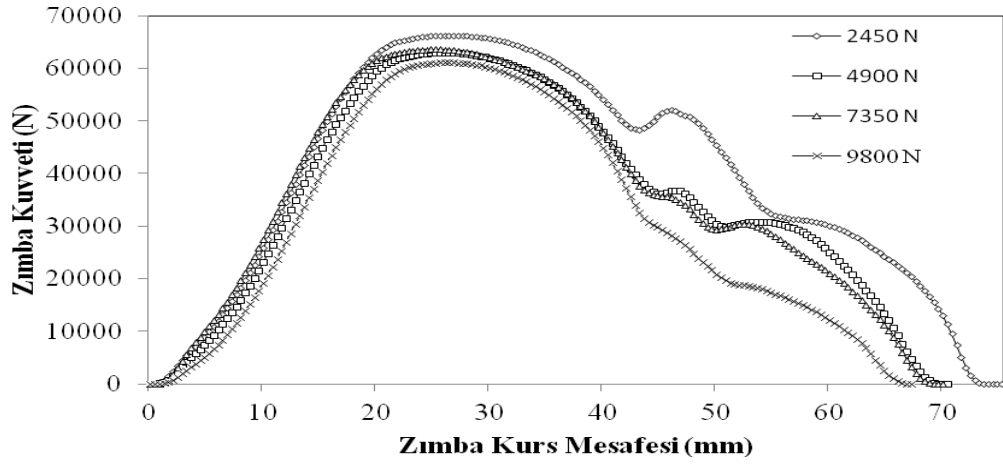


(a)



(b)

Şekil 5.20. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:DeneySEL, b:Sayısal: $\alpha=10^\circ$)

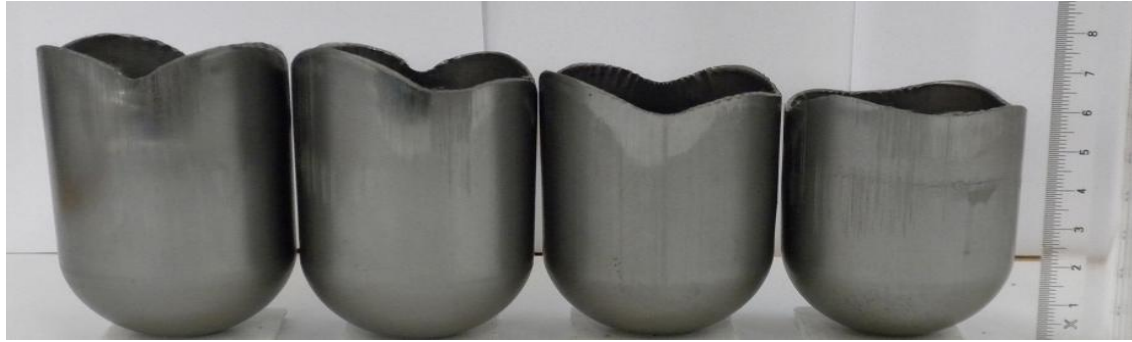


Şekil 5.21. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=10^\circ$)

Matris/baskı plakası açısı $12,5^\circ$ olan kalıpta, BPK=2450 N için LÇO $\beta=2,40$ ve EBZK 64942,2 N; BPK=4900 N için LÇO $\beta=2,38$ ve EBZK 64706,76 N; BPK=7350 N için LÇO $\beta=2,30$ ve EBZK 60549 N; BPK=9800 N için LÇO $\beta=2,24$ ve EBZK 59272,02 N olarak elde edilmiştir. Matris/baskı plakası açısı $\alpha=12,5^\circ$ olan kalıpta, farklı BPK'leri

kullanılarak elde edilen deney numuneleri Şekil 5.22’de ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.23’de verilmiştir.

Maksimum limit çekme oranı 2450 N’da LÇO $\beta=2,40$ olarak elde edilmiştir. B değerinin daha da artması, benzer şekilde radyal kuvvetlerdeki azalma oranı ile ilişkilendirilebilir



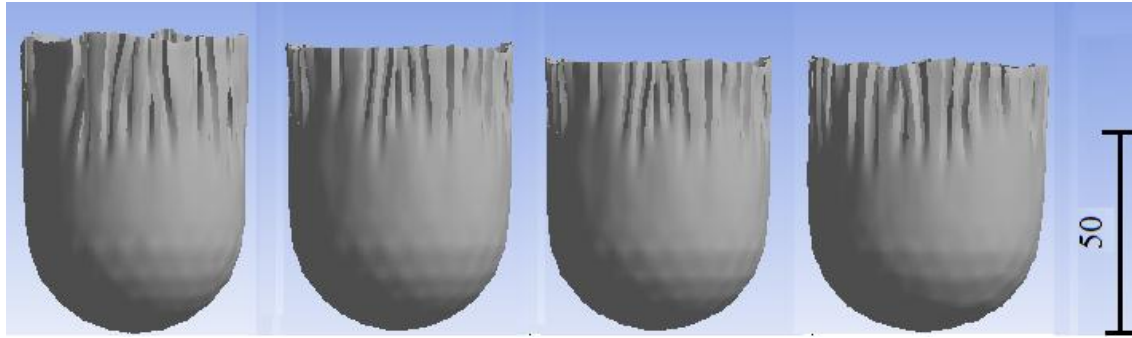
BPK=2450 N

BPK=4900 N

BPK=7350 N

BPK=9800 N

(a)



BPK=2450 N

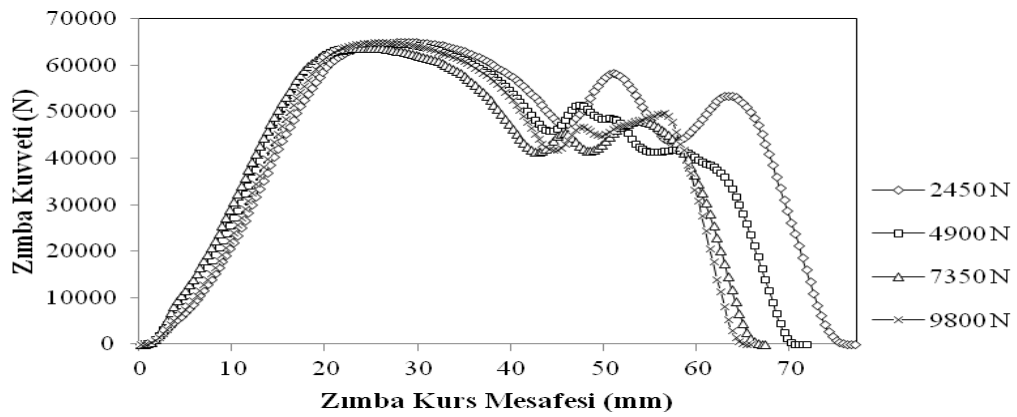
BPK=4900 N

BPK=7350 N

BPK=9800 N

(b)

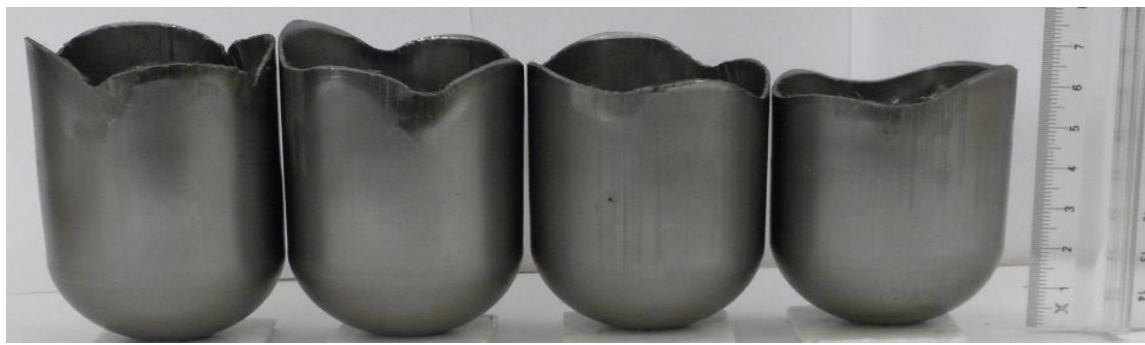
Şekil 5.22. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:DeneySEL, b:Sayısal: $\alpha=12,5^\circ$)



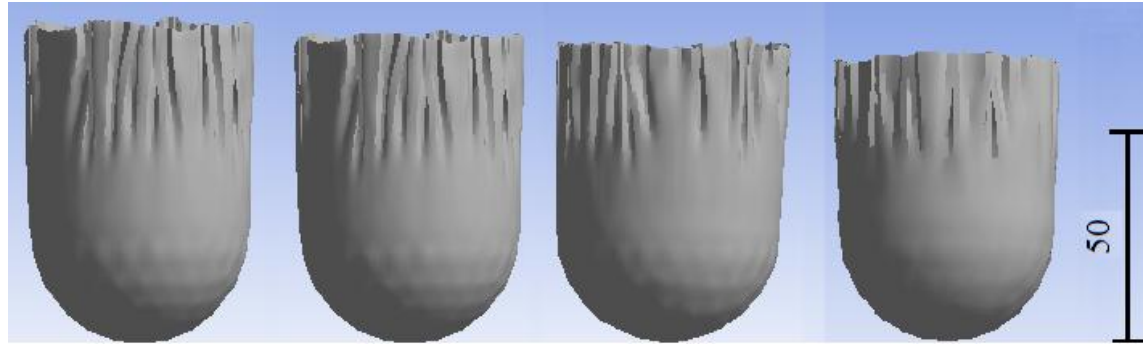
Şekil 5.23. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=12,5^\circ$)

Matris/baskı plakası açısı 15° olan kalıpta, baskı plakası kuvveti $BPK=2450$ N için LÇO $\beta=2,42$ ve EBZK 64804,86 N; $BPK=4900$ N için LÇO $\beta=2,38$ ve EBZK 64098,54 N; $BPK=7350$ N için LÇO $\beta=2,35$ ve EBZK 63980,82 N; $BPK=9800$ N için LÇO $\beta=2,24$ ve EBZK 58940,7 N olarak elde edilmiştir.

Matris/baskı plakası açısı $\alpha=15^\circ$ olan kalıpta, farklı BPK kullanılarak elde edilen deney numuneleri Şekil 5.24'de ve deneyler esnasında ölçülen zımba kuvvetleri ise Şekil 5.25'de verilmiştir. Benzer şekilde, 2450 N değerinde en yüksek LÇO değeri 2,42 olarak ölçülmüştür.

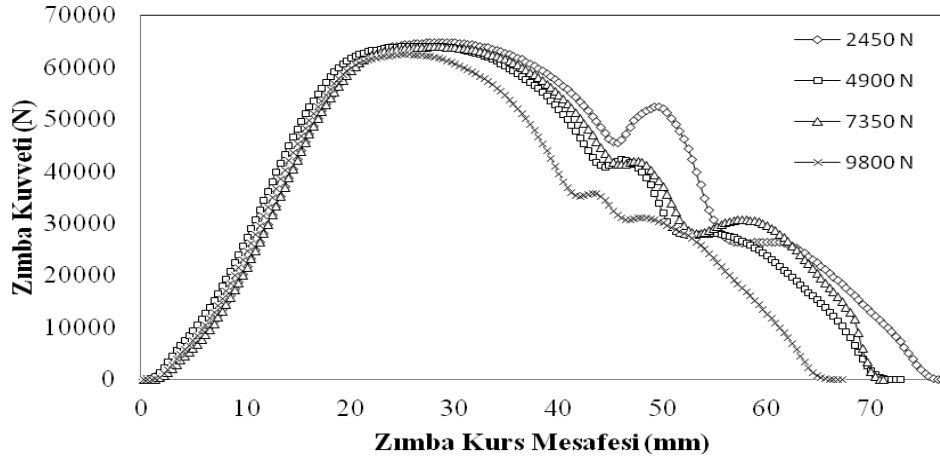


(a)

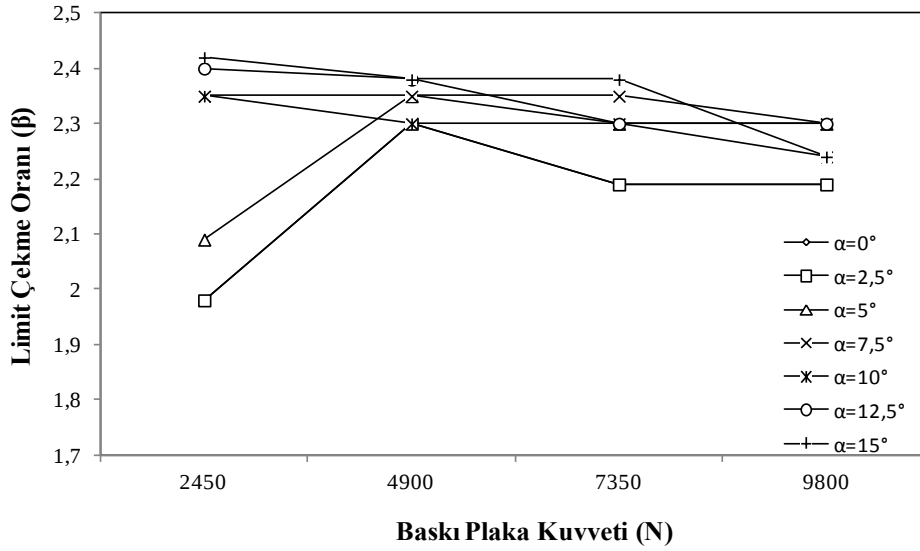


(b)

Şekil 5.24. Baskı plakası kuvvetinin kap yüksekliği üzerindeki etkisi (a:DeneySEL, b:Sayısal: $\alpha=15$)



Şekil 5.25. Kurs mesafesine bağlı olarak ölçülen zımba kuvvetleri ($\alpha=15^\circ$)



Şekil 5.26. Baskı plakası kuvvetlerinin (BPK) çekme oranı (β) üzerindeki etkisi

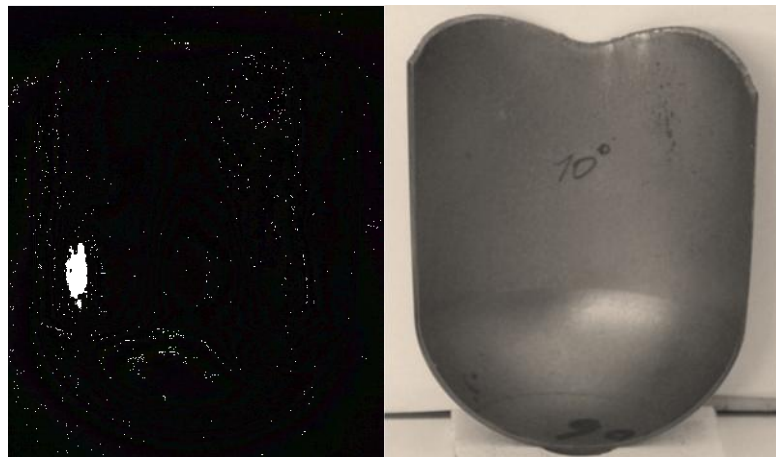
Şekil 5.26'da baskı plaka kuvvetinin β üzerindeki etkisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, α açısının 0° - $2,5^\circ$ ve 5° olduğu durumlarda en yüksek LÇO değerleri, baskı plaka kuvvetinin 4900 N olduğu şartlarda elde edilmiştir. Ancak α 'nın LÇO üzerinde ideal baskı plaka kuvveti 2450 N olarak belirlenmiştir. α açısının artmasıyla sac malzemenin matris içerisine akışı kolaylaşmakta ve meydana gelen gerilmeler de azalmaktadır. 0° açıda $\beta=1,98$ çekme oranı elde etmek için gerekli zımba kuvveti 73418,04 N iken, $\alpha=15^\circ$ açıda $\beta=2,42$ çekme oranı elde etmek için gerekli zımba kuvveti 64804,86 N'dir. Dolayısıyla matris açısının limit çekme oranı üzerinde oldukça büyük bir etkisinin olduğu söylenebilir.

5.3. Derin Çekme Parametrelerinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Derin çekme yönteminde, dikkat edilmesi gereken hususlardan biri de çekilen kabın et kalınlığında meydana gelen değişimlerdir. Başarılı bir çekme işlemi için; et kalınlığının kontrolü, hem üretilen parçanın kalitesini artırır hem de çekme esnasında meydana gelebilecek hasarların önlenmesi açısından büyük önem arz eder.

Derin çekme işlemi sırasında, iş parçası üzerinde meydana gelen çeşitli gerilmelerin etkisi ile et kalınlığı değişmektedir. Bu gerilmeleri etkileyen faktörler; kalıp açısı, baskı plakası kuvveti (BPK), matris/zimba radyüsü veya farklı geometrilere sahip zimbalar şeklinde sıralanabilir. Alt yüzeyi düz ve kenarları radyüslü olan zimbaların kullanıldığı derin çekme işleminde, iş parçasının taban kısmında et kalınlığı değişmez. Küresel kesitli zimbaların kullanıldığı işlemlerde, iş parçasının taban bölgesinde ve yan yüzeyinden küresel formun başladığı kısımlarda incelmeler, duvarının üst kısmında ise kalınlaşmalar meydana gelmektedir.

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen numuneler, et kalınlıklarının incelenmesi amacıyla tel erezyon tezgahında kesilmiştir. Kesilen kabın duvar yüzeyleri hadde yönüne göre 0°, 45° ve 90°'lik açılarda merkezden kabın dış yüzeyine doğru 5 mm aralıklarda işaretlenerek tespit edilmiştir. Kesilmiş ve ölçüm noktalarının gösterildiği numune Şekil 5.27'de, QLR marka 10^{-4} mm hassasiyetindeki dijital mikrometre ile belirlenen noktaların et kalınlıklarının ölçülmesi ise Şekil 5.28'de verilmiştir.



Şekil 5.27. Et kalınlığı ölçümü için hazırlanan numune



Şekil 5.28. Et kalınlığının ölçülmesi

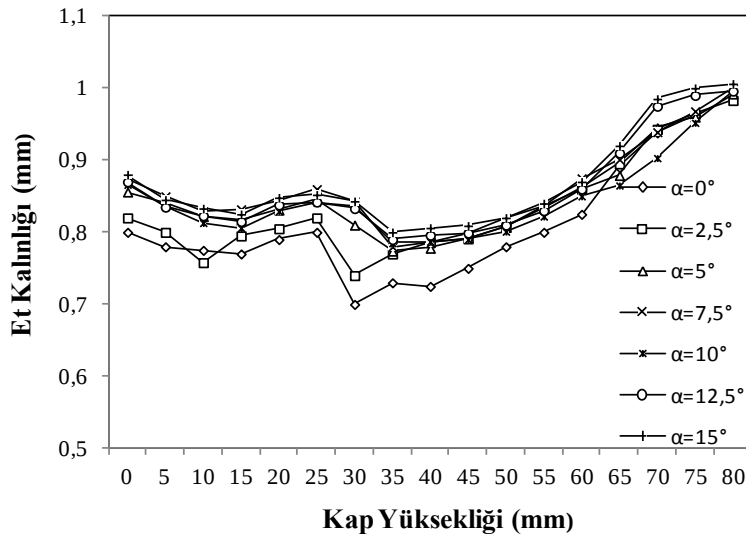
5.3.1. Matris/Baskı Plakası Açısının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

Derin çekme yönteminde karşılaşılan problemlerden bir tanesi de, elde edilen ürünün her bölgesinde homojen olmayan bir kalınlık dağılımının oluşmasıdır. Kalıp elemanlarının sahip olduğu geometri, şekil, konum, yüzey kalitesi, ölçü aralıkları ve kalıplama geometrilerine bağlı olarak, iş paçası; yönü ve şiddeti değişen birçok farklı gerilmelere maruz kalmaktadır. Dolayısıyla gerilme dağılımı, malzemenin yüzey alanı boyunca homojen olmamakta ve gerilme yoğunlaşmasına bağlı olarak elde edilen üründe çatlak veya yırtılma şeklinde hasarlar meydana gelmektedir. Daha homojen bir gerilme dağılımı sağlamak amacıyla, genellikle kalıplama işlemi kademeli olarak yapılmaktadır. Buda işlem sayısını, dolayısıyla maliyet ve zamanı arttırmaktadır. Ancak açılı kalıplar kullanılarak, işlem sayısı azaltılmakta ve et kalınlığı değişimi belirli bir oranda tutulmaktadır.

Şekil 5.29’da sabit β ve BPK ($\beta=2,30$ ve BPK=4900N) değerlerinde kürenin merkezinden başlayıp yan yüzeye dik istikamette eşit aralıklarla yapılan et kalınlığı ölçümü sonuçları verilmiştir. Şekilde, çekme işlemine başlandığı ve küresel ucun matris içerisine tamamen daldığı ve kap yüksekliğinin 0-25 mm olduğu aralıkta et kalınlığının tüm matris açısı değerlerinde azaldığı görülmektedir. Bu aralıkta et kalınlığı 0,75-0,87 mm aralığında değişmektedir. Numunenin yan duvarının sona erdiği ve küresel geometriye geçildiği kritik bölgede kap yüksekliğinin 25-35 mm olduğu aralıkta incelmeler daha da artmaktadır. Bu bölgede et kalınlığı değeri 0,70-0,80 mm aralığında değişmektedir. Kabın

üst bölgelerine doğru (35 mm'den sonra), et kalınlığının kademeli olarak arttığı ve sac kalınlığından daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir.

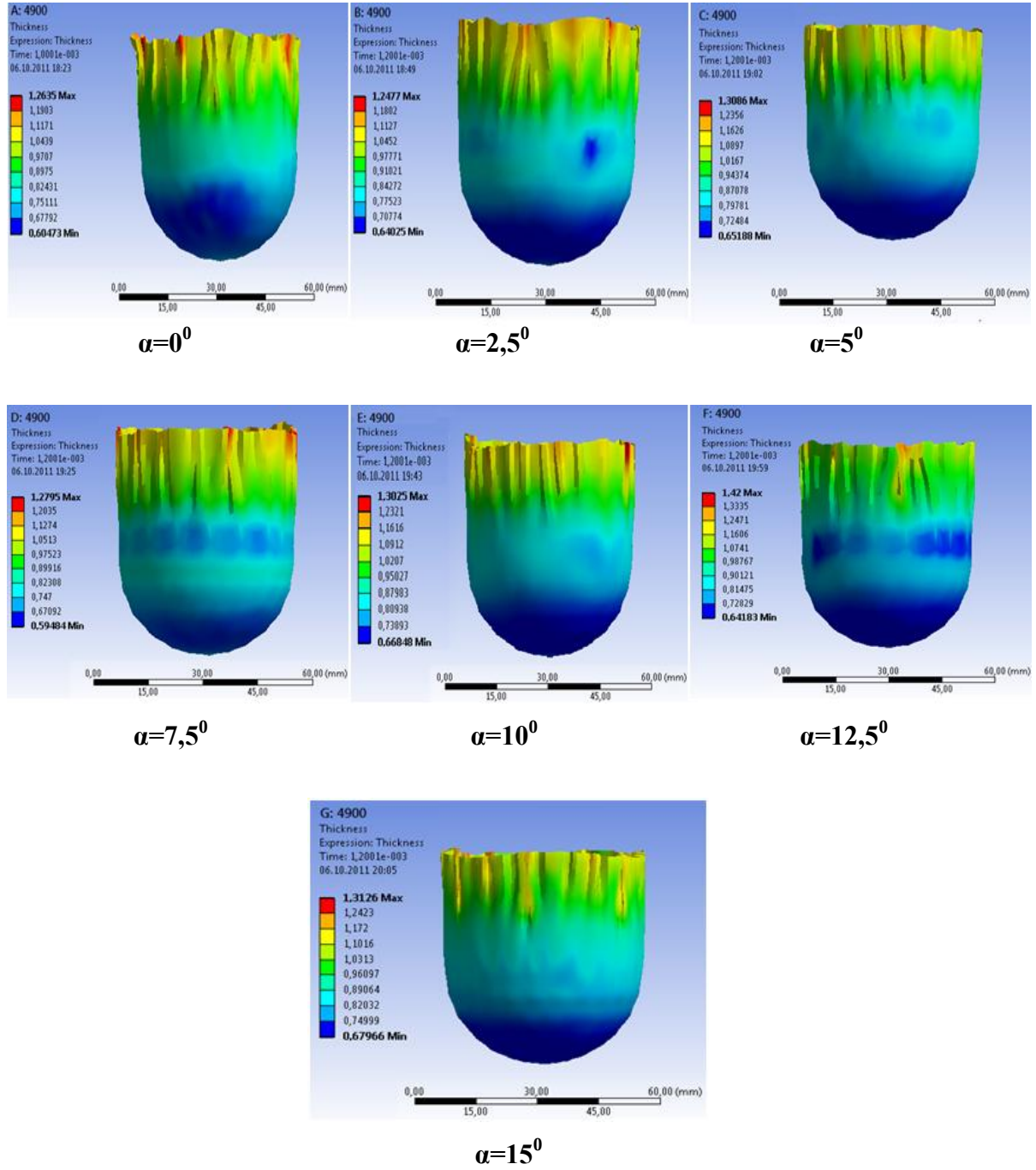
Tüm matris/baskı plakası açi değerlerinde et kalınlığının kap yüksekliği boyunca benzer eğilim gösterdiği görülmektedir. Ancak yüksek matris/baskı plakası açi değerlerinde incelmeler azalmakta ve et kalınlığı yaklaşık olarak sac kalınlığı ile aynı değerlerde kalmaktadır. Bu durum, α değerlerinin artmasıyla kalıp içerisine malzeme akışının kolaylaşmasını ve dolayısıyla gerekli çekme kuvvetinin azalmasıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 5.29. α açısı değişiminin et kalınlığı üzerindeki etkisi

Deneyssel ölçümlerin yanı sıra, paket program kullanılarak yapılan et kalınlığı analizleri de benzer sonuçlar vermektedir. Şekil 5.30'da farklı kalıplama parametrelerine bağlı olarak yapılan analiz sonuçları verilmiştir. Sabit LÇO ve BPK değerlerinde ($\beta=2,30$ ve $BPK=4900$ N) farklı matris açılarında et kalınlığı için yapılmış analiz sonuçları genel olarak incelendiğinde kabın kritik ve üst bölgelerinde et kalınlığı değerleri sırasıyla; $\alpha=0^\circ$ için kritik bölgedeki et kalınlığı değeri 0,6047 mm iken üst bölgede bu değer 1,2635 mm; $\alpha=2,5^\circ$ için kritik bölgedeki et kalınlığı değeri 0,6402 mm iken üst bölgede bu değer 1,2477 mm; $\alpha=5^\circ$ için kritik bölgedeki et kalınlığı değeri 0,6518 mm iken üst bölgede bu değer 1,3086 mm; $\alpha=7,5^\circ$ için kritik bölgedeki et kalınlığı değeri 0,5948 mm iken üst bölgede bu değer 1,2795 mm; $\alpha=10^\circ$ için kritik bölgedeki et kalınlığı değeri 0,6684 mm iken üst bölgede bu değer 1,3025 mm; $\alpha=12,5^\circ$ için kritik bölgedeki et kalınlığı değeri 0,6418 mm iken üst bölgede bu değer 1,42 mm; $\alpha=15^\circ$ için kritik bölgedeki et kalınlığı

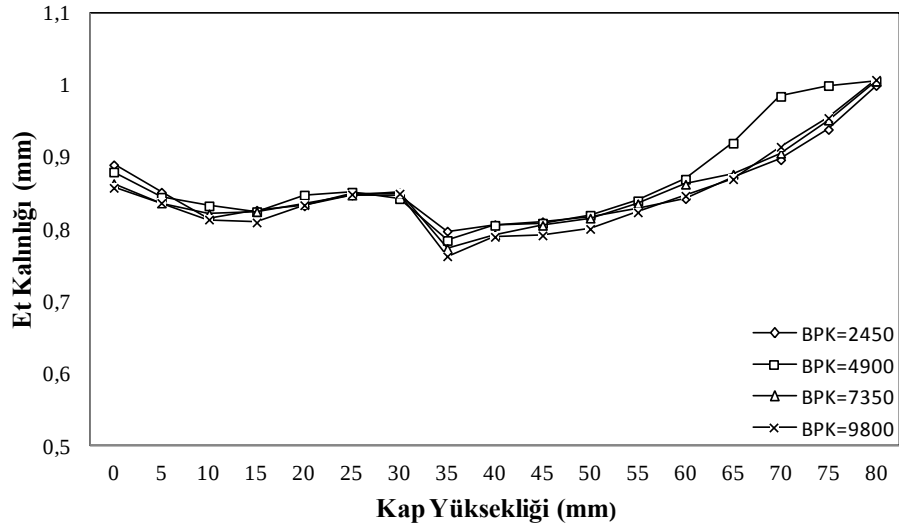
değeri 0,6796 mm iken üst bölgede bu değer 1,3126 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, kabın alt bölgelerinde (küresel kısım) et kalınlığında bir azalma meydana gelmektedir. Bu azalma, kritik bölgede daha da artmaktadır. Ancak, kabın üst bölgelerine doğru gidildikçe et kalınlığı değerlerinde bir artış söz konusudur.



Şekil 5.30. Matris baskı plakası açısının et kalınlığı üzerindeki bilgisayar analizi sonucu ($\beta=2,30$ ve BPK=4900 N).

5.3.2. Baskı Plakası Kuvvetinin Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi

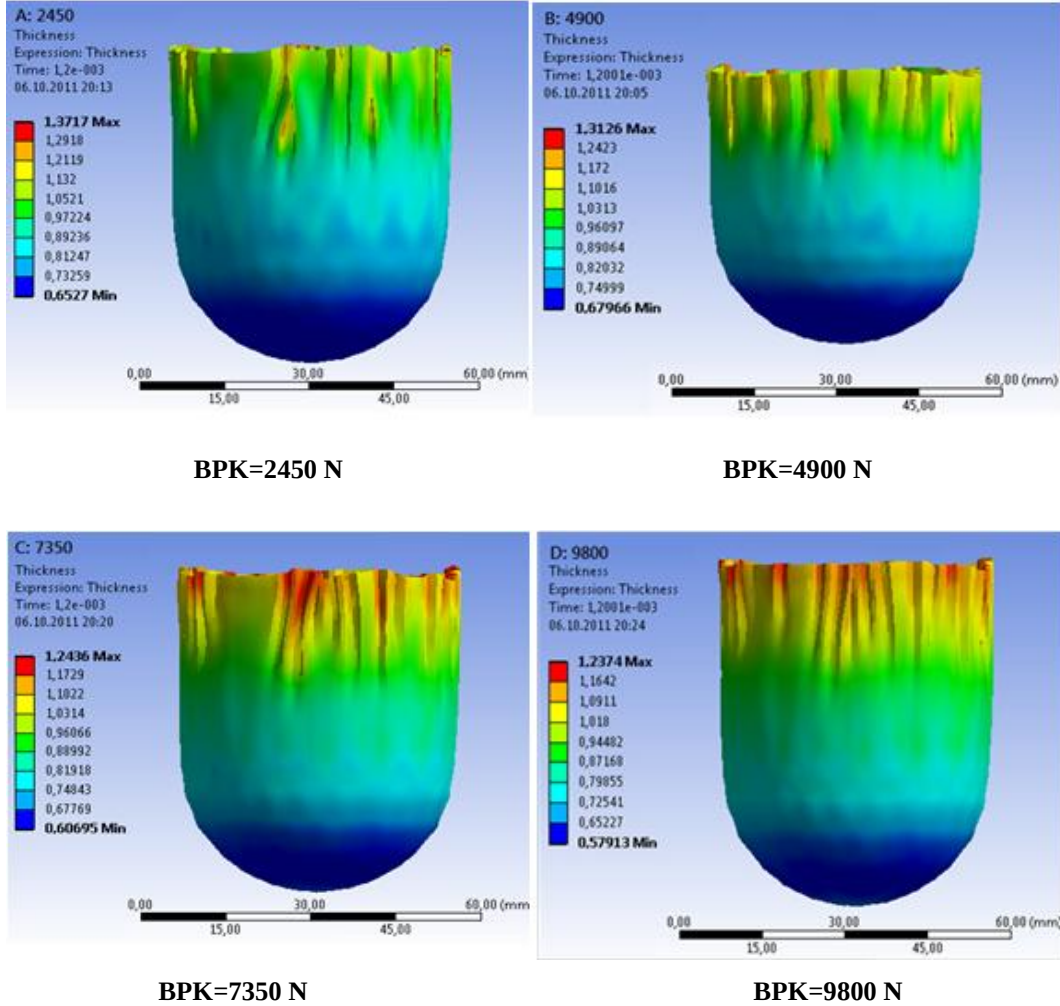
Şekil 5.31’de sabit β ve α ($\beta=2,30$ ve $\alpha=15^\circ$) değerlerinde, BPK’nın et kalınlığı üzerindeki etkisi görülmektedir. Baskı plakası kuvveti arttıkça kap et kalınlığında da bir azalma görülmektedir. Et kalınlığı değerleri sırasıyla, 2450N’ da 0,798 mm; 4900 N’da 0,785 mm; 7350 N’da 0,774mm; 9800 N’da 0,763 mm olarak ölçülmüştür. Baskı plakası kuvvetinin artmasıyla, malzeme-kalıp arasındaki radyal gerilmeler artmakta, artan radyal gerilmeler sürtünme kuvvetlerini de artırmaktadır. Sürtünme kuvvetinin artması, malzemede daha yüksek çekme gerilmelerinin oluşmasına yol açmakta ve bu nedenle daha fazla incelleme meydana gelmektedir



Şekil 5.31. Baskı plaka kuvvetinin (BPK) et kalınlığı üzerindeki etkisi

Şekil 5.32’de sabit limit çekme oranı ve matris baskı plakası açısı değerlerinde ($\beta=2,30$ ve $\alpha=15^\circ$) farklı baskı plaka kuvvetleri kullanılarak, kap et değişimini gösteren analiz sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar genel olarak incelendiğinde kabın kritik ve üst bölgelerinde et kalınlığı değeri sırasıyla; BPK=2450 N için kritik bölgedeki et kalınlığı değeri 0,6527 mm iken üst bölgede bu değer 1,3717 mm; BPK=4900 N için kritik bölgedeki et kalınlığı değeri 0,6796 mm iken üst bölgede bu değer 1,3126 mm; BPK=7350 N için kritik bölgedeki et kalınlığı değeri 0,6069 mm iken üst bölgede bu değer 1,2436 mm; BPK=9800 N için kritik bölgedeki et kalınlığı değeri 0,5791 mm iken üst bölgede bu değer 1,2374 mm olarak ölçülmüştür. Veriler değerlendirildiğinde; analiz sonuçlarının,

deneysel sonuçlarla aynı paralelde olduğu ve BPK arttıkça kap et kalınlığında bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.32. Matris baskı plakası kuvvetinin et kalınlığı üzerindeki bilgisayar analizi sonucu ($\beta=2,30$ ve $\alpha=15^\circ$).

5.4. İlkel Parça Çapının Kap Hasarları Üzerindeki Etkisi

Şekil 5.33’de, farklı ilkel parça çaplarında çekilen numunelerde meydana gelen değişik yırtılma ve çatlak hasarları görülmektedir. Çekilen kapların üst kısımlarında buruşma ve kulaklanma, küresel zımba radyüsünün başladığı yerde, dairesel yırtılma ve çatlak şeklinde hasarların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bilindiği gibi, ilkel parça çapı büyüdükçe sacı plastik deformasyona uğratmak için gerekli zımba kuvveti artmaktadır. Zımba kuvvetinin artması, derin çekme esnasında oluşan gerilmelerin artmasına yol açmaktadır. Bu nedenle derin çekme esnasında oluşan daha büyük çekme gerilmelerine mukavemet gösteremeyen iş parçasında yırtılmalar meydana gelmekte ve işlem

başarısızlıkla sonuçlanmaktadır. Baskı plakası kuvvetinin (BPK) fazla olduğu durumlarda, yırtılmalar genellikle kabın alt kısımlarında oluşmaktadır. BPK'nın düşük olduğu durumlarda ise kırışıklıkların artmasından dolayı kabın üst kısımlarında aşırı buruşmalar meydana gelmekte ve buda üst kısımlarda yırtılmaların oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 5.33. Farklı ilkel parça çaplarında çekilen numunelerde meydana gelen değişik yırtılma ve çatlak hasarları

Farklı ilkel parça çaplarında çekilen numunelerin kulaklanmış kısımlarının traşlandıktan sonraki görünümü Şekil 5.34’de verilmiştir.



Şekil 5.34. Farklı ilkel parça çaplarında çekilen numunelerin kulaklanmış kısımlarının traşlandıktan sonraki görünümü

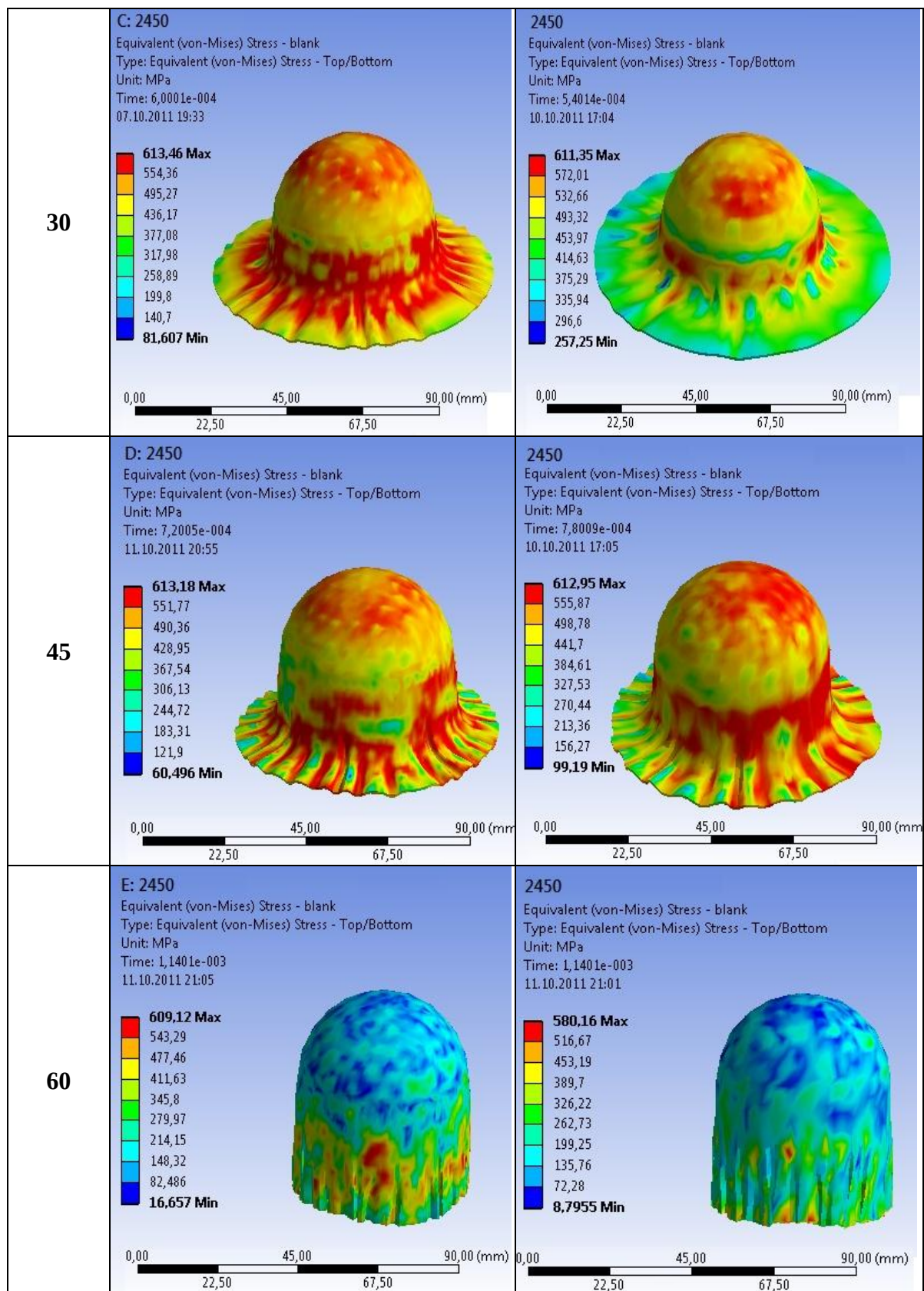
5.5. Zimba Kurs Mesafesinin Gerilmeye Etkisi

Zimba kurs mesafesine bağlı olarak numunelerde meydana gelen gerilmelerin değişimi Tablo 5.1’de verilmiştir. Bu gerilmeler kurs boyu ile ilişkilendirildiğinde, 15 mm’ye kadar kabın merkezinde oluşan gerilme bölgelerinin kademeli olarak arttığı görülmektedir. Zimbanın küresel ucunun, çekilen malzemenin içine tamamen daldığı 30 mm ile 45 mm’lik kurs mesafesinde toplam gerilme değerlerinde ve gerilme bölgelerinde belirgin bir artış olmaktadır. Bu artış; kurs boyunun artmasıyla birlikte, kalıp içerisine

itilen malzeme miktarının artması ve kabın kenarlarında oluşan ondülasyonların matris içerisine itilmesinin zorlaşması ve dolayısıyla, daha fazla çekme kuvvetine ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır. Çekme işleminin tamamlandığı 60 mm kurs boyunda ise gerilme bölgelerinde ani bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir. BPK=2450N olduğu durumda matris/baskı plakası açısı $\alpha=7,5^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ için zımba kurs mesafesi değişiminde oluşan gerilme dağılımları karşılaştırıldığında, kurs mesafesinin her durumu için $\alpha=15^\circ$ 'lik kalıpta oluşan en büyük gerilme değerlerinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, kalıp açısının gerilmeleri azalttığı düşünülmektedir.

Tablo 5.1. Zımba kurs mesafesine bağlı olarak sayısal analiz metodu ile elde edilen numunelerde meydana gelen gerilmelerin değişimi

Zımba kurs mesafesi (mm)	Matris/baskı plakası açısı	
	$\alpha=7,5^\circ$	$\alpha=15^\circ$
6	A: 2450 Equivalent (von-Mises) Stress - blank Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 1,2008e-004 07.10.2011 19:27 358,01 Max 330,72 303,44 276,15 248,87 221,58 194,29 167,01 139,72 112,44 Min	2450 Equivalent (von-Mises) Stress - blank Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 1,2006e-004 11.10.2011 20:38 335,21 Max 319,03 302,85 286,66 270,48 254,3 238,12 221,94 205,75 189,57 Min
15	B: 2450 Equivalent (von-Mises) Stress - blank Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 2,4006e-004 11.10.2011 20:14 411,12 Max 390,16 369,19 348,22 327,25 306,29 285,32 264,35 243,38 222,42 Min	2450 Equivalent (von-Mises) Stress - blank Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 2,4002e-004 11.10.2011 15:18 386,38 Max 367,26 348,13 329,01 309,88 290,76 271,64 252,51 233,39 214,27 Min



6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; 0,9 mm kalınlığında DIN EN 10130-1999 dekape sacının açılı kalıplarda küresel derin çekilebilirliği deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneylerde, matris/baskı plakası açıları ve BPK'leri belirli sınırlar içerisinde değiştirilmiştir. Derin çekme parametrelerinin LÇO ve et kalınlıkları üzerindeki etkileri araştırılmış ve aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

6.1. Genel Sonuçlar

- Matris/baskı plakası yüzeylerine açı değerlerinin artması, malzemenin kalıp içerisine akışının daha kolay olması sağlanmış ve bu sayede çekme işlemi olumlu yönde etkilenmiştir. Açının artmasıyla, limit çekme oranlarının da arttığı belirlenmiştir. Maksimum limit çekme oranı $\alpha=15^\circ$ ve BPK=2450 N değerinde $\beta=2,42$ olarak elde edilmiştir. Açı değerinin azalmasıyla, limit çekme oranında da azalmanın olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan artan açı değerlerinin zımba kuvvetlerini azalttığı ve buna bağlı olarak çekme işlemi sırasında ölçülen maksimum zımba kuvvetinin de azaldığı gözlenmiştir. Diğer yandan et kalınlığı değerleri artan açı değerleri ile beraber artış göstermiştir.
- Yapılan çalışmalar sonucunda, limit çekme oranı, zımba kuvveti ve et kalınlığı ile baskı plakası kuvvetinin doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Baskı kuvvetinin düşük değerlerde olması, sac malzeme üzerinde kırışıklıklara sebep olmakta, oluşan bu kırışıklıklar da malzemelerin daha erken kurs mesafelerinde yırtılmasına, çekme oranlarının düşmesine ve zımba kuvvetlerinin de artmasına yol açmaktadır. Baskı plakası kuvvetinin, olması gereken değerlerin üzerinde seçilmesi durumunda ise, zımba kuvvetini artırdığı ve çekilen kaptaki kulaklanmalara yol açtığı gözlenmiştir. Baskı plakası kuvvetinin düşük değerlerinde, sürtünme kuvvetinin azalmasına bağlı olarak çekilen kabın kritik bölgesindeki et kalınlığının arttığı, tersi durumunda ise et kalınlığında azalmanın olduğu belirlenmiştir.

- Küresel olarak işlenmiş zımbanın, tabanı düz ve kenarlarına radyüs verilerek işlenmiş zımbalara nazaran küresel alana daha homojen bir şekilde yayılmakta ve malzeme yüzeyindeki gerilmeler azalmaktadır.
- Sonuç olarak; matris/baskı plakası yüzeylerine açıl verilmesi ve zımbanın küresel olarak işlenmesinin; limit çekme oranı, et kalınlığı ve zımba kuvveti üzerinde olumlu etkiler meydana getirdiğı, deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir.

6.2. Öneriler

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, aşağıdaki önerilerde bulunulabilir;

- Çalışmada kullanılan dekape sacının, ılık ve sıcak plastik şekillendirilebilirliği de araştırılabilir.
- Alüminyum, bakır v.b. demir dışı malzemelerin de aynı yöntem kullanılarak derin çekilebilirliği araştırılabilir.
- Derin çekme işlemindeki çekme hızı, bilgisayarlı sayısal kontrollü (CNC) pres tezgahları kullanılarak daha kontrollü hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Savaş, V. and Seçgin, Ö.**, 2007, A new type of deep drawing die design and experimental results, *Materials and Design*, **28**, 1330–1333.
- [2] **Özek, C. and Bal, M.**, 2009, The Effect of Die/Blank Holder and Punch Radiuses on Limit Drawing Ratio in Angular Deep-Drawing Dies, *Int J Adv Manuf Technol*, **40**, 1077–1083.
- [3] **Özek, C., Ünal, E.**, 2011, Optimization and Modeling of Angular Deep Drawing Process for Square Cups, *Materials and Manufacturing Processes*, **26**:9, 1117-1125.
- [4] **Lin, J., Zhao, S.D., Zhang, Z.Y. and Wang, Z.W.**, 2009, Deep Drawing Using a Novel Hydromechanical Tooling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **49**, 73–80.
- [5] **Herrera, C., Lima, N.B., Filho, A.F., Plaut, R.L. and Padilha, A.F.**, 2009, Texture and Mechanical Properties Evolution of a Deep Drawing Medium Carbon Steel During Cold Rolling and Subsequent Recrystallization, *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 3518–3524.
- [6] **Van den Boscha, M.J., Schreurs, P.J.G. and Geers, M.G.D.**, 2009. On The Prediction of Delamination During Deep-Drawing of Polymer Coated Metal Sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 297–302.
- [7] **Plaut, R.L., Padilha, A.F., Lima, N.B., Herrera, C., Filho, A.F. and Yoshimura, L.H.**, 2009, Medium Carbon Steel Deep Drawing: A Study On The Evolution of Mechanical Properties, Texture and Simulations, From Cold Rolling to The End Product, *Materials Science and Engineering A*, **499**, 337–341.
- [8] **Roizarda, X., Pothier, J.M., Hihn, J.Y. and Monteil, G.**, 2009, Experimental Device for Tribological Measurement Aspects in Deep Drawing Process, *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 1220–1230.
- [9] **Sivasankaran, S., Narayanasamy, R., Jeyapaul, R. and Loganathan, C.**, 2009, Modelling of Wrinkling in Deep Drawing of Different Grades of Annealed Commercially Pure Aluminum Sheets When Drawn Through a Conical Die Using artificial Neural Network, *Materials and Design*, **30**, 3193–3205.
- [10] **Lang, L., Li, T., An, D., Chi, C., Nielsen, K.B. and Danckert, J.**, 2009, Investigation into Hydromechanical Deep Drawing of Aluminum Alloy—Complicated Components in Aircraft Manufacturing, *Materials Science and Engineering A*, **499**, 320–324.

- [11] **Lin, C.T. and Kwan, C.T.**, 2009, Application of Abductive Network and FEM to Predict The Optimal Blank Contour of An Elliptic Cylindrical Cup From Deep Drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 1351–1361.
- [12] **Padmanabhana, R., Oliveira, M. C., Baptista, A.J., Alves, J.L. and Menezes, L.F.**, 2009, Blank Design for Deep Drawn Parts Using Parametric NURBS Surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 2402–2411.
- [13] **Bastos, A.C. and Simões, A.M.P.**, 2009, Effect of Deep Drawing on The Performance of Coil-Coatings Assessed by Electrochemical Techniques, *Progress in Organic Coatings*, **65**, 295-303.
- [14] **Ren, L.M., Zhang, S.H., Palumbo, G., Sorgente, D. and Tricarico, L.**, 2009, Numerical Simulation on Warm Deep Drawing of Magnesium Alloy AZ31 Sheets, *Materials Science and Engineering A*, **499**, 40–44.
- [15] **Hwang, B.C., Han, S.M., Bae, W.B. and Kim, C.**, 2009, Development of an automated progressive design system with multiple processes (piercing, bending, and deep drawing) for manufacturing products, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **43**, 644–653.
- [16] **Le Port, A., Toussaint, F. and Arrieux, R.**, 2009, Finite element study and sensitive analysis of the deep-drawing formability of commercially pure titanium, *International Journal of Material Forming*, **2**, 121–129.
- [17] **Delucchi, M., Barbucci, A., Ricotti, R. and Cerisola, G.**, 2009 Quantitative evaluation of oxide impurities in bright annealed stainless steels for deep drawing, *Journal of Applied Electrochemistry*, **39**, 2251–2255.
- [18] **Vollertsen, F., Niehoff, H. S. and Wielage, H.**, 2009, On the acting pressure in laser deep drawing, *Production Engineering*, **3**, 1–8.
- [19] **Saxena, R.K. and Dixit, P.M.**, 2009, Finite element simulation of earing defect in deep drawing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **45**, 219–233.
- [20] **Yang, T. S.**, 2008, Finite Element Analysis of Square Cup Deep Drawing of Pure Titanium Metal Sheet at Elevated, *Advanced Design and Manufacture to Gain a Competitive Edge*, pp. 33–42, Eds. Yan, X., Jiang, C. and Eynard, B., Springer – Verlag, London.
- [21] **Padmanabhan, R., Oliveira, M.C. and Menezes, L.F.**, 2008, Deep Drawing of Aluminum–Steel Tailor-Welded Blanks, *Materials and Design*, **29**, 154–160.
- [22] **Luo, Y., Luckey, S.G., Friedman, P.A. and Peng, Y.**, 2008, Development of an Advanced Superplastic Forming Process Utilizing a Mechanical Pre-forming Operation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **48**, 1509–1518.

- [23] **E, D., Mizuno, T. and Li, Z.,** 2008, Stress Analysis of Rectangular Cup Drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, **205**, 469–476.
- [24] **Khelifa, M. and Oudjene, M.,** 2008, Numerical Damage Prediction in Deep-Drawing of Sheet Metals, *Journal of Materials Processing Technology*, **200**, 71–76.
- [25] **Zhang, Z., Zhao, S. and Zhang, Y.,** 2008, A Novel Response Variable for Finite Element Simulation of Hydro-Mechanical Deep Drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, **208**, 85–89.
- [26] **Demirci, H.I., Esner, C. and Yasar, M.,** 2008, Effect of The Blank Holder Force on Drawing of Aluminum Alloy Square Cup: Theoretical and Experimental Investigation, *Journal of Materials Processing Technology*, **206**, 152–160.
- [27] **Park, D.H. and Yarlagaadda, P.K.D.V.,** 2008, Effects of Punch Load for Elliptical Deep Drawing Product of Automotive Parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **35**, 814–820.
- [28] **Oliveira, M.C., Alves, J.L. and Menezes, L.F.,** 2008, Algorithms and Strategies for Treatment of Large Deformation Frictional Contact in the Numerical Simulation of Deep Drawing Process, *Archives of Computational Methods in Engineering*, **15**, 113–162.
- [29] **Sattari, H., Sedaghati, R. and Ganesan, R.,** 2007, Analysis and design optimization of deep drawing process Part II Optimization,, *Journals of Materials Processing Technology*, **184**, 84-92.
- [30] **Gavas, M. and Izciler, M.,** 2007, Effect of Blank Holder Gap on Deep Drawing of Square Cups, *Materials and Design*, **28**, 1641–1646.
- [31] **Lee, Y.S., Kim, M.C., Kim, S. W., Kwon, Y.N., Choi, S.W. and Lee, J.H.,** 2007, Experimental and Analytical Studies for Forming Limit of AZ31 Alloy on Warm Sheet Metal Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, **187–188**, 103–107.
- [32] **Karalı, M.,** 2007, Derin Sac Çekme İşleminde Kalıp Boşluğunun Cidar Kalınlık Değişimine Etkilerinin Sonlu Elemanlar Analizi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **1**, 55–60.
- [33] **Gavas, M. and Izciler, M.,** 2006, Design and Application of Blank Holder System with Spiral Spring in Deep Drawing of Square Cups, *Journal of Materials Processing Technology*, **171**, 274–282.
- [34] **Wei, Z., Zhang, Z.L. and Dong, X.H.,** 2006, Deep Drawing of Rectangle Parts Using Variable Blank Holder Force, *Int J Adv Manuf Technol*, **29**, 885–889.
- [35] **Yuqi, L., Jincheng, W. and Ping, H.,** 2002, A Finite Element Analysis of The Flange Earrings of Strong Anisotropic Sheet Metals in Deep Drawing Processes, *Acta Mechanica Sinica (English Series)*, **18**, 82–91.

- [36] **Menezes, L. F. and Teodosiu, C.,** 2000, Three-Dimensional Numerical Simulation of The Deep-Drawing Process Using Solid Finite Elements, *Journal of Materials Processing Technology*, **97**, 100–106.
- [37] **Zimniak, Z.,** 2000, Implementation of The Forming Limit Stress Diagram in FEM Simulations, *Journal of Materials Processing Technology*, **106**, 261–266.
- [38] **Marumo, Y., Saiki, H. and Mori, T.,** 1999, Combined Effects of Strain Hardening Characteristics and Tool Geometry on The Deep-Drawability of Square Aluminum Cups, *Journal of Materials Processing Technology*, **89–90**, 30–36.
- [39] **Marumo, Y. and Saiki, H.,** 1998, Evaluation of The Forming Limit of Aluminum Square Cups, *Journal of Materials Processing Technology*, **80–81**, 427–432.
- [40] **Gea, H.C. and Ramamurthy, R.,** 1998, Blank Design Optimization on Deep Drawing of Square Shells, *IIE Transactions*, **30**, 913–921.
- [41] **Mamalis, A.G., Manolakos, D.E. and Baldoukas, A.K.,** 1997, Simulation of Sheet Metal Forming Using Explicit Finite Element Techniques: Effect of Material and Forming Characteristics Part 2. Deep-Drawing of Square Cups, *Journal of Materials Processing Technology*, **72**, 110–116.
- [42] **Kuwabara, T. and Si, W.,** 1997, PC-Based Blank Design System for Deep-Drawing Irregularly Shaped Prismatic Shells with Arbitrarily Shaped Flange, *Journal of Materials Processing Technology*, **63**, 89–94.
- [43] **Koga, N. and Paisarn, R.,** 2003, Effects of Tool Radius on Formability During Deep Drawing of AZ31 Magnesium Alloy Sheets, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, **53**, No.4, 152–156.
- [44] **Gavas, M. ve Küçükrendeci, İ.,** 2004, Alüminyum Kare Kabin Derin Çekilmesinde Taslak Malzeme Şekillerinin Değerlendirilmesi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **4**, 185–200.
- [45] **Çapan, L.,** 2003. *Metallere Plastik Şekil Verme*, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [46] **Kayalı, E.S., Çimenoglu, H.,** 1995. *Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- [47] **Güneş, A.T.,** 2002. *Pres İşleri Tekniği Cilt 2*, Makine Mühendisleri Odası, Ankara.
- [48] **Topaç, M.M.,** 2003. *Karbonlu Çeliklerde Derin Çekmeye Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [49] **Demiray, K.,** 2006. *Al 1050 Malzemesinin Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

- [50] **Uzun, İ., ve Erişkin, Y.,** 2002. Sac Metal Kalıpcılığı, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, Ankara.
- [51] **Tzchaetsch, H.,** 2006. Metal Forming Practice, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- [52] **Raabe, D., Wang, Y. And Roters, F.,** 2005, Crystal Plasticity Simulation Study On The Influence Of Texture On Earing in Steel, Computational Material Science, **34**, 221 – 234.
- [53] **Altan, T.,** 1998. Metal Forming Handbook, Schuler Springer – Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- [54] **Simith, A.D.,** 1990. Die Design Handbook, Society of Manufacturing Engineers, **10**, Michigan.
- [55] **Kayalı, E.S., ve Ensari, C.,** 2000. Metallerde Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları, İ.T.Ü. Kimya – Metalürji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [56] **Çimenoglu, H., ve Kayalı E.S.,** 1986. Malzemelerin Yapısı ve Dinamik Davranışları, İ.T.Ü. Kimya – Metalürji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [57] **Kayalı E.S.,** 1997. Mekanik İşlem Hasarları, T.M.M.O.B. Metalurji Mühendisleri Odası Hasar Analizi Seminer Notları, İstanbul.
- [58] **Alpers, B., Bergmann, D., Galanulis, K. And Winter, D.,** 2000. Advanced Deformation Measurement in Sheet Metal Forming, GOM, Gesselscheft für Optisch Meßtechnik, Germany.
- [59] <http://www.biyomed.com/femmuhanaliz/fem/seynedir.htm> Sonlu Elemanlar Yöntemi. 25 Aralık 2010.
- [60] **Kırlı, O.,** 2003. Derin Çekme İle Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Non-Linear Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [61] **Yaşar, M.,** 2001. Yüksek hızda şekillendirilen alüminyum alaşımlarında oluşan deformasyon incelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [62] **Karalı, M.,** 2005. Derin sac çekme işleminde pot çemberi baskısının kontrolünün cidar kalınlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [63] **URL-1,** www.ansys.com/Products/Simulation+Technology, 15 Mart 2011.

ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında Elazığ'da doğdu. İlköğrenimini Elazığ'da, lise öğrenimini 1987 yılında Merkez Endüstri Meslek Lisesinde tamamladı. 2001 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Talaşlı Üretim Öğretmenliği bölümünde lisans öğrenimine başladı. 2004 yılında lisans programından mezun oldu ve 2009 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Talaşlı Üretim Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı.