
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KALIP GEOMETRİSİNİN DERİN ÇEKİLEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Mehmet Okan KABAKÇI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2020

Mehmet Okan KABAKCI tarafından hazırlanan "KALIP GEOMETRİSİNİN DERİN ÇEKİLEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylamıyorum. ……..……..

Başkan: Prof. Dr. İhsan KORKUT

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Güven MERAL

Görsel İletişim Tasarımı Ana Sanat Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. .....……

Tez Savunma Tarihi: 30/12/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……..…….

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet Okan KABAKÇI

30/12/2020

KALIP GEOMETRİSİNİN DERİN ÇEKİLEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Okan KABAKÇI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2020

ÖZET

Derin çekme işlemlerinde tek operasyon ile sac metal malzemenin ulaşılabilen en yüksek derin çekme oranında şekillendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle, çekme yöntemlerinde yapılan geliştirmeler ile bu amaca ulaşılmaya çalışılmaktadır. Yapılan bu çalışmada; klasik derin çekme işlemleri ile elde edilemeyen yüksek çekme oranlarına, yenilikçi bir yaklaşım ile tasarlanan kalıplar ile ulaşılması hedeflenmiştir. Tasarlanan kalıplarda, hidromekanik derin çekme işlemlerinde sıklıkla kullanılan ön şişirme yöntemi mekanik olarak uygulanmaktadır. Mekanik ön şişirme işlemi; 15° ve 30° açılı ters kalıp giriş geometrisi ile sağlanmaktadır. Tasarımı yapılan bu kalıplar üretilerek deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir ve bu çalışmalarda 1 mm et kalınlığına sahip DC-01 (EN 10130:2006) ve Al6061-T6 sac metal malzemeleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında deney malzemelerinin karakterizasyonu yapılmıştır. Deney malzemelerinin mekanik özellikleri, tek eksenli çekme testleri ile; kimyasal özellikleri ise X Işını Floresansı (XRF) analizi ile belirlenmiştir. Sonrasında, deney numuneleri lazer kesim yöntemi ile kesilerek hazırlanmıştır ve üretilen kalıplar kullanılarak derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; DC–01 sac metal malzemesi klasik yöntemler ile en fazla 2,2 çekme oranında başarılı olarak şekillendirilebilirken, ters giriş geometrisine sahip kalıplarda tek operasyonda 2,5 çekme oranında başarılı bir şekilde şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. Al6061-T6 sac metal malzemesinde ise klasik kalıp seti ile şekillendirmede en fazla 2,0 çekme oranı elde edilebilirken, ters giriş geometrisine sahip kalıplar ile herhangi bir şekillendirme kusuru meydana gelmeksizin tek operasyonda 2,2 çekme oranında kapların başarılı bir şekilde çekilebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, şekillendirme kuvvetlerinin %24,5'e varan oranlarda azaltılabildiği ve duvar kalınlıklarındaki incelme miktarının ise %12,5'e varan oranlarda iyileştirilebildiği belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Derin çekme, kalıp giriş geometrisi, ters çekme
Sayfa Adedi : 90
Danışman : Doç. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIE GEOMETRY ON DEEP DRAWABILITY

(M. Sc. Thesis)

Mehmet Okan KABAKCI

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2020

ABSTRACT

In deep drawing processes, it is aimed to form a sheet metal at the highest deep drawing ratio achieved with a single operation. For this reason, it is tried to reach this goal with the improvements made in drawing methods. In this study, it is aimed to achieve high drawing ratios, which cannot be achieved with classical deep drawing processes, by using the dies designed with an innovative approach. Pre-bulging method, which is widely used in hydro-mechanical deep drawing processes, is mechanically applied with the designed dies. Mechanical pre-bulging process is provided with 15° and 30° angled reverse die entrance geometry. Experimental studies were carried out by producing these designed dies and in these studies, DC-01 (EN 10130: 2006) and Al6061-T6 sheet metal materials with a thickness of 1 mm were used. In the first stage of the experimental studies, the test materials were characterized. The mechanical and chemical properties of the test materials were determined by uniaxial tensile tests and X-Ray Fluorescence (XRF) analysis, respectively. Afterwards, the test samples were prepared by cutting with laser cutting method and deep drawing experiments were carried out using the produced dies. As a result of the experiments, it has been observed that the DC-01 sheet material can be successfully formed with conventional methods at a maximum deep-drawing ratio of 2.2, and this ratio can be increased up to 2.5 in a single operation in dies with reverse entrance geometry. In Al6061-T6 sheet material, it has been observed that a maximum draw ratio of 2.0 can be achieved in forming with the classical die set, and in the case of dies with reverse entrance geometry, the process can be successfully performed at a draw ratio of 2.2 in a single operation without any forming defects. In addition, it has been determined that forming forces can be reduced by up to 24.5% and the amount of thinning in wall thicknesses can be improved up to 12.5%.

Science Code : 91438
Key Words : Deep-drawing, die enterance geometry, reverse drawing
Page Number : 90
Supervisor : Assoc. Prof. Ibrahim KARAAGAC

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda desteğini ve zamanını esirgemeden yardımcı olan, mesleki hayatımda bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı bildiğim kıymetli danışmanım Doç. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ' a teşekkür ederim. Deneysel çalışmaların yürütülmesinde doğrudan ya da dolaylı şekilde zamanlarını ve emeklerini harcayarak çalışmanın tamamlanmasına çeşitli faydaları olan; araştırma görevlisi değerli çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Yetişmemde sonsuz emeği geçen sevgili anne ve babama şükranlarımı sunarım. Yüksek Lisans çalışmasını 07/2019-17 kodlu proje ile destekleyerek verdiği maddi katkıdan dolayı, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. KURAMSAL TEMELLER 3

2.1. Derin Çekme İşlemi 3

2.2. Derin Çekme İşleminin Mekaniği 5

2.3. Derin Çekme İşleminde Kullanılan Hesaplamalar 7

2.3.1. Çekme oranı 7

2.3.2. Azaltma oranı 8

2.3.3. Kalınlık – çap oranı 8

2.3.4. Derin çekme kuvveti 8

2.3.5. Baskı yastığı kuvveti 9

2.3.6. Çekme yüksekliği 9

2.3.7. Kalıp radyüsü 10

2.3.8. Açınım sac ölçüsü 10

2.4. Derin Çekme İşleminde Karşılaşılan Şekillendirme Kusurları 11

2.5. Diğer Mekanik Derin Çekme Yöntemleri 13

2.5.1. Yeniden çekme 13

2.5.2. Ters derin çekme işlemi (Çevirme çekme işlemi) 13

Sayfa

2.5.3. Baskı yastıksız derin çekme işlemi 14
3. LİTERATÜR TARAMASI 17
4. MATERYAL VE METOT 43
4.1. Sac Metal Malzeme 43
4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu 43
4.3. Deney Seti Tasarımı ve Hazırlanması 46
4.4. Deneysel Çalışmalar 50
5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 55
5.1. DC – 01 Sac Metal Malzemenin Derin Çekme ile Şekillendirilebilirliği 55
5.1.1. DC – 01 Sac malzemede şekillendirme kuvvetleri 57
5.1.2. DC – 01 Sac malzemede kalınlık değişimleri 60
5.1.3. DC – 01 Sac malzemede % kalınlık değişimi 64
5.2. Al6061 – T6 Sac Metal Malzemenin Derin Çekme ile Şekillendirilebilirliği 66
5.2.1. Al6061 – T6 Sac malzemede şekillendirme kuvvetleri 67
5.2.2. Al6061 – T6 Sac malzemede kalınlık değişimleri 70
5.2.3. Al6061 – T6 Sac malzemede % kalınlık değişimi 73
6. SONUÇLAR 75
KAYNAKLAR 77
EKLER 81
EK-1. Zımba Teknik Resmi 82
EK-2. α=0° Baskı Yastığı Teknik Resmi 83
EK-3. α=0° Kalıp Teknik Resmi 84
EK-4. α=15° Baskı Yastığı Teknik Resmi 85
EK-5. α=15° Kalıp Teknik Resmi 86
EK-6. α=30° Baskı Yastığı Teknik Resmi 87
EK-7. α=30° Kalıp Teknik Resmi 88

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ 89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Derin çekme işlemlerinde görülen kusurlar ve muhtemel sebepleri 12

Çizelge 4.1. Al6061-T6 sac metal malzemesine ait kimyasal analiz sonuçları (% wt) .. 43

Çizelge 4.2. DC-01 sac metal malzemesine ait kimyasal analiz sonuçları (% wt) 43

Çizelge 4.3. DC-01 sac malzeme için tek eksenli çekme testi sonuçları 45

Çizelge 4.4. Al6061-T6 sac malzeme için tek eksenli çekme testi sonuçları 46

Çizelge 4.5. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler 52

Çizelge 4.6. Al6061 – T6 için hesaplanan ve uygulanan kuvvet değerleri..... 52

Çizelge 4.7. DC-01 için hesaplanan ve uygulanan kuvvet değerleri 53

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Klasik derin çekme kalıbının ve derin çekme işleminin şematik gösterimi; (a) Operasyon öncesi; (b) Operasyon sonrası 4

Şekil 2.2. Derin çekme işlemi aşamaları 6

Şekil 2.3. Derin çekme işlemlerinde görülebilen şekillendirme kusurları 11

Şekil 2.4. Yeniden çekme işlemi; (a) Baskı ile sacın sıkıştırılması; (b) Zımba ile şekillendirme 13

Şekil 2.5. Ters Derin Çekme; (a) Baskı ile sacın sıkıştırılması; (b) Zımba ile şekillendirme 14

Şekil 3.1. (a) Açılı kalıp ve baskı yastığının şematik gösterimi; (b) Açılı kalıpta şekillendirilmiş numuneler 18

Şekil 3.2. R=4 mm için sonuçlar; (a) α=15° & β=1.9; (b) α=12.5° & β=1.9; (c) α=7.5° & β=1.9; (d) α=2.5° & β=1.8; (e) α=0° & β=1.9 19

Şekil 3.3. R=6 mm için sonuçlar; (a) α=15° & β=2.1 (b) α=12.5° & β=2.1; (c) α=7.5° & β=2.1; (d) α=2.5° & β=1.9; (e) α=0° & β=1.8 19

Şekil 3.4. R=8 mm için sonuçlar; (a) α=15° & β=2.1 (b) α=12.5° & β=2.1; (c) α=7.5° & β=2.1; (d) α=2.5° & β=1.9; (e) α=0° & β=1.8 19

Şekil 3.5. R=10 mm için sonuçlar; (a) α=15° & β=2.3 (b) α=12.5° & β=2.2; (c) α=7.5° & β=2.2; (d) α=2.5° & β=2.1; (e) α=0° & β=1.8 19

Şekil 3.6. (a) Çalışmada kullanılan derin çekme kalıplarının şematik gösterimi; (b) Kalıp giriş açısı – baskı yastığı kuvveti ilişkisinin çekme oranına etkisi..... 21

Şekil 3.7. Et kalınlığının ölçülmesi 22

Şekil 3.8. R=6 mm sabit giriş radyüsü için farklı kalıp giriş açılarına göre artan çekme oranları; (a) α=0°& β=1,86; (b) α=5°& β=2,09; (c) α=10°& β=2,13; (d) α=15°& β=2,22 22

Şekil 3.9. Derin çekme kalıplarının artan giriş radyüsüne sahip şematik gösterimi 23

Şekil 3.10. Sonlu elemanlar çalışmasında kullanılan farklı giriş geometrileri ve ölçülerinin şematik gösterimi 24

Şekil 3.11. Açılı kalıplarda şekillendirilmiş malzemeler; (a) AA6111; (b) SS304; (c) 70-30 Pirinç 25

Şekil 3.12. Gerilme oluşumunun sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi; (a) AA6111; (b) SS304; (c) 70-30 Pirinç 25

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.13. (a) Ön şişirme yüksekliği – şekillendirme yüksekliği ; (b) Ön şişirme yüksekliği – duvar kalınlığı değişimi oranı ilişkisi 27

Şekil 3.14. Derin çekilmiş parçalar; (a) ABAQUS simulasyonu; (b) Deney sonucu şekillendirilmiş parça; (c) Kalınlık değişimi 28

Şekil 3.15. (a) Ön şişirme işleminin simülasyon ile gösterimi; (b) Ön şişirme işlemi kullanılarak derin çekilen malzemeler 29

Şekil 3.16. Eşit kenar yüksekliği olmayan dikdörtgensel parça; (a) Şematik görüntüsü; (b) Kalıptan çıkan ürün 30

Şekil 3.17. Sayısal modelleme sonuçlarına göre incelme oranları. (a) Ön şişirme yüksekliği – incelme oranı; (b) Ön şişirme basıncı – incelme oranı 31

Şekil 3.18. Ön şişirme uygulanan hidromekanik derin çekme işlemlerinde görülen tipik kusurlar; (a) Küçük ön şişirme basıncı nedeniyle kırışıklık oluşumu; (b) Büyük ön şişirme basıncı nedeniyle çatlak oluşumu 32

Şekil 3.19. Farklı ön şişirme basınçları altında kalınlık dağılımı; (a) 1.5 MPa ön şişirme basıncı; (b) 2 MPa ön şişirme basıncı 32

Şekil 3.20. Hidromekanik derin çekme prosesi aşamaları; (a) Prosesin başlangıcı; (b) Ön şişirme işlemi; (c) Hidromekanik derin çekme işlemi 33

Şekil 3.21. Radyüs – incelme ilişkisi; (a) Kalıp giriş radyüsünün incelmeye etkisi; (b) Zımba uç radyüsünün incelmeye etkisi 34

Şekil 3.22. Radyüs – kalıntı gerilme ilişkisi (a) Kalıp giriş radyüsünün kalıntı gerilmelere etkisi; (b) zımba uç radyüsünün kalıntı gerilmelere etkisi 34

Şekil 3.23. Kalıp açısı ve kalıp giriş radyüsünün çekme oranına etkisi 36

Şekil 3.24. Farklı kalıp giriş radyüslerinde meydana gelen gerilim değişimleri; (a) 4 mm; (b) 5 mm; (c) 6 mm; (d) 7 mm; (e) 8 mm 37

Şekil 3.25. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki benzerlik 39

Şekil 3.26. Açılı Derin Çekme Kalıbının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi 40

Şekil 4.1. Tek eksenli çekme deneyi numunelerinin sac metal levha üzerine yerleşimi ve numunelere ait teknik resim 44

Şekil 4.2. DC-01 sac malzeme için tek eksenli çekme testi sonuç grafiği 45

Şekil 4.3. Al6061-T6 sac malzeme için tek eksenli çekme testi sonuç grafiği 46

Şekil 5.1. (a) Çalışmada kullanılan kalıpların şematik gösterimi; (b) DC – 01 malzeme için farklı kalıp giriş açılarında meydana gelen şekillendirme kuvvetleri 58

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.2. DC – 01 malzeme için strok-şekillendirme kuvveti ilişkisi 59

Şekil 5.3. DC-01 malzeme için başarısız çekme operasyonlarında meydana gelen şekillendirme kuvveti değişimleri 60

Şekil 5.4. DC-01 malzemenin α=0° ve ß=2,2 için duvar kalınlıkları 62

Şekil 5.5. DC-01 malzemenin α=15° ve ß=2.4 için duvar kalınlıkları 63

Şekil 5.6. DC-01 malzemenin α=30° ve ß=2.5 için duvar kalınlıkları 63

Şekil 5.7. DC-01 malzemenin α=0° ve ß=2.2 için kalınlık değişimi oranları (%) 64

Şekil 5.8. DC-01 malzemenin α=15° ve ß=2.4 için kalınlık değişimi oranları (%) 65

Şekil 5.9. DC-01 malzemenin α=30° ve ß=2.5 için kalınlık değişimi oranları (%) 65

Şekil 5.10. (a) Çalışmada kullanılan kalıpların şematik gösterimi; (b) Al6061 – T6 malzeme için farklı kalıp giriş açılarında meydana gelen şekillendirme kuvvetleri..... 68

Şekil 5.11. Al6061-T6 malzeme için strok-şekillendirme kuvveti ilişkisi 69

Şekil 5.12. Al6061-T6 malzeme için başarısız çekme operasyonlarında meydana gelen şekillendirme kuvveti değişimleri 70

Şekil 5.13. Al6061-T6 malzemenin α=0° ve ß=2,0 için duvar kalınlıkları 71

Şekil 5.14. Al6061-T6 malzemenin α=15° ve ß=2,1 için duvar kalınlıkları 72

Şekil 5.15. Al6061-T6 malzemenin α=30° ve ß=2,2 için duvar kalınlıkları 72

Şekil 5.16. Al6061-T6 malzemenin α=0° ve ß=2,0 için kalınlık değişimi oranları..... 73

Şekil 5.17. Al6061-T6 malzemenin α=15° ve ß=2,1 için kalınlık değişimi oranları..... 74

Şekil 5.18. Al6061-T6 malzemenin α=30° ve ß=2,2 için kalınlık değişimi oranları..... 74

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. (a) DC-01 çekme numuneleri; (b) Al6061-T6 çekme numuneleri; (c) Çekme deneyi uygulaması 45

Resim 4.2. (a) α=0° kalıp seti; (b) α=15° kalıp seti; (c) α=30° kalıp seti 47

Resim 4.3. (a) Kalıp setinin kesit görüntüsü; (b) Deney cihazının genel görünümü ve kalıp setinin deney cihazı üzerindeki durumu 48

Resim 4.4. (a) Kalıp setinin detay görüntüsü; (b) Deney cihazının genel görünümü .. 48

Resim 4.5. Üretilen kalıplar; (a) 0° kalıp seti; (b) 15° kalıp seti; (c) 30° kalıp seti 49

Resim 4.6. Üretimi yapılan kalıp mastarları 50

Resim 4.7. Mikrometre kullanılarak yapılan kalınlık ölçümü 51

Resim 5.1. DC-01 malzemenin α=0° kalıp seti ile elde edilen sonuçlar; (a) ß=2,0; (b) ß=2,1; (c) ß=2,2 56

Resim 5.2. DC-01 malzemenin α=15° kalıp seti ile elde edilen sonuçlar; (a) ß=2,0; (b) ß=2,1; (c) ß=2,2; (d) ß=2,3; (e) ß=2,4 56

Resim 5.3. DC-01 malzemenin α=30° kalıp seti ile elde edilen sonuçlar; (a) ß=2,0; (b) ß=2,1; (c) ß=2,2; (d) ß=2,3; (e) ß=2,4; (f) ß=2,5..... 57

Resim 5.4. DC-01 malzeme için başarısız sonuçlanan çekme işlemleri; (a) α=0° kalıp ß=2,3; (b) α=15° kalıp ß=2,5; (c) α=30° kalıp ß=2,6..... 57

Resim 5.5. (a) Çekilmiş kabın kalınlık ölçüm bölgeleri; (b) Kalınlık ölçüm noktaları 61

Resim 5.6. Al6061 – T6 için α=0° kalıp setinde çekilen ß= 2,0 deney numunesi..... 66

Resim 5.7. Al6061-T6 malzemenin α=15° kalıp setinde alınan sonuçlar; (a) ß=2,0; (b) ß=2,1..... 66

Resim 5.8. Al6061-T6 malzemenin α=30° kalıp setinde alınan sonuçlar; (a) ß=2,0; (b) ß=2,1; (c) ß=2,2..... 67

Resim 5.9. Al6061-T6 malzeme için başarısız sonuçlanan çekme işlemleri; (a) α=0° kalıp ß=2,1; (b) α=15° kalıp ß=2,2; (c) α=30° kalıp ß=2,3..... 67

Resim 5.10. Kesilmiş numuneler ve kalınlık ölçüm noktalarının şematik gösterimi (a) ß=2,0; (b) ß=2,1; (c) ß=2,2 (d) Kalınlık ölçüm noktaları 71

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
α	Kalıp giriş açısı
ß	Çekme oranı
c	Çekme boşluğu
h	Çekme yüksekliği
r	Azaltma oranı
v	Şekillendirme hızı
A_a	Açınım sac alanı
A_b	Baskı yastığı etkin alanı
$A_ü$	Çekilmiş ürün alanı
D_i	Açınım sac çapı
D_z	Zımba çapı
F_b	Baskı yastığı kuvveti
$F_ç$	Çekme kuvveti
F_d	Şekillendirme kuvveti (deformasyon kuvveti)
P_b	Baskı yastığı basıncı
R_k	Kalıp radyüsü
R_z	Zımba uç radyüsü
t_0	Açınım sac et kalınlığı
σ_{ak}	Malzemenin akma dayanımı
$\sigma_ç$	Malzemenin çekme dayanımı

1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusu ve değişen tüketim ihtiyaçlarının etkileri sonucunda, endüstrilerin enerji sarfiyatı ve doğaya salınan zararlı gazların miktarı gün geçtikçe artmaktadır. Son zamanlarda; doğaya verilen bu zararın azaltılmasının büyük önem arz ettiğini anlatan çok sayıda akademik çalışmalar yayınlanmaktadır. Ayrıca, pek çok üretim prosesi için de endüstriyel faaliyetlerde enerji tasarrufuna yönelik çeşitli modifikasyonlar, analizler ve fikirler geliştirilmeye çalışılmaktadır [1–4].

Ekonominin önemli bir kısmını oluşturan uzay ve havacılık, savunma, otomotiv ve ev elektroniği gibi büyük endüstriler incelendiğinde; daha az ham madde ve zaman harcayarak imalatı daha kolay olan işlevsel ürünlerin üretilebildiği sac metal malzemelerin kullanıldığı sac metal şekillendirme prosesleri ön plana çıkmaktadır. Sac metal malzemelerin; plakalar, şeritler ve açınım parçalardan ürüne dönüştürülmesi aşamasında çeşitli sac metal şekillendirme kalıplarından faydalanılmaktadır. Sac metal kalıpları kullanılarak, çeşitli imalat yöntemlerine kıyasla daha uygun maliyetler ile yüksek dayanımlı ve hafif parçaların seri şekilde üretilebilmesi sağlanmaktadır. Herhangi bir form verilmemiş sac metal malzemelerin ürüne dönüştürüldüğü her alanda, çeşitli çalışma prensiplerine sahip sac metal şekillendirme kalıpları kullanılarak üretim yapılmaktadır. Sac metal şekillendirme kalıpları; delme, kesme, bükme, çekme ve şekil verme gibi çok sayıda şekillendirme işlemlerini çeşitli çalışma prensipleri kullanarak sac metal malzemelerden istenen ürünlerin elde edilmesini sağlamaktadır.

Sac metal kalıpları ile şekillendirme işlemlerinde; dikişsiz bir kap şeklinde sac metal ürünlerin üretilebildiği -*derin çekme*- yöntemi endüstrinin birçok faaliyet alanında tercih edilmektedir. Ayrıca, karmaşık geometriye sahip sac metal ürünlerin de şekillendirilmesine olanak veren derin çekme işleminde amaç, herhangi bir çatlama, kırışma, kulaklanma, yırtılma gibi şekillendirme kusuru olmaksızın en yüksek çekme oranına tek operasyonda ulaşmaktır. Ancak istenen çekme oranlarına tek operasyonda ulaşılamayan durumlarda; yeniden çekme ve çevirme çekme gibi derin çekme yöntemleri kullanılarak, daralan kalıp boşluğu çapları sayesinde tek operasyonda ulaşılamayan çekme oranları iki ya da daha fazla aşamada gerçekleştirilen çekme işlemleriyle elde edilebilmektedir. Öte yandan; patlayıcı ya da enerji yüklü bir kondansatör ve elektrotlar ile sağlanan yüksek yoğunluklu enerjinin

aniden açığa çıkması sayesinde meydana gelen şok dalgalarından faydalanılarak gerçekleştirilen sac metal şekillendirme işlemlerinde, tek operasyonda ve bir kalıp yarımı kullanılarak dikişsiz kaplar üretilebilmektedir.

Hidroforming; sadece kalıbın yarısının kullanılarak, sacın bir yüzeyine temas eden basınçlı akışkan sıvı desteği sayesinde daha eşit duvar kalınlıklarına sahip parçaların şekillendirilebildiği bir imalat yöntemidir. Hidroforming proseslerinde şekillendirme öncesinde ön şişirme (pre-bulging) işlemi olarak adlandırılan bir yöntem kullanılarak, açınım sac metal malzeme kalıba ters yönde bir miktar şişirilmektedir. Bu sayede, ters yönde ön deformasyona uğrayan sac metal malzeme daha kolay ve daha yüksek derin çekme oranlarında şekillendirilebilmektedir. Ancak hidroforming yöntemi; ilk kurulum, çalıştırma ve bakım maliyetlerinin yüksek olması, parça başına ihtiyaç duyulan zamanın fazla olması, kullanılan hidrolik akışkan atıklarının saklanma ve geri dönüşüm zorlukları gibi nedenlerden dolayı endüstride tüm paydaşlar tarafından kolaylıkla ulaşılabilir bir yöntem değildir.

Ters kalıp giriş formunun derin çekme prosesine etkilerinin deneysel olarak araştırıldığı bu çalışmada, geleneksel derin çekme kalıplarına -hidroforming proseslerinde kullanımına sıklıkla rastlanan ön şişirme işlemine benzer- yenilikçi bir kalıp giriş modeli tasarlanıp uygulanarak, sac metal malzemenin deformasyonunun kolaylaştırılması ve bu sayede daha az adımda daha yüksek çekme oranında derin çekme sonuçları elde edilerek literatüre katkıda bulunulması hedeflenmiştir. Ayrıca; kurulum ve işletme maliyetleri çok yüksek olan hidroforming operasyonlarında sıklıkla kullanılan ön şişirme işleminin geleneksel derin çekme kalıplarında mekanik olarak uygulanması ile üretim sürecinin kısa sürede daha fazla ürün elde edilebilen, düşük enerji tüketimi ile daha ekonomik ve çevreci endüstrilerin oluşmasına katkı sağlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla, açılı ters kalıp giriş formuna sahip kalıplar tasarlanarak üretilmiştir. Üretilen derin çekme kalıplarında; sabit 10 mm/sn şekillendirme hızında, 6 mm uç radyüsü olan Ø30 mm zımba yardımı ile 1 mm kalınlığındaki sac metal malzemelerin tek operasyonda elde edilebilen en yüksek çekme oranı sınırı belirlenmiştir. En yüksek çekme oranının belirlenmesi çalışmalarında; düşük alaşım ve yüksek dayanım özellikleri nedeniyle otomotiv ve beyaz eşya endüstrisinde sıklıkla kullanılan DC – 01 (EN10130:2006) ve düşük özgül ağırlıklarına rağmen yüksek mekanik özelliklere sahip olmaları sebebiyle savunma, uzay-havacılık ve otomotiv sanayiinde yaygın kullanım alanı olan Al6061 – T6 sac metal malzemeler tercih edilmiştir.

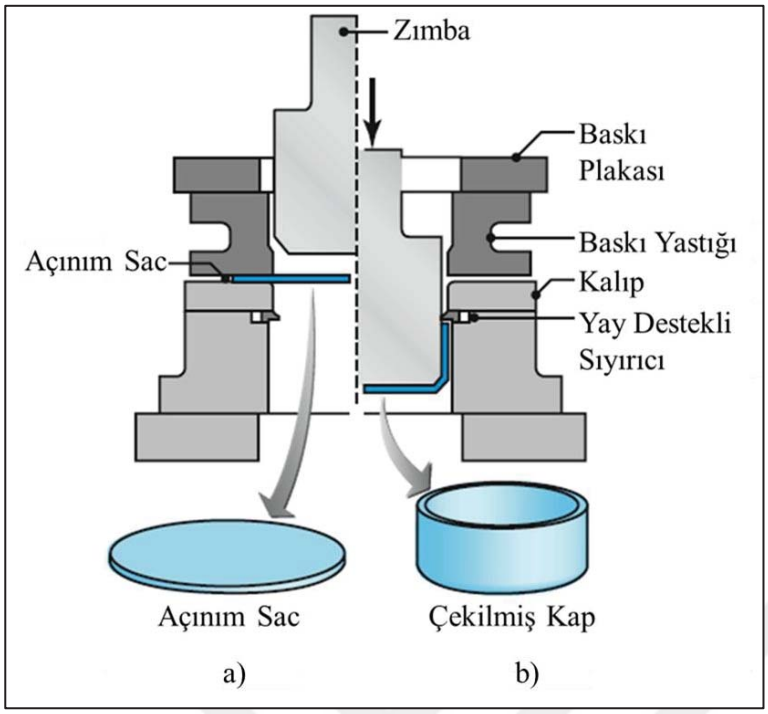
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Derin Çekme İşlemi

Derin çekme işlemi; düzlemsel bir sac metal malzemeden hazırlanan açınım parçanın bir ağzı açık dikişsiz bir kap haline getirildiği, basma ve çekme gerilmelerinin bir arada etkili olduğu bir sac metal şekillendirme işlemidir [DIN 8584]. Diğer bir tanıma göre de derin çekme işlemi; silindirik kap, kutu şekilli ya da daha karmaşık geometrili içi boş parçaların; zımba, kalıp ve baskı yastığından oluşan bir kalıp seti ile şekillendirilebildiği bir sac metal şekillendirme yöntemidir [5–7].

Derin çekme prosesi ile sac metal malzemeler; yüksek mukavemetli, hafif, kullanışlı ve farklı üretim yöntemlerine kıyasla daha uygun maliyetler ile karmaşık geometrili parçalar olarak üretilebilmektedir. Derin çekme operasyonlarında kalıp üzerine doğrudan ya da çeşitli mastarlar yardımıyla yerleştirilen açınım sac metal malzeme ilk olarak baskı yastığı kullanılarak daha önceden hesaplanan bir baskı kuvvetiyle kalıp yüzeyine sac malzemede kırışıklık olmayacak şekilde bastırılır. Sonraki adımda sac metal malzeme; bir çekme zımbası yardımıyla kalıp boşluğuna doğru belirlenen bir şekillendirme hızında akmaya zorlanmaktadır. Kalıp boşluğundan içeriye doğru akmaya başlayan sac metal malzeme, önce zımbaya sarılmakta daha sonrasında kalıp boşluğunda şekil alarak son haline gelmekte ve ürün olarak çıkmaktadır [7–9].

Klasik bir derin çekme kalıbının ve derin çekme işleminin şematik gösterimi Şekil 2.1’ de verilmiştir.



Şekil 2.1. Klasik derin çekme kalıbının ve derin çekme işleminin şematik gösterimi; (a) Operasyon öncesi; (b) Operasyon sonrası [10]

Şekil 2.1' de verilen derin çekme kalıbında bulunan kalıp bileşenleri aşağıda tanımlanmıştır.

- Zımba: Sac metal malzemenin kalıp içine itilerek şekillendirilmesini sağlamaktadır.
- Baskı plakası: Sac metal malzeme üzerine uygulanan baskı kuvvetini ileten baskı yastığı bu plakaya bağlanmaktadır. Kalıp üst yarımı da derin çekmenin gerçekleştirildiği prese bu plaka yardımıyla montajlanmaktadır.
- Baskı Yastığı: Sac malzeme üzerine belirli bir baskı kuvveti uygulayarak derin çekme işleminde sac malzeme flanşının kırışmasını engelleyerek işlemin başarılı bir şekilde sonuçlanmasını sağlamaktadır.
- Açınım Sac: Şekillendirilmemiş sac metal malzeme.
- Kalıp: Sac metal malzemenin şekillendirildiği ana elemanı
- Yay Destekli Sıyırıcı: Zımbanın geri çekilirken şekillendirilmiş kabın zımbadan ayrılmasını sağlamaktadır.

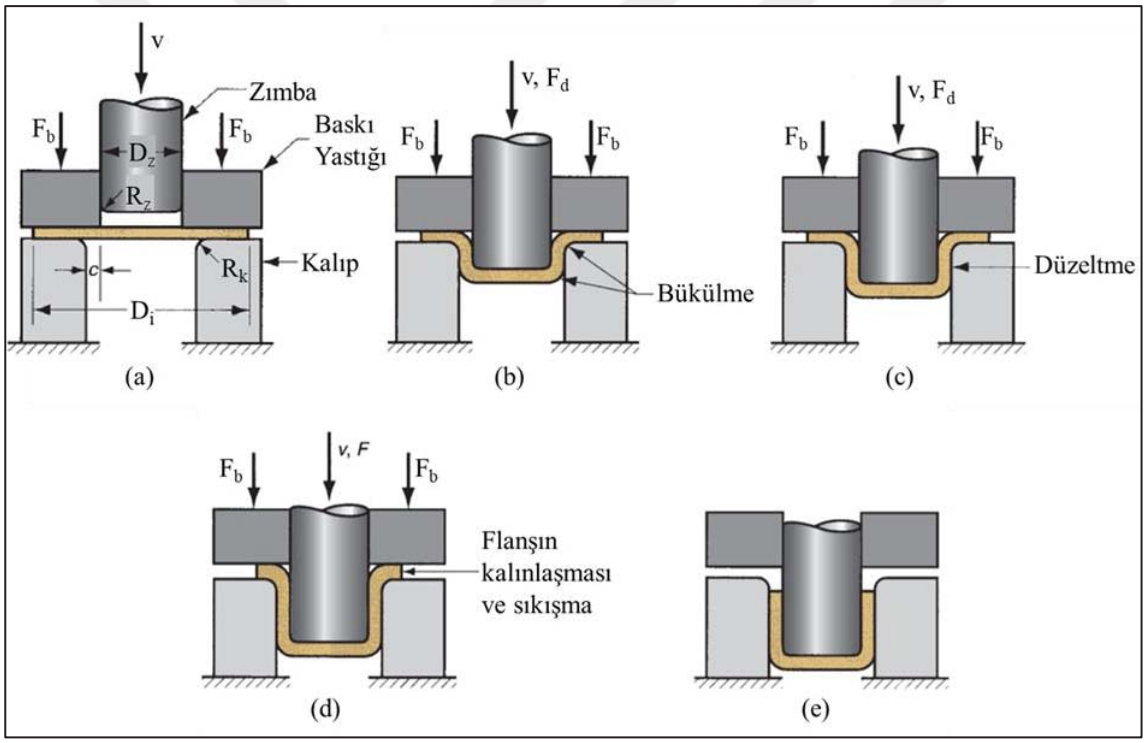
2.2. Derin Çekme İşleminin Mekaniği

Derin çekme işlemlerinde, açınım sac metal malzeme zımbanın etkisi ile kalıp içerisinde akarak deformasyona uğraması sonucu şekil alırken çeşitli gerilme ve gerinimlerden oluşan şekillendirme aşamaları gözlemlenmektedir. Derin çekme işleminin aşamaları Şekil 2.2' de verilmiştir.

a) Kalıp üzerine yerleştirilen açınım sac metal malzemeye; baskı yastığı yardımıyla baskı yastığı kuvveti (F_b) uygulanmaktadır. Bu sayede derin çekme işlemi sırasında sac metal malzemenin düzensiz akışı engellenerek kırışıklık oluşumunun önüne geçilmektedir.
b) Zımba aşağı yönde ilerleyerek malzemeye ilk baskıyı uyguladığında; sac metal malzeme, zımba radyüsü ile kalıp radyüsü arasında şekil almaktadır. Bu aşama sac metal malzemenin *bükülmesi* olarak adlandırılmaktadır. Bu aşamada açınım sac metal malzeme yavaşça kalıp boşluğuna doğru akmaya başlamaktadır.
c) Zımba ilerlemesine devam ettikçe; zımba ve kalıp radyüsü arasında bükülerek, zımbanın tabanına tam olarak sarılan sac metal malzeme kalıp ile zımba arasındaki çekme boşluğundan (c) akarak istenen kap şeklini almaya başlar. Sac metal malzeme bu aşamada artık flanşlı bir kap durumundadır ve bu aşama düzeltme olarak adlandırılmaktadır. Bu aşamada; sürtünme ve basma kuvvetleri önemli rol oynamaktadır. Kalıp içerisinde oluşan yüksek sürtünme kuvvetleri, çekme kuvvetlerinin artmasına ve dolayısıyla şekillendirilen malzemede çatlama ve kırılma gibi derin çekme gibi proses kusurlarına neden olabilmektedir. Sac metal malzemenin flanşının çekme boşluğundan kalıp içine hareket etmesi için kalıp – sac metal malzeme ve baskı yastığı – sac metal malzeme arasındaki sürtünme kuvvetlerinin yenilmesi gerekmektedir. Akışı kolaylaştırmak açısından çeşitli yağlayıcılar ve derin çekme işlemleri için özel olarak geliştirilmiş olan kaydırıcıların kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu sayede; kalıp aşınmasının, sürtünme kuvvetlerinin ve oluşan şekillendirme kuvvetlerinin azaltılması sağlanabilmektedir [7, 11–13].
d) Bu aşamada, sürtünme ve baskı yastığı ile uygulanan baskı kuvvetleri önemli rol oynamaktadır. Zımba hareketiyle sac metal malzeme çekildikçe kalıp ile baskı yastığı arasında kalan flanşın dış çevresi küçülmektedir. Sac metal malzemenin toplam hacmi değişmeyeceği için flanşın dış tarafında *kalınlaşma ve sıkışma* davranışı görülmektedir. Bu davranış, düşük baskı yastığı kuvveti kullanılmışsa düzeltilmesi mümkün olmayan kırışıklıklara neden olmaktadır. Bu durumdan da anlaşılabildiği gibi baskı yastığı kuvvetinin sac metal malzemeyi kalıp yüzeyine yeterli kuvvetle baskılaması işlemin

başarısı için çok önemli bir işlemdir. Baskı kuvveti gereğinden fazla olursa sac metal malzemenin kalıp içerisinde oluşan sürtünme ve baskı kuvvetlerini yenerek akması sağlanamaz ve gerilen sac metal malzeme yırtılabilir.

e) Açınım sac metal malzemenin tamamen kalıp içerisinden akıp derin çekilmiş parça oluşturulana kadar zımba hareketi devam etmektedir. Sac metal malzeme kalıp içerisinde zımba ile uygulanan yük altında çekilerek şekillendirilirken plastik deformasyona uğramaktadır. Bu plastik deformasyon sonucunda şekillendirilen sac metal malzemede uzama ve oluşturulan kabın yan duvarlarında incelme gözlemlenmektedir. Başarılı bir şekilde gerçekleştirilen derin çekme işlemlerinde, oluşturulan kabın yan duvarlarında en çok %25' e kadar incelme görülebilmektedir [7, 10, 13].



Şekil 2.2. Derin çekme işlemi aşamaları [7]

Derin çekme işlemlerinde; aşağı yönlü baskı yastığı kuvveti (F_b) ile kalıp yüzeyine bastırılan çapındaki şekillendirilmemiş açınım sac metal malzeme (D_i), aşağı yönde deformasyon kuvveti (F_d), uç radyüsü (R_z) ve silindirik şekillendirme zımbası (D_z) kullanılarak kalıp giriş radyüsü (R_k) olan kalıp boşluğundan içeri doğru akmaya zorlanır. Sac metal malzemenin şekillendirme sırasında kalıp içinde kolay hareket etmesi ve çekme işleminin daha düşük kuvvetler altında gerçekleşebilmesi için kalıp girişine olabildiğince büyük kalıp radyüsü verilmesi işlem açısından önemlidir. Eğer gereğinden büyük kalıp radyüsleri tercih edilirse,

baskı yastığının etkin yüzey alanı azalacağı için çekilen parça üzerinde kırışıklık oluşumu görülmektedir. Ancak, kalıbın ve zımbanın köşelerinde yeterli miktarda radyüs olmaz ise operasyon çekme yerine çok da başarılı olmayan bir delme işlemi ile sonuçlanır. Derin çekme işlemlerinde kalıp boşluğu ile zımba arasında kullanılan açınım sac malzeme kalınlığının (t_0) en az %10' u kadar bir çekme boşluğu (c) bulunmaktadır ve Eş.2.1' de çekme boşluğunun hesaplanması verilmiştir [7, 13, 14].

$$c \geq 1{,}1\, t_0 \tag{2.1}$$

2.3. Derin Çekme İşleminde Kullanılan Hesaplamalar

Derin çekme işleminde şekillendirilmesi düşünülen parçanın ya da şekillendirme operasyonun gerçekleştirileceği tezgâhın uygunluğu; derin çekme oranı, redüksiyon oranı, kalınlık-çap oranı, derin çekme kuvveti, baskı yastığı kuvveti, şekillendirilmemiş sac ölçüsü gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Bu parametreler basit hesaplamalar sonucunda kolayca belirlenebilmekte ve derin çekme operasyonu değerlendirilebilmektedir.

2.3.1. Çekme oranı

Derin çekme oranı, sac metal malzemenin çatlak ve kırılma gibi herhangi bir şekillendirme kusuru görülmeden hangi çapa kadar çekilebileceğini ifade eden bir değerdir. Bu değer genel olarak çelik sac malzemeler için 2,0 üst sınır olarak kabul edilmektedir ve derin çekme oranı büyüdükçe gerçekleştirilen işlemin zorluğu aynı oranda artar. Derin çekme oranı (ß), açınım sac metal malzeme çapının (D_i) zımba çapına (Dz) oranı olarak ifade edilebilir. Derin çekme oranının matematiksel ifadesi Eş.2.2' de verilmiştir [7, 14, 15].

$$\beta = \frac{D_i}{D_z} \tag{2.2}$$

2.3.2. Azaltma oranı

Derin çekme operasyonlarını anlamlandırmanın bir diğer yöntemi ise redüksiyon oranının (r) tespitidir. Çekme oranı (ß=2,0) ile bağıntılı olarak, redüksiyon oranının 0,5' ten daha küçük değerlerde olması istenir. Redüksiyon oranı ifadesi Eş.2.3' te verilmiştir.

$$r = \frac{D_i - D_z}{D_i} \tag{2.3}$$

2.3.3. Kalınlık – çap oranı

Derin çekme operasyonları için belirleyici olan üçüncü ölçüt ise açınım sac metal malzemenin et kalınlığının (t_0) açınım sac metal malzemenin çapına (D_i) bölümü ile bulunan kalınlık – çap oranıdır. Başarılı bir derin çekme işleminin gerçekleşmesi için kalınlık – çap oranının %1' den büyük olması beklenmektedir. Bu oranın azalması sac metal malzemenin şekillendirme esnasında kırışmasına yol açabilmektedir. Kalınlık – çap oranının ifadesi Eş.2.4' te verilmiştir

$$\frac{t_0}{D_i} \geq 0,01 \tag{2.4}$$

2.3.4. Derin çekme kuvveti

Açınım sac metal malzemeden derin çekilmiş ürün elde edebilmek için gereken kuvvete veya diğer bir tanımla derin çekme işlemi sırasında sac metal malzemenin zımba ilerlemesine karşı gösterdiği direnç, derin çekme kuvveti olarak tanımlanmaktadır [14]. Derin çekme kuvveti, zımba hareketi süresince değişken değerlerdedir. Genellikle derin çekme işleminin üçte biri tamamlandığında maksimum derin çekme kuvveti değerine ulaşılmaktadır. Derin çekme işleminde meydana gelen maksimum derin çekme kuvvetinin hesaplanması Eş. 2.5' te verilmiştir. Eşitlikte verilen 0,7 sabit değeri, derin çekme işleminde meydana gelen sürtünmeleri hesaba katan düzeltme faktörüdür.

$$F_ç = \pi D_z \sigma_ç (\beta - 0,7) t_0 \tag{2.5}$$

2.3.5. Baskı yastığı kuvveti

Baskı yastığı kuvveti derin çekme işlemini doğrudan etkileyen bir parametredir. Başarılı bir derin çekme işleminin gerçekleştirilebilmesi için baskı yastığı yardımı ile sac malzeme üzerine doğru ayarlanmış bir baskı kuvveti uygulanması oldukça önemlidir. Uygulanan baskı kuvveti gerekenden az olursa çekilen sac malzemenin flanşında kırışıklıklar, fazla olursa da sac malzemede yırtılmalar meydana gelmektedir. Derin çekme işlemlerinde kullanılan baskı yastığı basıncı (P_b) Eşitlik 2.6' da ve baskı yastığı kuvveti (F_b)'nin hesaplanması Eş.2.7- 2.9' da verilmiştir [7, 14 – 16].

$$P_b = 2.10^{-3}\left[(\beta-1)^2 + \frac{D_i}{200t_0}\right]\sigma_ç \tag{2.6}$$

$$F_b = A_b P_b \tag{2.7}$$

$$F_b = 0,015\sigma_{ak}\pi\left(\beta - 0,7\right) \tag{2.8}$$

$$F_b = 0,015\sigma_{ak}\pi\left(D_i^2 - \left(D_z + 2,2t_0 + 2R_k\right)^2\right) \tag{2.9}$$

2.3.6. Çekme yüksekliği

Derin çekilen bir kabın çekme yüksekliği, açınım sac metal malzemenin çap değeri referans alınarak belirlenebilmektedir. Sac metal malzeme kalıp içerisinde akarken sac flanşı bir miktar kalınlaşmaktadır. Derin çekme işleminde en ince duvar kalınlığı çekilen kabın zımba radyüsü kısmında tabana yakın kısımlarda görülmektedir. Çekilen kabın yan duvarlarının ortalarına doğru ise duvar kalınlığı sac metal malzemenin başlangıç kalınlığına (t_0) eşittir. Ancak, çekme yüksekliği hesabı yapılırken derin çekilmiş kabın tüm duvar kalınlıklarının 't_0' başlangıç kalınlığında olduğu varsayılır ve sabit hacim denkliğinden çekme yüksekliği elde edilir. Çekme yüksekliği (h) ifadesinin elde edilmesi Eş. 2.10 ve Eş.2.11' de verilmiştir [14, 17].

$$\frac{\pi D_i^2 t_0}{4} = \frac{\pi D_z^2 t_0}{4} + \pi D_z t_0 h \tag{2.10}$$

$$h \approx \frac{D_z}{4}\left(\beta^2 - 1\right) \tag{2.11}$$

2.3.7. Kalıp radyüsü

Sac metal malzemenin kalıp içerisinde kolayca hareket edebilmesi ve derin çekme işleminin başarılı bir şekilde sonuçlandırılması için kalıp radyüsünün dikkatle seçilmesi gereken önemli bir parametredir. Kalıp radyüsünün gereğinden daha büyük seçilmesi baskı yastığı etkin alanını azalttığı için kırışıklıkların oluşmasına, gereğinden daha küçük seçilmesi ise rahat şekilde akamayan sac metal malzemenin gerilmelerinin radyüs bölgesinde yoğunlaşmasına ve sac malzemenin yırtılmasına neden olmaktadır. kalıp radyüsü(R_k) Eş.2.12 ve Eş.2.13' de verilmiştir[14, 18].

$$R_k = 0,035\left(50 + \left(D_i - D_z\right)\right)\sqrt{t_0} \tag{2.12}$$

$$R_k = \sqrt{0,8\left(D_i - D_z\right)t_0} \tag{2.13}$$

2.3.8. Açınım sac ölçüsü

Derin çekme işleminin tasarlanması, öncelikli olarak şekillendirilecek sac metal malzemenin açınım ölçülerinin belirlenmesi ile başlamaktadır. Teknik detayları belirlenmiş olan derin çekilmiş ürünün ölçüleri kullanılarak açınım sac metal malzemenin ölçüleri bulunabilmektedir. Plastik deformasyon ile şekillendirme işlemlerinin genel kuralı olarak kabul edilen sabit hacim eşitliği yöntemiyle çekilen sac çekilen sac metal malzemenin açınım durumundaki hacim değeri ile bitmiş ürün durumundaki hacim değerleri eşitlenerek hesaplanmaktadır. Çekilmiş ürünün alanı ($A_ü$) ve açınım sac metal malzeme alanının (A_a) birbirine eşit kabul edilerek açınım sac metal malzeme ölçüsünün (D_i) elde edildiği denklemler silindirik bir kap geometrisi için Eş.2.14 – 2.16' da verilmiştir [14, 18].

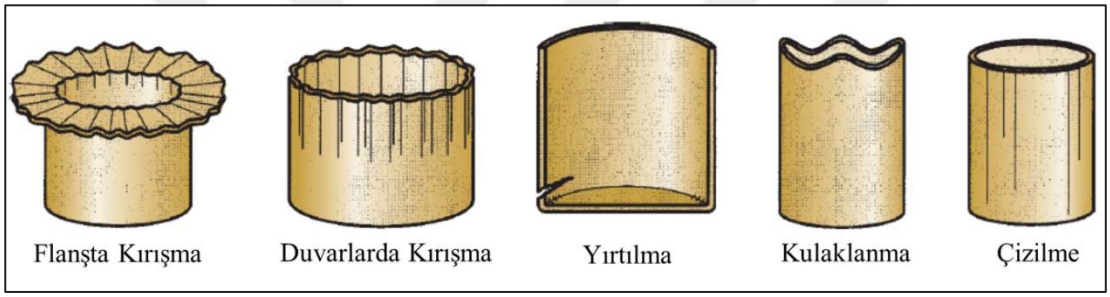
$$A_a = \frac{\pi D_i^2}{4} \tag{2.14}$$

$$A_ü = \frac{\pi D_z^2}{4} + \pi D_z h \tag{2.15}$$

$$D_i = \sqrt{D_z^2 + 4D_z h} \tag{2.16}$$

2.4. Derin Çekme İşleminde Karşılaşılan Şekillendirme Kusurları

Sac metal kalıpçılığında kullanılan kesme ve bükme operasyonları ile kıyaslandığında derin çekme işlemi daha karmaşık bir mekaniğe sahiptir ve birçok sebepten dolayı işlem başarısız olarak sonuçlanabilir. Derin çekme yöntemi ile üretilmiş parçalarda; sac flanşında kırışma, yan duvarlarda kırışma, yırtılma, kırılma, çizilme, kulaklanma ve simetrik olmama gibi çeşitli işlem kusurları meydana gelebilir. Ayrıca, derin çekme işleminde ölçü tamlığının sağlanamamasına yol açan geri esneme davranışı da gözlemlenebilir. Derin çekme işlemlerinde görülebilen şekillendirme kusurları Şekil 2.3' te verilmiştir. Derin çekme işlemlerinde görülebilen şekillendirme kusurlarının muhtemel oluşma sebepleri de Çizelge 2.1' de verilmiştir [7, 18, 19].



Şekil 2.3. Derin çekme işlemlerinde görülebilen şekillendirme kusurları [7]

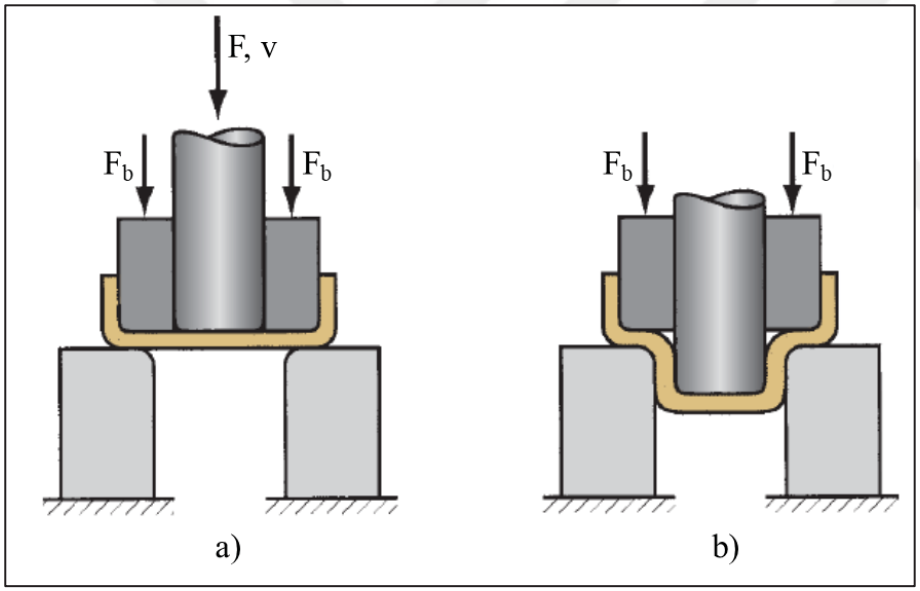
Çizelge 2.1. Derin çekme işlemlerinde görülen kusurlar ve muhtemel sebepleri [18]

Hata	Sebepleri
Buruşma	Uygunsuz baskı yastığı kuvveti
	Baskı yastığı kuvvetinin tüm yüzeylerde eşit olmaması
	Baskı yastığı yüzeyinin düzgün olmaması
	Sac malzeme kalitesinin düşük olması
	Kalıp radyüsünün çok büyük olması
	Çekme boşluğunun çok büyük olması
	Malzeme yüzeyinin kirli veya çapaklı olması
Parçada yırtılma veya Kırılma	Aşırı baskı yastığı kuvveti
	Kalıp radyüsünün çok küçük olması
	Zımba radyüsünün çok küçük olması
	Pres hızının çok yüksek olması
	Çekme oranının çok yüksek olması
	Sac malzeme kalitesinin düşük olması
	Uygunsuz veya eksik yağlama
	Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması
	Çekme boşluğunun çok küçük olması
	Kalıp veya baskı yastığı üzerinde oluşan çizik veya çentikler
	Malzeme akışını önleyen keskin köşeler
Kulaklama	Çekme boşluğunun uygun olmaması
	Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması
	Sac malzemenin kalıp içerisine uygun yerleştirilmemesi
	Uygunsuz yağlama
Parça kenarlarında yırtılma veya dalgalanma	Çekme boşluğunun uygun olmaması
	Fazla yağlama
	Kalıp radyüsünün çok büyük olması
	Eşit olmayan baskı kuvveti
	Kalıp kenarlarının dışa esnemesi
Parçanın dip kısımlarında pürüzlenme	Sac malzeme kalitesi
	Baskı yastığı yetersiz olması
	Baskı yastığı üzerinde yağ birikmesi
	Hava çıkışının olmaması
	Parçadaki uygunsuz esneme

2.5. Diğer Mekanik Derin Çekme Yöntemleri

2.5.1. Yeniden çekme

Tasarlanan ürünün derin çekilmesinde, derin çekme oranı fazla yüksek ise istenen ürünün elde edilebilmesi için bir veya birkaç adımdan oluşan derin çekme işlemi gerekli olabilmektedir. İlk çekme adımını takip eden yeniden yapılan tüm bu çekme adımları 'yeniden çekme' olarak tanımlanmaktadır. Yeniden çekme işleminde plastik deformasyon ile şekillendirme operasyonlarındaki hacim sabitliği kuralı temel alınarak daralan çaplarda çekilen malzemenin uzaması ile istenen çekme oranlarında şekillendirilmiş ürünler elde edilebilmektedir. Yeniden çekme işleminin şematik gösterimi Şekil 2.4' te verilmiştir.

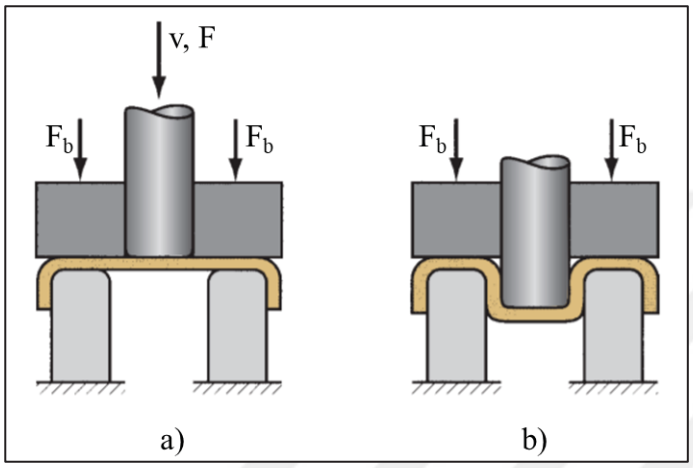


Şekil 2.4. Yeniden çekme işlemi; (a) Baskı ile sacın sıkıştırılması; (b) Zımba ile şekillendirme

2.5.2. Ters derin çekme işlemi (Çevirme çekme işlemi)

Yeniden çekme işlemi ile aynı şekilde hacim eşitliği prensibini kullanan ters derin çekme işleminde daha önceden ön çekilerek şekillendirilmiş olan sac metal malzeme derin çekme kalıba ters şekilde yerleştirilmekte daha sonra küçük çapa tekrar çekilerek istenilen ürün elde edilebilmektedir. Tersine derin çekme işleminde, yeniden derin çekme işlemine kıyasla daha büyük deformasyon kuvveti gerekli gibi görünse de aslında tersine derin çekme işlemi ile derin çekilmiş kapların oluşturulması daha kolaydır. Yeniden çekme işleminde ön şekil

verilmiş sac metal malzemenin köşeleri takip eden çekme işlemlerinde çekme yönüne zıt yönde bükülürken, tersine derin çekme işleminde ön şekil verilmiş sac metal malzemenin köşeleri takip eden çekme işlemlerinde çekme yönü ile aynı yönde bükülmektedir. İki işlem arasındaki bu fark nedeniyle tersine derin çekme işlemlerinde daha az gerilme sertleşmesi ve daha az çekme kuvveti görülmektedir. Ters derin çekme işleminin şematik gösterimi Şekil 2.5' da verilmiştir



Şekil 2.5. Ters Derin Çekme; (a) Baskı ile sacın sıkıştırılması; (b) Zımba ile şekillendirme

2.5.3. Baskı yastıksız derin çekme işlemi

Derin çekme işlemlerinde uygulanan baskı kuvvetinin en önemli amacı derin çekilen sac malzeme kulaklarının çekme sırasında kırışmasını önlemektir. Derin çekme proseslerinde başlangıç kalınlığı (t_0) – açınım sac çapı (D_i) oranı arttıkça sac metal malzemenin kırışma eğilimi azalmaktadır. Bu nedenle bazı durumlarda baskı kuvvetine ihtiyaç duyulmadan derin çekme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Bu tür baskı kuvveti uygulanmadan gerçekleştirilen derin çekme kalıplarında işlemin düzgünce gerçekleştirilebilmesi için kalıp boşluğuna eğimli bir şekil verilmesi gerekmektedir. Baskı kuvvetini uygulamak için gerekli olan baskı yastığı kullanılmadan gerçekleştirilebilen derin çekme işlemleri, kalıp üretim maliyetleri açısından ve prosesin tek etkili preslerde uygulanabilmesi açısından avantajlar sağlamaktadır. Baskı yastıksız derin çekme işlemi için Eş.2.17-2.19'a uygun girdiler sağlanmalıdır. Ayrıca, daha önceden çekilmiş bir kabın baskı yastıksız derin çekme operasyonuyla tekrar çekilerek daha küçük çapta bir ürünün elde edilmesi isteniyorsa ikinci adımda kullanılan zımba çapı (D_z) önem arz etmektedir. Bu durumda Eş.2.20 ve Eş.2.21 sağlanmalıdır [7, 10, 18].

$$D_i - D_z < 5t_0 \tag{2.17}$$

$$t_0 \geq 0,017D_i \tag{2.18}$$

$$\frac{D_z}{D_i} \geq 0,55 \tag{2.19}$$

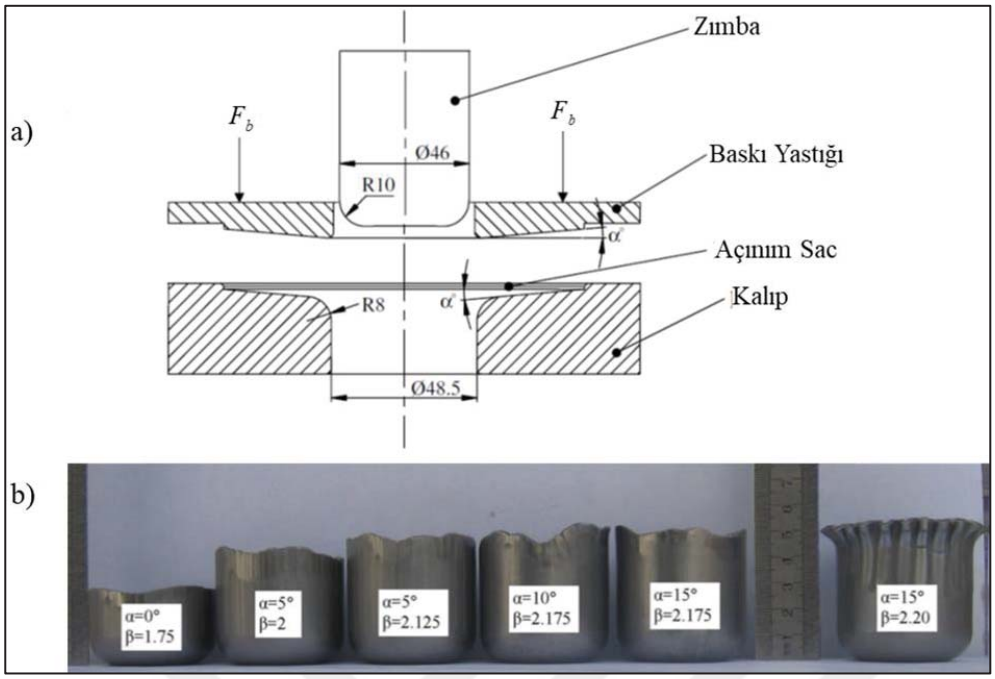
$$s \geq 0,015D_i \tag{2.20}$$

$$\frac{D_z}{d_z} \geq 0,78 \tag{2.21}$$

3. LİTERATÜR TARAMASI

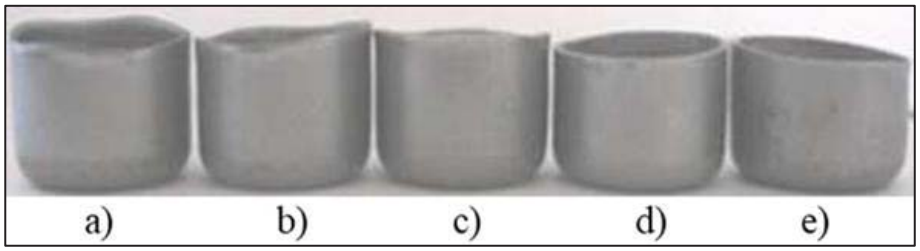
Literatürde derin çekme işleminin verimliliğini arttırmak için deneysel ve analiz yöntemlerinin kullanıldığı çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada da kalıp giriş tipinin esas alınarak derin çekme ile şekillendirilebilirliğin arttırılmaya çalışıldığı çalışmalar derlenmiştir.

Savaş ve Secgin, yaptıkları çalışmalarında çeşitli açılara sahip kalıp ve baskı yastığı geometrileri kullanarak çekme oranını (β) arttırmayı hedeflemişlerdir. Çalışmalarında 1 mm kalınlığında DC-01 kalite düşük karbonlu ve yüksek şekillendirilebilirlik özelliklerine sahip sac malzeme kullanmışlardır. Derin çekme deneylerini 0°; 2,5°; 5°; 10°; 15° giriş açılarına sahip kalıplarda gerçekleştirmişlerdir. Çekme oranının kalıp geometrisine uygulanan açıdan (α) etkilendiğini ve α açısının artmasıyla çekme oranının arttığını belirlemişlerdir. Kalıp girişine açı uygulanmayan çalışmalarında maksimum çekme oranı β=1,75 olarak ölçülürken, kalıp giriş açısının arttırılmasıyla maksimum çekme oranının β=2,175 değerine yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Ancak kalıp giriş açısının açının fazla arttırılması sonucunda (α=15°) ise radyal kuvvetin azalmasına bağlı olarak sac üzerinde kırışıklıkların meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Deney düzeneğinin şematik gösterimi ve şekillendirilmiş parçaların gösterimi Şekil 3.1’ de verilmiştir [20].

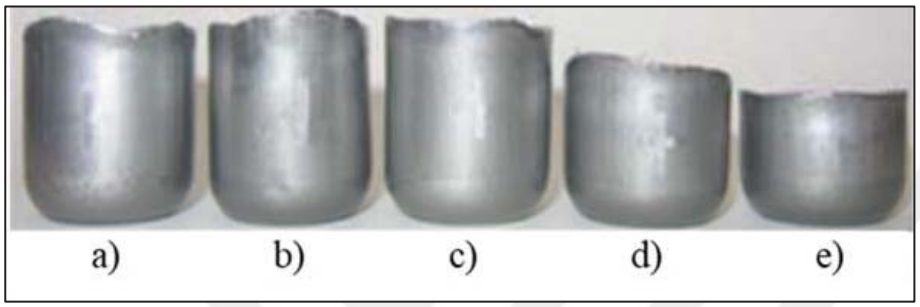


Şekil 3.1. (a) Açılı kalıp ve baskı yastığının şematik gösterimi; (b) Açılı kalıpta şekillendirilmiş numuneler [20]

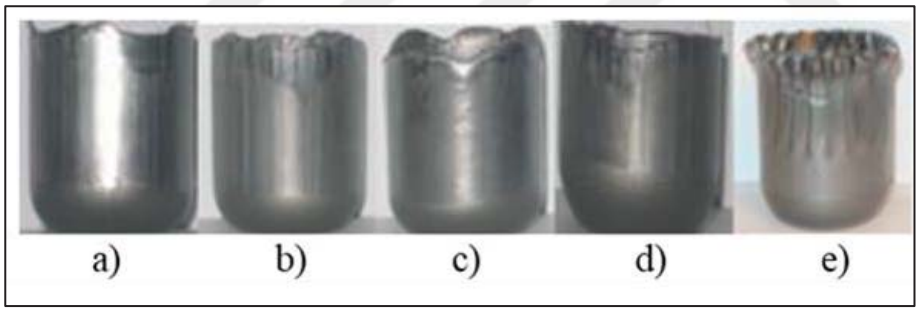
Özek ve Bal; derin çekme işlemlerinde önemli etkileri olan kalıp giriş açısı, kalıp giriş radyüsü ve zımba uç radyüsü gibi parametrelerin derin çekilmiş kapların et kalınlığına etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında; klasik derin çekme kalıplarından farklı olarak çeşitli geometrilerde kalıplar tasarlayıp üretmişlerdir. Üretilen kalıplarda klasik derin çekme kalıplarından farklı olarak; kalıp girişine belirli açılar (α=0°, α=2,5°, α=7,5°, α=12,5°, α=15°), kalıp girişine ve zımbanın ucuna belirli radyüsler (R=4 mm, R=6 mm, R=8 mm, R=10 mm) uygulamışlardır. Derin çekme işlemlerini; Ø=30 mm zımba için β=1,8, β=1,9, β=2,1, β=2,2, β=2,3 ve β=2,35 çekme oranını sağlayacak 1 mm kalınlığındaki DKP37 sac metal numuneler kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda; klasik derin çekme yöntemleri ile en fazla β=1,8 çekme oranına ulaşılabilirken, kalıp geometrilerinde değişiklikler yaparak β=2,3 çekme oranına ulaşılabildiğini belirlemişlerdir. Kalıp girişine ve zımbanın uç kısmına uygulanan radyüs miktarı ve kalıp girişine uygulanan açı miktarı arttıkça çekme oranının arttığını ve bu artışa bağlı olarak da et kalınlığının azaldığını gözlemlemişlerdir. Farklı radyüs değerlerinde yapılmış deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Şekil 3.2 – 3.5' da verilmiştir [21].



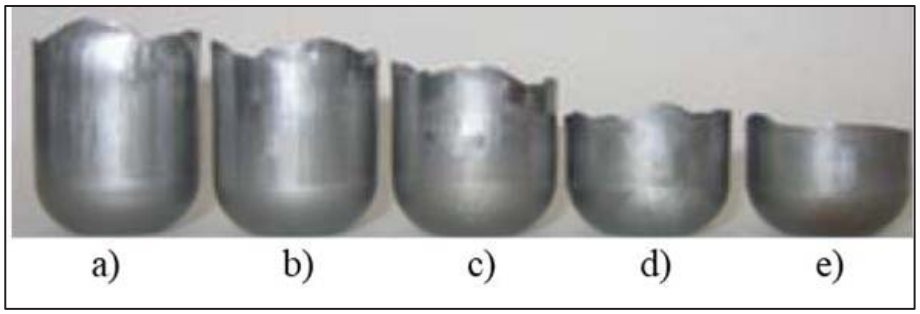
Şekil 3.2. R=4 mm için sonuçlar; (a) α=15° & β=1.9; (b) α=12.5° & β=1.9; (c) α=7.5° & β=1.9; (d) α=2.5° & β=1.8; (e) α=0° & β=1.9 [21]



Şekil 3.3. R=6 mm için sonuçlar; (a) α=15° & β=2.1 (b) α=12.5° & β=2.1; (c) α=7.5° & β=2.1; (d) α=2.5° & β=1.9; (e) α=0° & β=1.8 [21]

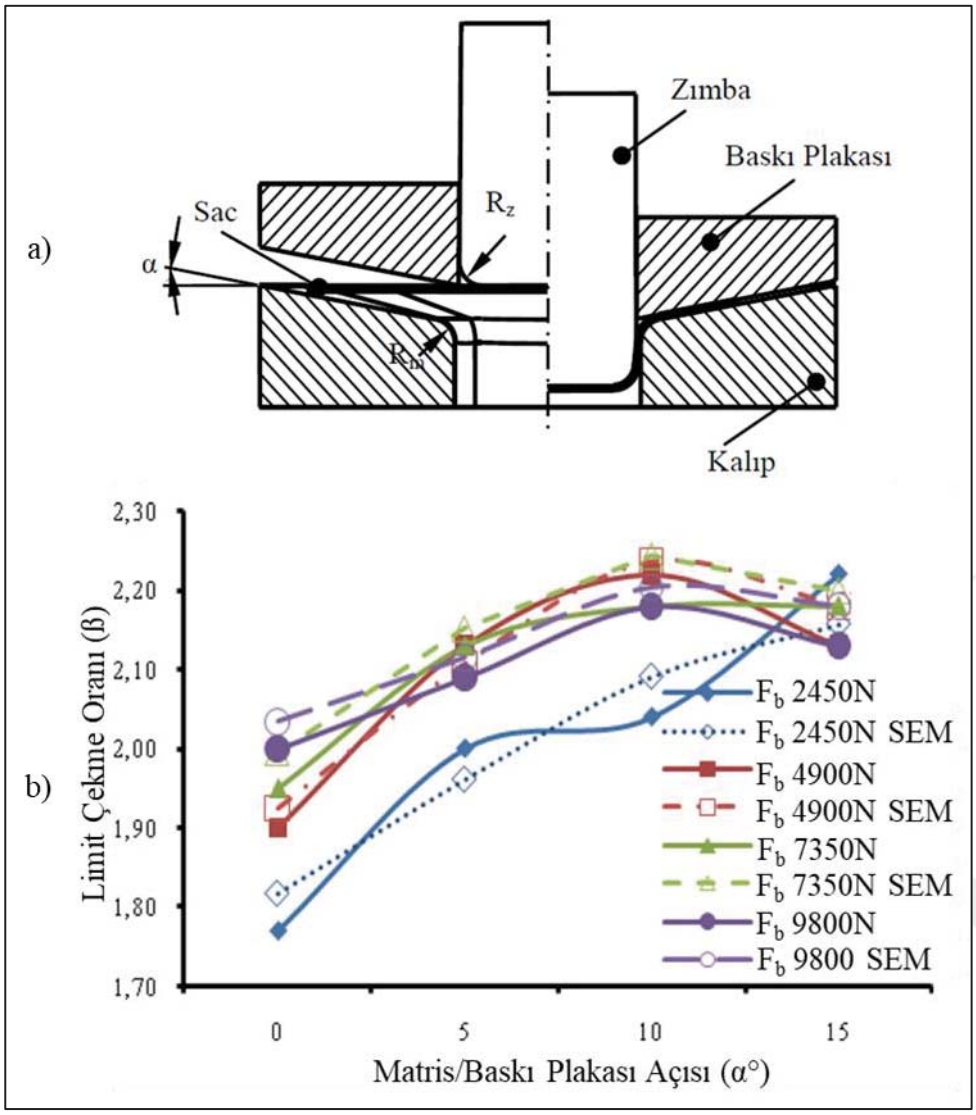


Şekil 3.4. R=8 mm için sonuçlar; (a) α=15° & β=2.1 (b) α=12.5° & β=2.1; (c) α=7.5° & β=2.1; (d) α=2.5° & β=1.9; (e) α=0° & β=1.8 [21]



Şekil 3.5. R=10 mm için sonuçlar; (a) α=15° & β=2.3 (b) α=12.5° & β=2.2; (c) α=7.5° & β=2.2; (d) α=2.5° & β=2.1; (e) α=0° & β=1.8 [21]

Kalıp ve baskı yastığına açı verilerek derin çekme ile şekillendirilebilirliğin araştırıldığı bir diğer çalışmada da Özek ve Ünal, kare profilli derin çekme işlemlerinde kalıp – baskı plakası çiftine uygulanan çeşitli giriş açılarının; çekme oranı (β), zımba kuvveti ve duvar kalınlığı yönünden prosese etkilerini deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analizleri ile incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarında deney malzemesi olarak 0,9 mm kalınlığında DC01(Erdemir 6112) standardında derin çekme sac metal malzemesini kullanmışlardır. Çekme işlemi uygulanan kalıp setlerinde ise; α=0°, α=5°, α=10°, α=15° giriş açılarına sahip dişi kalıplar ve baskı plakaları kullanmışlardır. Deneysel çalışma işlemleri sonucunda ise kalıp giriş açısının artmasıyla sac akışının kolaylaştığı ve çekme oranında (β) artışın meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Kalıp giriş açısının α=0° olduğu klasik yöntem ile yapılan çekme işleminde β=1.90 iken α=10° giriş açısı kullanılan kalıplarda ise çekme oranının β=2.22'ye yükseldiğini belirlemişlerdir. Çalışmada kullanılan çekme kalıplarının şematik gösterimi ve kalıp açısı – baskı plakası kuvveti ilişkisinin çekme oranına etkisi Şekil 3.6' da verilmiştir [22].



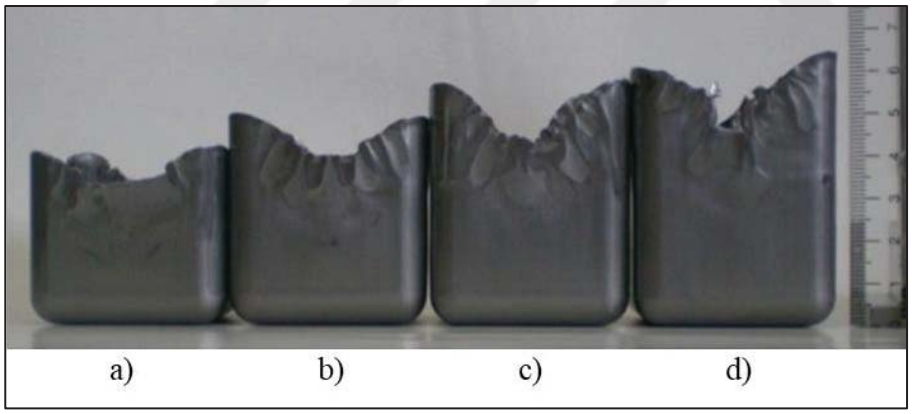
Şekil 3.6. (a) Çalışmada kullanılan derin çekme kalıplarının şematik gösterimi; (b) Kalıp giriş açısı – baskı yastığı kuvveti ilişkisinin çekme oranına etkisi [22]

Özek ve Ünal yaptıkları bir diğer çalışmada ise kare kapların derin çekme işlemi ile üretilmesinde kalıp ve baskı yastığı açısı, kalıp giriş radyüsü, baskı yastığı kuvveti ve zımba uç radyüsü gibi parametrelerin maksimum çekme oranına (β) ve et kalınlığına etkilerini yaptıkları deneysel çalışmalar ile incelemişlerdir. Derin çekme deneylerinde radyüsün etkisini gözlemlemek için R=4 mm, R=6 mm, R=8 mm giriş radyüsü bulunan kalıplar ile R=4 mm, R=6 mm, R=8 mm uç radyüsü bulunan zımbalar ve baskı yastığı açısının etkisini gözlemlemek için α=0°, α=5°, α=10°, α=15° açılı kalıplar ile baskı yastıkları kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarda, 0.9 mm kalınlığında DIN EN 10130-1999 (DC01) sac metal malzemeden hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda; çekme oranının, kalıp girişine ve baskı yastığına uygulanan açının arttırılması ve kalıp giriş radyüsünün arttırılması ile yükseltilebildiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, kalıp

ve baskı yastığına uygulanan açının arttırılması ile çıkan ürünün yan duvarlarındaki et kalınlığında meydana incelme oranının azaltılabildiğini gözlemlemişlerdir. Şekillendirilen parçaların et kalınlığı ölçümlerini dijital mikrometre kullanarak yapmışlardır. Et kalınlığının ölçüm adımları Şekil 3.7'de verilmiştir. Farklı kalıp giriş açılarında derin çekilen parçaların görüntüsü ise Şekil 3.8' de verilmiştir [23].



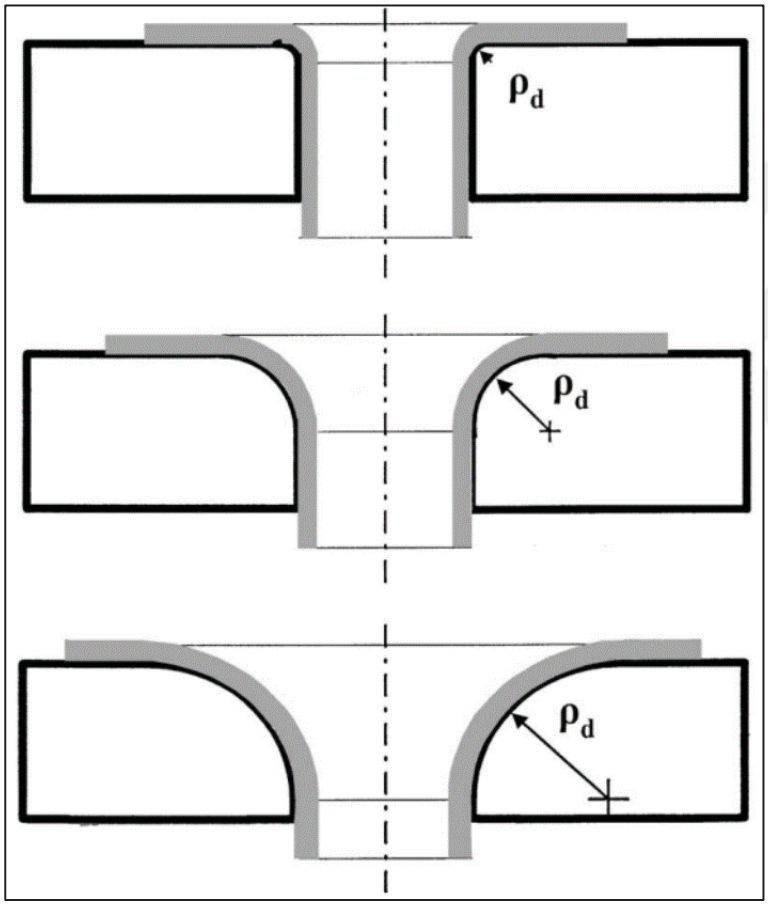
Şekil 3.7. Et kalınlığının ölçülmesi [23]



Şekil 3.8. R=6 mm sabit giriş radyüsü için farklı kalıp giriş açılarına göre artan çekme oranları; (a) α=0°& β=1,86; (b) α=5°& β=2,09; (c) α=10°& β=2,13; (d) α=15°& β=2,22 [23]

Dejmal vd. derin çekme işlemlerinde limit çekme oranını arttırmak için çekme kuvvetlerini azaltan optimum kalıp giriş tipini belirlemeyi amaçladıkları bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada; optimum kalıp özelliklerini belirlemek için 0.5 mm kalınlığındaki Al1100 ve tavlanmış bakırdan hazırlanan dairesel (Ø83 mm, Ø90 mm, Ø95 mm, Ø100 mm) sac metal plakaları, çeşitli kalıp giriş radyüslerine sahip (2 mm; 3,5 mm; 5 mm; 6,5 mm; 8 mm; 10 mm; 12 mm) olan kalıplardan çekmişlerdir. Deneysel çalışmalarını; 5 mm uç radyüsüne sahip 50 mm çapında bir zımba kullanılarak 5 cm/dk sabit

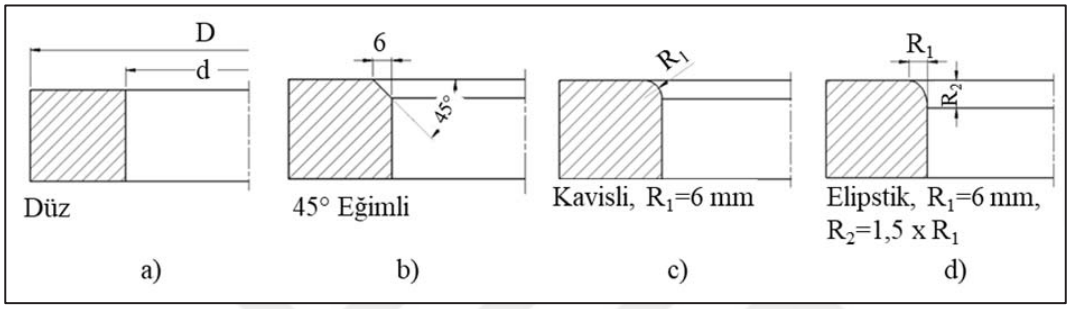
şekillendirme hızında gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sırasında strok ve zımba kuvvetini sürekli takip ederek kaydetmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, kalıp giriş radyüsünün artması ile sürtünme kuvvetlerinin azaldığını ve bu sayede şekillendirme için gereken zımba kuvvetinin de azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, limit çekme oranının; kalıp giriş radyüsü ve kalıp ile sac arasındaki sürtünmeye bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir ve çekme oranının arttırılabilmesi için kalıp giriş radyüsünün olabildiğince büyük seçilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir [24].



Şekil 3.9. Derin çekme kalıplarının artan giriş radyüsüne sahip şematik gösterimi [24]

Taşdemir de yaptığı çalışmada, farklı giriş geometrilerine sahip derin çekme kalıplarının; zımba kuvveti, sac incelme miktarı ve gerilme oluşumu gibi proses parametreleri üzerinde meydana getirdiği değişimleri sonlu elemanlar analizleri ile incelediği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmasında; düz, kavisli, eliptik ve 45° açılı girişe sahip kalıplar ve 1.85 mm kalınlığında 1.3012 sac malzeme modelleyerek sabit 4mm/sn zımba hızı ve 25 kN baskı yastığı kuvveti ile sonlu elemanlar deneylerini uygulamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda; düz giriş tipine sahip kalıpta derin çekme işlemi tamamlanamadan sacın yırtıldığını ifade

etmişlerdir. Çekme işlemleri sırasında oluşan gerilmelerin giriş tipi kavisli ve eliptik olan kalıplarda birbirine yakın, giriş tipi 45° açılı kalıpta ise daha fazla olduğunu gözlemlemiştir. Duvarlardaki et kalınlığında incelme miktarının ise en fazla 45° açılı kalıpta, en az incelmenin ise kavisli kalıpta meydana geldiğini belirtmiştir. Ayrıca, en yüksek zımba kuvveti 45° açılı kalıpta ve kavisli kalıp ile elipstik kalıptaki zımba kuvvetlerinin birbirine yakın olduğunu gözlemlemiştir. Çalışmada kullanılan farklı giriş geometrilerindeki kalıpların ve ölçülerinin şematik bir gösterimi Şekil 3.10' da verilmiştir [25].

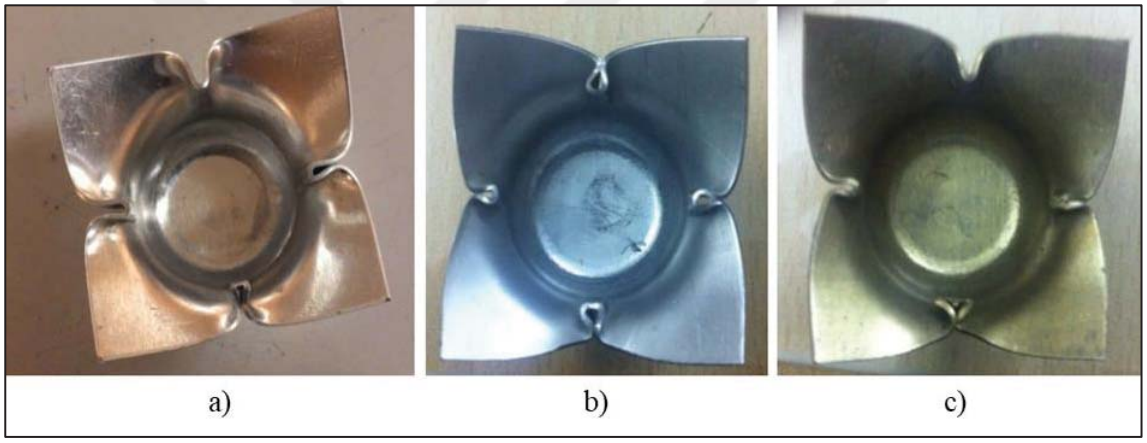


Şekil 3.10. Sonlu elemanlar çalışmasında kullanılan farklı giriş geometrileri ve ölçülerinin şematik gösterimi [25]

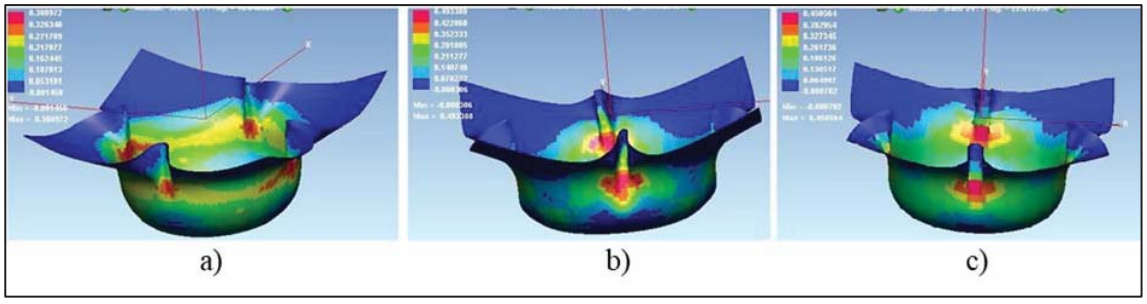
Deneysel ve sonlu elemanlar analizleri ile derin çekme prosesinin araştırıldığı bir diğer çalışmada da Colgan ve Monaghan, derin çekme prosesini etkileyen önemli parametreleri araştırmışlardır. Bu parametreleri zımba ve kalıp radyüsü, zımba hızı, baskı kuvveti, sürtünme ve çekme derinliği olarak belirlemişlerdir. Çalışmalarında, çeşitli geometrilere sahip zımbalardan ve kalıplardan oluşan bir derin çekme sistemi tasarlamışlar ve üretmişlerdir. Deney parametreleri olarak Ø39,4 mm zımba, Ø41,7 mm kalıp, 1 mm kalınlığında ve Ø76 mm EN10130 FeP01 (DC01) açınım sac metal plaka kullanmışlardır. Deneysel çalışmaları sonucunda, çekme derinliği miktarı için önemli bir parametre olan baskı yastığı kuvveti çok fazla olursa kabın tabanında yırtılmaların oluştuğunu, çok az olursa da sac üzerinde kırışıklıklara ve kulaklanmalara neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, küçük zımba ve kalıp radyüsü kullanıldığında zımba kuvvetinin arttığını, sac metal malzemenin kalıp içerisinde akamamasından dolayı çekme derinliğinin azaldığını ve çekilmiş kap duvarlarındaki incelmelerin arttığını gözlemlemişlerdir [26].

Reddy ve diğerleri de farklı malzeme türleri için açılı kalıplarda derin çekme prosesinin tasarım ve analizini gerçekleştirdikleri bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, öncelikle kalıp tasarımını tamamlayarak sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyon sonuçlarını

elde etmişler daha sonrasında ise tasarlanan kalıpları üreterek derin çekme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Derin çekme işlemleri için 55x55 mm ölçülerinde, 0,8 mm kalınlığında SS304 ile 70-30 pirinç ve 0,9 mm AA6111 sac metal malzemeler kullanmışlardır. Çekme deneylerini; uç radyüsü 6 mm olan 30 mm çapındaki zımba, giriş radyüsü 5 mm olan 12,5° açılı kalıp ve 12,5° açılı baskı yastığından oluşan kalıp setinde yapmışlardır. Yaptıkları sonlu elemanlar analizleri ve deneysel çalışmalarda, en iyi şekillendirilebilirliğin SS304 sac metal malzemede elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca; zımba kuvveti ve şekillendirilebilirlik açısından düz kalıplar ile açılı kalıpları karşılaştırdıklarında, açılı kalıpların kullanılmasıyla daha iyi sonuçların elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Açılı kalıplar ile yapılan deney sonuçları Şekil 3.11' de, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonuçları da Şekil 3.12' de verilmiştir [27].



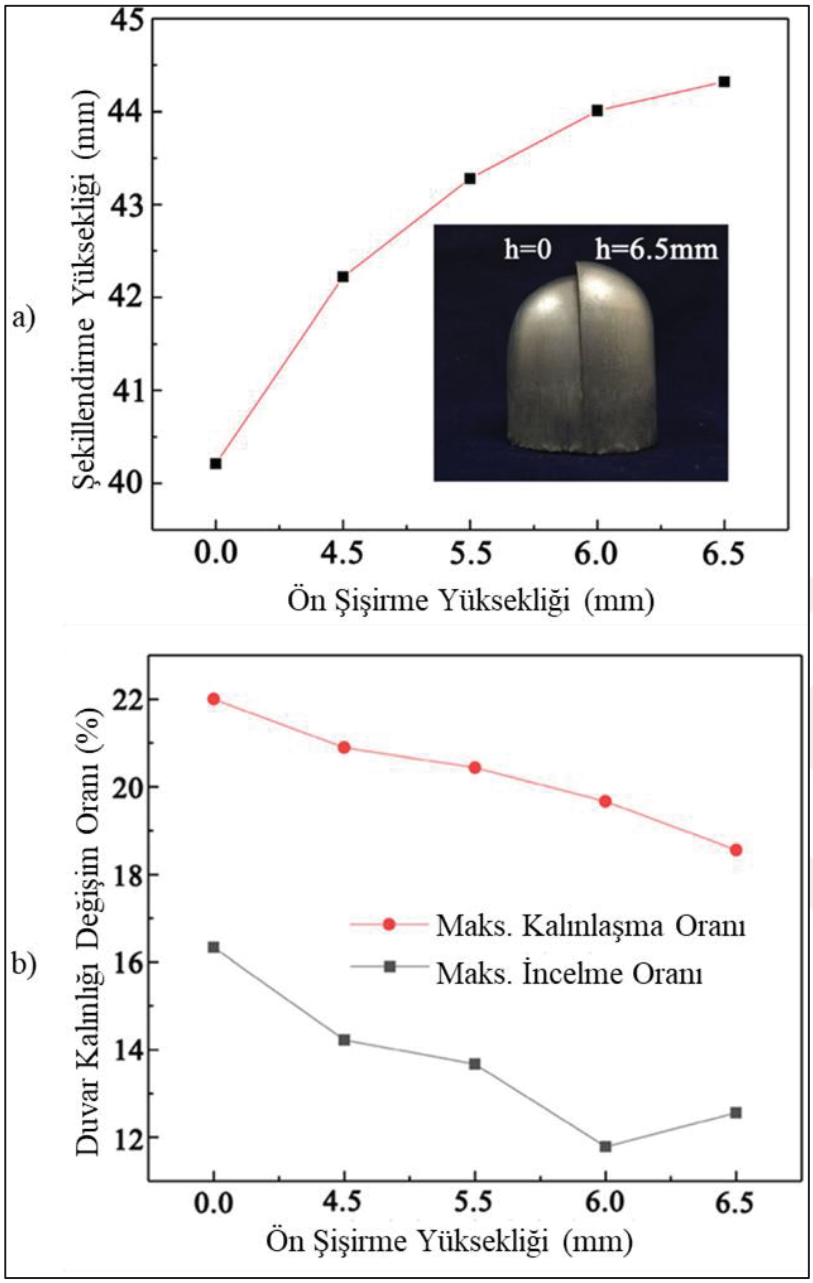
Şekil 3.11. Açılı kalıplarda şekillendirilmiş malzemeler; (a) AA6111; (b) SS304; (c) 70-30 Pirinç [27]



Şekil 3.12. Gerilme oluşumunun sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi; (a) AA6111; (b) SS304; (c) 70-30 Pirinç [27]

Liu vd. yaptıkları çalışmada, küresel tabanlı silindirik alüminyum kapların derin çekilebilirliğine ön şişirme işleminin etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları

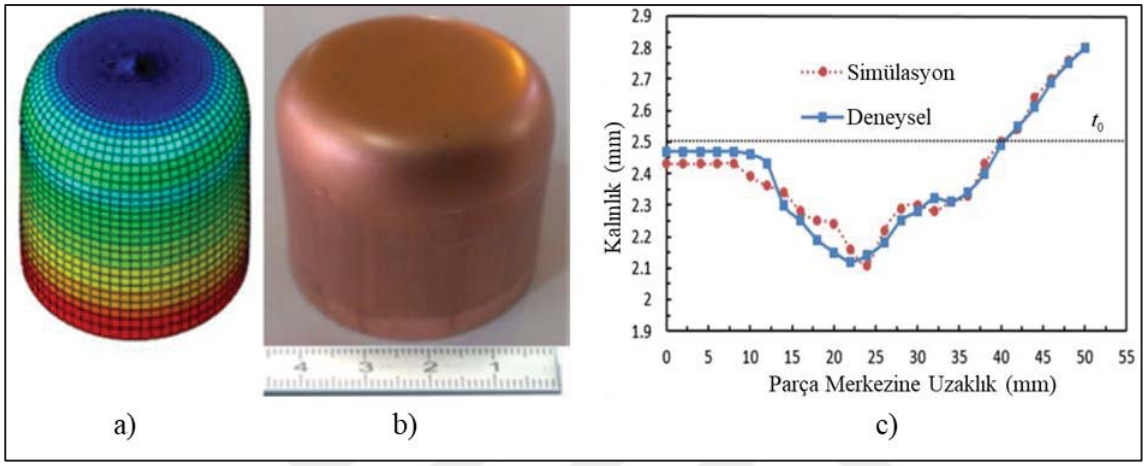
çalışmada, ön şişirme yüksekliğinin çekilmiş parçalarının duvar kalınlıklarındaki incelme oranı ve çekme oranı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında, 0,9 mm kalınlığında Al1060-O sac malzemeden hazırladıkları numuneler kullanmışlardır. Çeşitli ön şişirme yüksekliği parametrelerinde başarılı şekilde çekilerek şekillendirilen alüminyum kapları merkez eksenlerinden keserek duvar kalınlıklarını ölçmüşler ve duvarlardaki incelme oranı değişimlerini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, ön şişirme yüksekliğinin artması ile birlikte belirli bir sınır yüksekliğine kadar duvarlardaki incelme oranının azaldığını daha fazla ön şişirme yüksekliği uygulanması sonucunda ise incelme oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Ön şişirme yüksekliğini 0 mm'den 6 mm'ye yükselterek yaptıkları çekme işlemleri sonucunda elde ettikleri ürünlerin duvar kalınlıklarının daha düzenli bir dağılım gösterdiğini ve duvarlardaki incelmenin %25 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Ön şişirme yüksekliğinin 0 mm'den 6 mm'ye yükseltilmesiyle duvarlardaki maksimum incelme oranının %16'dan %12 oranına gerilediğini ancak ön şişirme yüksekliğinin 0 (sıfır) mm'den 6,5 mm'ye yükseltilmesiyle bu oranın %12,56 oranına ulaştığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda, ön şişirme basıncının artmasıyla maksimum çekme yüksekliğinin %10 arttığını ve geri esnemenin belirgin miktarda azalarak daha doğru şekil-boyut tamlığının elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Ön şişirme yüksekliğinin artmasına bağlı olarak şekillendirme yüksekliği ve çekilmiş kapların duvar kalınlıklarında meydana gelen değişimler Şekil 3.13' te verilmiştir [28].



Şekil 3.13. (a) Ön şişirme yüksekliği – şekillendirme yüksekliği ; (b) Ön şişirme yüksekliği – duvar kalınlığı değişimi oranı ilişkisi [28]

Modanloo vd. derin çekme işlemlerinde proses kalitesini etkileyen kalıp giriş radyüsü, zımba uç radyüsü, zımba hızı, maksimum sıvı basıncı, zımba ve baskı yastığı arasındaki sürtünme katsayısı, kalıp ve baskı yastığı arasındaki sürtünme katsayısı, kalıp ve baskı yastığı arasındaki boşluk miktarı, ön şişirme basıncı vb. parametrelerin çekilmiş bakır kapların duvarlarındaki incelme oranına etkisini sonlu elemanlar analizleri ve deneysel çalışmalar ile araştırmışlardır. Çalışmalarında öncelikle, ABAQUS yazılımı ile çekme işlemini simüle etmişlerdir. Simülasyonların ardından elde edilen sonuçları gerçek derin çekme deneyleri ile

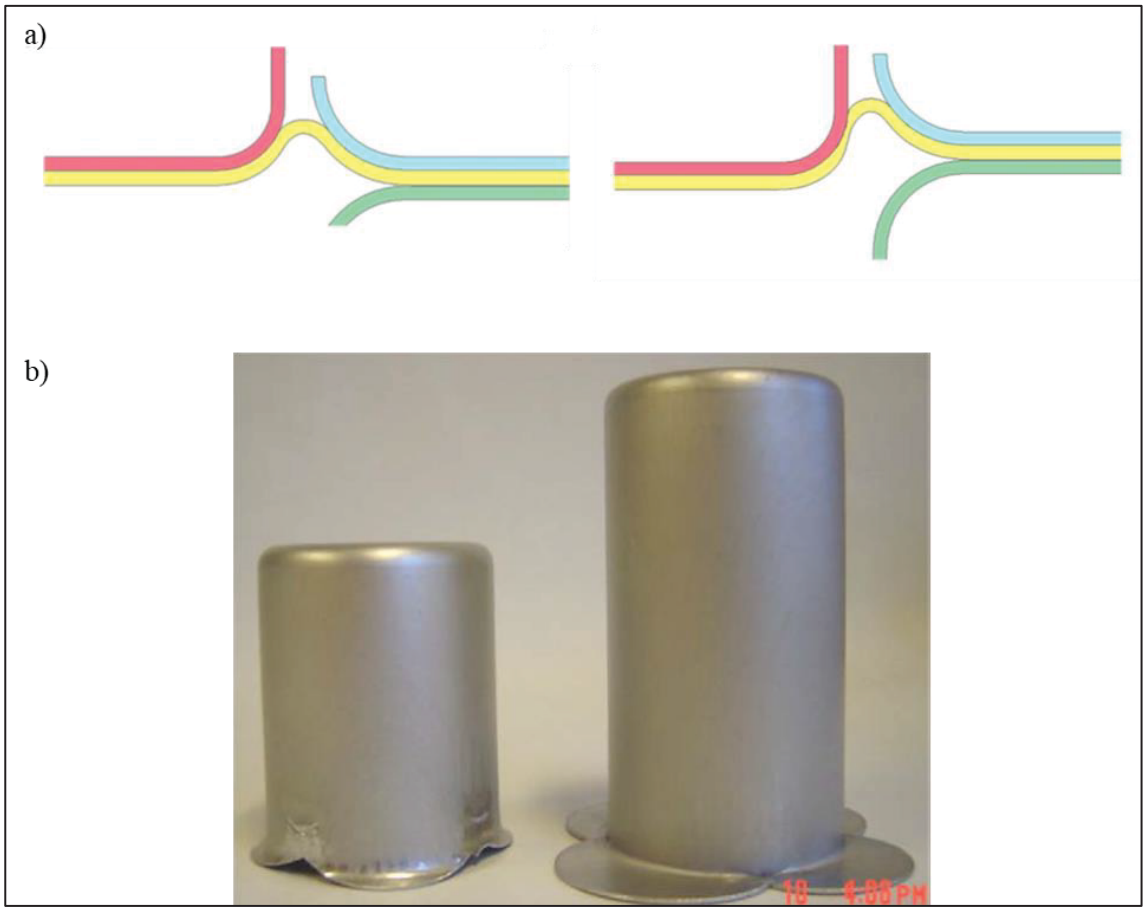
karşılaştırmışlardır. Yaptıkları sonlu elemanlar analizleri ve deneysel çalışmalar sonucunda optimum şekillendirme işlemi için; 8 mm kalıp giriş radyüsü ve 14 MPa ön-şişirme basıncı parametrelerini belirlemişlerdir. Çekme işlemini belirlenen optimum parametrelerde gerçekleştirdiklerinde duvarlardaki incelme oranının en fazla %11 miktarında geliştirilebildiğini gözlemlemişlerdir [29].



Şekil 3.14. Derin çekilmiş parçalar; (a) ABAQUS simulasyonu; (b) Deney sonucu şekillendirilmiş parça; (c) Kalınlık değişimi [29]

Lang vd. hidromekanik derin çekme işlemlerinde önemli bir parametre olan ön şişirme işleminin derin çekmeye etkisini sonlu elemanlar analizleri ve deneysel çalışmalar ile araştırdıkları bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında uç radyüsü 5 mm olan 69 mm çapında zımba, giriş radyüsü 6 mm olan kalıp ve radyüsleri 3 mm (Al1050 için) ile 7 mm (Al6016 için) olan baskı yastıklarından oluşan bir deney seti kullanmışlardır. Derin çekme işlemlerini, 1,15 mm kalınlığındaki Al6016-T4 ve 1,24 mm kalınlığındaki Al1050-H0 sac metal malzemelerden elde edilmiş numuneler kullanılarak çeşitli ön şişirme parametrelerinde gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri derin çekme işlemleri sonucunda, konvansiyonel yöntemler ile elde edemeyecekleri 2,46 (Al1050 için) ve 3,11 (Al6016 için) çekme oranlarında ulaşmışlardır. Yaptıkları deneyler ve sonlu elemanlar analizleri sonucunda; ön şişirme ile sağlanan ters yönlü şekillendirme ve sonrasında uygulanan çekme işleminin, sac malzemenin zımba radyüsü bölgesine yakın kısımlarında belirli bir sertleşmeye neden olduğunu ve bu sertleşmenin çekme sırasında meydana gelebilen kırılmaların önüne geçmeye önemli oranda yardımcı olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, ön şişirme uygulanması ile sac malzemenin zımbayı çevrelemesi sonucunda zımba-sac metal arasındaki sürtünme sayesinde bu bölgelerde kırılmaların önlenebildiğini ancak

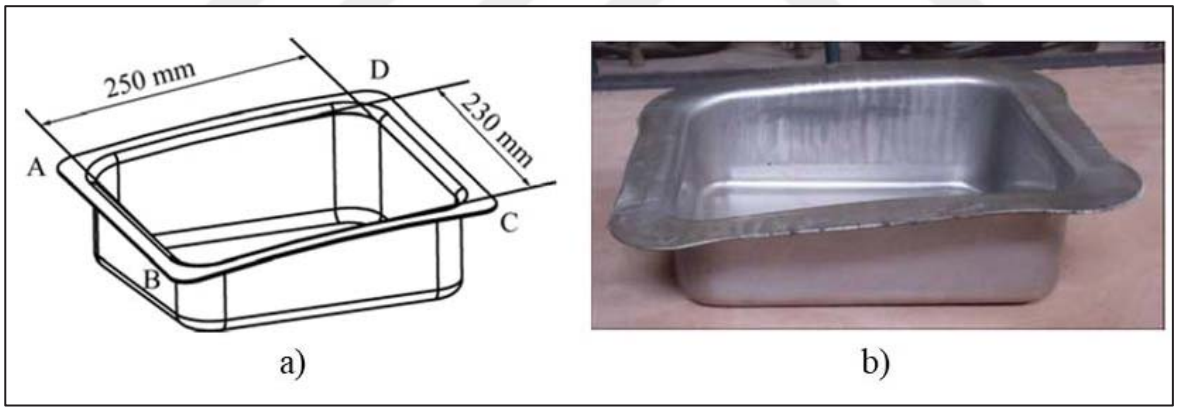
çok fazla ön şişirme yüksekliği uygulandığında sertleşme miktarının artmasından dolayı malzemenin doğru biçimde şekillendirilemeden kırılabileceğini belirlemişlerdir. Ön şişirmenin sonlu elemanlardaki simülasyon modeli ve derin çekilmiş deney numunelerinin görüntüsü Şekil 3.15' te verilmiştir [30].



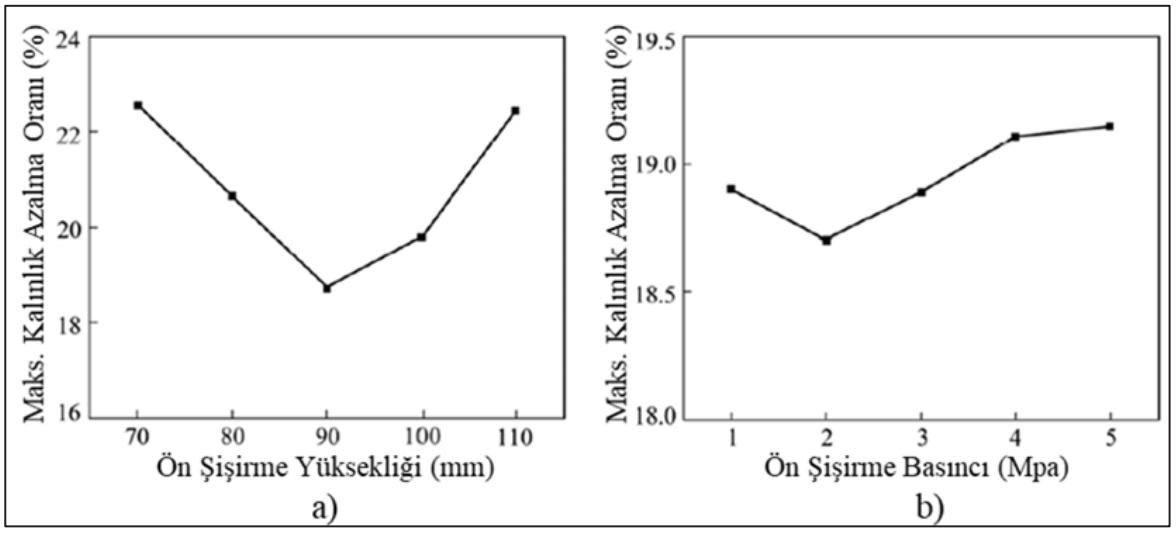
Şekil 3.15. (a) Ön şişirme işleminin simülasyon ile gösterimi; (b) Ön şişirme işlemi kullanılarak derin çekilen malzemeler [30]

Lang ve diğerleri yapmış oldukları bir diğer çalışmada da duvar yükseklikleri eşit olmayan ve tabanı düz olan dikdörtgensel kapların derin çekilmesine ön şişirme işleminin etkilerini sayısal modellemeler ve deneysel çalışmalar ile inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, ön şişirme işlemini meydana getiren ön şişirme yüksekliği ve ön şişirme basıncı parametrelerinin şekillendirmeye etkilerini ve duvar kalınlığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Derin çekme işlemleri; 75 MPa akma dayanımı ve 180 MPa çekme dayanımı değerlerine sahip, ilk çapı 460 mm olan 2.03 mm kalınlığındaki Al2024-O sac metal malzeme kullanılarak uygulanmıştır. Yaptıkları simülasyonlar ve deneysel çalışmalar sonucunda; ön şişirmenin elde edilen ürün üzerinde

önemli etkileri olduğunu gözlemlemişlerdir. Çok yüksek ön şişirme yüksekliğinin uygulandığı denemelerde, parçanın en az yüksekliğe sahip köşesi civarında çatlaklar ve belirgin buruşmaların meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Çok düşük ön şişirme yüksekliğinin uygulandığı denemelerde ise, parçanın en uzun köşesi civarında kırılmaların meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca; ön şişirme yüksekliğinin ideal seviyelerde olduğu çekme işlemlerinde, ön şişirme basıncının parçanın en uzun köşesi civarında oluşan kırıklara çok az bir etkisinin olduğunu belirlemişlerdir. Anca; çok fazla ön şişirme basıncının uygulandığı denemelerde, parçanın en az yüksekliğe sahip köşesi civarında çatlakların ve belirgin buruşmaların oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ek olarak, derin çekme işlemleri sırasında karşılaşılan şekillendirme kusurlarının doğru ön şişirme yüksekliği ve ön şişirme basıncı parametrelerinin uygulanması ile giderilebileceğini ve yaptıkları çalışma için 90-100 mm ön şişirme yüksekliği ile 1-3 MPa ön şişirme basıncı parametrelerinin uygun olduğunu tespit etmişlerdir. Deneysel çalışmalarında kullanılan parçanın şematik çizimi ve şekillendirilmiş hali Şekil 3.16’ da, ön şişirme basıncı ve ön şişirme yüksekliğine bağlı olarak kalınlık değişim oranı da Şekil 3.17’ de verilmiştir [31].

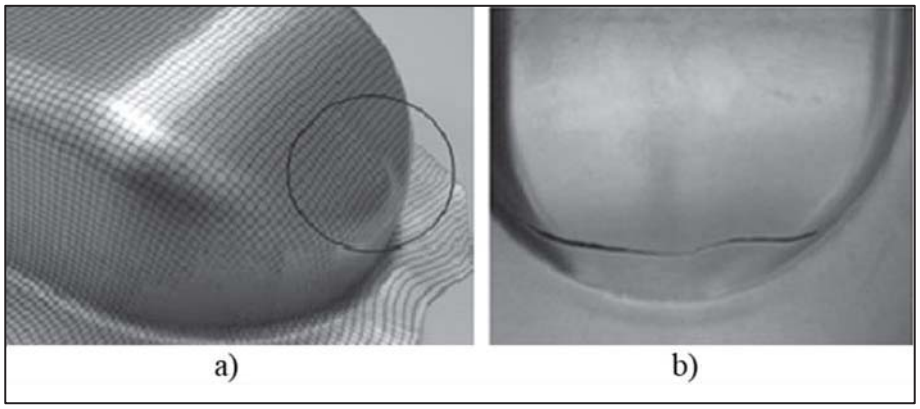


Şekil 3.16. Eşit kenar yüksekliği olmayan dikdörtgensel parça; (a) Şematik görüntüsü; (b) Kalıptan çıkan ürün [31]

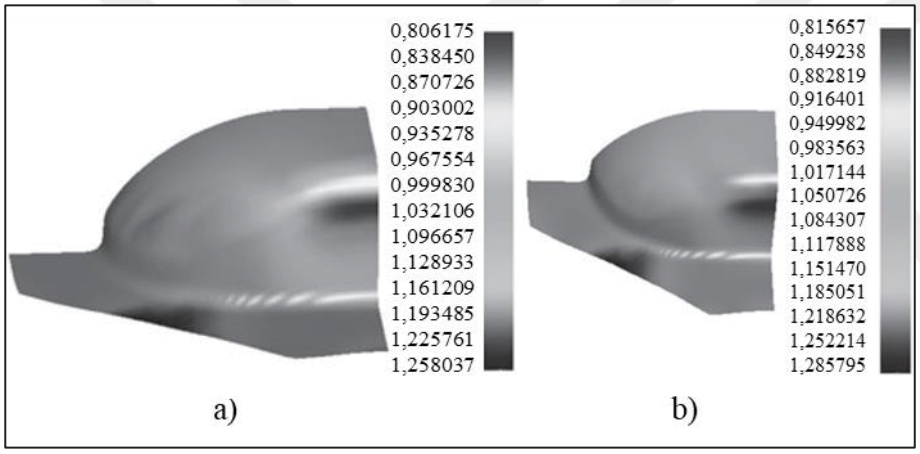


Şekil 3.17. Sayısal modelleme sonuçlarına göre incelme oranları. (a) Ön şişirme yüksekliği – incelme oranı; (b) Ön şişirme basıncı – incelme oranı [31]

Xu ve diğerleri de ön şişirme işleminin, Al 2024 alaşımından hidromekanik derin çekme yöntemi ile üretilen karmaşık geometrili bir parçanın yüzey kalitesine etkilerini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak parametrelerin belirlenebilmesi için sonlu elemanlar analizleri ile derin çekme işlemini simüle etmişlerdir. Hidromekanik derin çekme işlemlerini; akma dayanımı 75 MPa ve çekme dayanımı 185 MPa olan 1 mm kalınlığındaki Al 2024 sac levha kullanarak uygulamışlardır. Baskı yastığı kuvveti, 3.5-30 MPa aralığında farklı değerlerde alınarak simülasyonlar yapılmış ve 15 MPa baskı yastığı kuvvetinin optimum değer olduğu belirlenmiştir. Yaptıkları sonlu elemanlar analizleri ve deneysel çalışmalar sonucunda; 2 MPa ön şişirme basıncı ve 15 MPa baskı yastığı kuvveti parametrelerinde çekilmiş kaplardaki kalınlık dağılımının daha düzenli olduğunu, 2 MPa'dan daha az bir ön şişirme basıncı uygulanması durumunda sac yüzeyinde kırışıklıkların meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, kavisli yüzeylerde meydana gelen kırışıklıkların ön şişirme prosesi uygulanarak önlenebileceğini ve ön şişirme işleminin en önemli faydasının bu yüzeylerdeki basma gerilmelerinin azalmasının olduğunu belirlemişlerdir. Deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar Şekil 3.18 ve 3.19'da verilmiştir [32].



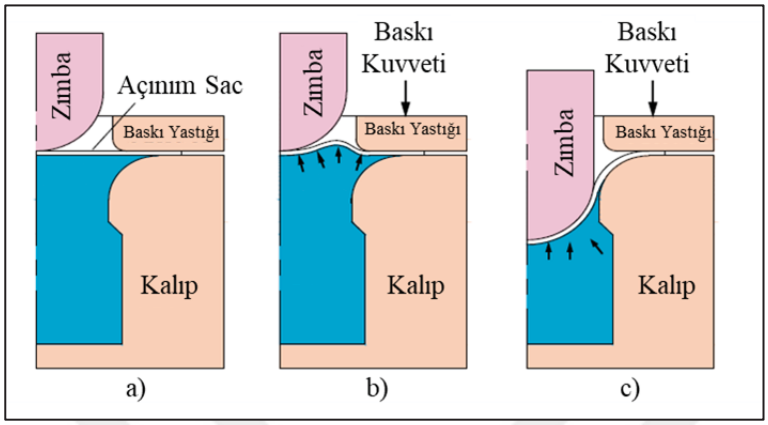
Şekil 3.18. Ön şişirme uygulanan hidromekanik derin çekme işlemlerinde görülen tipik kusurlar; (a) Küçük ön şişirme basıncı nedeniyle kırışıklık oluşumu; (b) Büyük ön şişirme basıncı nedeniyle çatlak oluşumu [32]



Şekil 3.19. Farklı ön şişirme basınçları altında kalınlık dağılımı; (a) 1.5 MPa ön şişirme basıncı; (b) 2 MPa ön şişirme basıncı [32]

Liu vd. hidromekanik derin çekme prosesinde; ön şişirme işleminin kavisli parçanın şekillendirilmesinde meydana gelen kırışıklıklar üzerindeki etkilerini, yaptıkları sonlu elemanlar analizleri ve deneysel çalışmalar ile incelemişlerdir. Sonlu elemanlar analizlerini; 1 mm kalınlığındaki 2A12 (Al 2024) alüminyum alaşımı sac metal malzeme, 5-30 MPa aralığında değişken baskı yastığı kuvvetleri ve 1-5 MPa aralığında değişken ön şişirme basıncı parametreleri kullanarak LS-DYNA3D yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda; sadece baskı yastığı kuvveti değişimi ile kırışıklık oluşumunun tamamen önlenemediğini, gerekenden çok daha fazla baskı yastığı kuvveti kullanılmasının ise çekme gerilmelerini arttırarak sac malzemelerde kırılmalara neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca; ön şişirme işleminin uygulanması ile zımba yüzeyine temas eden sac alanı arttırılarak kırışıklıkların meydana gelmesinin önüne geçilebildiği, yüksek ön

şişirme basıncının kullanılması ile de kırışıklıkların daha da azaltılabildiğini ortaya koymuşlardır. Deney düzeneğinin şematik görünüşü Şekil 3.20' de verilmiştir [33].

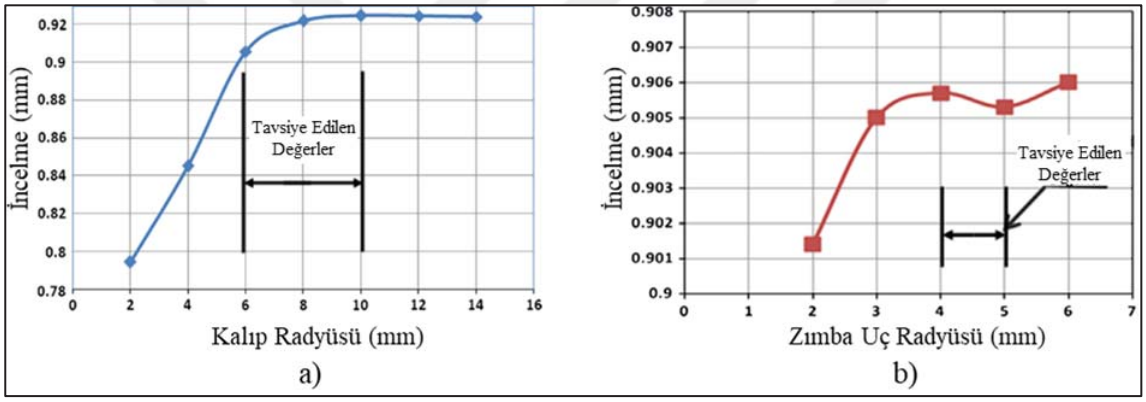


Şekil 3.20. Hidromekanik derin çekme prosesi aşamaları; (a) Prosesin başlangıcı; (b) Ön şişirme işlemi; (c) Hidromekanik derin çekme işlemi [33]

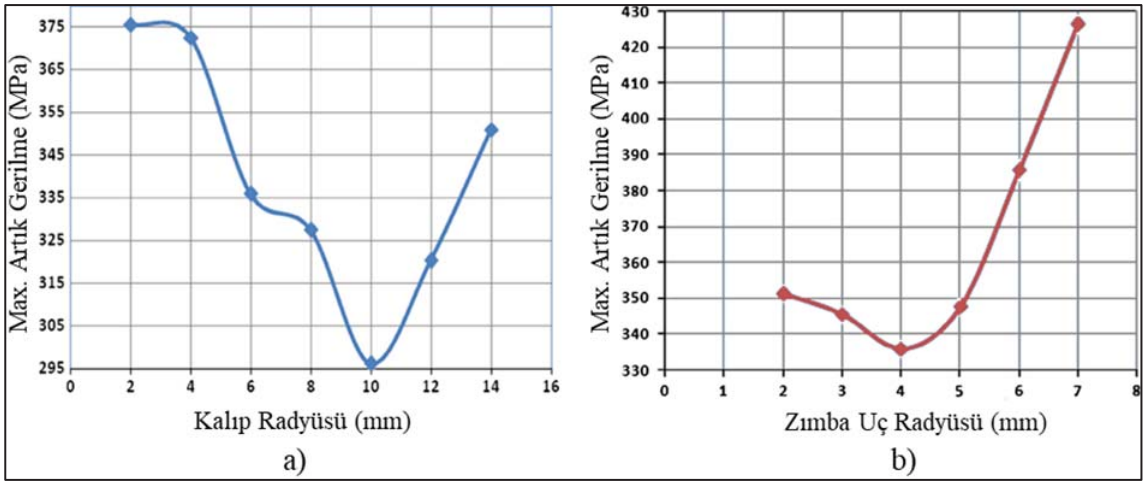
Liu vd. tarafından yapılan hidroforming yöntemi ile ön şişirme yönteminin bir arada kullanıldığı teorik ve deneysel bir diğer çalışmada da; endüstride yaygın olarak kullanılmakta olan 1,45 mm kalınlığında ve 112,4 mm yarıçapında Al-Cu-Mn alaşımı sac metal deney numuneleri kullanmışlardır. Çalışmalarında öncelikle, tepki yüzey metodolojisi kullanarak ön şişirme geometrisini optimize etmişler ve 75 mm ön şişirme radyüsü ile 35 mm ön şişirme yüksekliğine sahip bir ön şişirme geometrisi elde etmişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, şekillendirme işlemi öncesinde uygulanan ön şişirme işleminin malzemenin deformasyon miktarını önemli ölçüde arttırarak şekillendirme kalitesini geliştirdiğini gözlemlemişlerdir. Uygun ön şişirme parametreleri kullanılmasıyla ortalama gerinimin %75 oranında iyileştirilebildiğini ve homojen deformasyon oranının %45 civarında arttırılabildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, ön şişirme işlemi kullanılarak elde edilen ürünlerin sertliklerinin pekleşme etkisinden dolayı başlangıç durumuna göre %11.5 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [34].

Sherbiny vd. derin çekme yöntemi ile elde edilen ürünlerin duvar kalınlığı değişimlerini ve artık gerilmeleri araştırdıkları bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonuca ulaşmayı geciktiren ve maliyetleri arttıran deneme yanılma sürecini en azına indirmek amacıyla, öncelikli olarak sonlu elemanlar analizleri ile simülasyon ortamında işlem parametreleri belirlemişler daha sonrasında ise deneysel çalışmalar ile simülasyonların doğruluğunu karşılaştırmışlardır. Geliştirdikleri sonlu elemanlar modeli ile farklı kalıp geometrileri için derin çekme

işleminde duvarlardaki kalınlık dağılımını, sac incelme oranını ve gerilmeleri gerçeğe çok yakın olarak tahmin edebilmişlerdir. Simülasyon sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen verileri karşılaştırdıklarında; sonuçlar arasındaki farklılıkların ortalama %2,9 oranını aşmadığını ve %0.6 oranına kadar düştüğünü belirtmişlerdir. Yaptıkları sonlu elemanlar analizleri ve deneysel çalışma sonuçlarına göre kalıp giriş radyüsünün ve zımba uç radyüsünün belirli bir miktar artması ile kalınlık dağılımının düzenlendiğini, incelme miktarının azaldığını ve gerilmelerin azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca; kalıp giriş radyüsünün sac kalınlığının 10 katı civarında, zımba uç radyüsünün ise sac kalınlığının 4 katından fazla alınmasının uygun olduğunu belirlemişlerdir. Kalıp giriş radyüsünün ve zımba uç radyüsünün kalınlık değişimine olan etkileri Şekil 3.21' de, artık gerilmelere etkileri ise Şekil 3.22' de verilmiştir [35].

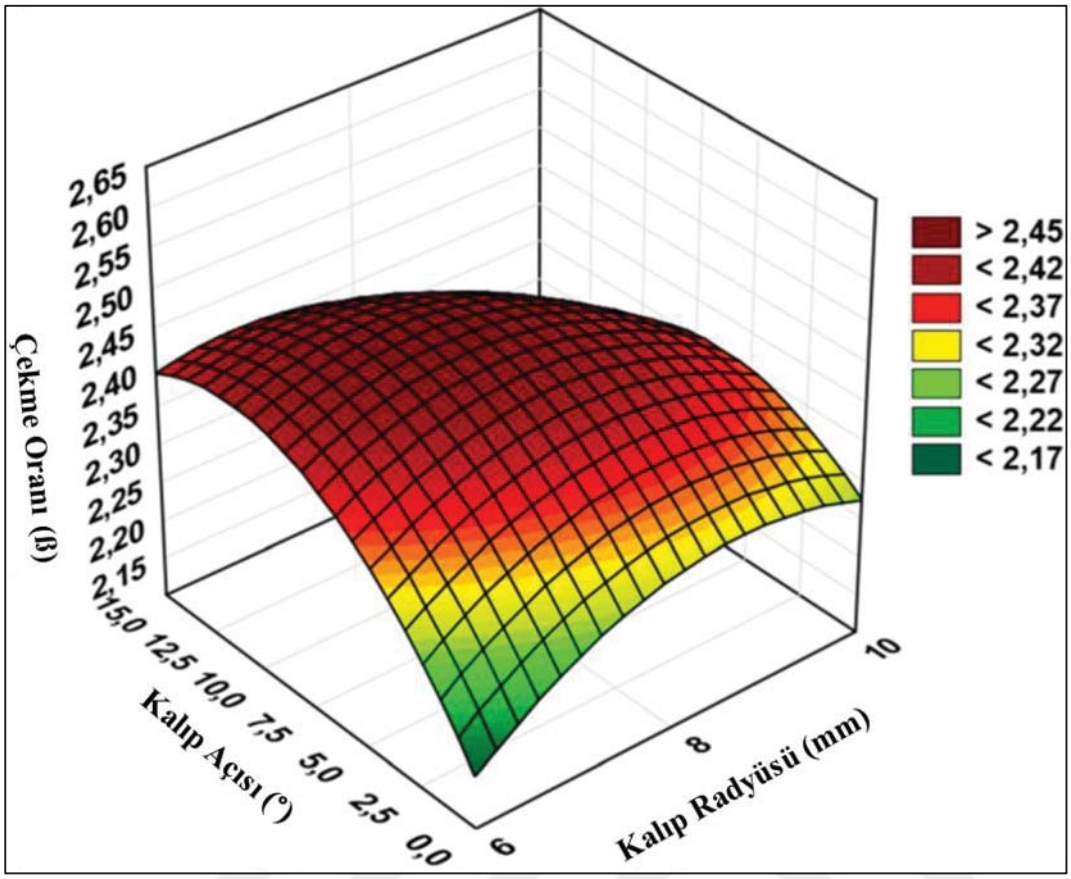


Şekil 3.21. Radyüs – incelme ilişkisi; (a) Kalıp giriş radyüsünün incelmeye etkisi; (b) Zımba uç radyüsünün incelmeye etkisi [35]



Şekil 3.22. Radyüs – kalıntı gerilme ilişkisi (a) Kalıp giriş radyüsünün kalıntı gerilmelere etkisi; (b) zımba uç radyüsünün kalıntı gerilmelere etkisi [35]

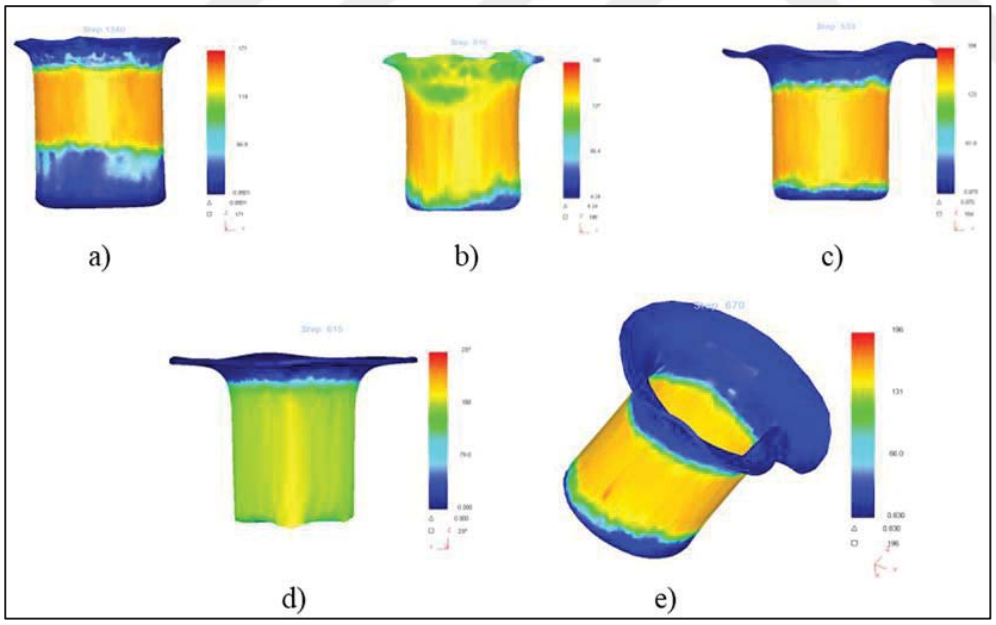
Ballıkaya vd. hidromekanik derin çekme işlemlerinde açılı kalıp kullanımının ve çeşitli işlem parametrelerinin maksimum derin çekme oranına etkisini araştırdıkları bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında; derin çekme oranına (β) etki eden kalıp açısı, kalıp giriş radyüsü, zımba geometrisi, baskı yastığı kuvveti parametrelerini çeşitli analizler ve deneysel çalışmalar ile incelemişlerdir. Öncelikle Taguchi deneysel tasarım metodu ile çeşitli parametrelerin nümerik analizini daha sonrasında ise sonlu elemanlar analizleri ile simülasyon ortamındaki sonuçları incelemişler ve son olarak deneysel çalışmalar ile yapılan analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. 66 – 90 mm arasında değişen çaplarda ve 0.9 mm kalınlığında DIN EN 10130–1999 açınım sac numuneler; çeşitli giriş açılarında (0°, 2,5°, 5°, 10°, 12,5°, 15°) ve giriş radyüslerinde (6, 8, 10 mm) kalıplar ve çeşitli uç radyüsüne (6, 8, 10 mm) sahip Ø30 mm zımbadan oluşan deney setinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Aynı parametrelerde (12,5° kalıp açısı, 8 mm kalıp giriş radyüsü ve 10 mm zımba uç radyüsü) gerçekleştirilen sonlu elemanlar testleri (β = 2.6) ile deneysel çalışmaların (β = 2.56) birbirine çok yakın sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca; zımba uç radyüsünün artması ve kalıp açısı, kalıp giriş radyüsü, baskı yastığı kuvveti parametrelerinin belirli bir noktaya kadar artması ile çekme oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Kalıp açısı, kalıp radyüsü ve çekme oranı arasındaki ilişki Şekil 3.23’ de verilmiştir. [36].



Şekil 3.23. Kalıp açısı ve kalıp giriş radyüsünün çekme oranına etkisi [36]

Ballıkaya vd. derin çekme işlemlerinde kullanılan kalıp matris açılarının derin çekilebilirliğe etkilerini inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada; kalıp matris açısının limit çekme oranına, zımba kuvvetine ve kap duvarlarının kalınlık değişimlerine etkilerini sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmışlardır. Yüksek şekillendirilebilirliğe sahip 0,8 mm kalınlığındaki Al1050 sac metal malzemenin çekilebilirliğini araştırdıkları sayısal çözümlemelerini; 7 farklı kalıp matris/baskı yastığı açısı (0°, 2,5°, 5°, 10°, 12,5°, 15°) ve 4 farklı baskı yastığı kuvveti (1036,2 N; 1554,3 2072,4 N; 3108,6 N) kullanarak ANSYS yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda; matris açısının artması sonucunda limit çekme oranında artışın sağlanabildiği ve en yüksek çekme oranının 12,5° matris açısında elde edilebildiğini ve çekme oranı arttıkça oluşan zımba kuvvetlerinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Kap duvar kalınlıklarında meydana gelen değişimler incelendiğinde; kabın alt kısmında çok fazla değişim olmazken, üst kısımlarda kalınlaşmanın ve zımba radyüsü etrafında da incelmelerin meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, 1036,2 N ve 1554,3 N baskı kuvveti değerlerinde en ideal sonuçların meydana geldiğini belirlemişlerdir [37].

Gowtham vd. kalıp giriş radyüsünün derin çekme prosesine etkilerini sonlu elemanlar analizi yöntemleriyle araştırdıkları bir çalışma gerçekleştirmişler ve sonuçlarını Monaghan'ın yaptığı çalışma [26] ile karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada modelleme işlemleri için Catia V5 ve sonlu elemanlar analizini uygulamak için Deform – 3D yazılımları kullanılmıştır. Sonlu elemanlar testlerinde kalıp giriş radyüsü değişirken; sac kalınlığı, zımba hızı, zımba uç radyüsü ve zımba ile sac malzeme arasındaki sürtünme sabit olarak alınmıştır. Analizlerinde ilkel çapı 56 mm olan Al6061 sac malzeme, 0,9 mm/sn zımba hızı, 0,3 sürtünme katsayısı ve değişken kalıp giriş radyüsleri (4, 5, 6, 7, 8 mm) kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda kalıp giriş radyüsünün artmasına bağlı olarak şekillendirme için gereken zımba kuvvetinin azaldığı, malzeme üzerindeki gerilmelerin azaldığı ve şekillendirmenin arttığı ancak kalıp giriş radyüsü çok düşük bir değer seçildiği zaman ise şekillendirme kuvvetinin çok yükseldiği için sac malzemede kulaklanmaların meydana geldiği gözlemlemişlerdir. Ayrıca, 7 mm'lik kalıp giriş radyüsünün en az hasar ile optimum deformasyon seviyelerini verdiğini tespit etmişlerdir. Farklı giriş radyüsüne sahip kalıplarda yapılan simülasyonlardaki gerilim dağılımları Şekil 3.24' te verilmiştir [38].

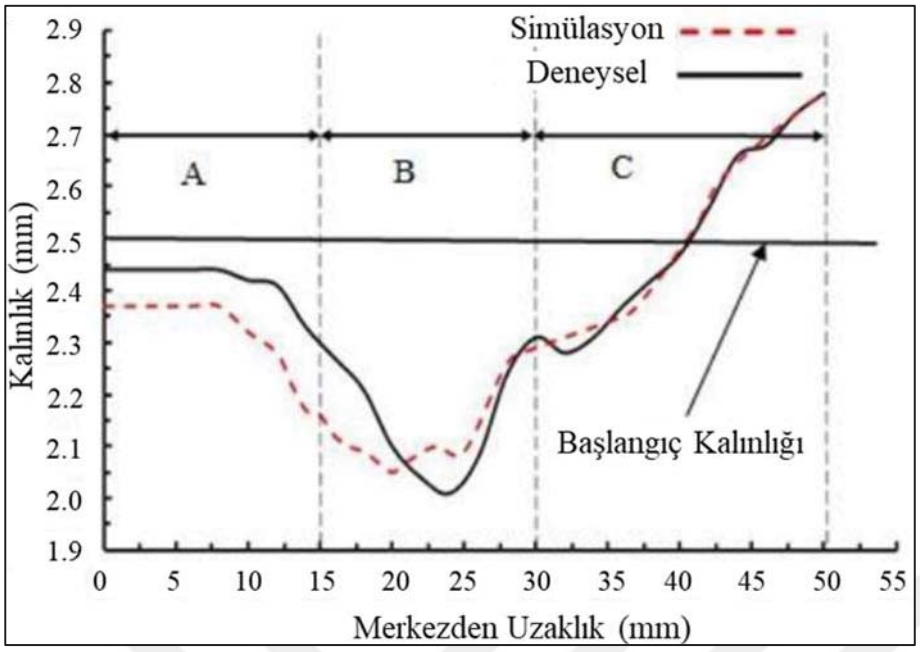


Şekil 3.24. Farklı kalıp giriş radyüslerinde meydana gelen gerilim değişimleri; (a) 4 mm; (b) 5 mm; (c) 6 mm; (d) 7 mm; (e) 8 mm [38]

Tian vd. optimum derin çekme prosesi parametrelerini analiz ettikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, dikdörtgensel kutu şeklindeki parçaların derin çekme işlemini LS-DYNA yazılımını kullanarak simüle etmişlerdir. Ardından; çekilmiş parçanın

en ince duvar kalınlığı seçilerek, derin çekme işlemine etki eden deney parametreleri araştırılmıştır. Yaptıkları çalışmada, 1 mm kalınlığındaki DC – 01 yüksek dayanımlı çelik sac metal malzemeye derin çekme işlemi uygulamışlardır. 300 kN, 400 kN ve 500 kN baskı yastığı kuvveti; 3 mm, 4 mm ve 5 mm kalıp giriş radyüsü; 3 mm, 4 mm ve 5 mm zımba uç radyüsü; 2000 mm/s, 3500 mm/s ve 5000 mm/s şekillendirme hızı değişkenlerini deney parametreleri olarak belirlemişlerdir. Yapılan optimizasyon çalışmalarına göre; 400 kN baskı yastığı kuvveti, 4 mm kalıp giriş radyüsü, 5 mm zımba uç radyüsü ve 2000 mm/s deney parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen çekme işlemlerinde minimum duvar kalınlığının 0,802006 mm olarak elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda; minimum duvar kalınlığını etkileyen temel parametrenin baskı yastığı kuvveti, ikincil sebebin ise kalıp giriş radyüsü olduğunu ve zımba uç radyüsü ile zımba hızı parametrelerinin önemsenir bir etkisinin olmadığını belirlemişlerdir [39].

Alimirzaloo ve Modanloo; sonlu elemanlar (FE) ve tepki yüzey (Response Surface Methodology: RSM) yöntemlerini kullanarak hidrolik derin çekme operasyonlarında sac incelmesini ve şekillendirme için gerekli zımba kuvvetini incelemişlerdir. Araştırmalarında, hidrolik derin çekme işlemlerinde zımba uç radyüsünün, kalıp giriş radyüsünün ve maksimum sıvı basıncının silindirik formlu ürünlere etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında ilk olarak çekme işlemini sonlu elemanlar yöntemi ile simüle etmişler ve bu simülasyonu deneysel veriler ile doğrulamışlardır. Daha sonrasında ise zımba kuvveti ve sac incelme oranı parametrelerini RSM faktörleri olarak belirlemişlerdir. Yapılan optimizasyonlar sonucunda tepki yüzey grafikleri değerlendirildiğinde; zımba uç radyüsünün ve kalıp giriş radyüsünün arttırılması ile sac kalınlığındaki inceleme oranının azaldığını ve diğer parametrelere kıyasla sıvı basıncının önemli bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, üç deney parametresinin artması ile çekme işlemi için gerekli zımba kuvvetinde artışın meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, FE ve RSM yöntemleri ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda deney parametrelerinde çeşitli varyasyonlar kullanarak sac incelmesinin %10 azaltılabildiğini belirlemişlerdir [40].

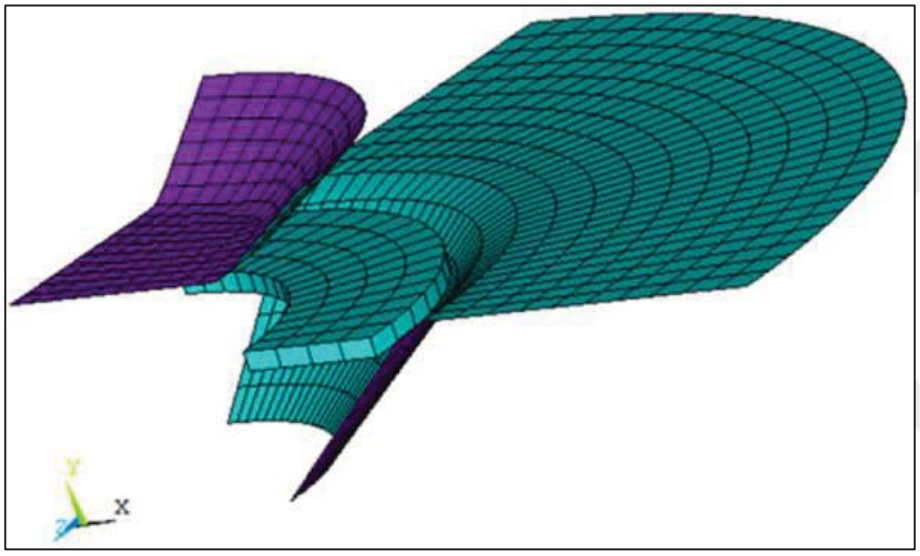


Şekil 3.25. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki benzerlik [40]

Padmanabhan vd. derin çekme parametrelerinin paslanmaz çeliğin şekillendirilmesine etkilerini inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının deney tasarımında Taguchi metodunu kullanmışlar ve sonlu elemanlar analizleri ile de kalıp giriş radyüsü, baskı yastığı kuvveti ve sürtünme katsayısının derin çekme işlemine etkilerini gözlemlemişlerdir. Sonlu elemanlar analizlerinde; 3.5 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik sac metal malzeme, kalıp giriş radyüsü (14, 16 ve 18 mm), baskı yastığı kuvveti (85, 95 ve 105 kN), sürtünme katsayısı (0.08, 0.14, 0.20) değerlerini kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda kalıp radyüsünün artmasına bağlı olarak çekme işleminde meydana gelen kusurların giderilebildiğini ve optimum deney parametrelerinde gerçekleştirilen çekme işlemleri sayesinde sac kalınlığındaki maksimum incelme oranının %16'yı aşmadığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, derin çekme işleminin kalitesini etkileyen parametrelerin sırasıyla; kalıp giriş radyüsü (%89.2), sürtünme katsayısı (%6.3) ve baskı yastığı kuvveti (%4.5) olduğunu belirlemişlerdir [41].

Choubey ve diğerleri de derin çekme prosesinde farklı kalıp açılarının şekillendirme işleminde neden olduğu sonuçları sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmalarında 2 mm kalınlığında SS304 sac metal malzemeyi deney malzemesi olarak belirlemişlerdir. Simülasyonlar sonucunda incelme bölgelerini ve muhtemel hasar bölgelerini tespit ederek optimum kalıp açısı ve zımba hızı değerlerini belirlemişlerdir. 22° kalıp açısı değerine kadar şekillendirme için gereken baskı kuvvetinin azaldığını

belirlemişlerdir. Ancak, kalıp açısının 22°'den fazla olması ile şekillendirme için gereken baskı kuvvetinin artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, 3.5 mm/sn zımba hızından yüksek hızlar da şekillendirme işlemi sonunda kusurlar meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda; 22° kalıp açısı ve 3.5 mm/sn zımba hızının SS304 sac metal malzemesinin derin çekme işlemi için en uygun parametreler olduğunu belirtmişlerdir. Açılı derin çekme kalıbının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi Şekil 3.26'da verilmiştir. [42].



Şekil 3.26. Açılı Derin Çekme Kalıbının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi [42]

Endüstrinin dikişsiz kap şeklinde ürünlerin imal edilmek istendiği her alanında yaygın olarak kullanılan derin çekme işlemlerinde temel hedef, en az operasyonda en yüksek çekme oranının elde edilmesidir. Bu nedenle; literatürde deneysel, sonlu elemanlar analizleri ve sonlu elemanlar ile deneysel araştırmaların bir arada yapıldığı çalışmaların hemen hepsinde işlem parametreleri ya da deney düzeneği üzerinde yapılan değişiklikler ile çekme oranının arttırılmasının amaçlandığı ve çekme oranının arttırılmasının bir başarı kriteri olarak kabul edildiği gözlemlenmiştir.

Klasik derin çekme çalışmalarında; ulaşılması kolay olmayan 2,0' dan daha yüksek çekme oranlarının sağlanması için kalıp girişinde daha büyük radyüs kullanılması, şekillendirme zımbasının uç kısmına daha büyük radyüs kullanılması, kalıp giriş açısının değiştirilmesi gibi uygulamaların yapıldığı ve çekme oranlarında bir artışın sağlanabildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, hidrolik akışkan kullanılarak yapılan hidromekanik derin çekme

işlemleri sırasında ön şişirme işlemi uygulanması ile çekme oranında önemli bir artışın sağlanabildiği tespit edilmiştir.

Yapılan literatür araştırması sonucunda açılı kalıp girişi uygulanması ve hidromekanik derin çekme işlemlerinde uygulanan ön şişirmenin çekme oranına olumlu etki ettiği gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, ön şişirme işleminin mekanik olarak uygulanmasını sağlayan bir kalıp geometrisinin oluşturulmasının çekme oranını geliştirilebileceği belirlenmiştir. Tasarlanan yeni kalıp giriş geometrisi sayesinde yüksek çekme oranlarına daha düşük maliyetler ile ulaşılması ve endüstride yaygınca kullanılabilir yeni bir yöntemin literatüre kazandırılması hedeflenmiştir.

4. MATERYAL VE METOT

Yapılan bu çalışmada, derin çekme kalıplarına ters açılı kalıp giriş geometrisi uygulanmasının derin çekme ile şekillendirilebiliriliğe etkileri deneysel araştırılmıştır. Bu doğrultuda, DC-01 (EN10130:2006) ve Al6061-T6 sac metal malzemeler deney malzemesi olarak belirlenmiştir.

4.1. Sac Metal Malzeme

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere; yüksek mukavemet ve düşük alaşım özellikleri nedeniyle beyaz eşya ve otomotiv endüstrisinde sıklıkla tercih edilen DC-01 (Erdemir 6112), düşük özgül ağırlıkları ve yüksek mekanik özellikleri nedeniyle savunma, otomotiv, uzay ve havacılık sektörlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan Al6061-T6 sac metal malzemeler deney malzemesi olarak tercih edilmiştir. Deneysel çalışmalar için tercih edilen bu sac metal malzemeler 1 mm kalınlığa sahip levhalar halinde endüstriden hazır olarak temin edilmiştir.

4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan numunelerin öncelikle mekanik ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Sac metal malzemelerin kimyasal kompozisyonu, X ışını floresansı (XRF) analizi ile belirlenmiştir. Yapılan kimyasal analiz sonucu elde edilen kimyasal içerikler Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmiştir.

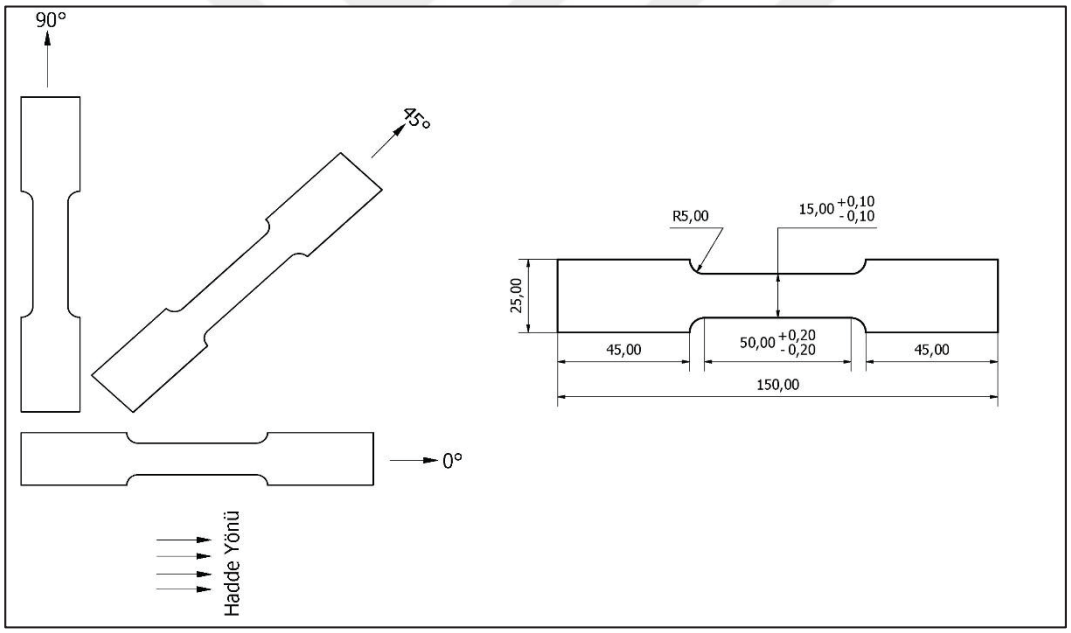
Çizelge 4.1. Al6061-T6 sac metal malzemesine ait kimyasal analiz sonuçları (% wt)

Element	% Fe	% Mn	% Cr	% Cu	% Zn	% Pb	% Al
Al 6061-T6	0,485	0,129	0,133	0,266	0,051	0,005	Kalan
Hata Oranı	0,022	0,014	0,017	0,011	0,003	0,001	0,009

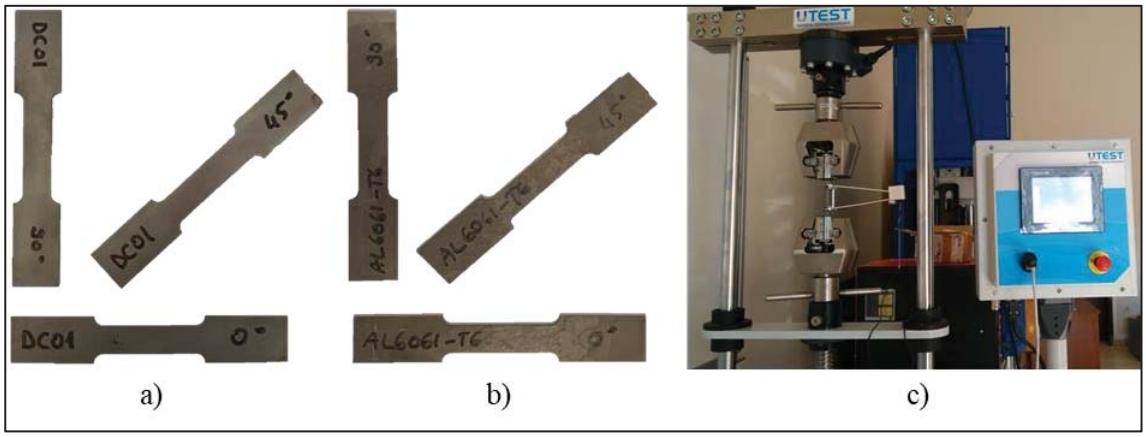
Çizelge 4.2. DC-01 sac metal malzemesine ait kimyasal analiz sonuçları (% wt)

Element	% Fe	% Mn	% Cr	% Mo	% Cu	% Zn	% Diğer
DC-01	99,139	0,192	0,043	0,004	0,399	0,152	Kalan
Hata Oranı	0,124	0,020	0,009	0,001	0,025	0,014	0,008

Deneysel çalışmalarda kullanılan sac metal malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için tek eksenli çekme testleri uygulanmıştır. Tek eksenli çekme testleri; endüstriden temin edilen sac malzemelerin hadde yönüne göre 0°, 45° ve 90° açılarda, ASTM-E8 standardına uygun şekilde tel erozyon tezgâhı kullanılarak hazırlanan deney numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan tek eksenli çekme testleri ile mekanik özelliklerin belirlenmesinin yanı sıra; elde edilen akma ve çekme dayanımları sayesinde derin çekme işleminin teorik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli çekme testi deney numunelerinin tel erozyon tezgâhında kesilmeden önce sac metal malzeme üzerindeki yerleşim planı ve numunelere ait teknik resim Şekil 4.1'de verilmiştir. Hazırlanan çekme numuneleri ve çekme deneyi uygulaması Resim 4.1'de verilmiştir. Ayrıca, testler sonucunda elde edilen tek eksenli çekme testi sonuçları Çizelge 4.3 – 4.4 ve Şekil 4.2 – 4.3'te verilmiştir.



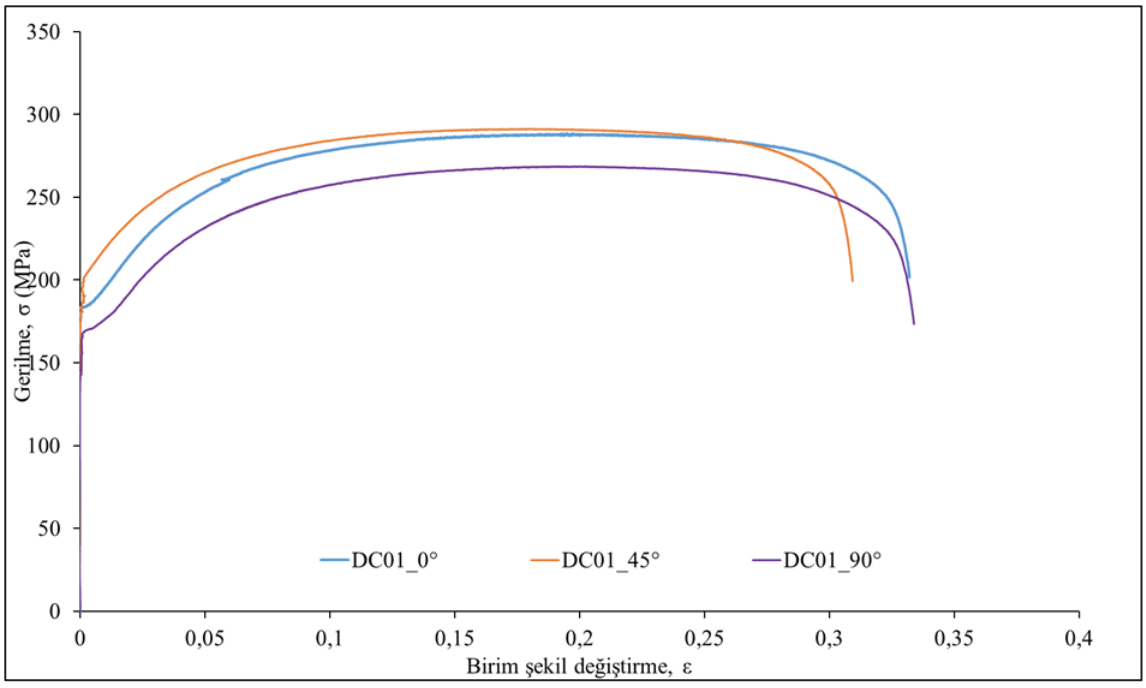
Şekil 4.1. Tek eksenli çekme deneyi numunelerinin sac metal levha üzerine yerleşimi ve numunelere ait teknik resim



Resim 4.1. (a) DC-01 çekme numuneleri; (b) Al6061-T6 çekme numuneleri; (c) Çekme deneyi uygulaması

Çizelge 4.3. DC-01 sac malzeme için tek eksenli çekme testi sonuçları

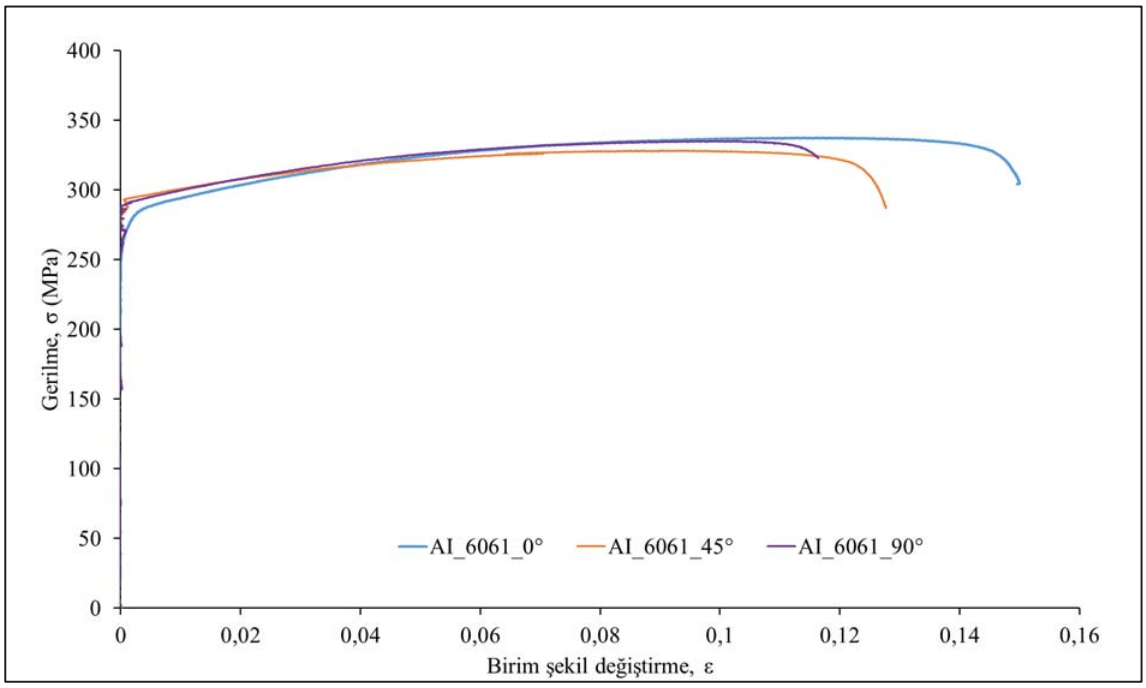
Hadde Yönü	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Gerinim
0°	243,6838	288,5845	0,2397963
45°	241,7629	291,3093	0,2306971
90°	243,2663	268,6769	0,2347759



Şekil 4.2. DC-01 sac malzeme için tek eksenli çekme testi sonuç grafiği

Çizelge 4.4. Al6061-T6 sac malzeme için tek eksenli çekme testi sonuçları

Hadde Yönü	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Gerinim (%)
0°	282,8687	337,4976	0,1208454
45°	270,0545	328,2795	0,1179581
90°	273,5241	335,2441	0,1030024



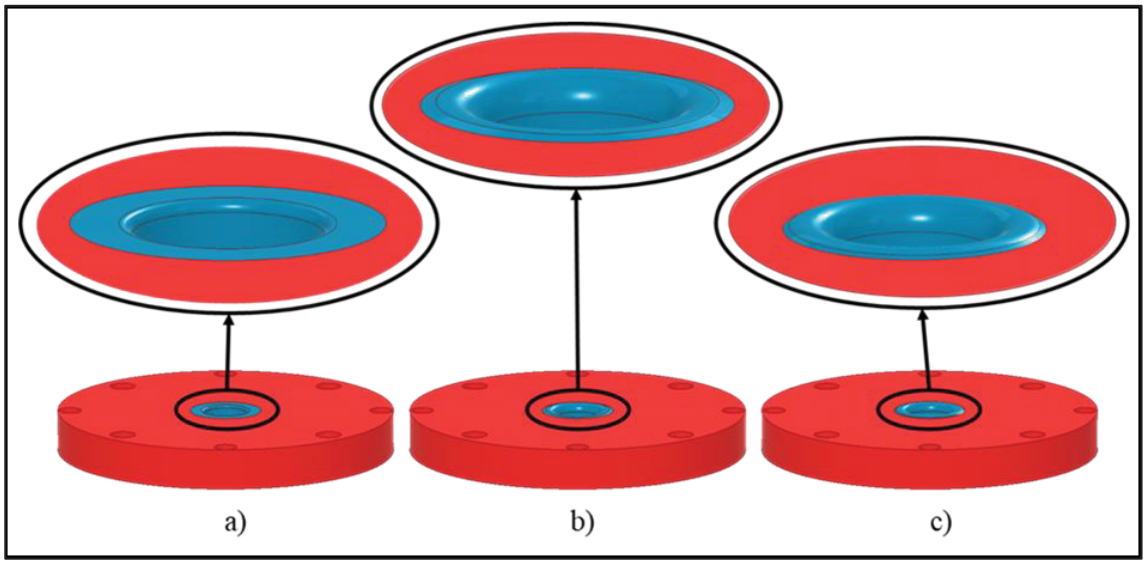
Şekil 4.3. Al6061-T6 sac malzeme için tek eksenli çekme testi sonuç grafiği

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7 ve 2,8 derin çekme oranında deney numuneleri hizmet alımı yapılarak lazer kesim yöntemi ile hazırlanmıştır.

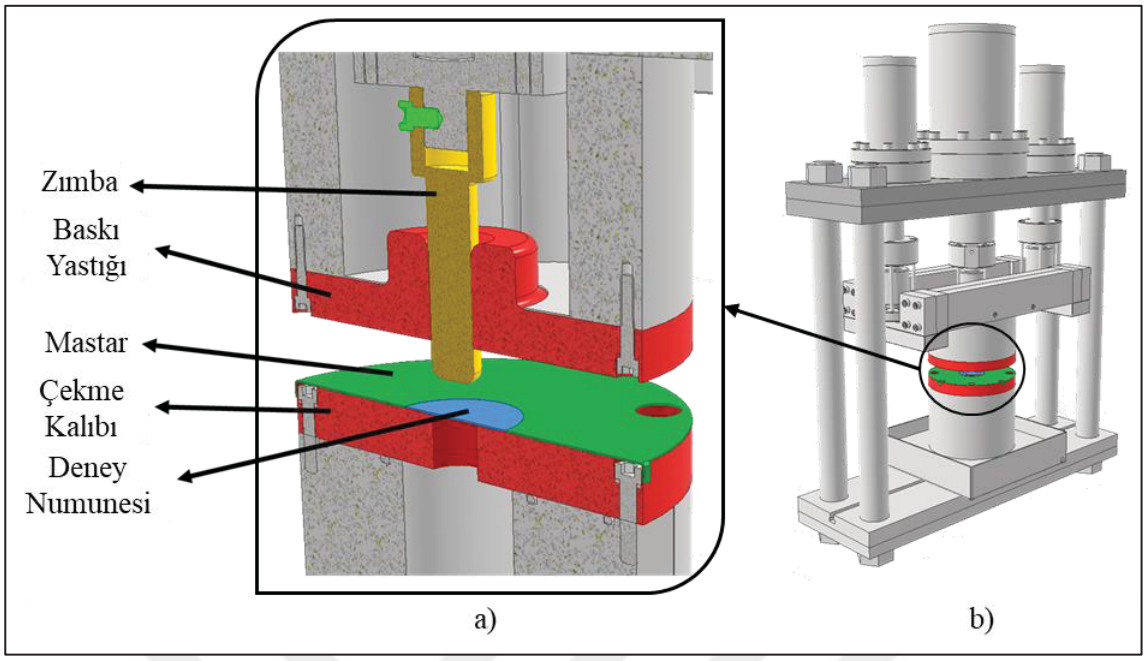
4.3. Deney Seti Tasarımı ve Hazırlanması

Çalışmaların gerçekleştirildiği deney kalıpları; hidroforming prosesinde yaygın olarak kullanılan ön şişirme işlemini kalıba verilen ters geometri vasıtasıyla malzemeyi çekme yönü tersine şekillendirerek ön deformasyon uygulanmasını sağlayan bir tasarıma sahiptir. Bu sayede daha yüksek çekme oranlarına daha kolay şekilde ulaşılabilmektedir. Uygulanan yöntemde ön şişirmeyi mekanik olarak yapabilmek için α=15° ve α=30° açılı ters kalıp giriş

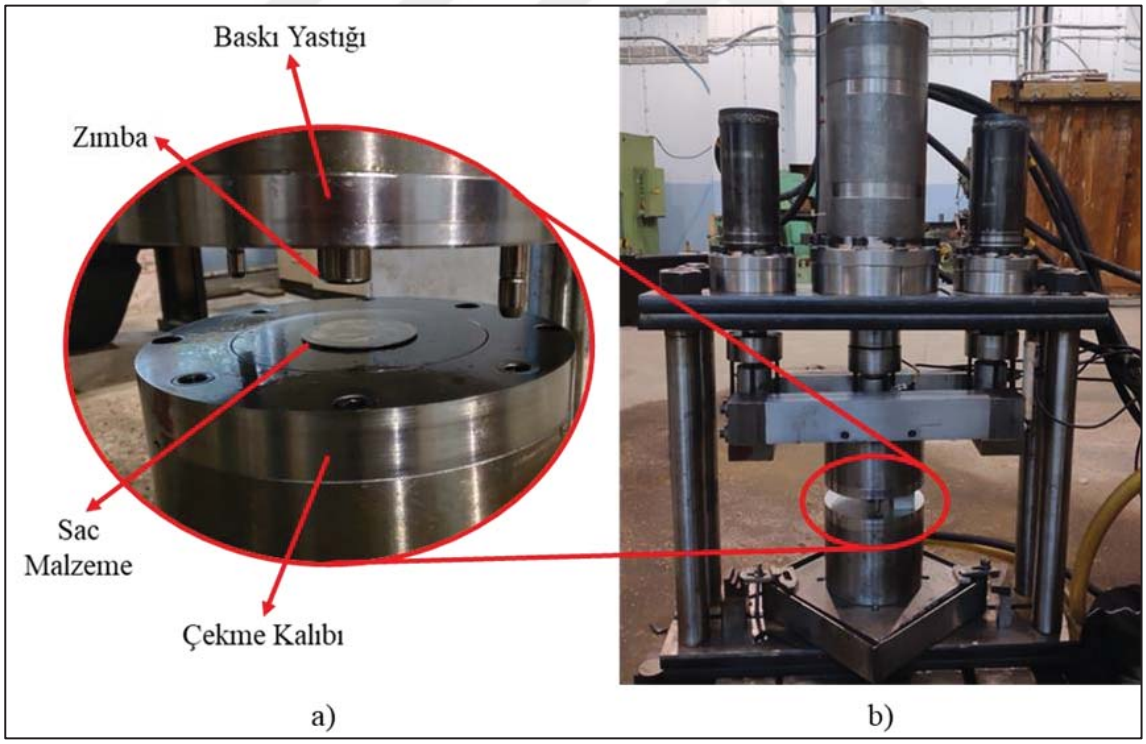
geometrisine sahip 2 adet yenilikçi tasarım yapılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda uygulanan kalıp giriş geometrilerinde, giriş açısının 15°'ye ulaşması ile şekillendirilen malzemelerde kırışma gibi şekillendirme kusurlarının meydana geldiği gözlemlenmiştir [20,23]. Ancak, yapılan yenilikçi tasarımda ise sac metal malzeme şekillendirmenin son aşamasına kadar baskı kuvvetinden kurtulamadığı için çekilen kaplarda kırışıklıkların oluşumu engellenmektedir. Ayrıca, derin çekme kalıpları ve elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için 1 adet α=0° kalıp giriş açısına sahip olan geleneksel derin çekme kalıbının tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Deney kalıpları; Gazi Üniversitesi 07/2007-40, 07/2009-12 ve 07/2013-09 numaralı Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş olan hidromekanik derin çekme deney düzeneğinin altyapısından faydalanarak çalışacak şekilde Autodesk Inventor 2020 Professional CAD yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Sanal ortamda montaj yapılarak sistemin mekanik olarak sorunsuz şekilde çalıştığı doğrulanmıştır. CAD ortamında yapılan kalıp tasarımları ve hidromekanik derin çekme deney düzeneği üzerindeki görüntüsü Resim 4.2 ve 4.3'te; deney cihazının ve kalıp setinin cihaz üzerindeki görünümü, üretimi tamamlanan derin çekme kalıplarının görüntüsü ve üretilen mastarların görüntüsü ise Resim 4.4 – 4.6' de verilmiştir. Ayrıca, üretilen 3 farklı derin çekme kalıp setine ait teknik resimler Ek 1 – 7' de verilmiştir.



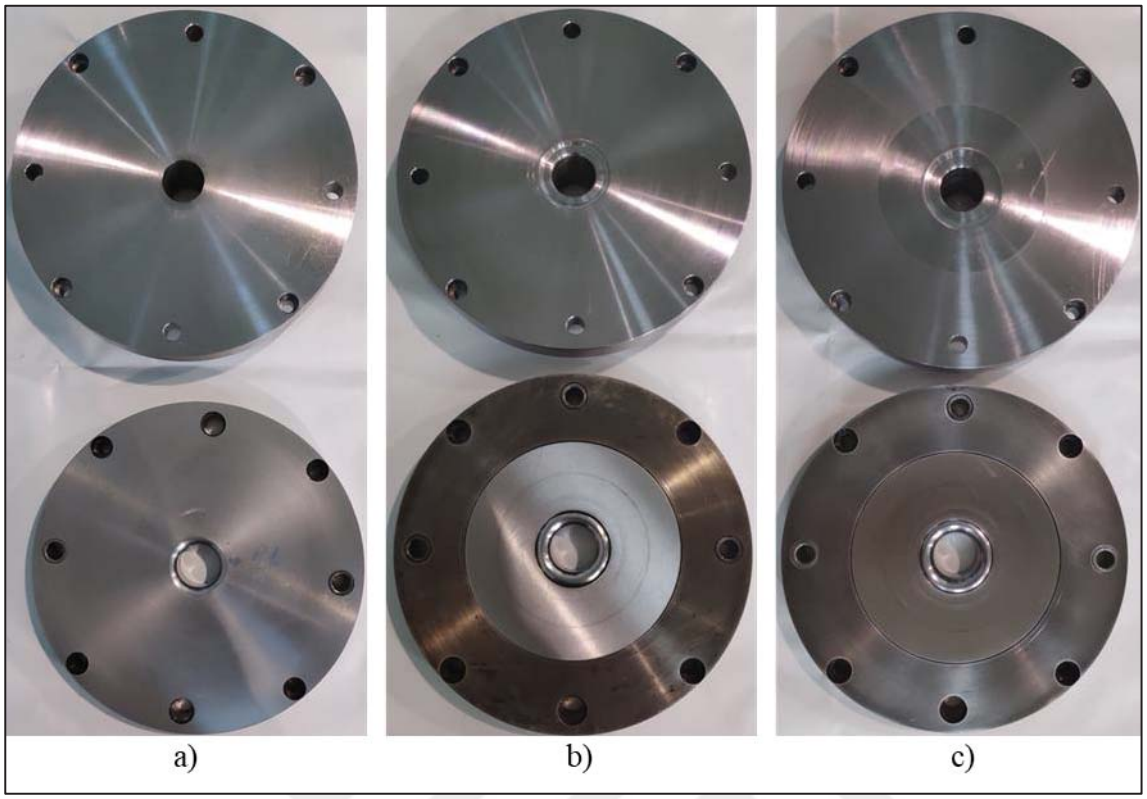
Resim 4.2. (a) α=0° kalıp seti; (b) α=15° kalıp seti; (c) α=30° kalıp seti



Resim 4.3. (a) Kalıp setinin kesit görüntüsü; (b) Deney cihazının genel görünümü ve kalıp setinin deney cihazı üzerindeki durumu

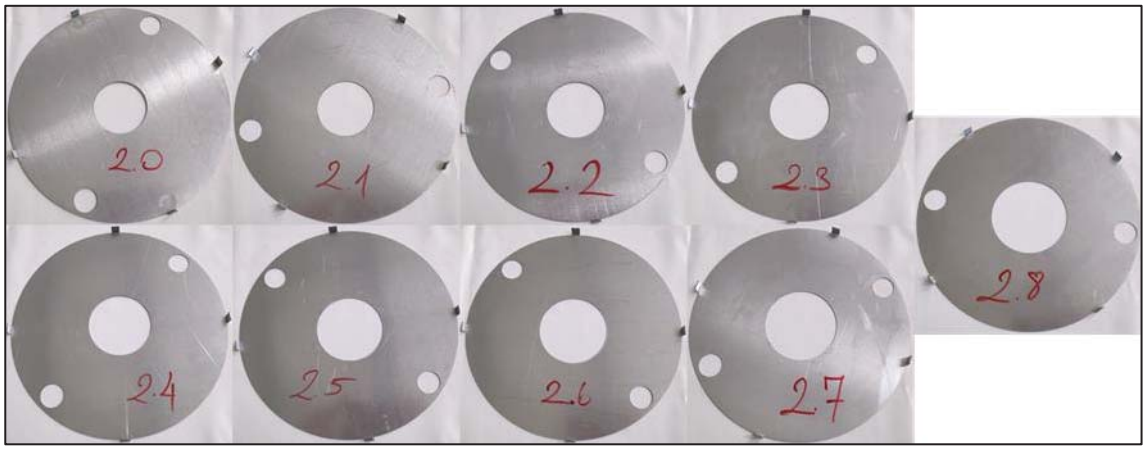


Resim 4.4. (a) Kalıp setinin detay görüntüsü; (b) Deney cihazının genel görünümü



Resim 4.5. Üretilen kalıplar; (a) 0° kalıp seti; (b) 15° kalıp seti; (c) 30° kalıp seti

Derin çekme prosesinde deney numunelerinin kalıp üzerinde çekme eksenine tam olarak ortalı olması; işlemin başarılı bir çekme ile sonlanması için son derece önem arz etmektedir. Aksi taktirde, sac metal malzeme kalıp kapandıktan sonra kalıp içerisinde eşit bir akma hareketi gösteremeyecek ve şekillendirme kuvvetinin hızla artması sonucunda sac metal malzeme yırtılarak işlem başarısız olarak sonuçlanacaktır. Bu durumun önüne geçilmesi adına her çekme oranındaki deney numunesi için deney numunelerini ortalamak amacıyla farklı kalıp mastarları tasarlanmış ve üretilmiştir. Hazırlanan mastarlar sayesinde, daha işlem başlamadan yaşanması muhtemelen proses hatalarının önüne geçilerek; zaman, enerji ve malzeme tasarrufu sağlanmıştır. Tasarımı ve üretimi yapılan kalıp mastarları Resim 4.5’ de verilmiştir.



Resim 4.6. Üretimi yapılan kalıp mastarları

4.4. Deneysel Çalışmalar

Ters kalıp geometrisinin derin çekilebilirliğe etkilerinin incelendiği bu çalışmada, tasarımı ve üretimi yenilikçi bir yaklaşımla gerçekleştirilmiş ters kalıp giriş geometrisine sahip kalıp setleri kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Derin çekme prosesi bilgisayar kontrollü bir ünite yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Baskı yastığı kuvveti ve deformasyon hızı kullanıcı tarafından belirlenerek yazılıma girdi olarak girilirken, çekme prosesi ile eş zamanlı olarak alınan şekillendirme kuvveti ve çekme miktarı gibi değişken proses verileri anlık olarak takip edilerek kaydedilmiştir. Çalışma öncesinde; 1mm/sn, 10mm/sn ve 30 mm/sn şekillendirme hızlarında gerçekleştirilen ön deneyler sonucunda hız değişiminin çekme oranına herhangi bir etkisinin bulunmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, derin çekme deneylerinin gerçekleştirilmesinde 10mm/sn sabit deformasyon hızı kullanılmıştır. Aynı zamanda her bir deney numunesine uygulanan baskı yastığı kuvveti de proses boyunca sabit tutulmuştur. Yapılan deneylerde uç radyüsü (R_z) 6 mm olan Ø30 mm'lik silindirik bir şekillendirme zımbası kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, klasik kalıp setiyle derin çekmeyi kıyaslamak amacıyla ilk olarak 0° kalıp giriş açısına sahip olan geleneksel derin çekme kalıbı ile gerçekleştirilmiş ve kullanılan deney malzemeleri için maksimum çekme oranı sınırı tespit edilmiştir. Sonrasında, 15° ve 30° açılı ters kalıp giriş tipine sahip olan derin çekme kalıplarında deneyler yapılarak, giriş tipinin derin çekilebilirliğe etkisinin olup olmadığı incelenmiştir. Yapılan derin çekme deneylerinde, kalıp ile sac metal arasındaki sürtünme kuvvetinin azaltılması ve kalıp içerisine akışın daha kolay gerçekleştirilebilmesi için naylon kullanılarak yağlayıcı etkisi sağlanmıştır. Yapılan her bir deney en az 3 tekrar olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Derin çekme deneyleri sonucunda iki farklı deney malzemesi için her bir kalıpta en yüksek çekme oranında başarılı şekilde derin çekilebilen kaplar tel erozyon tezgahında simetri eksenlerinden kesilerek kap cidarlarındaki kalınlık değişimleri incelenmiştir. Kalınlık değişimi verileri, simetri eksenlerinden kesilen çekilmiş kapların mikrometre kullanılarak ölçülmesi ile elde edilmiştir. Yapılan kalınlık değişimi ölçümü Resim 4.7'de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan değişken ve sabit parametreler Çizelge 4.5' te verilmiştir. Ayrıca, DC-01 ve Al6061-T6 sac metal malzemeleri için çeşitli çekme oranlarında hesaplanan şekillendirme kuvveti, hesaplanan baskı yastığı kuvveti, uygulanan şekillendirme kuvveti ve uygulanan baskı yastığı kuvveti değerleri Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de verilmiştir.



Resim 4.7. Mikrometre kullanılarak yapılan kalınlık ölçümü

Çizelge 4.5. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler

Deney Parametleri	Parametre Değerleri	
Malzeme	DC-01 Al6061-T6	
Kalıp Giriş Açısı	α=0°; α=15°; α=30°	
İlkel Pul Çapı	Ø 60 mm (2.0 ß) Ø 63 mm (2.1 ß) Ø 66 mm (2.2 ß) Ø 69 mm (2.3 ß) Ø 72 mm (2.4 ß)	Ø 75 mm (2.5 ß) Ø 78 mm (2.6 ß) Ø 81 mm (2.7 ß) Ø 84 mm (2.8 ß)
Şekillendirme Hızı	10 mm/sn	
Zımba Formu	Ø 30 mm – R_z = 6 mm, silindirik	
Baskı Yastığı Kuvveti	Açınım sac çapına göre hesaplanarak uygulanmıştır.	

Çizelge 4.6. Al6061 – T6 için hesaplanan ve uygulanan kuvvet değerleri

Kalıp	Çekme Oranı	Hesaplanan Baskı Yastığı Kuvveti (N)	Uygulanan Baskı Yastığı Kuvveti (N)	Hesaplanan Şekillendirme Kuvveti (N)	Uygulanan Şekillendirme Kuvveti (N)
α=0°	2.0	2050	1550	40410	45000
	2.1	2200	1500	43520	37800
α=15°	2.0	2050	1500	40410	36700
	2.1	2200	1350	43520	39000
	2.2	2370	1280	46630	37500
α=30°	2.0	1650	1500	40410	34000
	2.1	1780	1400	43520	32350
	2.2	1900	1300	46630	36000
	2.3	2030	1300	49740	25800

Çizelge 4.7. DC-01 için hesaplanan ve uygulanan kuvvet değerleri

Kalıp	Çekme Oranı	Hesaplanan Baskı Yastığı Kuvveti (N)	Uygulanan Baskı Yastığı Kuvveti (N)	Hesaplanan Şekillendirme Kuvveti (N)	Uygulanan Şekillendirme Kuvveti (N)
α=0°	2.0	1470	1600	35270	44650
	2.1	1580	1500	37980	46700
	2.2	1700	1400	40700	47950
	2.3	1800	1350	43400	53000
α=15°	2.0	1470	1450	35270	42500
	2.1	1580	1550	37980	46100
	2.2	1700	1650	40700	47300
	2.3	1800	1350	46120	49800
	2.4	1920	1300	48830	47000
	2.5	2030	1800	51550	51800
α=30°	2.0	1470	1260	35270	41000
	2.1	1580	1370	37980	44800
	2.2	1700	1350	40700	42500
	2.3	1800	1500	43400	43000
	2.4	1920	1450	46120	43200
	2.5	2030	1450	48830	43000
	2.6	2150	1850	51550	50400

5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan deneysel çalışmalarda, klasik derin çekme yöntemi yenilikçi bir bakış açısıyla tasarlanan ters kalıp giriş tipine sahip derin çekme kalıpları kullanılarak geliştirilmiştir. Tasarlanan bu ters kalıp giriş tipi sayesinde sıvı basıncı kullanılarak yapılan ön şişirme işlemini mekanik olarak sağlayabilen kalıplar kullanılarak derin çekilebilirlik deneysel olarak araştırılmıştır.

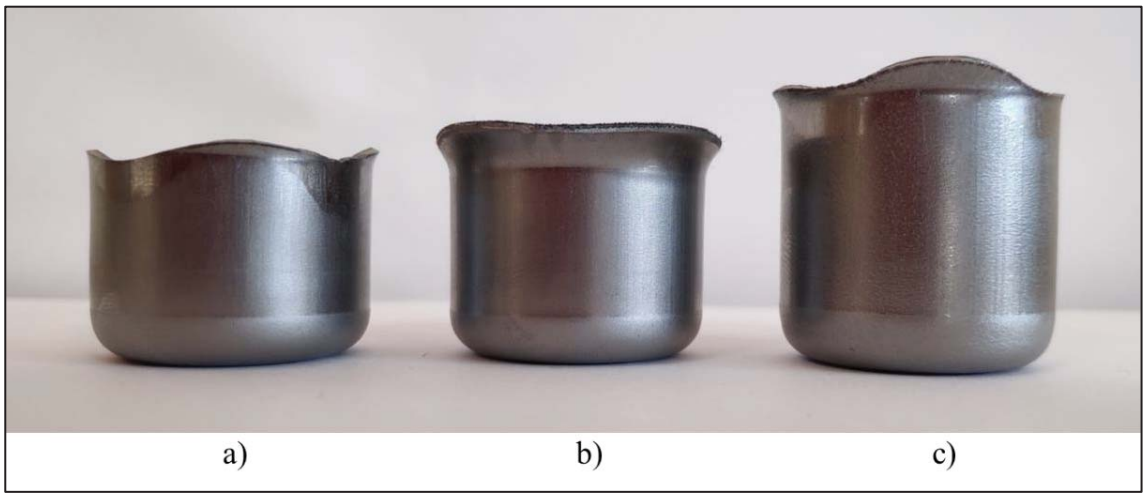
Silindirik derin çekme işlemi, farklı geometrilere sahip ürünler şekillendirilmeden önce sac metal malzemenin şekillendirilebilirliğini incelemek için kullanılan temel bir test yöntemidir [13]. Bu nedenle de yapılan tez çalışmasında; tasarlanan ters kalıp giriş tipinin DC – 01 ve Al6061-T6 sac metal malzemelerin şekillendirilebilirliğine etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar; tasarım ve üretimi gerçekleştirilen üç farklı derin çekme kalıbı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kalıplardan; 0° kalıp giriş açısına sahip olan klasik derin çekme kalıp seti, çalışma için referans derin çekme değerlerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Tasarlanan 15° ve 30° ters yönlü kalıp giriş açısına sahip kalıp setleri ise yapılan geliştirmenin derin çekilebilirlik üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için gereken verilerin elde edilmesinde kullanılmıştır. Elde edilen derin çekme oranı, maksimum şekillendirme kuvveti, çekile parçaların duvar kalınlıklarındaki değişim verileri değerlendirilerek ters kalıp giriş geometrisinin derin çekilebilirliğe etkileri incelenmiştir. Deney sonuçları DC – 01 ve Al6061-T6 sac metal malzeme tipi için ayrı ayrı verilmiştir.

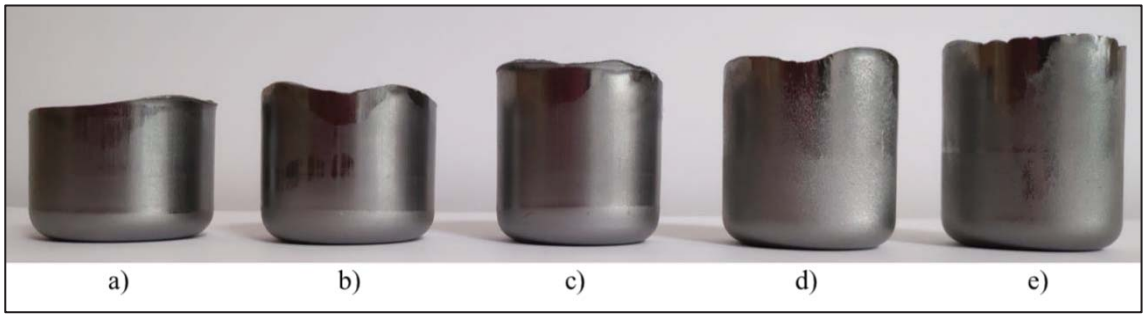
5.1. DC – 01 Sac Metal Malzemenin Derin Çekme ile Şekillendirilebilirliği

Otomotiv, beyaz eşya ve mutfak ürünleri endüstrisinde sıklıkla kullanılan DC – 01 sac metal malzemenin derin çekme ile şekillendirilebilirliği, geliştirilen üç farklı derin çekme kalıp seti kullanılarak araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, DC – 01 malzemenin $\alpha=0°$ açılı klasik derin çekme kalıp seti ile 1 mm kalınlığında ve maksimum 2,2 derin çekme oranında herhangi bir şekillendirme kusuru meydana gelmeksizin derin çekilebildiği gözlemlenmiştir. 15° kalıp giriş açısına sahip derin çekme kalıp setinde ise

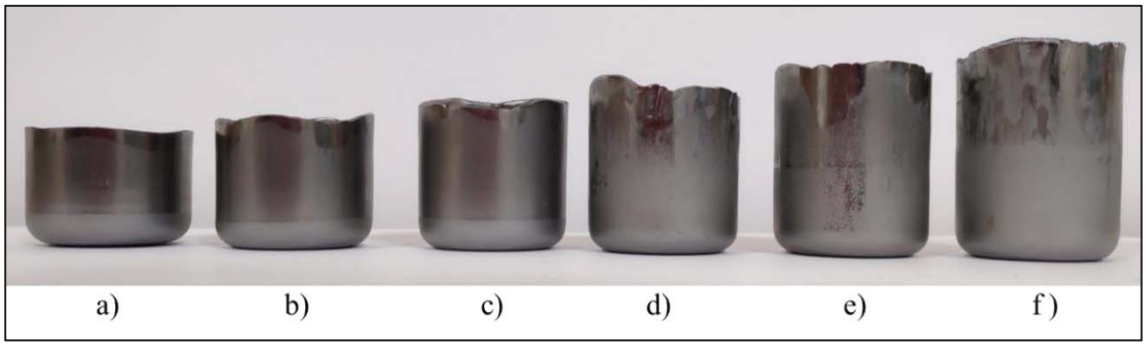
derin çekilebilirliğin arttırılarak maksimum 2,4 derin çekme oranında şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. 30° kalıp giriş açısına sahip derin çekme kalıp seti kullanılarak gerçekleştirilen derin çekme deneylerinde ise, 0° açılı derin çekme kalıbında elde edilen 2,2 çekme oranına kıyasla çekme oranında iyileştirme meydana geldiği ve DC – 01 sac metal malzemenin maksimum 2,5 çekme oranında şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. Farkı kalıp setleri kullanılarak elde edilen çekilmiş kaplar Resim 5.1 – 5.3' te verilmiştir. Ayrıca, yapılan deneyler sonucunda derin çekme işlemi başarısız sonuçlanan deney numuneleri de Resim 5.4' te verilmiştir.



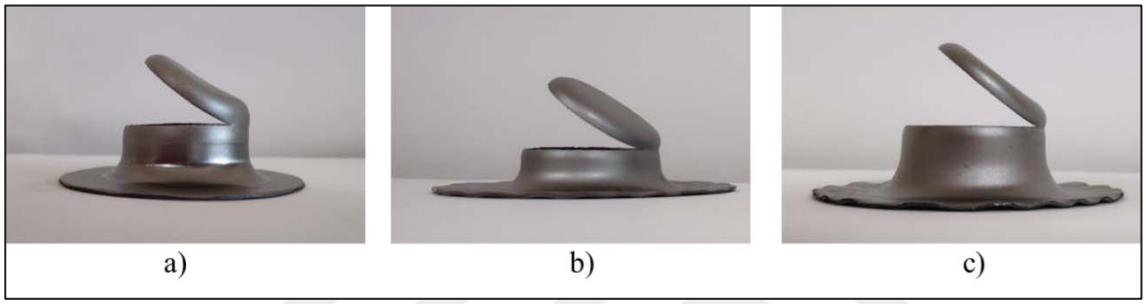
Resim 5.1. DC-01 malzemenin α=0° kalıp seti ile elde edilen sonuçlar; (a) ß=2,0; (b) ß=2,1; (c) ß=2,2



Resim 5.2. DC-01 malzemenin α=15° kalıp seti ile elde edilen sonuçlar; (a) ß=2,0; (b) ß=2,1; (c) ß=2,2; (d) ß=2,3; (e) ß=2,4



Resim 5.3. DC-01 malzemenin α=30° kalıp seti ile elde edilen sonuçlar; (a) ß=2,0; (b) ß=2,1; (c) ß=2,2; (d) ß=2,3; (e) ß=2,4; (f) ß=2,5

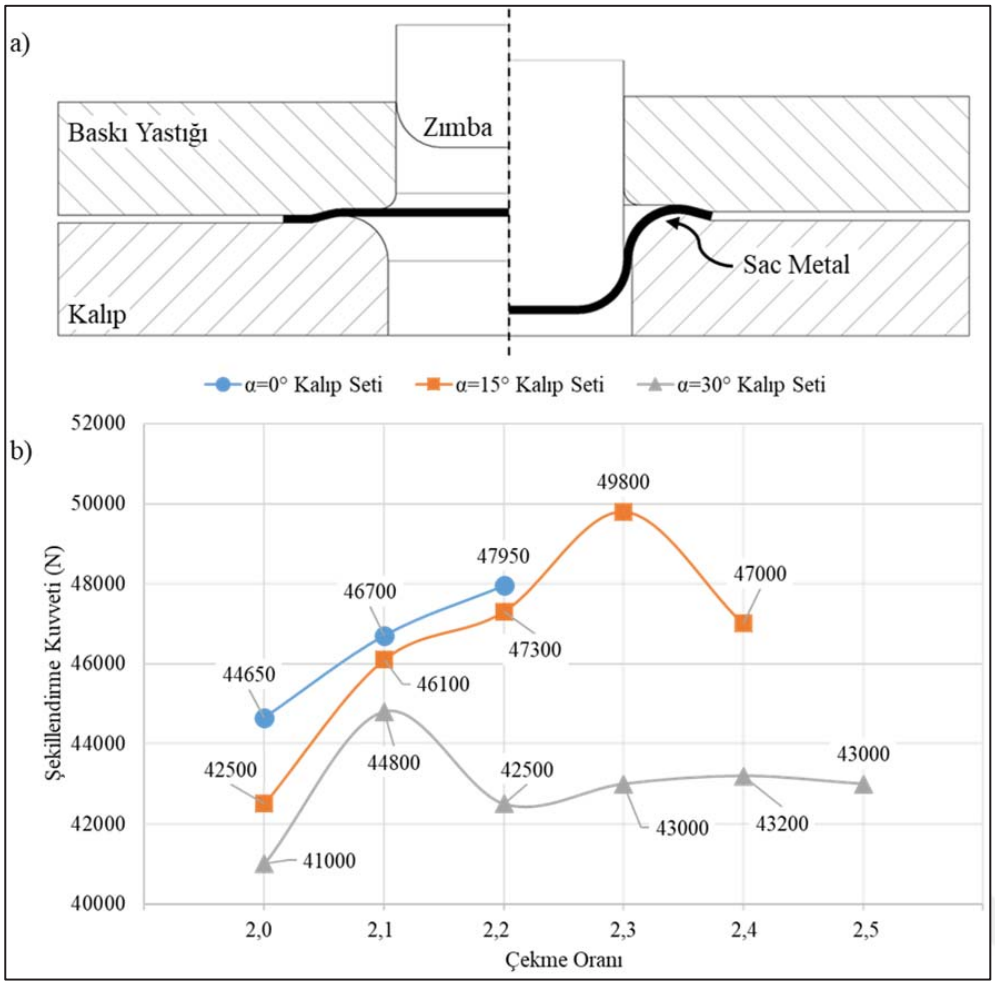


Resim 5.4. DC-01 malzeme için başarısız sonuçlanan çekme işlemleri; (a) α=0° kalıp ß=2,3; (b) α=15° kalıp ß=2,5; (c) α=30° kalıp ß=2,6

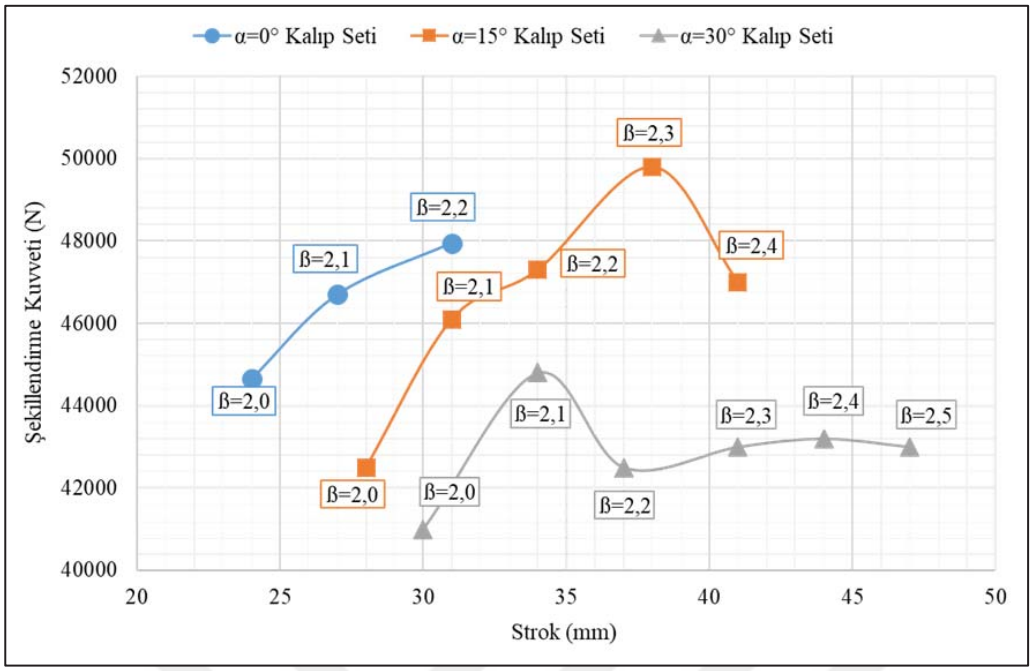
5.1.1. DC – 01 Sac malzemede şekillendirme kuvvetleri

0°, 15° ve 30° açılı kalıp giriş tipine sahip üç farklı derin çekme kalıp seti kullanılarak yapılan çekme operasyonları, bilgisayar kontrollü deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiş ve tüm deneyler bilgisayar üzerindeki yazılım ile kontrol edilerek kaydedilmiştir. Elde edilen en yüksek şekillendirme kuvvetleri birbirleri arasında karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Farklı açılarda kalıp giriş tipine sahip olan üç farklı kalıp seti kullanılarak yapılan derin çekme deney çalışmalarında, kalıp giriş açılarının artması ile meydana gelen en yüksek şekillendirme kuvvetlerinin azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Artan kalıp giriş açılarında şekillendirme kuvvetinde meydana gelen değişim Şekil 5.1’ de verilmiştir. Ayrıca, strok boyuna göre çekme oranı ve şekillendirme kuvveti ilişkisi Şekil 5.2’ de verilmiştir.



Şekil 5.1. (a) Çalışmada kullanılan kalıpların şematik gösterimi; (b) DC – 01 malzeme için farklı kalıp giriş açılarında meydana gelen şekillendirme kuvvetleri

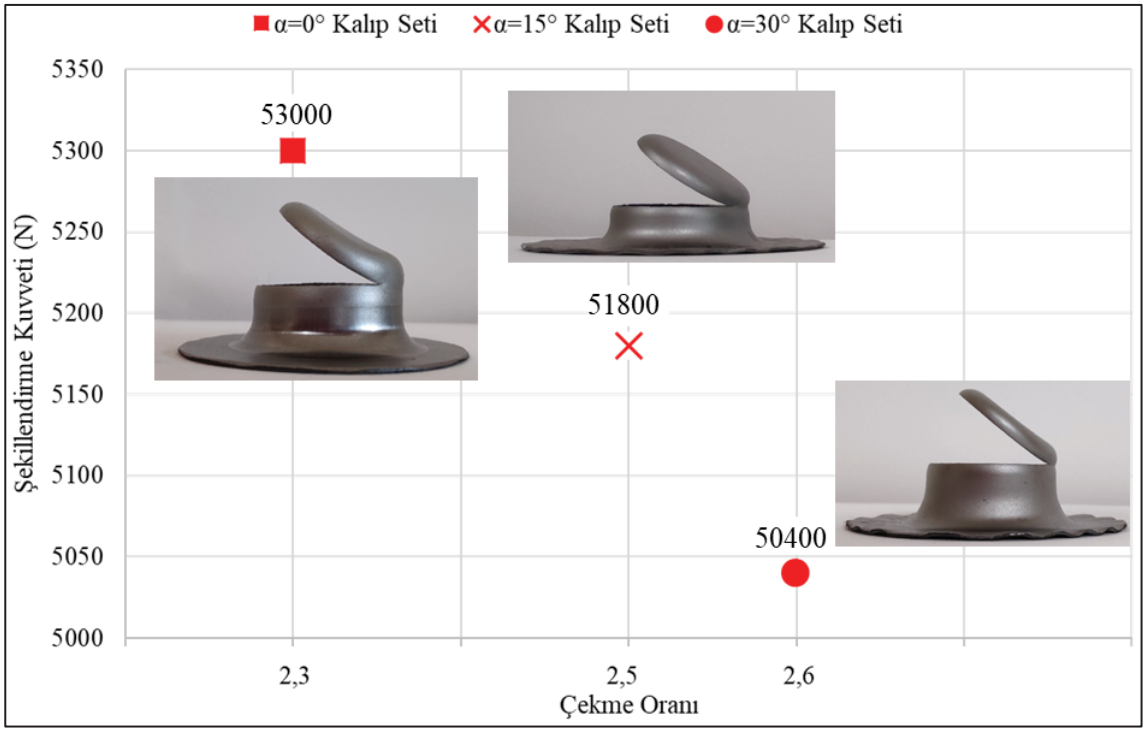


Şekil 5.2. DC – 01 malzeme için strok-şekillendirme kuvveti ilişkisi

Her üç kalıp setinde de ortak olarak başarılı sonuç veren çekme oranlarındaki deney sonuçları incelendiğinde; kalıp giriş açısındaki artışa rağmen şekillendirme kuvvetinde %17,5' e varan oranlarda azalma tespit edilmiştir. ß=2,0 için 0° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde yapılan çekme operasyonlarında en yüksek 4970 N şekillendirme kuvveti meydana gelirken; 15° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde %14,5 oranında bir azalma ile en yüksek 4250 N, 30° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde %17,5 oranında bir azalma ile en yüksek 4100 N şekillendirme kuvveti gözlemlenmiştir. Ayrıca, ß=2.2 için 0° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde yapılan çekme operasyonlarında en yüksek 4795 N şekillendirme kuvveti meydana gelirken; 15° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde yaklaşık %1,5 oranında bir azalma ile en yüksek 4730 N, 30° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde yaklaşık %11,4 oranında bir azalma ile en yüksek 4250 N şekillendirme kuvveti oluşumu gözlemlenmiştir.

15° ve 30° açılı giriş tipine sahip iki kalıp setinde de aynı çekme oranında başarılı olarak şekillendirilen çekme oranlarındaki deney sonuçları incelendiğinde; şekillendirme kuvvetinde %13,65' e varan oranlarda bir düşüş gözlemlenmiştir. ß=2,3 için 15° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde yapılan çekme operasyonlarında en yüksek 4980 N şekillendirme kuvveti meydana gelirken; 30° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde %13,65 oranında bir azalma ile en yüksek 4300 N şekillendirme kuvveti oluştuğu tespit

edilmiştir. ß=2,4 için 15° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde yapılan çekme operasyonlarında en yüksek 4700 N şekillendirme kuvveti meydana gelirken; 30° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde yaklaşık %8 oranında bir azalma ile en yüksek 4320 N şekillendirme kuvveti oluşumu gözlemlenmiştir. Ayrıca, meydana gelen ve teorik olarak hesaplanan şekillendirme kuvvetleri karşılaştırıldığında, α=30° kalıp setinde 2,3 ve daha yüksek çekme oranında şekillendirilen kapların hesap edilenden daha düşük kuvvetler altında şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. Ek olarak, her kalıp giriş açısında farklı çekme oranlarında başarılı olarak şekillendirilemeyen derin çekme deneylerinden elde edilen en yüksek şekillendirme kuvvetleri Şekil 5.3' te verilmiştir.



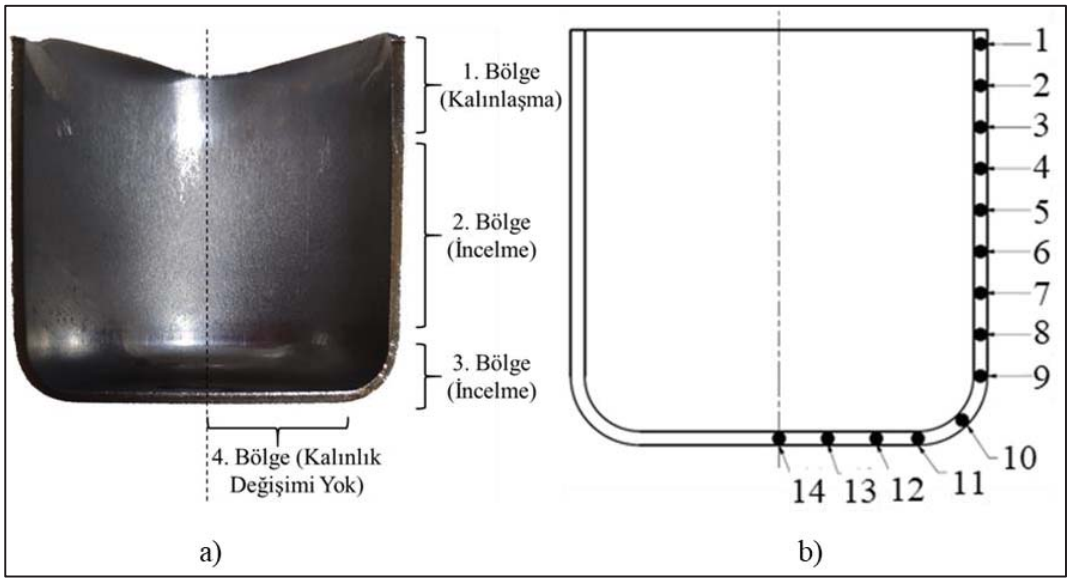
Şekil 5.3. DC-01 malzeme için başarısız çekme operasyonlarında meydana gelen şekillendirme kuvveti değişimleri

5.1.2. DC – 01 Sac malzemede kalınlık değişimleri

Şekillendirilen bir üründe; üretilebilirlik, kolay montaj yapılabilirlik ve düşük maliyet gibi önemli tasarım kriterlerinden birisi de dayanımdır. Dayanım hesaplamalarında ise parça kesitinin et kalınlığı büyük önem arz etmektedir. Basma ve çekme gerilmelerinin bir arada meydana geldiği derin çekme işlemlerinde, şekillendirilen sac metal malzemenin et kalınlığında bazı bölgelerde incelmeler ve bazı bölgelerde de kalınlaşmalardan meydana

gelen kalınlık değişimleri gözlemlenebilmektedir. Başarılı bir derin çekme operasyonu sonunda sac metal malzemenin et kalınlığında maksimum %25' e varan oranlarda değişim oluşabilmektedir [7].

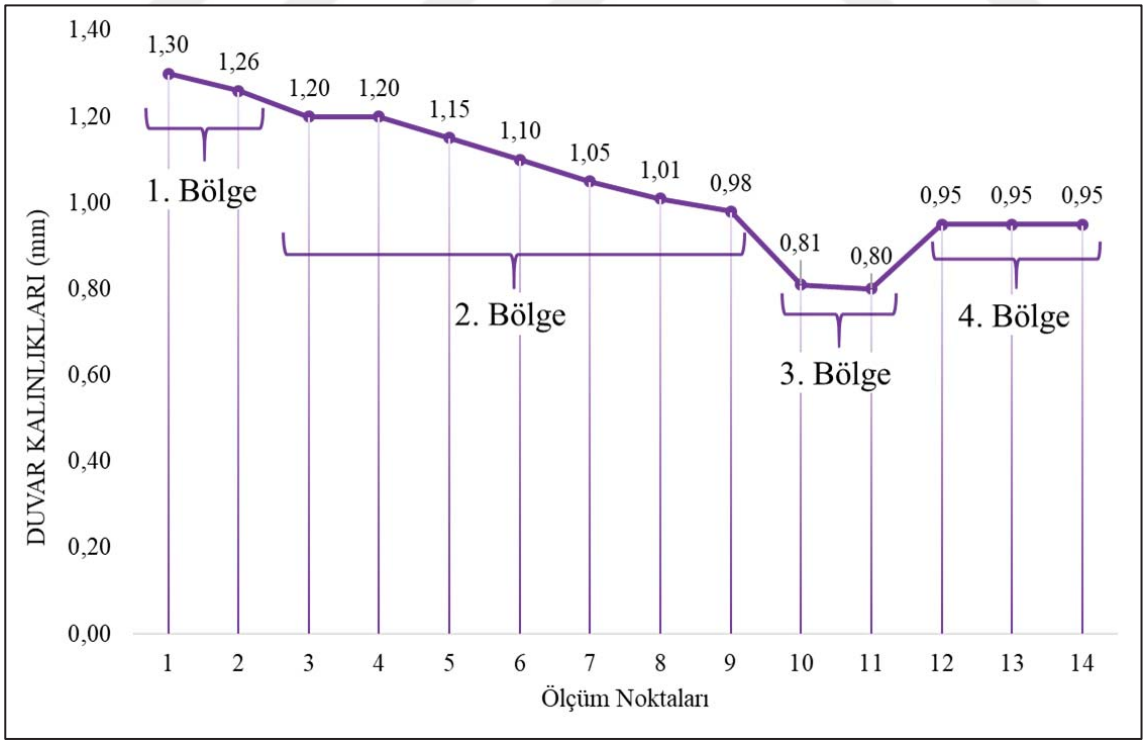
Deneysel çalışmalarda da farklı açılarda ters kalıp giriş tipine sahip derin çekme kalıp setleri kullanılarak, çekme oranı 2,0' dan 2,5' e kadar değişen çekme oranlarında derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Derin çekme deneyleri sonucunda, her kalıp seti için en yüksek çekme oranında başarılı şekilde derin çekilerek şekillendirilen numunelerin duvar kalınlıklarındaki değişimler incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda her üç kalıp setinde de duvar kalınlıklarındaki değişimin benzer olduğu gözlemlenmiştir. Çekilmiş kapların; açınım sac metal malzemenin dış kısımları olan birinci bölgesinde kalınlaşma davranışı, birinci ve ikinci bölge arasında kalan kısımda başlangıç kalınlığından incelmeye doğru bir eğilim, sac malzemenin zımba radyüsüne sarıldığı kısım olan ikinci bölgede ise incelme davranışının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Açınım sac metal malzemenin zımba tabanına dayanarak çekilmiş kabın tabanını oluşturan üçüncü bölgede ise herhangi bir kalınlık değişiminin olmadığı ya da ihmal edilebilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Çekilmiş kaplarda kalınlık tespitinde kullanılan ölçüm bölgeleri Resim 5.5 (a)' da ölçüm noktaları ise Resim 5.5 (b)' de verilmiştir.



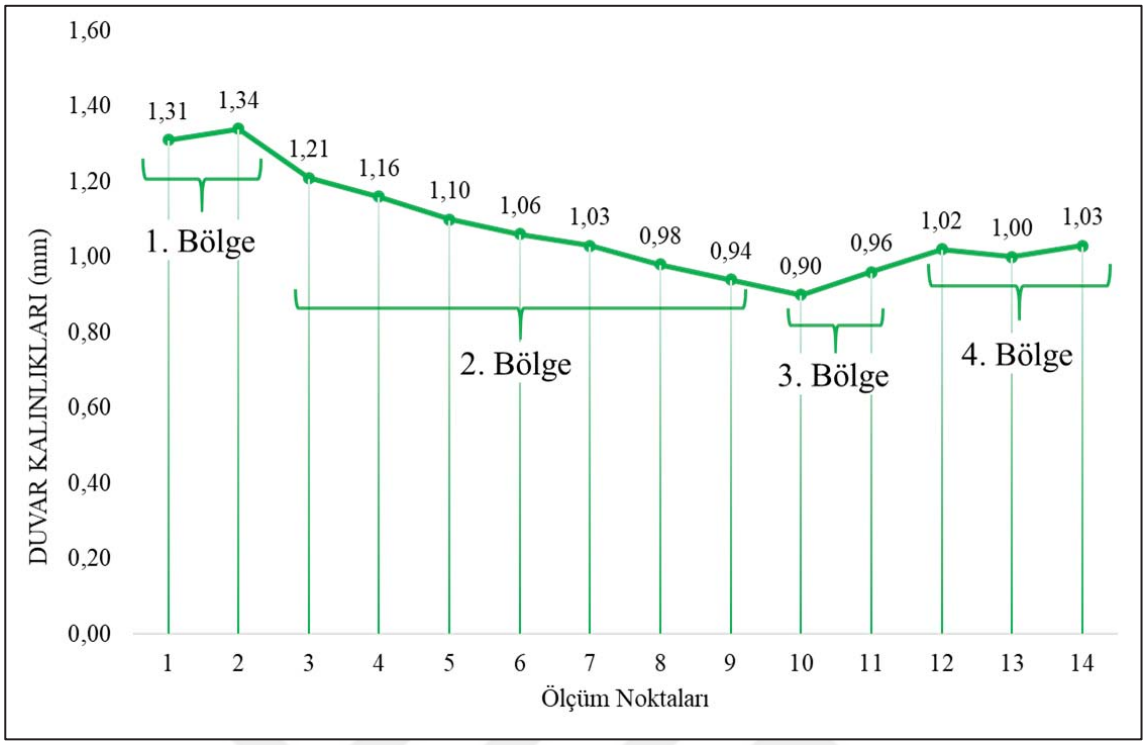
Resim 5.5. (a) Çekilmiş kabın kalınlık ölçüm bölgeleri; (b) Kalınlık ölçüm noktaları

Yapılan kalınlık ölçümlerinde farklı kalıp açılarında en yüksek çekme oranında şekillendirilen; α=0° kalıp seti için ß=2,2, α=15° kalıp seti için ß=2,4 ve α=30° kalıp seti için

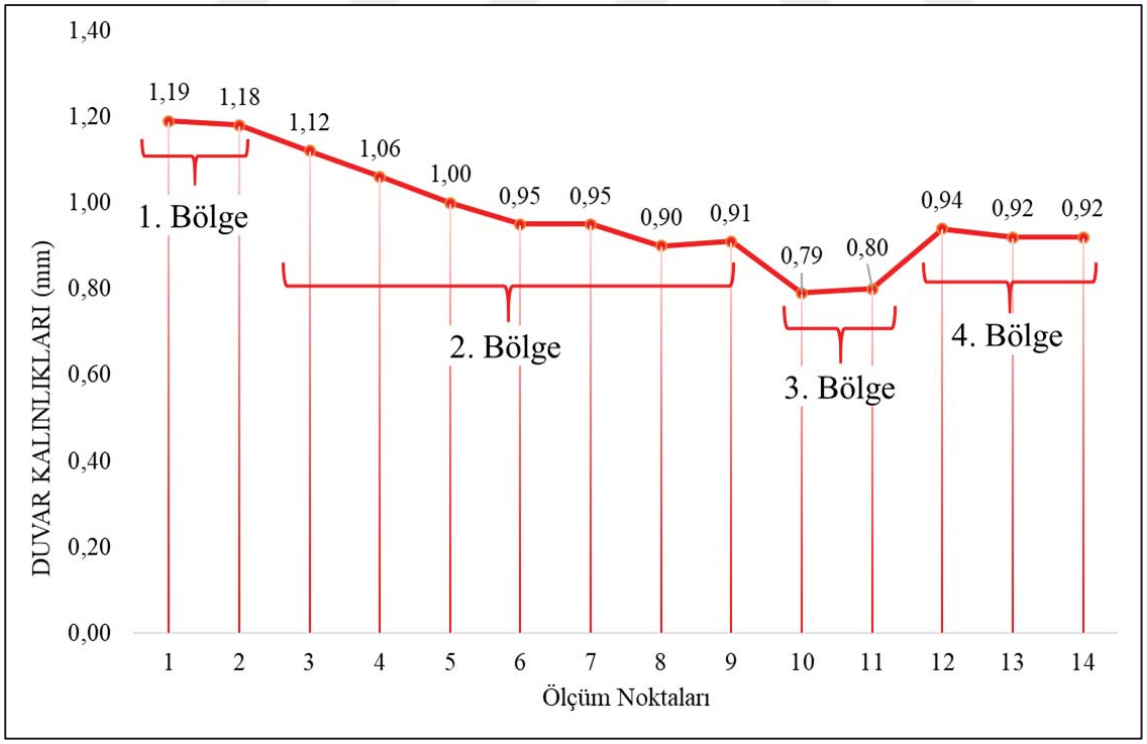
ß=2,5 olan çekilmiş kaplar kullanılmıştır. Çekme oranları 2,2 ve 2,4 olan çekme numuneleri; incelme davranışını 2.bölgeye yakın kısımlarda göstermeye başlarken, çekme oranı 2,5 olan numunenin daha fazla ön deformasyona maruz kalmasından dolayı incelme davranışını birinci bölgeden hemen sonra (3. 4. 5. noktalarda) gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak, basma kuvvetlerinin daha etkin şekilde etkili olduğu 2,5 çekme oranlı numunenin birinci bölgesinde meydana gelen kalınlaşmanın başlangıç kalınlığına daha yakın olduğu ve daha homojen bir deformasyon davranışının gözlemlendiği tespit edilmiştir. Şekillendirilen deney numuneleri kalınlık değerleri açısından karşılaştırıldığında; 2,2 çekme oranı için en yüksek kalınlık değeri 1,30 mm iken, çekme oranı 2,5 için en yüksek kalınlık değerinin yaklaşık %8,5 azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, ön deformasyon gerilimleri sayesinde daha kolay şekillendirilebilen ß=2,4 numunenin zımba radyüsü etrafında, et kalınlığı olan 1 mm' ye çekme oranı 2,2 ve 2,4 olan numunelere göre daha yakın değerlerde incelme davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. İncelme miktarları karşılaştırıldığında; ß=2,2 için en ince duvar kalınlığı değerinin 0,80 mm olduğu, ß=2,4 için ise en ince duvar kalınlığı değerinin %12,5 iyileşme göstererek 0,90 mm olduğu gözlemlenmiştir. Üç farklı çekme oranındaki numunelerden ölçülen duvar kalınlık değerleri Şekil 5.4 – 5.6 arasında verilmiştir.



Şekil 5.4. DC-01 malzemenin α=0° ve ß=2,2 için duvar kalınlıkları



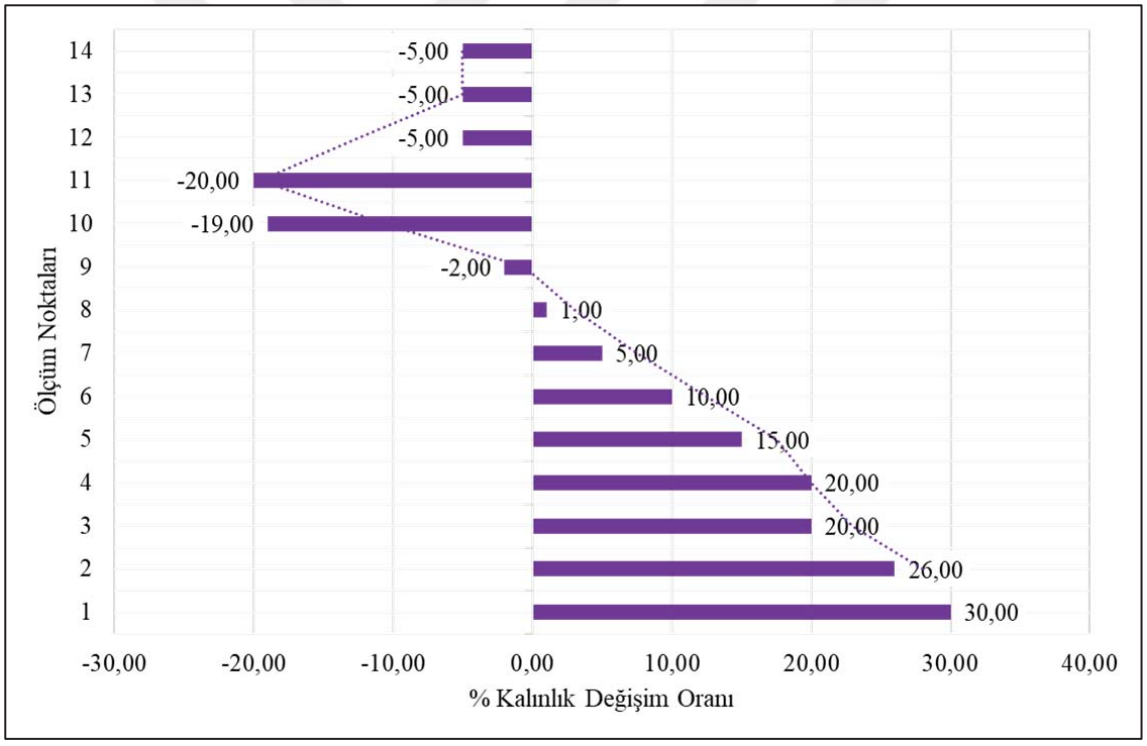
Şekil 5.5. DC-01 malzemenin α=15° ve ß=2.4 için duvar kalınlıkları



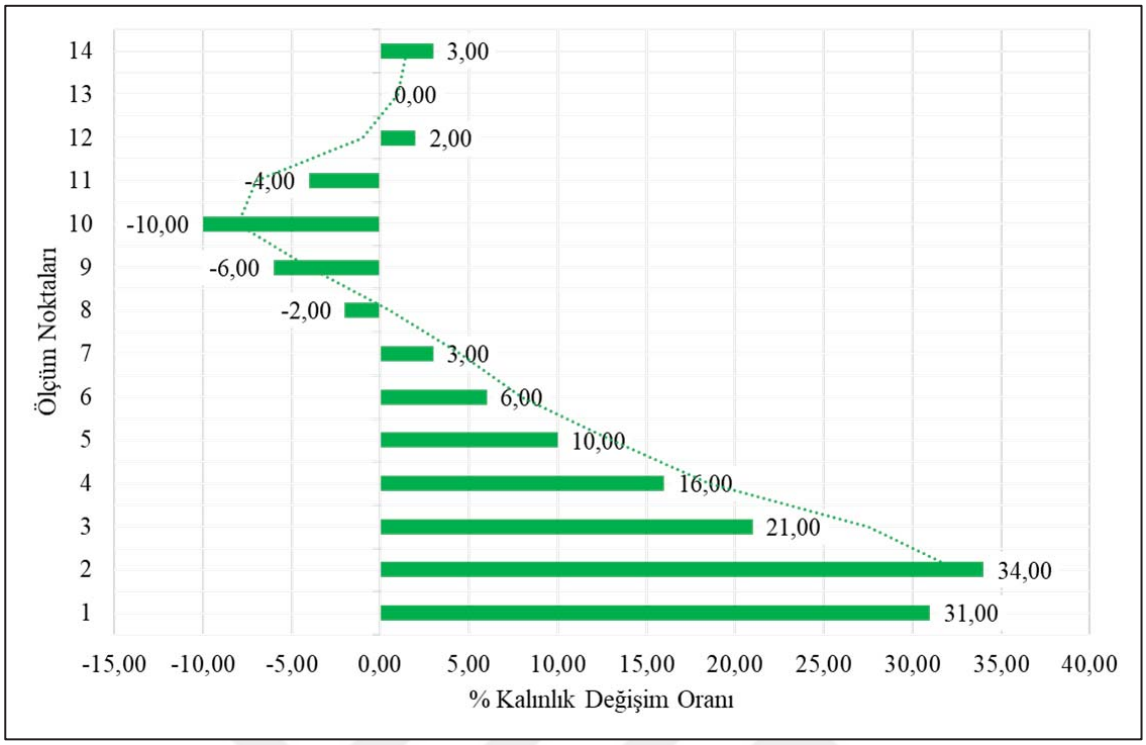
Şekil 5.6. DC-01 malzemenin α=30° ve ß=2.5 için duvar kalınlıkları

5.1.3. DC – 01 Sac malzemede % kalınlık değişimi

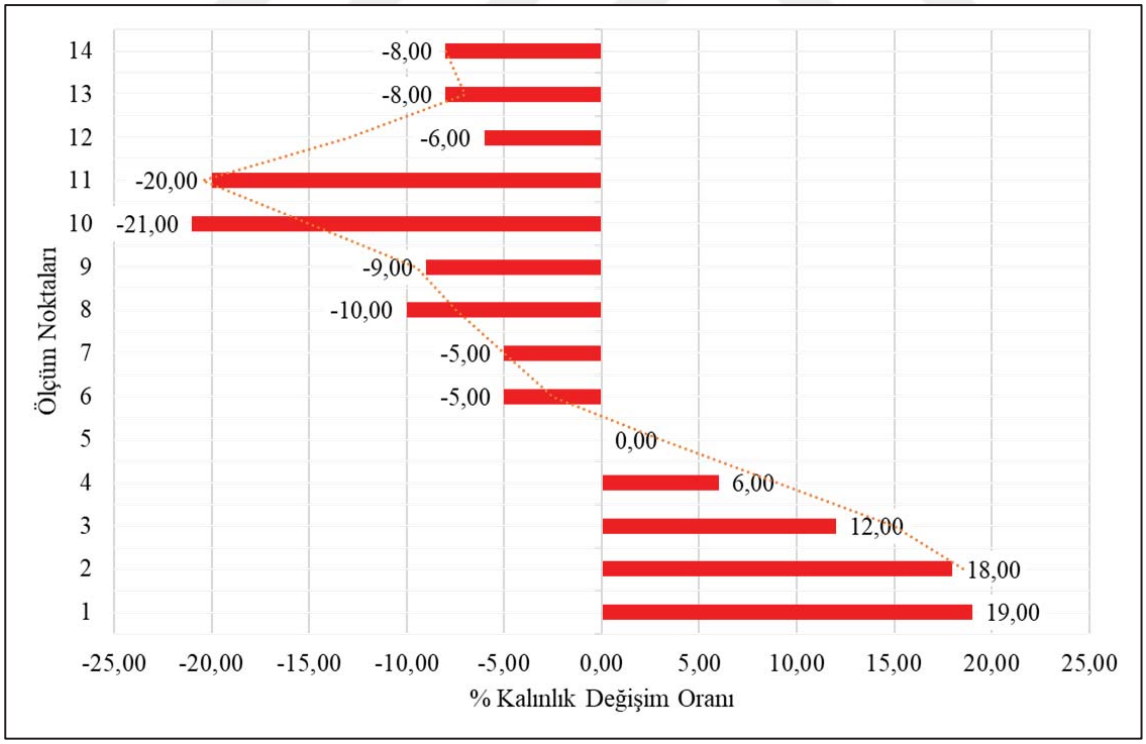
Derin çekme deneylerinde kullanılan sac metal malzemelerde şekillendirme işlemi sonrasında kalınlık değişimleri ile incelme ve kalınlaşma davranışları gözlemlenmiştir. Deney numunelerindeki kalınlık değişimi araştırmaları sonucunda DC – 01 sac metal malzeme için; en az kalınlaşma davranışının %19 kalınlaşma oranı ile çekme oranı 2,5 olan numunelerde meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, en az incelme davranışının ise %10 incelme oranı ile çekme oranı 2.4 olan numunelerde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yapılan kalınlık dağılımı ölçümleri sonucu elde edilen kalınlık değişim oranları yüzdesi 0; 15 ve 30 derece kalıp açılarında en yüksek çekme oranında şekillendirilen deney numuneleri için Şekil 5.7 – 5.9 arasında verilmiştir.



Şekil 5.7. DC-01 malzemenin α=0° ve ß=2.2 için kalınlık değişimi oranları (%)



Şekil 5.8. DC-01 malzemenin α=15° ve ß=2.4 için kalınlık değişimi oranları (%)



Şekil 5.9. DC-01 malzemenin α=30° ve ß=2.5 için kalınlık değişimi oranları (%)

5.2. Al6061 – T6 Sac Metal Malzemenin Derin Çekme ile Şekillendirilebilirliği

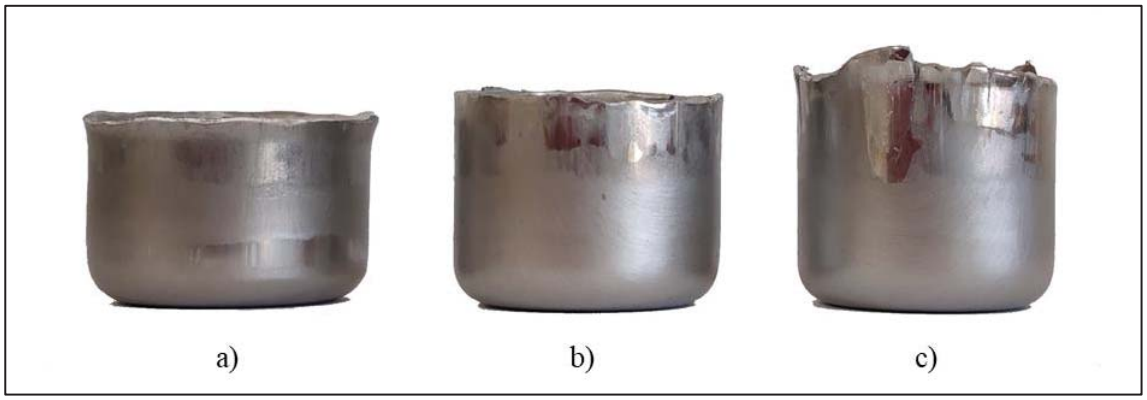
Yapılan bu çalışmada özellikle savunma sanayinde sıklıkla kullanılan Al 6061 – T6 sac metal malzemelerin derin çekilebilirliği de deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, α=0° açılı klasik derin çekme kalıp seti ile 1 mm kalınlığında ve maksimum 2,0 derin çekme oranında herhangi bir şekillendirme kusuru meydana gelmeksizin çekilmiş kaplar elde edilebilmiştir. 15° kalıp giriş açısına sahip derin çekme kalıp setinde ise derin çekme oranının arttırılarak maksimum 2,1 derin çekme oranında çekilmiş kaplar üretilebilmiştir. 30° kalıp giriş açısına sahip derin çekme kalıp seti kullanılarak gerçekleştirilen derin çekme işlemlerinde ise, 0° açılı derin çekme kalıbında elde edilen 2,0 çekme oranına kıyasla çekme oranında iyileşme meydana geldiği ve maksimum 2,2 çekme oranında çekilmiş kapların elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Farkı kalıp setleri kullanılarak elde edilen derin çekilmiş deney numuneleri Resim 5.6 – 5.8' de verilmiştir. Ayrıca, yapılan deneyler sonucunda derin çekme işlemi başarısız sonuçlanan deney numuneleri de Resim 5.9' da verilmiştir.



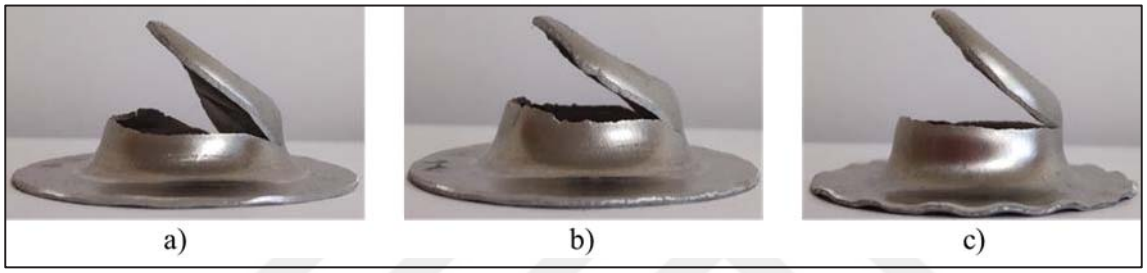
Resim 5.6. Al6061 – T6 için α=0° kalıp setinde çekilen ß= 2,0 deney numunesi



Resim 5.7. Al6061-T6 malzemenin α=15° kalıp setinde alınan sonuçlar; (a) ß=2,0; (b) ß=2,1



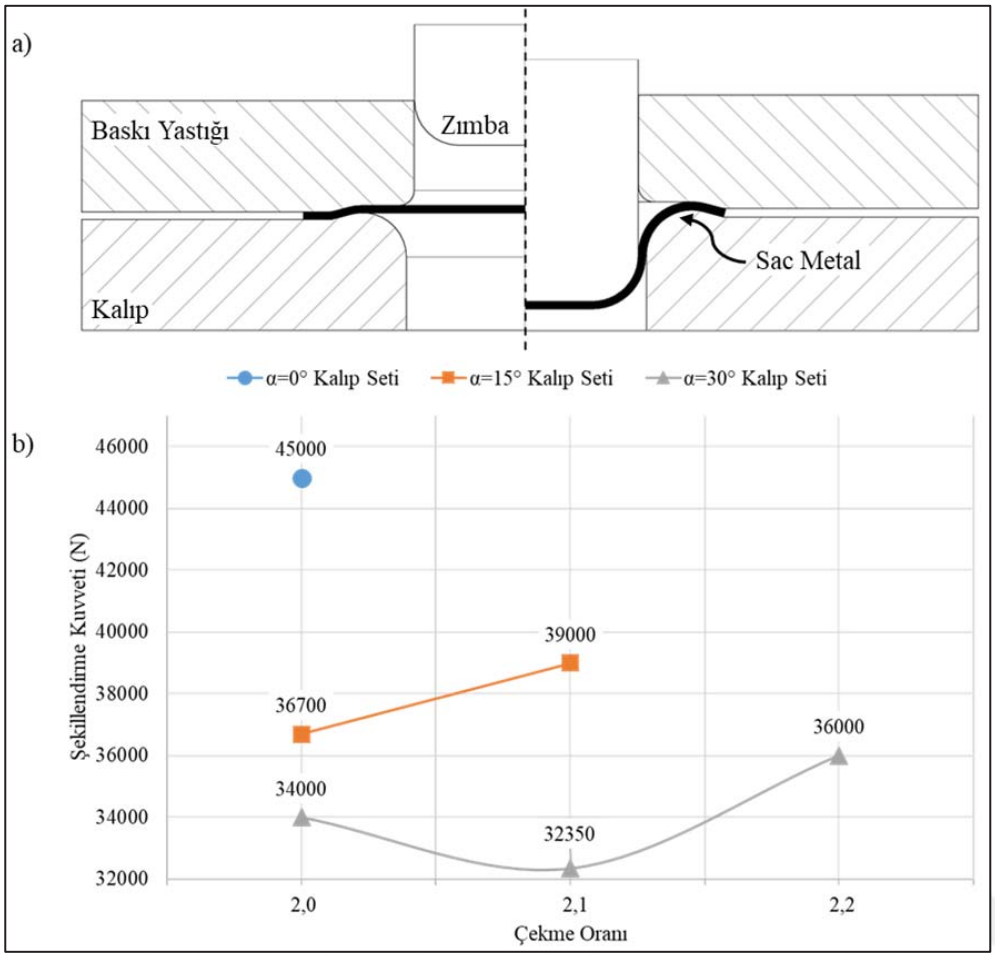
Resim 5.8. Al6061-T6 malzemenin α=30° kalıp setinde alınan sonuçlar; (a) ß=2,0; (b) ß=2,1; (c) ß=2,2



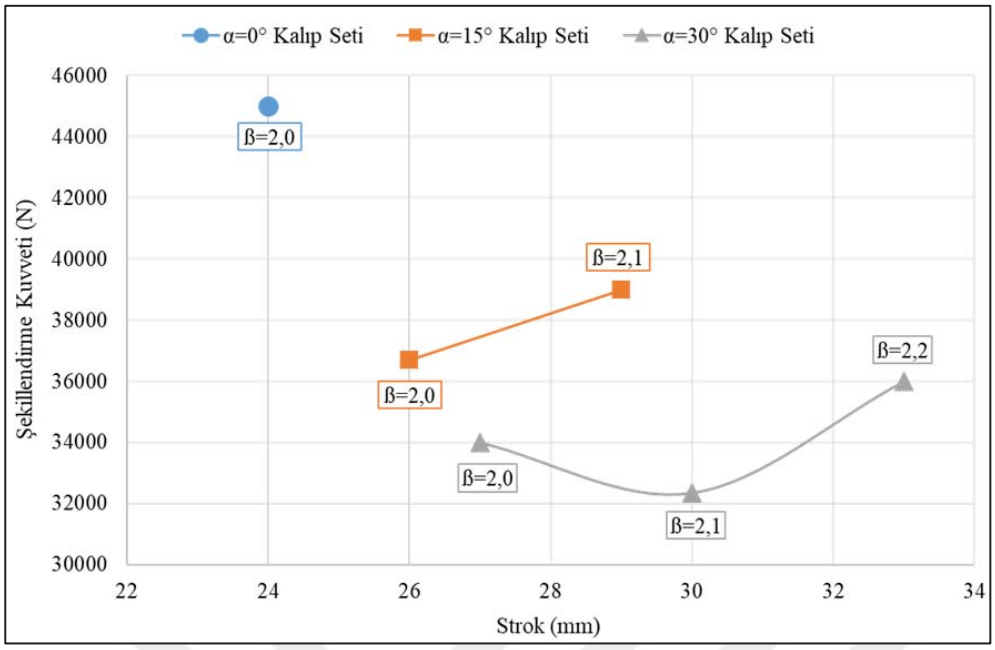
Resim 5.9. Al6061-T6 malzeme için başarısız sonuçlanan çekme işlemleri; (a) α=0° kalıp ß=2,1; (b) α=15° kalıp ß=2,2; (c) α=30° kalıp ß=2,3

5.2.1. Al6061 – T6 Sac malzemede şekillendirme kuvvetleri

Farklı açılarda kalıp giriş tipine sahip olan üç farklı kalıp seti kullanılarak yapılan derin çekme çalışmalarında, kalıp giriş açılarının artması ile meydana gelen en yüksek şekillendirme kuvvetlerinin azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Artan kalıp giriş açılarında şekillendirme kuvvetinde meydana gelen değişim Şekil 5.10’ da verilmiştir. Ayrıca, strok boyuna göre çekme oranı ve şekillendirme kuvveti ilişkisi Şekil 5.11’ de verilmiştir.



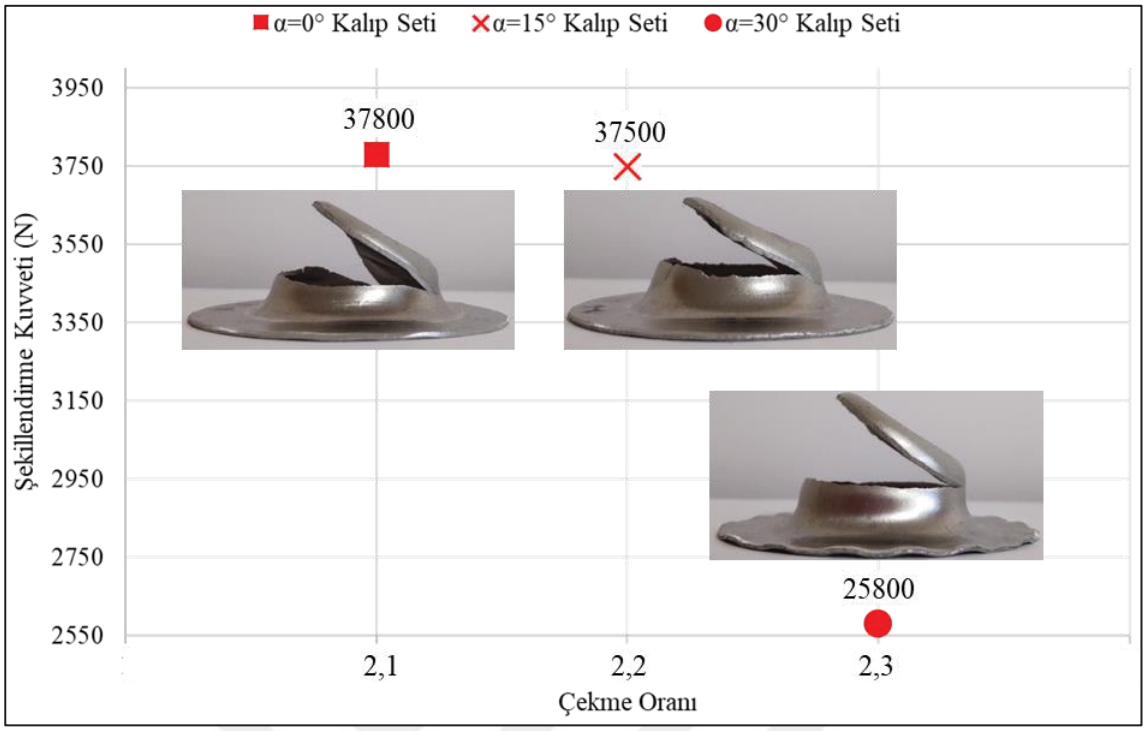
Şekil 5.10. (a) Çalışmada kullanılan kalıpların şematik gösterimi; (b) Al6061 – T6 malzeme için farklı kalıp giriş açılarında meydana gelen şekillendirme kuvvetleri



Şekil 5.11. Al6061-T6 malzeme için strok-şekillendirme kuvveti ilişkisi

Her üç kalıp setinde de ortak olarak başarılı sonuç veren 2,0 çekme oranındaki deney sonuçları incelendiğinde; şekillendirme kuvvetinde %24,45 oranında azalma tespit edilmiştir. ß=2,0 için 0° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde yapılan çekme operasyonlarında en yüksek 4500 N şekillendirme kuvveti meydana gelirken; 15° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde yaklaşık %18,45 oranında bir azalma ile en yüksek 3670 N, 30° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde yaklaşık %24,45 oranında bir azalma ile en yüksek 3400 N şekillendirme kuvveti oluşumu gözlemlenmiştir.

15° ve 30° açılı giriş tipine sahip iki kalıp setinde de ortak olarak başarılı sonuç veren 2,0 ve 2,1 çekme oranındaki deney sonuçları incelendiğinde; şekillendirme kuvvetinde %17 oranında azalma gözlemlenmiştir. ß=2,1 için 15° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde yapılan çekme operasyonlarında en yüksek 3900 N şekillendirme kuvveti meydana gelirken; 30° açılı kalıp giriş tipine sahip kalıp setinde %17,05 oranında azalma ile en yüksek 3235 N şekillendirme kuvveti oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, meydana gelen ve teorik olarak hesaplanan şekillendirme kuvvetleri karşılaştırıldığında, α=15° ve α=30° kalıp setlerinde şekillendirilen kapların hesap edilenden daha düşük kuvvetler altında çekilebildiği gözlemlenmiştir. Her kalıp giriş açısında farklı çekme oranlarında başarılı olarak şekillendirilemeyen derin çekme deneylerinden elde edilen en yüksek şekillendirme kuvvetleri Şekil 5.12’ de verilmiştir.

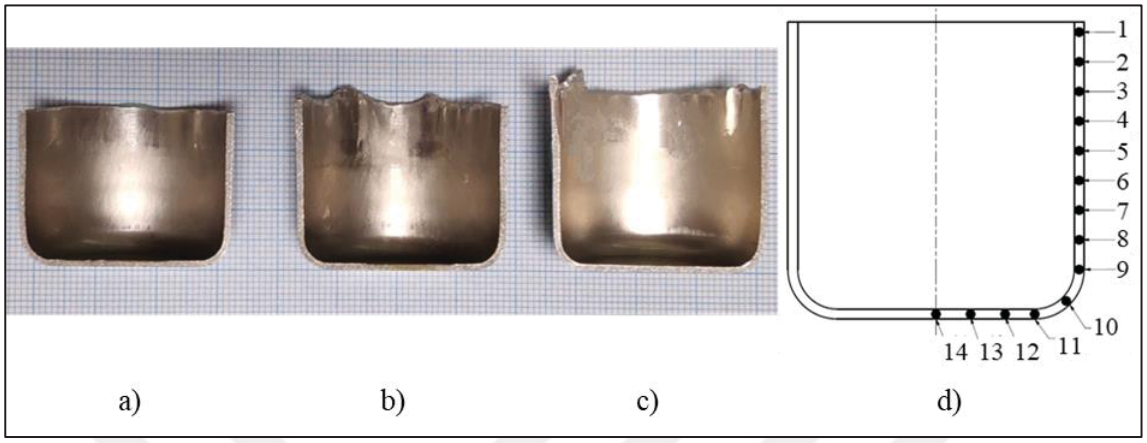


Şekil 5.12. Al6061-T6 malzeme için başarısız çekme operasyonlarında meydana gelen şekillendirme kuvveti değişimleri

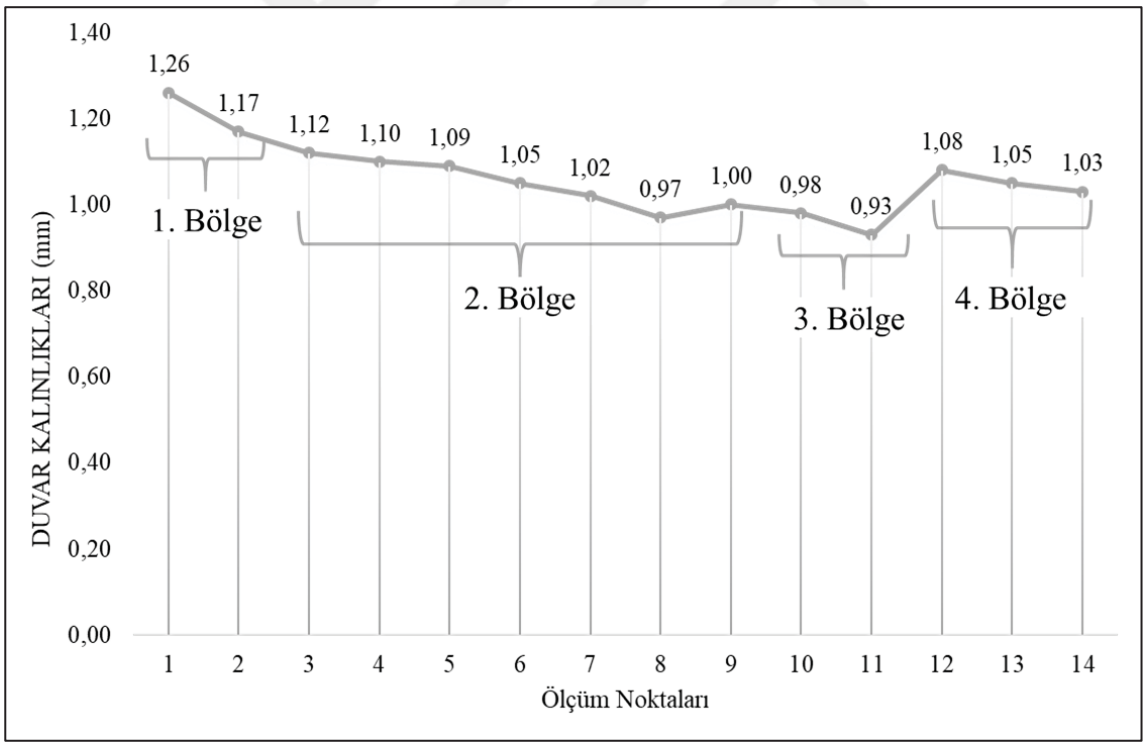
5.2.2. Al6061 – T6 Sac malzemede kalınlık değişimleri

Yapılan kalınlık ölçümlerinde her bir kalıp açısı için şekillendirilen en yüksek çekme oranına sahip deney numuneleri kullanılmıştır. α=0° kalıp seti için çekme oranı ß=2,0, α=15° kalıp seti için çekme oranı ß=2,1 ve α=30° kalıp seti için çekme oranı ß=2,2 olan deney numuneleri kesilerek hazırlanmıştır. Çekme oranı 2,0 olan deney numunesinin; incelme davranışını 2. bölgede gösterdiği gözlemlenmiştir. Çekme oranları 2,1 ve 2,2 olan deney numunelerinin açılı kalıp giriş tipine sahip kalıplarda ön deformasyona maruz kalmaları nedeniyle incelme davranışını 1. bölge ile 2. bölge arasında, 2. bölgeye daha yakın kısımlarda göstermeye başladıkları tespit edilmiştir. Kalınlık değerleri karşılaştırıldığında; ß=2,0 ve ß=2,2 için en yüksek kalınlık değeri 1,26 mm iken, ß=2,1 için en yüksek kalınlık değerinin yaklaşık %6,5 azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca; en yüksek miktarda incelme davranışı, maruz kaldığı yüksek ön deformasyon gerilimleri nedeniyle α=30° kalıp setinde en yüksek çekme oranı olan 2,2' ye sahip deney numunesinde meydana gelmiştir. İncelme miktarları karşılaştırıldığında; ß=2,0 için en ince duvar kalınlığı değerinin 0,93 mm olduğu, ß=2,2 için ise en ince duvar kalınlığı değerinin %8,60 oranında azalma göstererek 0,85 mm olduğu gözlemlenmiştir. Üç farklı numuneden ölçülen duvar kalınlık değerleri Şekil 5.13– 5.15

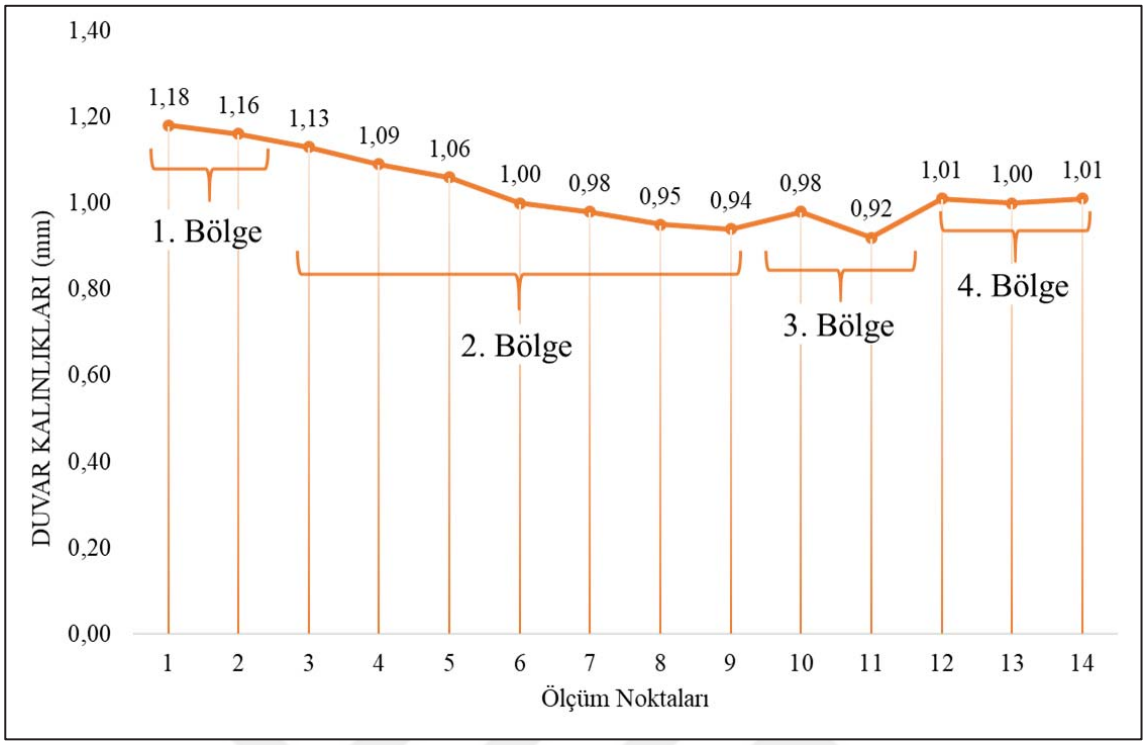
arasında verilmiştir. Simetri eksenlerinden tel erozyon tezgahında kesilerek hazırlanan numuneler ve kalınlık ölçüm noktaları Resim 5.10' da verilmiştir.



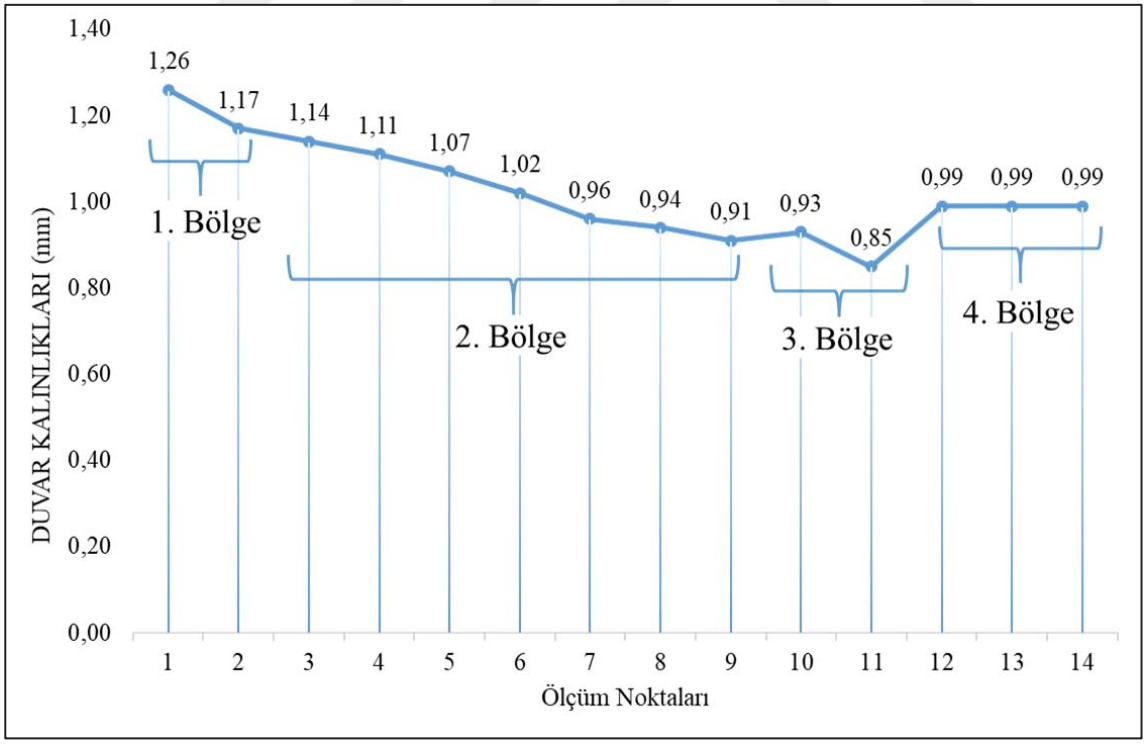
Resim 5.10. Kesilmiş numuneler ve kalınlık ölçüm noktalarının şematik gösterimi (a) ß=2,0; (b) ß=2,1; (c) ß=2,2 (d) Kalınlık ölçüm noktaları



Şekil 5.13. Al6061-T6 malzemenin α=0° ve ß=2,0 için duvar kalınlıkları



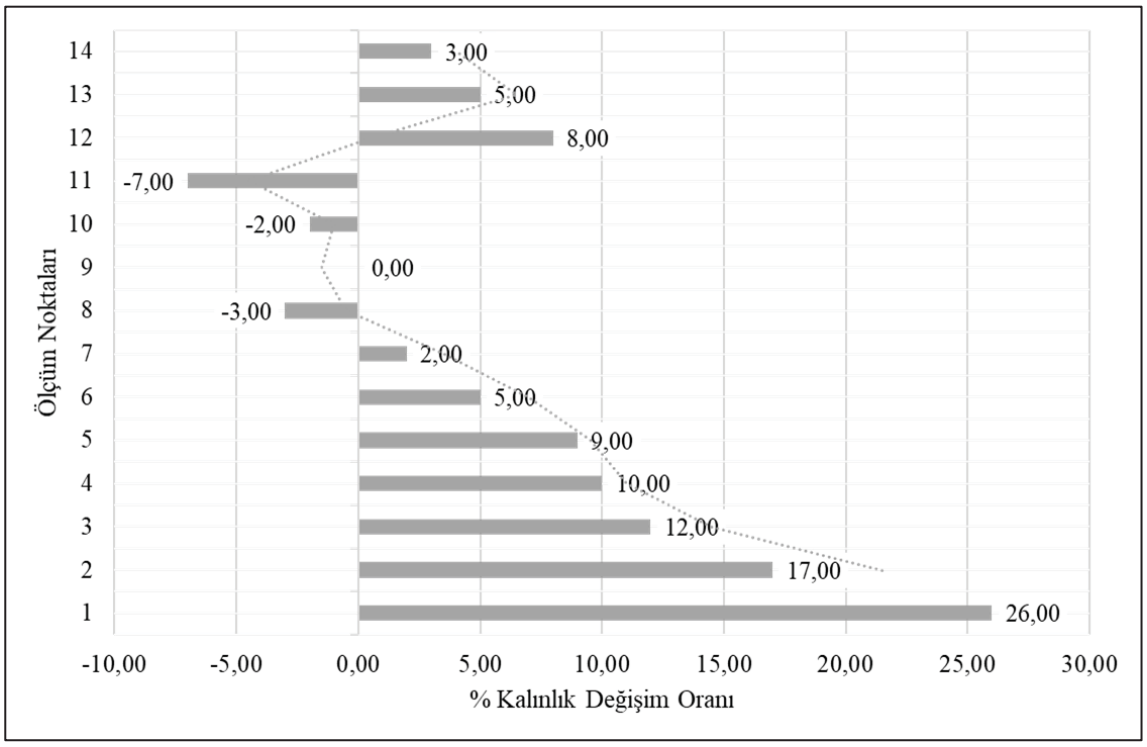
Şekil 5.14. Al6061-T6 malzemenin α=15° ve ß=2,1 için duvar kalınlıkları



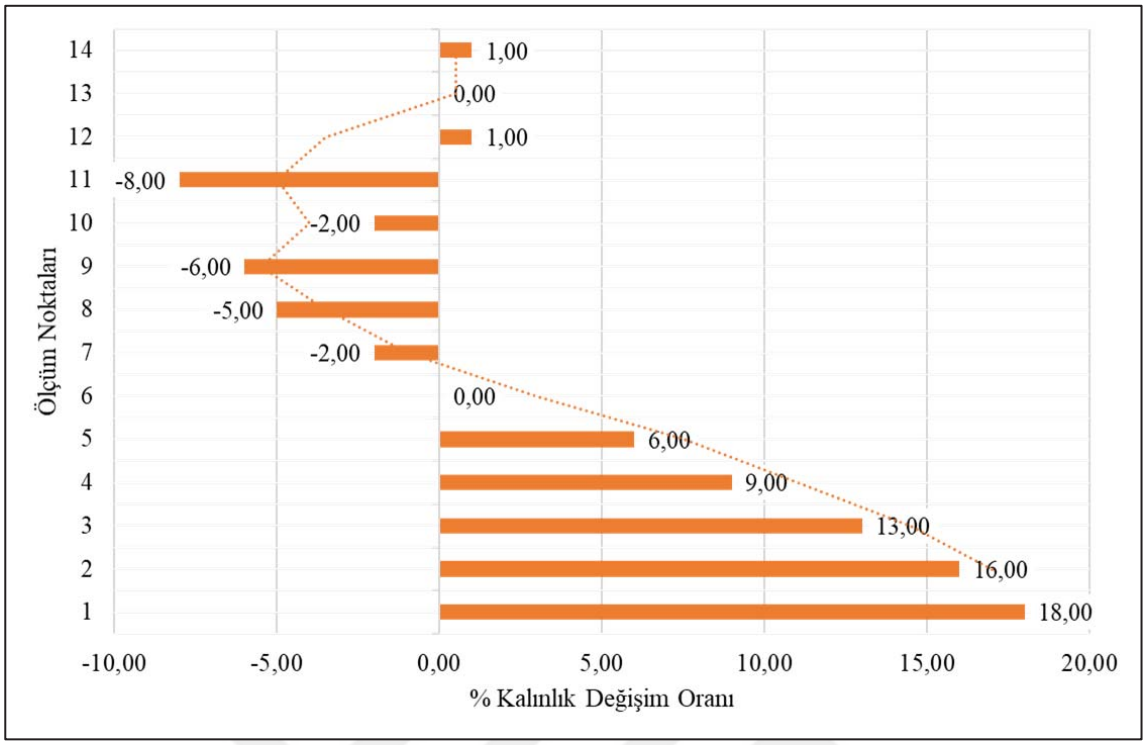
Şekil 5.15. Al6061-T6 malzemenin α=30° ve ß=2,2 için duvar kalınlıkları

5.2.3. Al6061 – T6 Sac malzemede % kalınlık değişimi

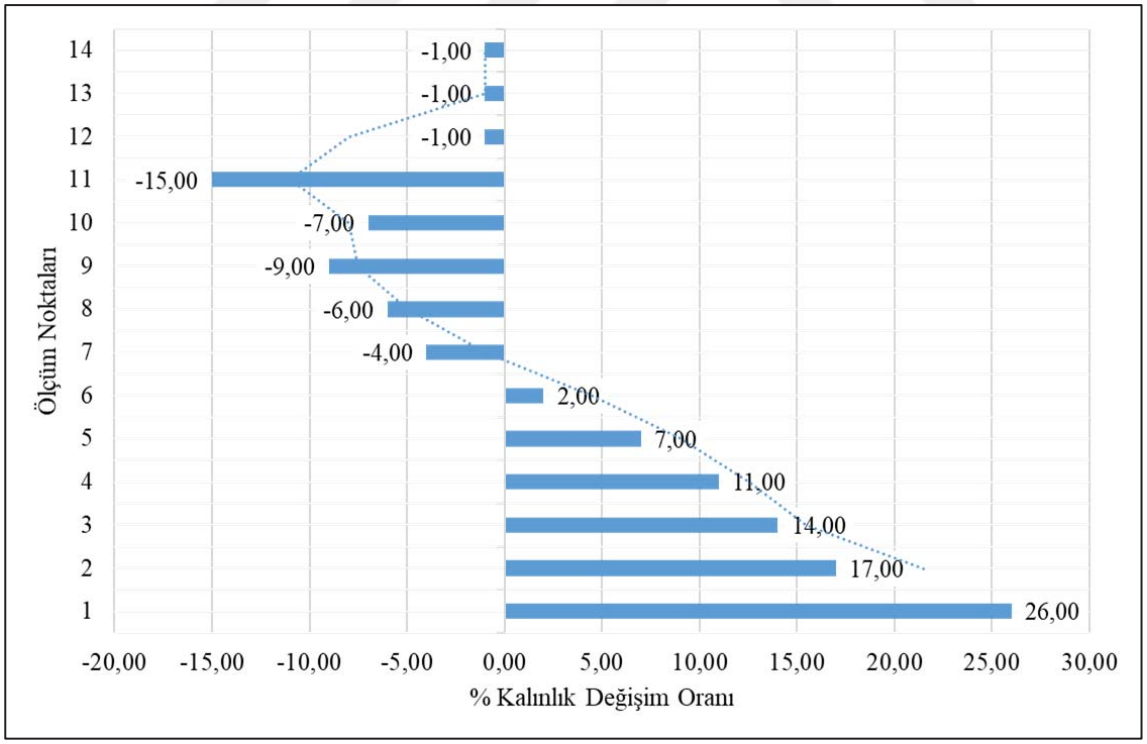
Al6061 – T6 sac malzeme için derin çekme deneylerinde kullanılan 1 mm kalınlığına sahip sac metal malzemelerin şekillendirme işlemi sonrasında kalınlık değişimleri ile incelme ve kalınlaşma davranışları yüzde değerler açısından karşılaştırılmıştır. Yapılan kalınlık değişimi incelemelerinde; en az incelme davranışının ise %7 incelme oranı ile çekme oranı 2,0 olan numunelerde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yapılan kalınlık dağılımı ölçümleri sonucu elde edilen % kalınlık değişim oranları Şekil 5.16 – 5.18 arasında verilmiştir.



Şekil 5.16. Al6061-T6 malzemenin α=0° ve ß=2,0 için kalınlık değişimi oranları



Şekil 5.17. Al6061-T6 malzemenin α=15° ve ß=2,1 için kalınlık değişimi oranları



Şekil 5.18. Al6061-T6 malzemenin α=30° ve ß=2,2 için kalınlık değişimi oranları

6. SONUÇLAR

Sac metal malzemelerden şekillendirilerek üretilen ürünler hem zaman – maliyet açısından hem de ürün işlevselliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak, sac metal malzemelerin şekillendirilmesi, şekillendirme proseslerindeki çeşitli sınırlamalar nedeniyle her zaman kolay olmamaktadır. Yapılan bu çalışmada; derin çekme operasyonlarındaki çekme sınırının geliştirilmesi amacıyla yeni bir kalıp giriş tipinin 1 mm kalınlığındaki DC – 01 ve Al6061 – T6 sac metal malzemelerin derin çekilebilirliğine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar, sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemlerinde sıklıkla kullanılan ön şişirme işleminin mekanik kalıplarda uygulanmasına imkân veren 15 ve 30 derece ters kalıp giriş açısına sahip kalıplar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan açılı derin çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar klasik derin çekme kalıplarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak yeni tasarımın derin çekilebilirliğe etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. DC – 01 sac metal malzeme kullanılarak yapılan derin çekme deneyleri sonucunda klasik derin çekme kalıbında en yüksek 2,2 çekme oranı sağlanabilirken; α=15° olan kalıp setinde %9 oranında bir artış ile en yüksek ß=2,4 ve α=30° olan kalıp setinde %13,63 oranında bir artış ile en yüksek ß=2,5 olan kaplar herhangi bir çekme kusuru gözlemlenmeksizin elde edilebilmiştir.
2. DC – 01 sac metal malzemenin tüm kalıp setlerinde başarılı şekilde çekilebilen deney sonuçları karşılaştırıldığında, şekillendirme kuvvetinde %17,5'e varan oranlarda bir azalmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir.
3. DC – 01 sac metal malzeme kullanılarak yapılan derin çekme deneyleri sonucunda her kalıp için başarılı olarak en yüksek çekme oranında şekillendirilebilen numunelerin duvar kalınlıklarında meydana gelen incelme ve kalınlaşma davranışları çekilmiş ürünler üzerinde kalınlık ölçümleri yapılarak incelenmiştir. Yapılan kalınlık ölçümleri sonucunda; α=15° kalıp setinden elde edilen ß=2,4 olan numunede incelme davranışının %12,5 oranında iyileştirilebildiği ve α=30° kalıp setinde elde edilen ß=2,5 olan numunede kalınlaşma davranışının %8,5 oranında iyileştirilebildiği gözlemlenmiştir.

4. Al6061 – T6 sac metal malzeme kullanılarak yapılan derin çekme deneyleri sonucunda klasik derin çekme kalıbında en yüksek 2,0 çekme oranı sağlanabilirken; α=15° olan kalıp setinde %5 oranında bir artış ile en yüksek ß=2,1 ve α=30° olan kalıp setinde %10 oranında bir artış ile en yüksek ß=2,2 olan kaplar herhangi bir şekillendirme kusuru oluşmadan çekilebilmiştir. Ayrıca; tüm kalıp setlerinde başarılı şekilde çekilebilen 2,0 çekme oranındaki deney sonuçları karşılaştırıldığında, şekillendirme kuvvetinde %24,45'e varan oranda bir azalmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir.
5. Al6061-T6 sac metal malzeme için açılı ters kalıp giriş formuna sahip kalıp setlerinde başarılı şekilde çekilebilen 2,1 çekme oranındaki deney sonuçları karşılaştırıldığında, şekillendirme kuvvetinde %17'ye varan oranlarda bir azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir.
6. Al6061 – T6 sac metal malzeme kullanılarak yapılan derin çekme deneyleri sonucunda her kalıp için başarılı olarak en yüksek çekme oranında şekillendirilebilen numunelerin duvar kalınlıklarında meydana gelen incelme ve kalınlaşma davranışları çekilmiş ürünler üzerinde kalınlık ölçümleri yapılarak incelenmiştir. Yapılan kalınlık ölçümleri sonucunda; α=30° kalıp setinden elde edilen ß=2,2 olan numunede incelme davranışının %8,6 oranında iyileştirilebildiği ve α=15° kalıp setinde elde edilen ß=2,1 olan numunede kalınlaşma davranışının %6,5 oranında iyileştirilebildiği gözlemlenmiştir.
7. Farklı kalıplar ile birkaç aşamada ya da yüksek maliyetli farklı derin çekme yöntemleri ile yüksek çekme oranlarına sahip kaplar şekillendirilebilmektedir. Ancak, geliştirilen kalıp geometrisi ile klasik derin çekme kalıplarında tek operasyonda şekillendirilemeyen yüksek çekme oranında kaplar elde edilebilmiştir. Bu sayede, ek kalıp veya yöntem maliyetleri, zaman ve enerji sarfiyatı açısından önemli miktarda kazanç sağlanmıştır.
8. Ayrıca, alüminyum gibi kısıtlı şekillendirilebilirlik özelliklerine sahip hafif alaşım metallerin şekillendirilmesinde; işlem sırasında sac malzemenin ya da kalıbın bölgesel ısıtılması, kalıp setinin tamamen ısıtılması, sac malzemenin tavlanması gibi işlemlerin yönteme adapte edilmesi ile çekme oranın arttırılması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. International Energy Agency (2020). *Key World Energy Statistics 2020*. Paris, August.

2. Gao, M., He, K., Li, L., Wang, Q., and Liu, C. (2019). A Review on Energy Consumption, Energy Efficiency and Energy Saving of Metal Forming Processes from Different Hierarchies. *Processes*, 7(6), 357.

3. Xiong, W., Huang, H., Zhu, Q., Gan, L., Li, L., Zhu, L., and Song, S. (2020). A Framework for Energy Consumption Reduction in Sheet Metal Forming. *Procedia CIRP*, 90, 534–539.

4. Gao, M., Huang, H., Wang, Q., Liu, Z., and Li, X. (2018). Energy Consumption Analysis on Sheet Metal Forming: Focusing on The Deep Drawing Processes. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 96(9–12), 3893–3907.

5. Wifi, A. S., Abdelmaguid, T. F., and El-Ghandour, A. I. (2007, 20-23 October). *A Review of The Optimization Techniques Applied to The Deep Drawing Process*. Paper presented at 37th International Conference On Computers And Industrial Engineering, Alexandria, Egypt.

6. Tunali, B. (2019). *Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan U Formlu Dp Sacların Geri Esneme Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 18-20.

7. Groover, M. P. (2012). *Metal Forming and Sheet Metalworking*, in *Fundamental of Modern Manufacturing Material, Processes, and System*, Fifth Edit, USA, 493–503.

8. Lim, Y., Venugopal, R., and Ulsoy, A. G. (2008, 6-11 July). *Advances in the Control of Sheet Metal Forming*. Paper presented at 17th World Congress The International Federation Of Automatic Control, Seoul, Korea.

9. Dwivedi, R., and Agnihotri, G. (2017). Study of Deep Drawing Process Parameters. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 820–826.

10. Kalpakjian, S., and Schmid, S. R. (2010). *Sheet-Metal Forming Processes and Equipment*, in *Manufacturing Engineering and Technology*, Sixth Edit, USA, 407–417.

11. Şen, N., Kurgan, N., Karaağaç, İ., ve Uluer, O. (2016). Ilık Derin Çekme Prosesinde Yağlayıcı Etkisinin Şekillendirilebilirlik Açısından Deneysel Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 19(2), 185–193.

12. Çavuşoğlu, O. (2013). *Sac Metal Şekillendirme İşlemlerinde Pres Hızı ve Malzemenin Şekillendirmeye Etkilerinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-25.

13. Kakandikar, G. M., and Nandedkar, V. M. (2017). *Sheet Metal Forming Optimization: Bioinspired Approaches*, First Edit. USA: CRC Press, 2-58.

14. Karaağaç, İ. (2011). *Sıvı Basıncıyla Sac Metal Şekillendirme (Hydroformıng) İşlem Parametrelerinin Deneysel Olarak Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 37-69.

15. Erdoğan, M. (2017). *Alüminyum Alaşımlarının Derin Çekme İşleminin Sonlu Eleman Yöntemi İle Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, 3-21.

16. Karaca, C. (2019). *Derin Çekme İşleminde Değişken Baskı Kuvvetinin En Aw 1070a H22 Alüminyum Sacının Şekil Alma Kabiliyetine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 21-30.

17. Marciniak, Z., Duncan, J. L., and Hu, S. J. (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Second Edi. England: Butterworth-Heinemann, 117-127.

18. Gürün, H. (2008). *Derin Çekme Kalıplarındaki Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Bulanık Mantık İle Tahmini*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

19. Bhaduri, A. (2018). *Deep Drawing*, in *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*, First Edit, Germany, 693–716.

20. Savas, V., and Secgin, O. (2007). A new type of deep drawing die design and experimental results. *Materials and Design*, 28(4), 1330–1333.

21. Özek, C., ve Bal, M. (2009). Derin Çekme Kalıplarında Matris-Zımba Radyüsü ve Çekme Oranının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(1), 33–41.

22. Özek, C., ve Ünal, E. (2011, 16-18 May). *Açılı Derin Çekme Kalıplarında Kare Kaplar İçin Limit Çekme Oranının Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması*. Paper presented at 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey.

23. Özek, C., ve Ünal, E. (2012). Kare Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp/Baskı Plakası Açısının Limit Çekme Oranı ve Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(3), 615–622.

24. Dejmal, I., Tirosh, J., Shirizly, A., and Rubinsky, L. (2002). On The Optimal Die Curvature in Deep Drawing Processes. *International Journal Of Mechanical Sciences*, 44(6), 1245–1258.

25. Taşdemir, V. (2013). Derin Çekme İşlemi Üzerine Kalıp Geometrisinin Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 43–47.

26. Colgan, M., and Monaghan, J. (2003). Deep Drawing Process: Analysis and Experiment. *Journal Of Materials Processing Technology*, 132(1–3), 35–41.

27. Reddy, P. V., Ramulu, P. J., Madhuri, G. S., Govardhan, D., and Prasad, P. V. S. R. (2016, 1–8). *Design and Analysis of Deep Drawing Process on Angular Deep Drawing Dies for Different Anisotropic Materials*. Paper presented at IOP Conference Series: Materials Science And Engineering, Bangalore, India.

28. Liu, Y., Li, F., Li, C., and Xu, J. (2019). Effect of Reverse Pre-Bulging on Magnetic Medium Deep Drawing Formability of Aluminum Spherical Bottom Cylindrical Parts. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 103(9–12), 4649–4657.

29. Modanloo, V., Gorji, A., and Bakhshi-Jooybari, M. (2019). A Comprehensive Thinning Analysis for Hydrodynamic Deep Drawing Assisted by Radial Pressure. *Iranian Journal Of Science And Technology - Transactions Of Mechanical Engineering*, 43(3), 487–494.

30. Lang, L., Danckert, J., and Nielsen, K. B. (2004). Investigation into The Effect of Pre-Bulging During Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto The Blank. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 44(6), 649–657.

31. Lang, L. H., Wang, Y. M., Xie, Y. S., Yang, X. Y., and Xu, Y. Q. (2012). Pre-Bulging Effect During Sheet Hydroforming Process of Aluminum Alloy Box with Unequal Height and Flat Bottom. *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 22(2), 302–308.

32. Xu, Y., Li, F., Liu, X., and Yuan, S. (2011). Effects of Pre-Bulging on 2024 Aluminum Alloy Complex-Shaped Components. *JOM*, 63(5), 39–41.

33. Liu, W., Xu, Y., and Yuan, S. (2014). Effect of Pre-Bulging on Wrinkling of Curved Surface Part by Hydromechanical Deep Drawing. *Procedia Engineering*, 81, 914–920.

34. Liu, W., Chen, Y. Z., Xu, Y. C., and Yuan, S. J. (2018). Enhancement on Plastic Deformation of Curved Surface Shell by Sheet Hydroforming with Optimized Pre-Bulging Process. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 97(9–12), 4145–4156.

35. El Sherbiny, M., Zein, H., Abd-Rabou, M., and El shazly, M. (2014). Thinning and Residual Stresses of Sheet Metal in The Deep Drawing Process. *Materials And Design*, 55, 869–879.

36. Ballıkaya, H., Savaş, V., and Özay, Ç. (2019). The Limit Drawing Ratio in Die Angled Hydromechanical Deep Drawing Method. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 106(1–2), 791–801.

37. Ballıkaya, H., Özay, Ç., Savaş, V., Altuğ, M., and Aytaç, F. (2018, 3-5 May). *Numerical Investigation of Al1050 Sheet Metal Material in Die Deep Drawing Method*. Paper presented at 1. Uluslararası Mühendislik Ve Teknoloji Sempozyumu (IETS), Batman, Turkey.

38. Gowtham, K., Srikanth, K. V. N. S., and Murty, K. L. N. (2012). Simulation of the effect of die radius on deep drawing process. *International Journal Of Applied Research In Mechanical Engineering*, 2(1), 12–17.

39. Tian, L., Men, C., and Yu, Q. (2015, 15-16 August). *Optimization of Process Parameters in Deep Drawing Process Based on Orthogonal Experiment Method*. Paper presented at 3rd International Conference On Mechanical Engineering And Intelligent Systems, Yinchuan, China.

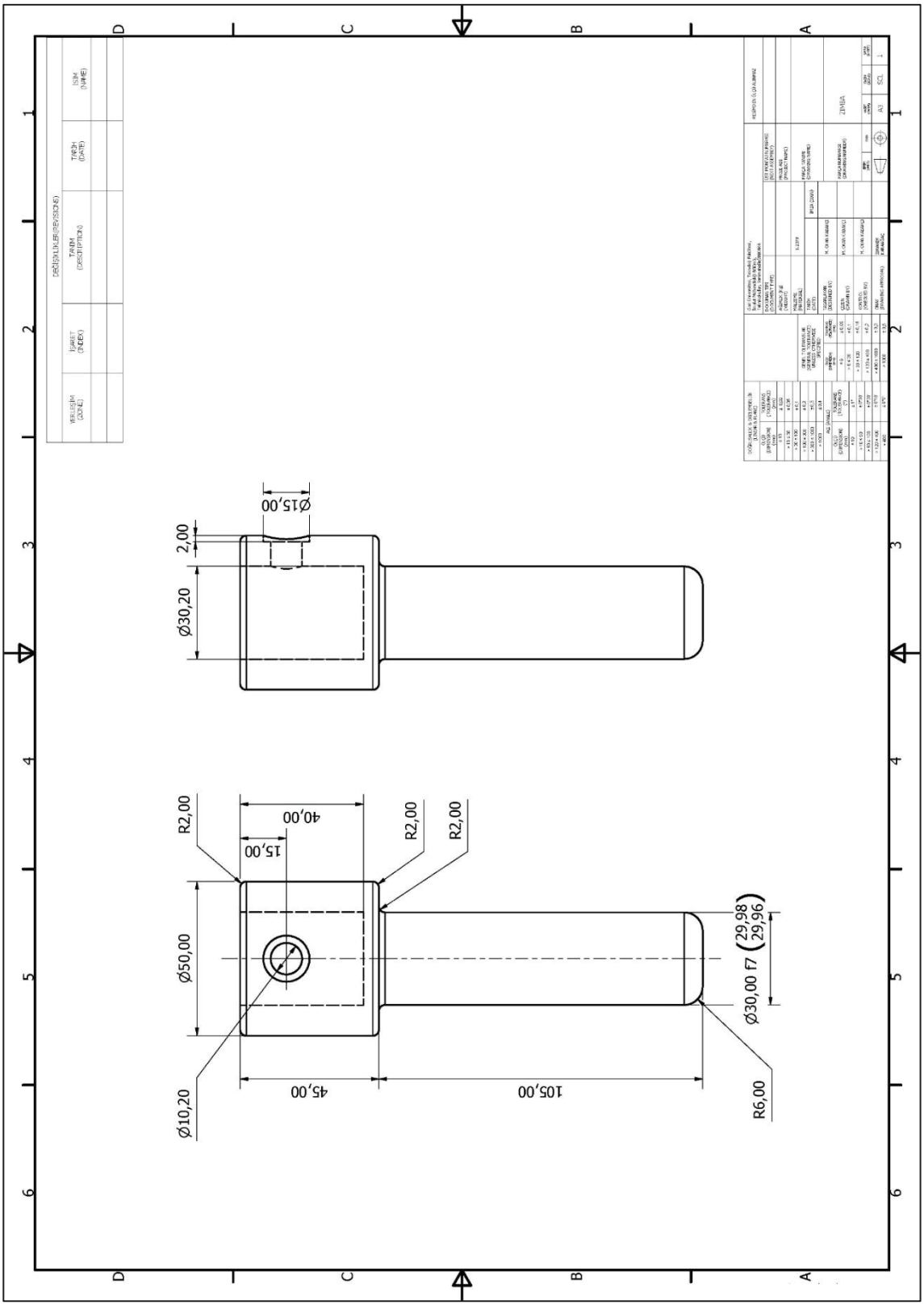
40. Alimirzaloo, V., and Modanloo, V. (2016). Minimization of The Sheet Thinning in Hydraulic Deep Drawing Process Using Response Surface Methodology and Finite Element Method. *International Journal Of Engineering*, 29(2), 264–273.

41. Padmanabhan, R., Oliveira, M. C., Alves, J. L., and Menezes, L. F. (2007). Influence of Process Parameters on The Deep Drawing of Stainless Steel. *Finite Elements In Analysis and Design*, 43(14), 1062–1067.

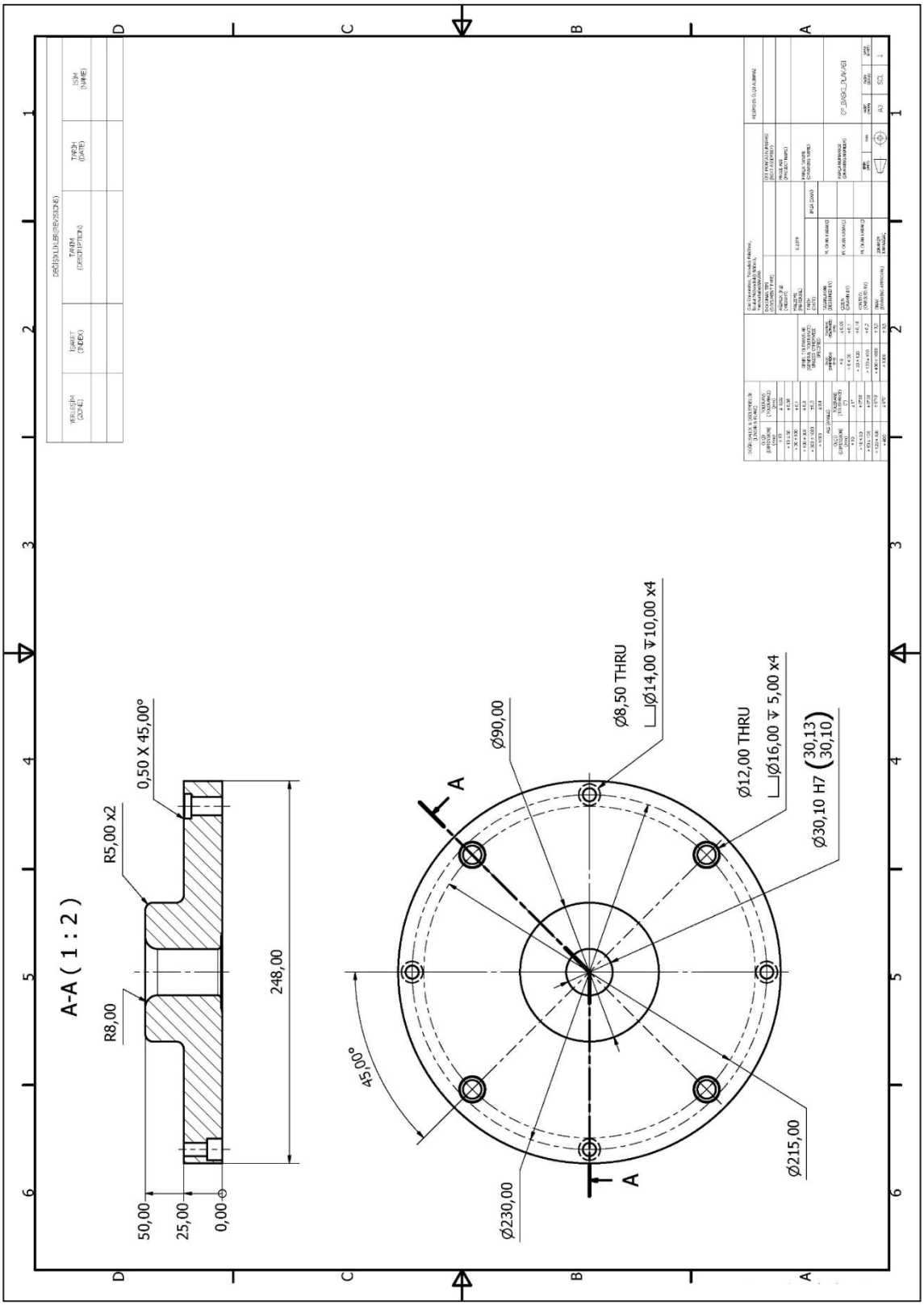
42. Choubey, A. K., Agnihotri, G., Sasikumar, C., and Singh, M. (2017). Analysis of Die Angle in Deep Drawing Process Using FEM. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2511–2515.

EKLER

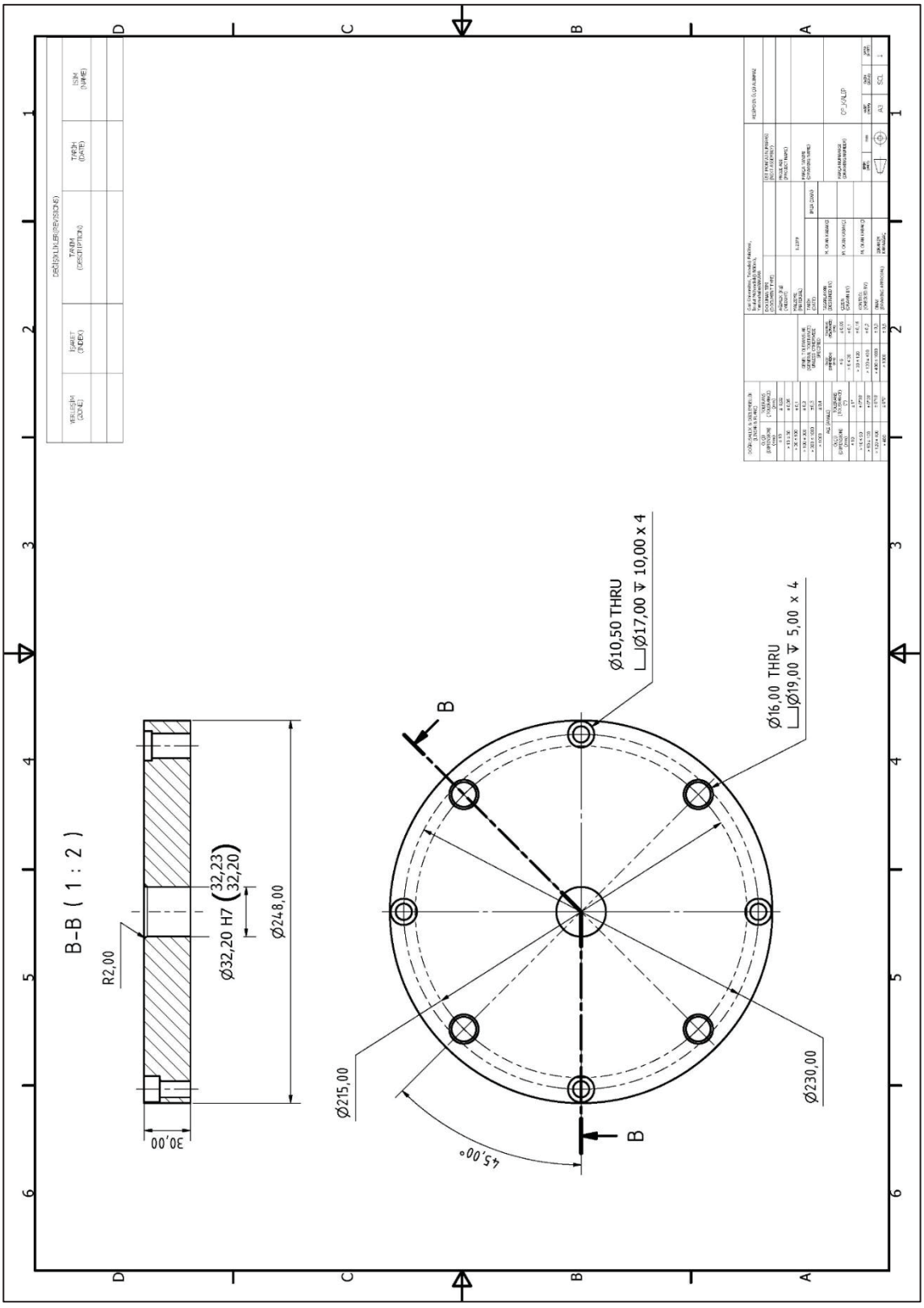
EK-1. Zımba Teknik Resmi



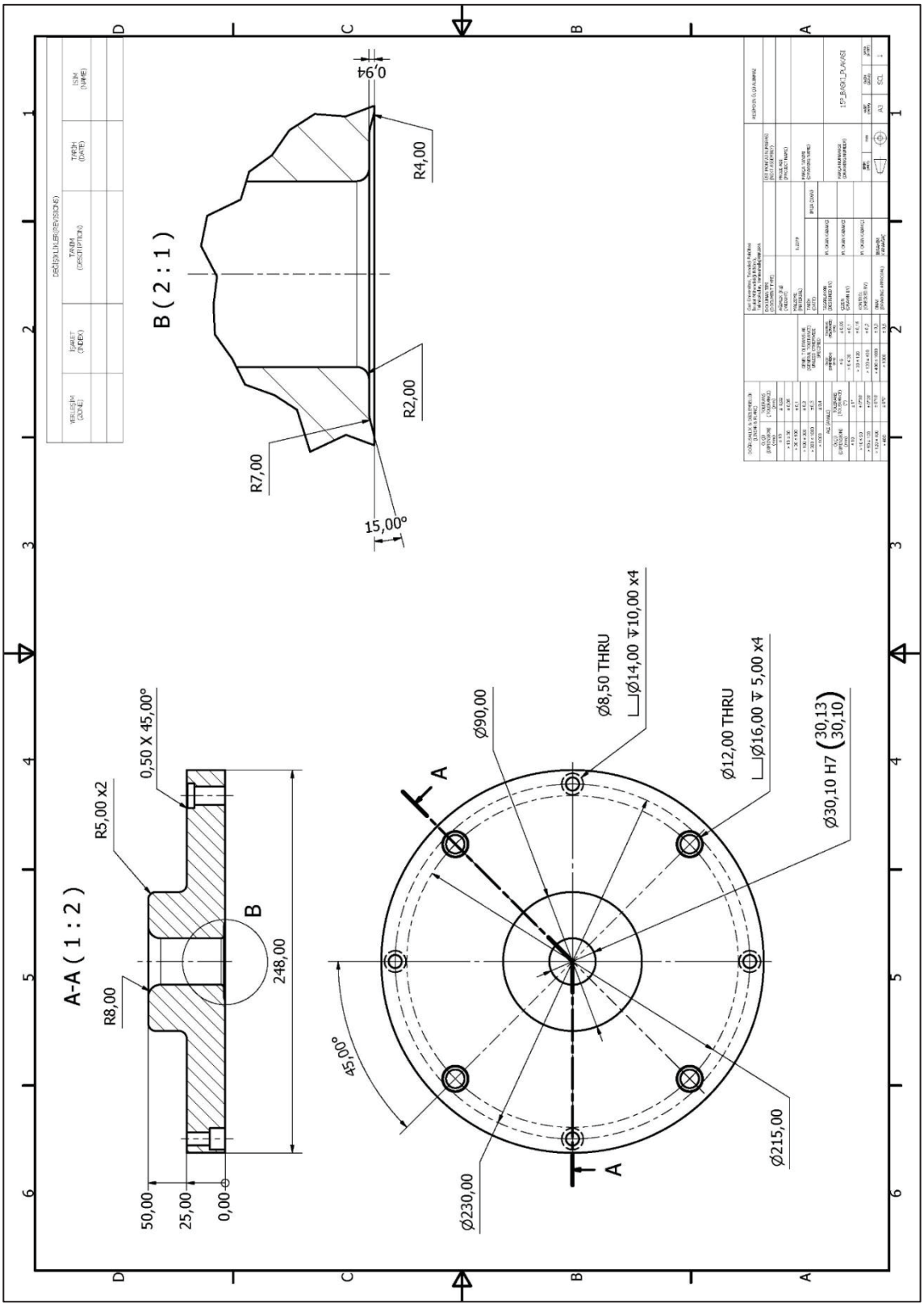
EK-2. α=0° Baskı Yastığı Teknik Resmi



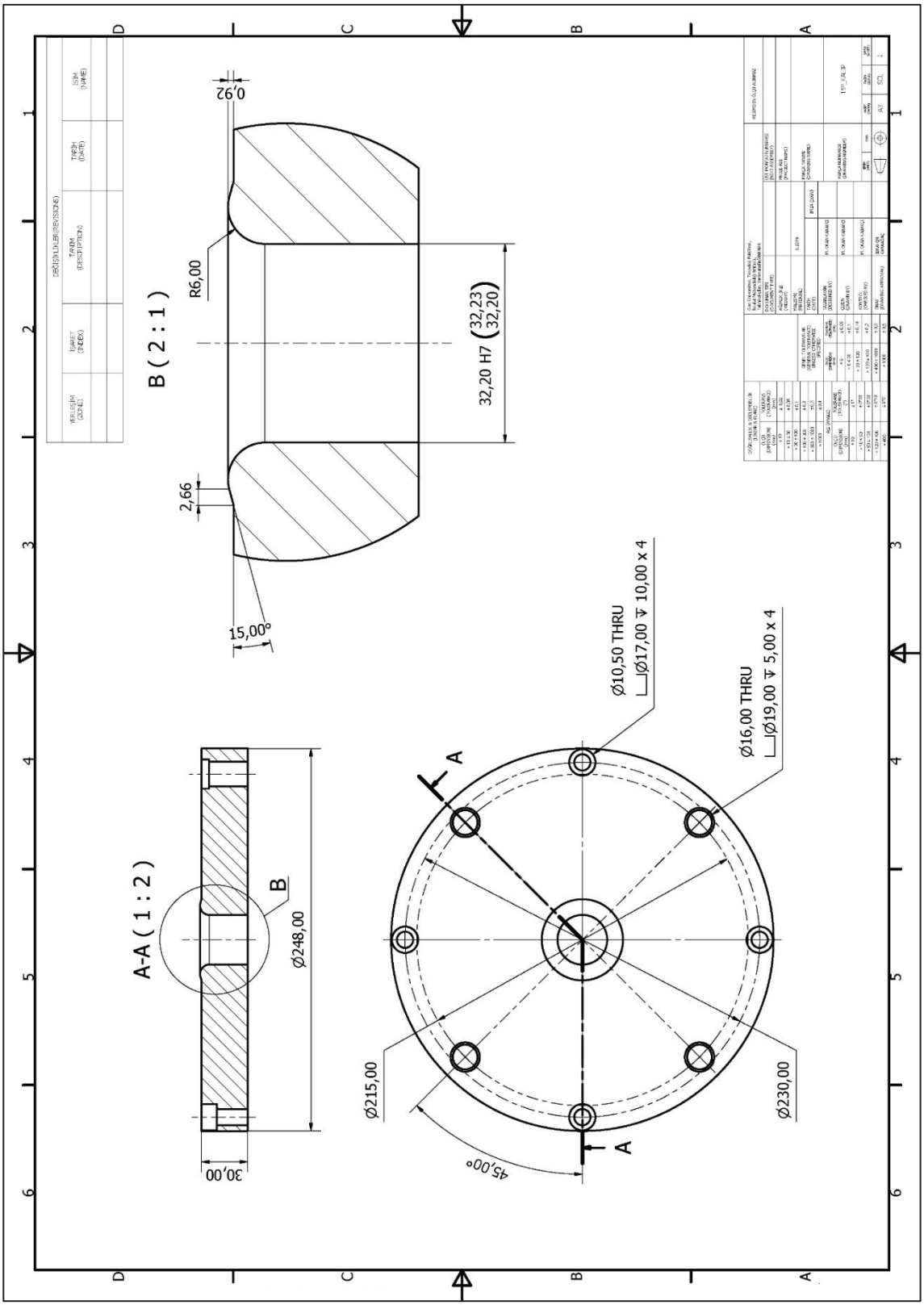
EK-3. α=0° Kalıp Teknik Resmi



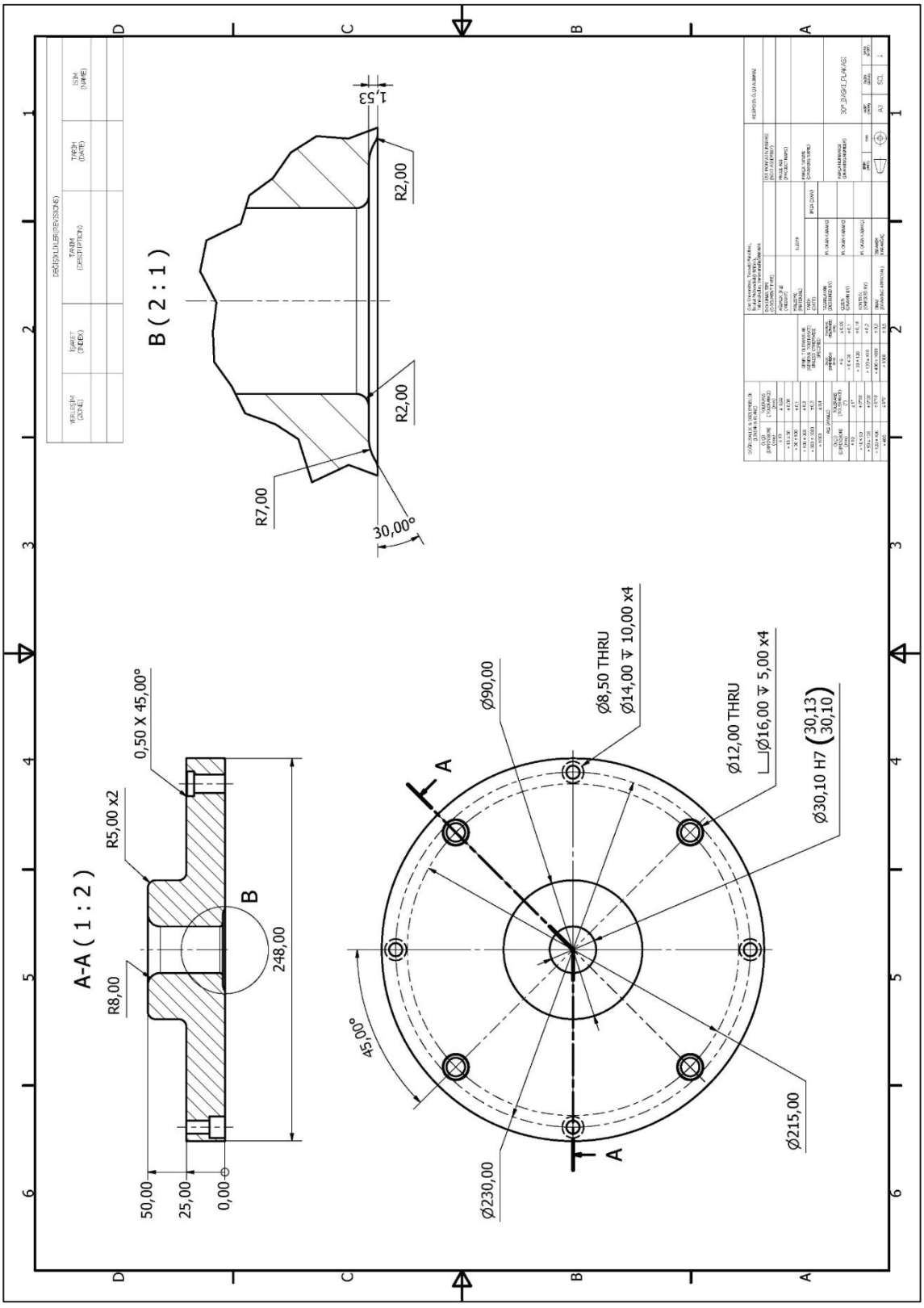
EK-4. α=15° Baskı Yastığı Teknik Resmi



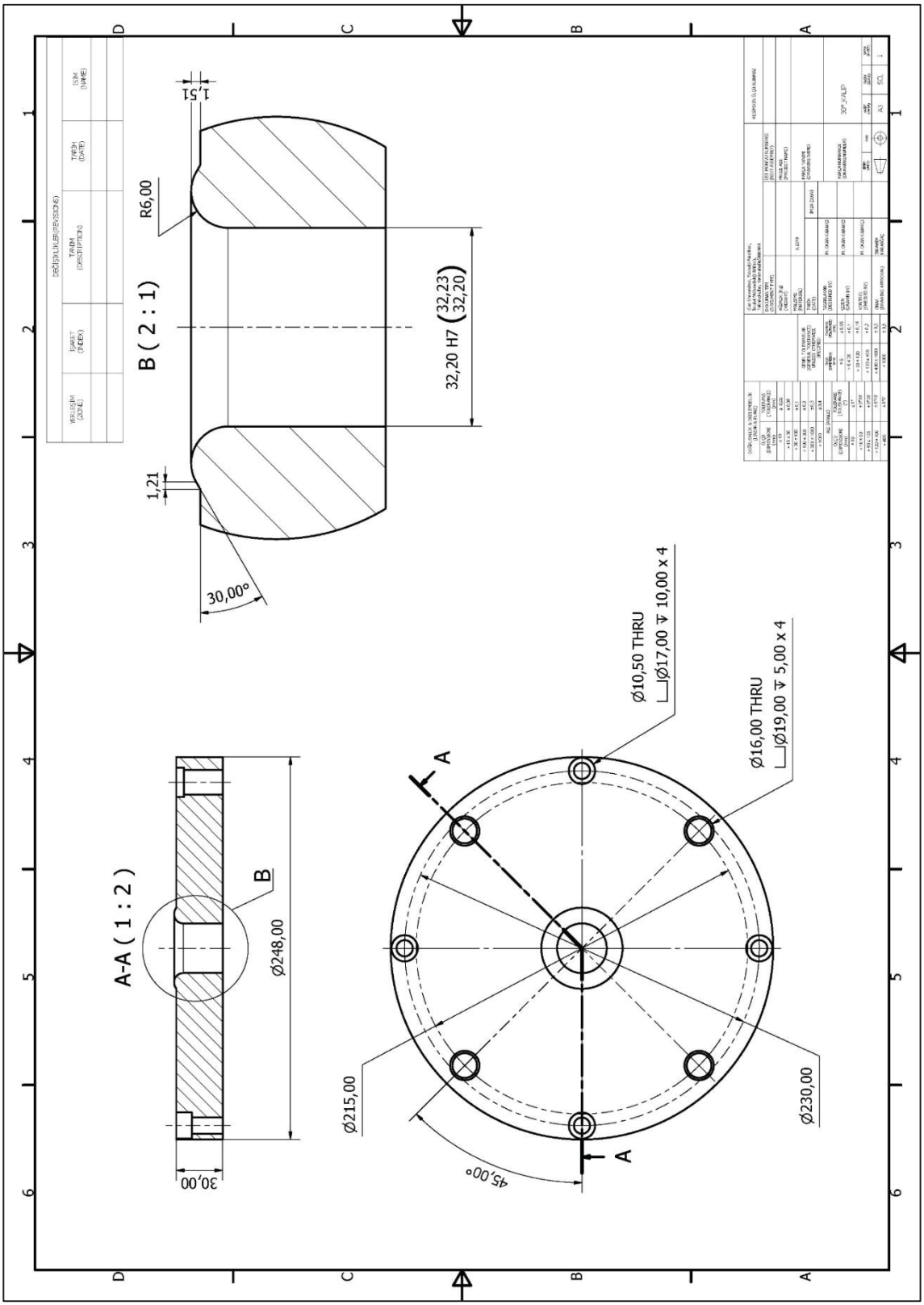
EK-5. α=15° Kalıp Teknik Resmi



EK-6. α=30° Baskı Yastığı Teknik Resmi



EK-7. α=30° Kalıp Teknik Resmi



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: Kabakçı, Mehmet Okan
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 04.04.1994, Çanakkale
Medeni hali	: Bekar
Telefon	: 0 (312) 202 86 10
e-mail	: mokabakci@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İmalat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / İmalat Mühendisliği	2017
Lise	Çanakkale İbrahim Bodur Anadolu Lisesi	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2018-2019	TR AR-GE	Mekanik Tasarım Mühendisi
2017-2018	RADSAN Elektromekanik A.Ş	İmalat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Kabakçı M. O., Karaağaç, İ. (2020). An*alysis of the Effects of Die Entry Type on the Deep Drawability of Al6061-T6*. V. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi-Mühendislik sempozyumunda sunuldu, Ankara, Türkiye.

2. Karaağaç, İ., Kabakçı, M. O., & Demirel, M. Y. (2020) Tavlama İşleminin Al 2024-T3 Sac Malzemesinin Şekillendirilebilirliğine ve Malzeme Özelliklerine Etkilerinin Deneysel Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8(1), 169-181.

3. Kabakçı, M. O., Karaağaç, İ., & Demirel, M. Y. (2019). The Experımental Investigation of Annealing Parameters Effects On Al2024-T3 Materials' Formabılity and Mechanical Properties. *European Journal of Technique*, 9(2), 338-346

4. Kabakçı, M. O., Karaağaç, İ., & Demirel, M. Y. (2019). Tavlama İşleminin Al7075-T6 Sac Malzemesinin Mekanik Özellikleri ve Bükme İle Şekillendirilebilirliğine Etkisinin Deneysel Araştırılması. *KMÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1(1), 108-119

5. Aydın K., Kabakçı M. O., Karaağaç, İ. (2019). *Dp800 Sac Malzemelerde Lokal Isıtma ile Şekillendirmenin Mikroyapıya Etkisi*. IV. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi-Mühendislik sempozyumunda sunuldu, Ankara, Türkiye.

6. Aydın K., Kabakçı M. O., Karaağaç, İ. (2019). *Dp800 Sac Malzemelerde Sıcaklığın ve Kalıp Açısının Geri Esnemeye Etkisi*. IV. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi-Mühendislik sempozyumunda sunuldu, Ankara, Türkiye.

7. Aydın K., Kabakçı M. O., Karaağaç, İ. (2019). *Dp800 Sac Malzemenin Geri Esneme Davranışları*. Paper presented at I. International Science and Innovation Congress, Denizli, Turkey.

8. Aydın K., Kabakçı M. O., Karaağaç, İ. (2019). *Dp600 ve HSLA Sac Malzemelerde Zımba Radyüsü ve Kalıp Açısının Geri Esnemeye Etkisi*. Paper presented at I. International Science and Innovation Congress, Denizli, Turkey.

9. Akkuş, A., Ağbulut, Ü., Civelek, B., Koş, G., Kabakçı, M.O., Karaağaç, İ., Uluer, O. (2019). *Plastik Ekstrüzyonda Şişme Davranışını Tespit Etme Deney Düzeneğinin Geliştirilmesi*. Paper presented at 3. International Engineering Research Symposium, Duzce, Turkey.

Projeler

1. Karaağaç, İ., Kabakçı, M. O., (Araştırmacı), *"Ters Kalıp Giriş Tipinin Derin Çekme Kalıplarında Şekillendirmeye Etkisinin Deneysel Araştırılması",* Bilimsel Araştırma Projesi, 07/2019-17, (24.373,00 TL), 2019 – Devam Ediyor



GAZİ GELECEKTİR...