
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

BASKI PLAKASI TASARIMININ DERİN ÇEKME İŞLEMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Fatih CİVELEK

DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2025

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.

Fatih CİVELEK
11/07/2025

BASKI PLAKASI TASARIMININ DERİN ÇEKME İŞLEMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Fatih CİVELEK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

Bu çalışmada, Al3105 alüminyum ve DC04 çelik sacların şekillenebilirlikleri deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Erichsen deneylerinde zımba çapının, sac kalınlığının ve zımba hızının Erichsen Sabitine (ES) ve zımba kuvvetine etkileri incelenmiştir. Erichsen deneyleri sonucunda zımba kuvvetinin ve ES değerlerinin zımba çapı ile neredeyse lineer olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca sac kalınlığının artmasıyla ES değerinin yükseldiği ve sac kalınlığının ES değerine etkisinin küçük zımba çaplarında daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Erichsen testinin yanı sıra derin çekme deneyleri de yapılarak sacların çekilerek şekillenebilme kabiliyetleri araştırılmıştır. Standart çekme kalıplarıyla yapılan derin çekme deneylerine ek olarak içbükey kavisli kalıp ve dışbükey kavisli baskı plakasından oluşan kalıp setleri ile de deneyler gerçekleştirilmiştir. Standart kalıplar ile yapılan çekme deneyleri sonucunda 1 mm kalınlığındaki Al3105 alüminyum ve DC04 çelik sacların limit çekme oranları sırasıyla 1,9 ve 2,1 değerlerinde bulunmuştur. Kavisli kalıp seti ile yapılan deneyler sonucunda Al3105 ve 1 mm kalınlığındaki DC04 sacların limit çekme oranlarının artmadığı fakat 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın limit çekme oranının 1,85'ten 1,90'a yükseldiği görülmüştür. Kavisli kalıp ve baskı plakasının en çok 0,8 mm kalınlığındaki DC04 sacın çekilebilirliğini etkilediği ve limit çekme oranını 2,0'dan 2,3'e yükselttiği tespit edilmiştir. Kırışma analizi için yapılan deneyler sonucunda kavisli kalıp setinin sacın atalet momentini artırarak kırışıklık oluşumunu engellemeye yardımcı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çekme işlemi süresince sabit baskı plakası kuvveti uygulamak yerine işlem üç adıma bölünerek ve her adım başlangıcında daha düşük baskı plakası kuvveti uygulanarak yapılan deneyler neticesinde 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın limit çekme oranının 1,85'ten 2,05'e yükseltilebileceği görülmüştür. Kalıp ve sac ara yüzeyine farklı yağlayıcılar uygulanarak gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda polietilen film yağlayıcının Hindistan cevizi yağı ve motor yağına kıyasla sürtünme kuvvetini daha fazla azalttığı ve çekme derinliğini artırdığı tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçları, Erichsen deneyleri ile %95 ve üzerinde, derin çekme deneyleriyle ise en az %81 oranında uyumlu olmuştur.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Sac metal şekillendirme, Erichsen şişirme testi, derin çekme
Sayfa Adedi : 163
Danışman : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

DETERMINATION OF THE THEORETICAL AND EXPERIMENTAL EFFECTS OF DIE AND BLANK HOLDER DESIGN ON THE DEEP DRAWING PROCESS

(Ph. D. Thesis)

Fatih CİVELEK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

The formability of Al3105 aluminum and DC04 steel sheets was studied using both experimental methods and the finite element analyzes. In the Erichsen cupping tests, the effects of punch diameter, sheet thickness, and punch speed on the Erichsen Index (EI) and punch force have been analyzed. The results showed a near-linear increase in both punch force and EI values with punch diameter. Additionally, the EI value was found to increase with sheet thickness, with the effect being more pronounced at smaller punch diameters. In addition to the Erichsen tests, deep drawing experiments have been carried out to evaluate the formability of the sheets through the drawing process. These experiments included both standard drawing dies and alternative setups featuring concave curved dies and convex curved blank holders. For the standard dies, the limiting drawing ratios of 1 mm thick Al3105 aluminum and DC04 steel sheets have been found to be 1.9 and 2.1, respectively. As a result of the experiments with the curved die setup, it was observed that the limiting drawing ratios of the Al3105 and 1 mm thick DC04 sheets did not increase. However, the limiting drawing ratio of the 0.5 mm thick DC04 steel sheet rose from 1.85 to 1.90. It was determined that the curved die and blank holder affected the drawability of 0.8 mm thick DC04 sheet the most and increased the limiting drawing ratio from 2.0 to 2.3. Wrinkling analysis indicated that the curved die setup helped reduce wrinkle formation by increasing the moment of inertia of the sheet. Furthermore, instead of applying a constant blank holder force during the drawing process, the experiments revealed that by dividing the process into three steps and applying a lower blank holder force at the beginning of each step, the limiting drawing ratio of the 0.5 mm thick DC04 steel sheet could be increased from 1.85 to 2.05. Drawing tests performed with different lubricants applied to the die and sheet interface showed that the polyethylene film lubricant reduced friction force and increased drawing depth more effectively than both coconut oil and engine oil. The simulation results showed a consistency of 95% or higher with the Erichsen tests and at least 81% with the deep drawing tests.

Science Code : 91438
Key Words : Sheet metal forming, Erichsen cupping test, deep drawing
Page Number : 163
Supervisor : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, bilgi ve deneyimleriyle yönlendirme yapan Danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR'e, Tez İzleme Komitesinde yer alan ve değerli bilgi ve deneyimlerini aktaran Sayın Prof. Dr. Hakan GÜRÜN ile Sayın Prof. Dr. Alaattin KAÇAL'a ve derin çekme kalıplarının imalatında yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Tanju TEKER'e, ayrıca tez çalışmamı FDK-2023-8497 proje numarasıyla destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xvii

SİMGELER VE KISALTMALAR xxii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ÖZETİ 5

2.1. Erichsen Şişirme Testi Literatür Özeti 5

2.2. Derin Çekme İşlemi Literatür Özeti 23

3. TEORİK BİLGİLER VE KURAMSAL TEMELLER 49

3.1. Plastik Deformasyon 49

3.2. Derin Çekme İşlemi 54

3.3. İlkel Parça Çapının ve Çekme Oranının Belirlenmesi 56

3.3.1. Alan yöntemi 57

3.3.2. Uzunluk ve ağırlık merkezi yöntemi 57

3.4. Limit Çekme Oranı 58

3.5. Çekme İşlemine Etki Eden Parametreler 59

3.5.1. Çekme boşluğu 59

3.5.2. Kalıp ve zımba radyüsleri 59

3.5.3. Çekme kuvveti 60

Sayfa

3.5.4. Sac tutucu (baskı plakası) kuvveti 60

3.5.5. Çekme hızı 61

3.6. Erichsen Şişirme Testi 61

4. MATERYAL ve YÖNTEM 63

4.1. Erichsen Test Cihazının Kalibrasyonu 65

4.2. Erichsen Testlerinin Tasarımı 68

4.3. Erichsen Deneylerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonları 71

4.4. Standart Kalıp ile Yapılan Derin Çekme Simülasyonları 73

4.5. Kavisli Kalıp ve Baskı Plakası ile Yapılan Derin Çekme Simülasyonları 79

4.6. Derin Çekme Setinin Tasarımı ve İmalatı 86

4.7. Kırışma Analizi Deneylerinin Tasarımı 90

4.8. Değişken Baskı Plakası Kuvveti ile Çekme Deneyleri 90

4.9. Farklı Yağlayıcılar ile Çekme Deneyleri 91

5. BULGULAR VE TARTIŞMA 93

5.1. Erichsen Deneyleri ve Simülasyonları Sonuçları 95

5.2. Derin Çekme Deneyleri ve Simülasyon Sonuçlarıyla Mukayese 114

5.3. Kırışma Analizi Deneyleri Sonuçları 130

5.4. Değişken Baskı Plakası Kuvveti ile Yapılan Çekme Deneyleri Sonuçları 135

5.5. Yağlayıcı Türünün Çekme Deneyleri Sonuçlarına Etkisi 138

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 145

KAYNAKLAR 151

EKLER 160

ÖZGEÇMİŞ 163

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Testlerde kullanılan çeliklerin ağırlıkça kimyasal birleşimi 6

Çizelge 2.2. Farklı ısı girdileri ile ulaşılan ES değerleri ve deformasyon davranışı 10

Çizelge 2.3. Deneylerde kullanılan Mg alaşımlarının kimyasal içerikleri 12

Çizelge 2.4. Hidromekanik derin çekme işlemi için parametreler ve seviyeleri 39

Çizelge 2.5. Çekme kabarcıklı sac tutucu ile hidromekanik derin çekme deneyi parametreleri ve seviyeleri 41

Çizelge 2.6. Derin çekme işlemi parametreleri ve seviyeleri 45

Çizelge 3.1. Derin çekme işlemi için önerilen çekme hızları (mm/s) 61

Çizelge 4.1. Alüminyum alaşımı sacın ağırlıkça (%) kimyasal bileşimi 65

Çizelge 4.2. Çelik sacların ağırlıkça (%) kimyasal bileşimi 65

Çizelge 4.3. Baskı plakası kuvvetinin kalibrasyon ölçümleri 67

Çizelge 4.4. Erichsen şişirme testi aparatlarının ölçüleri 69

Çizelge 4.5. Çelik saclar için Taguchi deney tasarımı 70

Çizelge 4.6. Alüminyum saclar için Taguchi deney tasarımı 70

Çizelge 4.7. Derin çekme simülasyonlarında kullanılan çekme boşluğu değerleri 73

Çizelge 4.8. Al3105 sac ile yapılan standart derin çekme simülasyonları 75

Çizelge 4.9. DC04 sac ile yapılan standart derin çekme simülasyonları (Sac kalınlığı 1 mm) 76

Çizelge 4.10. DC04 sac ile yapılan standart derin çekme simülasyonları (Sac kalınlığı 0,8 mm) 77

Çizelge 4.11. DC04 sac ile yapılan standart derin çekme simülasyonları (Sac kalınlığı 0,5 mm) 78

Çizelge 4.12. Al3105 sac ile yapılan simülasyonlar sonucunda sacın kalınlık değişimi (Limit çekme oranı:1,9) 80

Çizelge 4.13. DC04 çelik sac ile yapılan simülasyonlar sonucunda sacın kalınlık değişimi (Sac kalınlığı:1 mm ve limit çekme oranı:1,9) 81

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.14. DC04 çelik sac ile yapılan simülasyonlar sonucunda sacın kalınlık değişimi (Sac kalınlığı: 0,8 mm ve limit çekme oranı:1,9) 82

Çizelge 4.15. DC04 çelik sac ile yapılan simülasyonlar sonucunda sacın kalınlık değişimi (Sac kalınlığı: 0,5 mm ve limit çekme oranı:1,9) 84

Çizelge 4.16. Kavisli kalıp ve baskı plakası derin çekme setinin ölçüleri 85

Çizelge 4.17. Standart ve kavisli kalıp için kırışıklık oluşumu üzerine deney tasarımı 90

Çizelge 4.18. Değişken baskı plakası kuvveti ile derin çekme işlemi için deney tasarımı 91

Çizelge 4.19. Farklı yağlayıcı türleri ile çekme deneyleri tasarımı 91

Çizelge 5.1. Tek eksenli çekme testleri sonuçları..... 95

Çizelge 5.2. DC04 çelik sacların Erichsen testi sonuçları..... 97

Çizelge 5.3. Alüminyum sacların Erichsen testi sonuçları..... 97

Çizelge 5.4. DC04 sac malzemenin Erichsen sabiti için ANOVA tablosu..... 97

Çizelge 5.5. Al3105 sac malzemenin Erichsen sabiti için ANOVA tablosu 99

Çizelge 5.6. DC04 sacların Erichsen deneyleri sonucunda ulaşılan en büyük zımba kuvveti için ANOVA tablosu 99

Çizelge 5.7. Al3105 sacların Erichsen deneyleri sonucunda ulaşılan en büyük zımba kuvveti için ANOVA tablosu 99

Çizelge 5.8. Boyun verme bölgesi için hesaplanan temas açıları ve tahmini limit gerinimler (DC04 çelik sac) 107

Çizelge 5.9. Boyun verme bölgesi için hesaplanan temas açıları ve tahmini limit gerinimler (Al3105 alüminyum sac)..... 107

Çizelge 5.10. Deneyler ve simülasyonlar sonrasında oluşan halka şekilli çatlak bölgelerinin yarıçapları (DC04 çelik sac)..... 112

Çizelge 5.11. Deneyler ve simülasyonlar sonrasında oluşan halka şekilli çatlak bölgelerinin yarıçapları (Al3105 alüminyum sac)..... 112

Çizelge 5.12. Zımba yük altında iken zımba hızında meydana gelen hata oranları..... 114

Çizelge 5.13. Derin çekme işlemi ile üretilen kapların et kalınlığı değişimi..... 125

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.14. Derin çekme işlemi sonrasında sac numunelerin tane boyutunun değişimi 130

Çizelge 5.15. Standart kalıp ile yapılan deneylerin kırışma analizi sonuçları 132

Çizelge 5.16. Kavisli kalıp ile yapılan deneylerin kırışma analizi sonuçları 133

Çizelge 5.17. Değişken baskı plakası kuvveti ile gerçekleştirilen çekme deneyleri sonuçları 135

Çizelge 5.18. Farklı yağlayıcı türleri ile gerçekleştirilen çekme deneyleri sonuçları 138

Çizelge 5.19. Deney parametrelerinin çekme derinliğine etkisininin ANOVA sonuçları 139

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Deneylerde uygulana izleme sistemi;1) Lazer ışını kaynağı, 2) Kamera, 3) LED aydınlatıcı, 4) Kontrol sistemi, 5) Görüntü kaydedici bilgisayar, 6) Yükseklik ölçmede kullanılan için prizma, 7) Hidrolik test cihazı kafası 5

Şekil 2.2. Çift fazlı çeliklerin lazer kaynak bağlantılarının mikro yapı modeli..... 8

Şekil 2.3. Erichsen sabitinin tavlama sıcaklığıyla değişimi..... 11

Şekil 2.4. Çapraz haddeleme işleminin şematik gösterimi 13

Şekil 2.5. Numuneler ve deney düzeneği; a) Sürtünme karıştırma işleminin ve numune konumların şematik gösterimi, b) Küçültülmüş Erichsen deney seti 15

Şekil 2.6. Yüksek sıcaklıklarda bükme testi ve Erichsen testinin şematik diyagramı; a) Bükme testi, b) Erichsen testi..... 18

Şekil 2.7. Çeşitli zımba hızları ile gerçekleştirilen Erichsen testleri esnasında elde edilen zımba kuvvetti-çökertme derinliği eğrileri 19

Şekil 2.8. Erichsen sabitinin zımba boyutu ve hızı ile ilişkisi 20

Şekil 2.9. ES değerinin sac numune genişliği ile değişimi (Zımba çapı 20 mm ve zımba ilerleme hızı 6,25 mm/dk.)..... 21

Şekil 2.10. Zımba ilerleme mesafesi-zımba kuvveti eğrilerinin değişimi; a) Zımba çapı ile, b) Sac kalınlığı ile..... 22

Şekil 2.11. Derin çekme kalıbının şematik diyagramı..... 24

Şekil 2.12. Derin çekme deneyinde kullanılan aparatların şematik diyagramı; a) Düz sac tutucu, b) Kıvrımlı sac tutucu..... 24

Şekil 2.13. Sac tutucu konstrüksiyonun ve eğimli parçaların hareketlerinin şematik gösterimi..... 25

Şekil 2.14. Derin çekme deneylerinde kullanılan ekipmanların şematik gösterimi; 1-Pres koçu, 2-Hidrolik silindir, 3-Yağ basıncı, 4-Destek blok, 5-Sıkıştırma aparatı, 6-Kalıp, 7-Sac, 8-Konik sac tutucu, 9-Sac tutucu sabit taban plakası, 10-Zımba, 11-Ayarlama pimi, 12-Yay, 13-Komparatör, 14-Konteyner, 15-Kalıp seti, 16-Kontrol valfi, 17-Emniyet valfi..... 26

Şekil 2.15. Farklı rijitliğe sahip halkalardan oluşan sac tutucu 27

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.16. Derin çekme simülasyon modelleri; a) Geleneksel derin çekme modeli, b) Çoklu çekme radyüsü ile derin çekme modeli 28

Şekil 2.17. Derin çekme deney düzenekleri; a) Standart çekme kalıbı ve sac tutucu, b) Makro işlenmiş çekme kalıbı ve sac tutucu 29

Şekil 2.18. Standart (Sol) ve dalgalı yapı ile beraber kürelerden oluşan (Sağ) derin çekme tasarımı 30

Şekil 2.19. İki halkadan oluşan baskı plakasının şematik diyagramı 31

Şekil 2.20. Derin çekme düzeneğinin aparatları 31

Şekil 2.21. Makro ölçekte işlenmiş sac tutucunun yüzey dokusu..... 32

Şekil 2.22. Geometrik parametreler ve sonlu elmanlar modeli 33

Şekil 2.23. Eliptik zımba ve konik kalıp ile eliptik kap çekme işlemi..... 34

Şekil 2.24. Toz boşluklu esnek şekillendirme kalıbının çizimi (1-Zımba, 2-Cıvata, 3-Somun, 4-Düz pul, 5-Klavuz plaka, 6-Boşluk plakası, 7-Toz, 8-Boşluk destek plakası, 9-Alt plaka, 10-Kauçuk bar, 11-Kalıp tutucu)..... 35

Şekil 2.25. Hidrodinamik derin çekme işleminin şematik gösterimi..... 37

Şekil 2.26. Yüzen kalıp ve sabit kalıptan oluşan hidrodinamik derin çekme düzeneğinin şematik diyagramı..... 38

Şekil 2.27. Hidromekanik derin çekme işlemi için tasarlanan açılı kalıp seti 39

Şekil 2.28. Sığ çekme kabarcığı eklenmiş hidromekanik derin çekme sistemi..... 40

Şekil 2.29. Zımba ve kalıp grubunun kesit görüntüsü ve fotoğrafı 42

Şekil 2.30. Derin çekme deney düzeneği; a) Takım ölçüleri, b) ve c) Üniversal sac metal test cihazı (Erichsen tipi); 1-Zımba, 2-Baskı plakası, 3-Sac metal, 4-Kalıp..... 46

Şekil 3.1. Şekil değişimi sırasında oluşan üç ana gerilme durumu [73]; a) Basma, b) Çekme, c) Kayma..... 49

Şekil 3.2. Sac malzemeler için tek eksenli çekme testi numunesi 50

Şekil 3.3. Mühendislik ve gerçek gerilme-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması 51

Şekil 3.4. Hadde yönüne göre normal ve düzlemsel anizotropinin şematik gösterimi... 52

Şekil 3.5. Derin çekme yöntemi; a) 2 boyutlu, b) Perspektif..... 54

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.6. Derin çekme için yararlanılan temel aparatlar 55

Şekil 3.7. Derin çekme işlemi sırasında oluşan gerinimler [71]; a) Silindirik derin çekme işlemi çizimi, b) Gerinimlerin ölçüldüğü bölgelerin gösterildiği kap kesiti, c) İki kademeli çekme işlemi için gerinim grafikleri 56

Şekil 3.8. Derin çekme işleminde oluşabilecek hatalar 56

Şekil 3.9. Alan yöntemi ile ilkel parça çapının hesaplanması 57

Şekil 3.10. Uzunluk ve ağırlık merkezi yöntemiyle ilkel parça çapın belirlenmesi 58

Şekil 3.11. Zımba ve kalıp radyüsleri 60

Şekil 3.12. Erichsen şişirme testi 62

Şekil 4.1. Zımba kuvveti kalibrasyon eğrisi 67

Şekil 4.2. Baskı plakası kuvveti kalibrasyon eğrisi 68

Şekil 4.3. Erichsen şişirme testinin şematik gösterimi 69

Şekil 4.4. Deform 2D programı ile farklı kalıp setleri için simülasyon tasarımları; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm 71

Şekil 4.5. Erichsen sabitinin sonlu eleman sayısı ile değişimi 72

Şekil 4.6. Simülasyonlar sırasında CDV değerinin belirlenmesinin şematik gösterimi. 72

Şekil 4.7. Derin çekme işlemi sonrası sac kalınlığının değişimi 75

Şekil 4.8. Kavisli kalıp ve baskı plakasının kesit görünümü 79

Şekil 5.1. Al3105 alüminyum sacın gerilme-gerinim eğrileri 93

Şekil 5.2. DC04 çelik sacın gerilme-gerinim eğrileri (kalınlık 0,5 mm) 93

Şekil 5.3. DC04 çelik sacın gerilme-gerinim eğrileri (kalınlık 0,8 mm) 94

Şekil 5.4. DC04 çelik sacın gerilme-gerinim eğrileri (kalınlık 1 mm) 94

Şekil 5.5. Çeşitli sac kalınlığı için DC04 çelik sacların zımba ilerlemesi-zımba kuvveti eğrileri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm 95

Şekil 5.6. Farklı zımba hızlarında Al3105 sacların zımba ilerlemesi-zımba kuvveti eğrileri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm 96

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.7. DC04 çelik sacların ES üzerine yapılan Taguchi analizi..... 98

Şekil 5.8. Al3105 alüminyum sacların ES üzerine yapılan Taguchi analizi..... 98

Şekil 5.9. DC04 çelik sacların en büyük zımba kuvveti üzerine yapılan Taguchi analizi 100

Şekil 5.10. Al3105 alüminyum sacların en büyük zımba kuvveti üzerine yapılan Taguchi analizi..... 100

Şekil 5.11. Erichsen testi sırasında oluşan deformasyon geometrisi 101

Şekil 5.12. Zımba çapının en büyük zımba kuvvetine etkisi (DC04 çelik sac)..... 102

Şekil 5.13. Zımba çapının en büyük zımba kuvvetine etkisi (Al3105 alüminyum sac). 103

Şekil 5.14. Sac kalınlığının en büyük zımba kuvvetine etkisi 103

Şekil 5.15. Farklı zımba hızlarında DC04 çelik saclar için elde edilen gerilme-gerinim eğrileri; a) Zımba çapı=8 mm, b) Zımba çapı=20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm 104

Şekil 5.16. Erichsen sabitinin zımba çapı ile değişimi (DC04 çelik) 105

Şekil 5.17. Erichsen sabitinin zımba çapı ile değişimi (Al3105 alüminyum) 106

Şekil 5.18. Efektif gerinimin ($\bar{\varepsilon}_{\theta}$) temas açısı ($\theta$) ile değişimi 106

Şekil 5.19. Erichsen sabitinin sac kalınlığı ile değişimi 108

Şekil 5.20. DC04 çelik sacların deneyler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen zımba ilerlemesi-zımba kuvveti eğrileri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm 109

Şekil 5.21. Al3105 alüminyum sacların deneyler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen zımba ilerlemesi-zımba kuvveti eğrileri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm 109

Şekil 5.22. Erichsen testi sırasında çatlak oluşumunun şematik gösterimi..... 111

Şekil 5.23. Al3105 sac numunelerin standart kalıp seti ile yapılan derin çekme işlemi sırasında oluşan zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrileri (Çekme oranı:1,9 ve baskı plakası kuvveti: 3 kN)..... 121

Şekil 5.24. Al3105 sac numunelerin kavisli kalıp seti ile yapılan derin çekme işlemi sırasında oluşan zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrileri (Çekme oranı:1,9 ve baskı plakası kuvveti: 3 kN)..... 121

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.25. DC04 çelik sac numunelerin standart kalıp seti ile yapılan derin çekme işlemi sırasında oluşan zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrileri (Sac kalınlığı:0,8 mm, çekme oranı:2,0 ve baskı plakası kuvveti:10 kN) ... 122

Şekil 5.26. DC04 çelik sac numunelerin kavisli kalıp seti ile yapılan derin çekme işlemi sırasında oluşan zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrileri (Sac kalınlığı:0,8 mm, çekme oranı:2,3 ve baskı plakası kuvveti:13 kN) ... 122

Şekil 5.27. Farklı kalınlıklardaki DC04 çelik sac numunelerin standart kalıp seti ile yapılan derin çekme deneyleri sırasında oluşan zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrileri (0,5 mm kalınlığındaki sac 1,85 çekme oranı; 1 mm kalınlığındaki sac 2,1 çekme oranı) 123

Şekil 5.28. Sac kalınlığı değişimi ölçüm noktaları 125

Şekil 5.29. Kırışma yüksekliğinin ölçümü..... 131

Şekil 5.30. Standart kalıp seti ile elde edilen kırışıklar üzerine yapılan Taguchi analizi 133

Şekil 5.31. Dikdörtgen kesitli plakanın çekme ve basma gerilmeleri altında bükülmesi 134

Şekil 5.32. Değişken baskı plakası kuvvetinin çekme deneyleri üzerine etkisinin Taguchi analizi ile incelenmesi..... 136

Şekil 5.33. Yağlayıcı türünün çekme derinliğine etkisinin Taguchi analizi ile incelenmesi..... 139

Şekil 5.34. Farklı yağlayıcı ve baskı plakası kuvveti ile çekme derinliği-zımba kuvveti eğrilerinin değişimi (İlkel parça çapı:40 mm)..... 141

Şekil 5.35. Farklı yağlayıcı ve baskı plakası kuvveti ile çekme derinliği-zımba kuvveti eğrilerinin değişimi (İlkel parça çapı:42 mm)..... 141

Şekil 5.36. Farklı yağlayıcı ve baskı plakası kuvveti ile çekme derinliği-zımba kuvveti eğrilerinin değişimi (İlkel parça çapı:44 mm)..... 142

Şekil 5.37. Polietilen film ile elde edilen çekme derinliği-zımba kuvveti eğrileri (İlkel parça çapı:40 mm) 143

Şekil 5.38. Motor yağı ile elde edilen çekme derinliği-zımba kuvveti eğrileri (İlkel parça çapı:40 mm)..... 143

Şekil 5.39. Hindistan cevizi yağı ile elde edilen çekme derinliği-zımba kuvveti eğrileri (İlkel parça çapı:40 mm)..... 144

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Erichsen şişirme testi sırasında elde edilen görüntünün karakteristik alanlarının bir örneği 6

Resim 2.2. EBDS analizi sonucu elde edilen tane sınırı görüntüleri; a) Başlangıç sacı, b) ARB işlemi uygulanmış sac numune; ARB uygulanmış ve sonrasında c) 500 ºC'de 0,5 saat, d) 600 ºC'de 0,5 saat, e) 600 ºC'de 20 saat ve f) 850 ºC'de 20 saat tavlanmış numuneler 16

Resim 3.1. Derin çekme işlemiyle imal edilmiş parçalar 54

Resim 4.1. Sac plakalar; a) Kesimden önce, b) Tel erozyon ile kesildikten sonra 63

Resim 4.2. Tel erozyon tezgahında tek eksenli çelme testi numunelerinin kesimi 63

Resim 4.3. Alüminyum ve çelik sac plakalardan kesilen tek eksenli çekme ve karakterizasyon testi numuneleri 64

Resim 4.4. Tek eksenli çekme testi cihazı 64

Resim 4.5. Optik emisyon spektrometre cihazı 65

Resim 4.6. Kalibrasyon işleminde kullanılan yaylı düzenek 66

Resim 4.7. Yaylı düzenek ve komparatör yardımıyla Erichsen test cihazının kalibrasyonu 66

Resim 4.8. Kalibrasyon işlemi sırasında yük hücresine bağlanan zımba 68

Resim 4.9. Deneylerde kullanılan farklı çaplardaki zımba ve kalıplar 69

Resim 4.10. Erichsen testi için hazırlanmış çelik ve alüminyum numuneler 70

Resim 4.11. Al3105 alüminyum sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü 2,5 mm ve baskı plakası kuvveti 4 kN) 76

Resim 4.12. 1 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü 3 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN) 77

Resim 4.13. 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü 2,5 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN) 78

Resim **Sayfa**

Resim 4.14. 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü 2 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN) 79

Resim 4.15. Kavisli kalıp ve baskı plakasıyla yapılan simülasyonların aşamaları; a) Başlangıç adımı, b) Baskı plakası ile sacın sıkıştırılması, c) Zımba ile sacın çekilmesi 80

Resim 4.16. Al3105 alüminyum sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü (r) 2,5 mm, kavis radyüsü (R) 10 mm ve baskı plakası kuvveti 4 kN) 81

Resim 4.17. 1 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü (r) 3 mm, kavis radyüsü (R) 7 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN) 82

Resim 4.18. 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü (r) 2,5 mm, kavis radyüsü (R) 7 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN) 83

Resim 4.19. 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü (r) 2 mm, kavis radyüsü (R) 15 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN) 84

Resim 4.20. Derin çekme işleminde kullanılan sac numune örnekleri 85

Resim 4.21. Erichsen test cihazı ve derin çekme setinin 3D çizimin kesit gösterimi 86

Resim 4.22. Yaylı baskı aparatı 87

Resim 4.23. Ayarlanabilir zımba aparatları 87

Resim 4.24. Ayarlanabilir zımba 87

Resim 4.25. Zımba eksenini hizalamak için kullanılan mastar 88

Resim 4.26. Dış kalıp ve kavisli kalıp çekirdeği ile dış kalıbın montajı..... 88

Resim 4.27. Düz ve kavisli kalıp çekirdekleri 89

Resim 4.28. Kavisli baskı plakası..... 89

Resim 5.1. Erichsen testi simülasyonu sırasında oluşan asal gerilmeler; a) Zımba ilerlemesi = 0,4 mm, b) Zımba ilerlemesi = 7,0 mm 105

Resim 5.2. DC04 çelik sac numunelerinde Erichsen testlerinden sonra oluşan deformasyonlar; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm 110

Resim **Sayfa**

Resim 5.3. Al3105 alüminyum sac numunelerinde Erichsen testlerinden sonra oluşan deformasyonlar; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm 110

Resim 5.4. Çatlak başlangıcında DC04 çelik saclarda oluşan efektif gerinim değerleri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm..... 113

Resim 5.5. Çatlak başlangıcında Al3105 alüminyum saclarda oluşan efektif gerinim değerleri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm..... 113

Resim 5.6. Standart kalıp seti ile Al3105 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 3 kN; limit çekme oranı: 1,9) 114

Resim 5.7. Standart kalıp seti ile Al3105 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 3 kN; çekme oranı: 1,95)..... 115

Resim 5.8. Standart kalıp seti ile Al3105 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 1,5 kN; çekme oranı: 1,9) 115

Resim 5.9. Kavisli kalıp seti ile 1 mm kalınlığındaki Al3105 sacın derin çekme sonucu (Limit çekme oranı: 1,9; baskı plakası kuvveti sol: 1,5 kN ve sağ: 3 kN) 115

Resim 5.10. Kavisli kalıp seti ile 1 mm kalınlığındaki Al3105 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 3 kN; çekme oranı: 1,95) 116

Resim 5.11. Düz kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Çekme oranı: 1,8; baskı plakası kuvveti sol: 10 kN ve sağ: 5 kN)..... 116

Resim 5.12. Düz kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 10 kN; çekme oranı: 1,9) 117

Resim 5.13. Düz kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Limit çekme oranı: 1,85; baskı plakası kuvveti: 10 kN)..... 117

Resim 5.14. Kavisli kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 10 kN; çekme oranı: 2,05) 118

Resim 5.15. Kavisli kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Çekme oranı: 1,95; baskı plakası kuvveti sol: 10 kN ve sağ: 12 kN)..... 118

Resim 5.16. Kavisli kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Limit çekme oranı: 1,9; baskı plakası kuvveti: 12 kN) 118

Resim **Sayfa**

Resim 5.17. Standart kalıp seti ile 0,8 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Çekme oranı: 2,05; baskı plakası kuvveti sol: 10 kN ve sağ: 6,75 kN)..... 119

Resim 5.18. 0,8 mm kalınlığındaki DC04 sac ile derin çekme deneyleri (Sol standart kalıp – limit çekme oranı 2,0 ve sağ kavisli kalıp seti – limit çekme oranı 2,3)..... 119

Resim 5.19. Standart kalıp seti ile 1 mm kalınlığındaki DC04 sac numunelerle yapılan derin çekme deneyleri (Çekme oranı 2,2; sol baskı plakası kuvveti 10 kN ve sağ 5,25 kN)..... 120

Resim 5.20. Standart kalıp seti ile 1 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 12 kN; limit çekme oranı: 2,1) 120

Resim 5.21. Al3105 saclar ile yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen kalınlık dağılımı (Limit çekme oranı: 1,9; sol standart kalıp ve sağ kavisli kalıp) 126

Resim 5.22. DC04 çelik saclar ile yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen kalınlık dağılımı (Limit çekme oranı: 2,1; sol standart kalıp ve sağ kavisli kalıp) 126

Resim 5.23. Mikro yapı incelemesi için kesilen sac numune. 127

Resim 5.24. Standart kalıp ile üretilen silindirik kabın 1 numaralı bölgesinin 100 kat büyütülmesi sonucu elde edilen tane yapısı (Limit çekme oranı: 1,95)..... 127

Resim 5.25. Standart kalıp ile üretilen silindirik kabın 2 numaralı bölgesinin 100 kat büyütülmesi sonucu elde edilen tane yapısı (Limit çekme oranı: 1,95)..... 128

Resim 5.26. Kavisli kalıp ile üretilen silindirik kabın 1 numaralı bölgesinin 100 kat büyütülmesi sonucu elde edilen tane yapısı (Limit çekme oranı: 1,95)..... 128

Resim 5.27. Kavisli kalıp ile üretilen silindirik kabın 2 numaralı bölgesinin 100 kat büyütülmesi sonucu elde edilen tane yapısı (Limit çekme oranı: 1,95)..... 129

Resim 5.28. Standart (Geleneksel) kalıp seti ile yapılan kırışma analizi deney sonuçları..... 131

Resim 5.29. Kavisli kalıp seti ile yapılan kırışma analizi deney sonuçları..... 132

Resim 5.30. Değişken baskı plakası kuvveti ile yapılan çekme deneyleri sonuçları 136

Resim 5.31. 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac ile üretilen silindirik kaplar (Sol sabit baskı plakası kuvveti; sağ değişken baskı plakası kuvveti)..... 137

Resim **Sayfa**

Resim 5.32. Farklı yağlayıcılar ile yapılan çekme deneyleri sonuçları 138

Resim 5.33. Al3105 sac numunenin 3 kN baskı plakası kuvveti altında polietilen film yağlayıcı ile çekme işlemi sonucu (Çekme oranı: 2,0) 140

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Tek eksenli çekme numunesinin anlık kesit alanı
A_0	Tek eksenli çekme numunesinin başlangıç kesit alanı
β	Yüzey normalinin sınırda oluşturduğu açı
c	Çekme boşluğu
d	Zımba çapı
D	İlkel parça çapı
e	Mühendislik gerinimi
ε	Gerçek gerinim
ε_t	Kalınlık gerinimi
ε_w	Genişlik gerinimi
$\bar{\varepsilon}$	Efektif gerinim
$\bar{\varepsilon}_{\theta}$	Temas sınırındaki efektif gerinim
έ	Gerinim hızı
E	Elastisite modülü
E_0	Plastik bükülme modülü
F	Tek eksenli çekme testinde çekme kuvveti
$F_{d,max}$	Derin çekme işleminde en büyük zımba kuvveti
h	Erichsen testinde zımba ilerleme mesafesi
H	Kırışıklık yüksekliği
Δl	Tek eksenli çekme numunesinin uzama miktarı
l	Tek eksenli çekme numunesinin anlık uzunluğu
l_0	Tek eksenli çekme numunesinin başlangıç uzunluğu
K	Mukavemet katsayısı
m	Kırışıklık sayısı
m	Deformasyon hızı duyarlılığı üssü
n	Pekleşme üssü
η	Şekillendirme verimliliği

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{P}$	Erichsen testinde zımba kuvveti
$\mathbf{P_e}$	Gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrisisin eğim modülü
$\mathbf{r}$	Kalıp radyüsü
r	Plastik gerinim oranı
r_{ort}	Ortalama normal anizotropi
$\Delta \mathbf{r}$	Düzlemsel anizotropi
$\mathbf{R}$	Kavis yarıçapı
$\mathbf{R_C}$	Halka şeklindeki çatlak bölgesinin yarıçapı
$\mathbf{R_D}$	Erichsen testinde kalıp deliği yarıçapı
$\mathbf{R_P}$	Erichsen testinde zımba yarıçapı
$\boldsymbol{\sigma}$	Gerçek gerilme
$\boldsymbol{\sigma_e}$	Mühendislik gerilmesi
$\boldsymbol{\sigma_f}$	Akış gerilmesi
$\boldsymbol{\sigma_y}$	Akma dayanımı
$\boldsymbol{\sigma_{t,cr}}$	Kırışıklık oluşumu için kritik basma gerilmesi
$\boldsymbol{\sigma^*}$	En büyük asal gerilme
$\bar{\sigma}$	Efektif gerilme
$\bar{\sigma}_\theta$	Temas sınırındaki efektif gerilim
$\boldsymbol{\theta}$	Erichsen testi sırasında oluşan temas açısı
$\mathbf{t}$	Sac kalınlığı
$\mathbf{t_0}$	Başlangıç sac kalınlığı
$\mathbf{t_{max}}$	Derin çekme işlemi sonrası en büyük sac kalınlığı
$\mathbf{t_{min}}$	Derin çekme işlemi sonrası en ince sac kalınlığı
$\mathbf{t_\theta}$	Erichsen testi sırasında temas sınırındaki sac kalınlığı
$\mathbf{v}$	Zımba hızı
ν	Poisson oranı
$\mathbf{w_0}$	Tek eksenli çekme numunesinin başlangıç genişliği
$\mathbf{W_p}$	Derin çekme işleminde zımbanın yaptığı iş
$\mathbf{y}$	Çekme işlemi ile üretilen kabın yüksekliği

Kısaltmalar	Açıklamalar
ANOVA	Varyans Analizi
BHF	Baskı Plakası Kuvveti (Blank Holder Force)
CDV	Kritik Hasar Değeri (Critical Damage Value)
ES	Erichsen Sabiti
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze sac metaller, ambalaj, otomotiv, inşaat, enerji gibi birçok endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Hidrolik derin çekme, gererek şekillendirme, çekme, sıvama ve benzeri üretim yöntemlerinden sac metallerin biçimlendirilmesinde sıklıkla yararlanılmaktadır. Üretim sürecinde ortaya çıkabilecek hataların önceden tahmin edilebilmesi ve bu hataları önlemek adına, sac malzemelerin biçimlenebilirliği üzerine detaylı olarak odaklanmak gerekmektedir.

Sac metallerin şekillendirilebilirliği, genel olarak metalin yırtılma ve boyun verme olmaksızın tasarlanan şekle deformasyonla ulaşma kabiliyetini ifade eder [1]. Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için, Swift derin çekme testi, hidrolik şişirme testi, sınır kubbe yüksekliği testi (LDH testi) ve Erichsen şişirme testi gibi çeşitli test metotları günümüzde de tercih edilmektedir [2].

Malzemenin özellikleri, kalıp tasarımı ve işlem koşulları gibi temel parametreler sac metal şekillendirme işlemlerinin başarısını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu parametreleri anlamak şekillendirme sürecini verimli hale getirmek, kusurları azaltmak ve ürün kalitesini iyileştirmek için son derece önemlidir. Şekillendirme sürecinde yer alan zımba ve kalıpların tasarımı bir diğer önemli husustur. Kalıp tasarımındaki hassasiyet, sac metalin düzgün bir şekilde şekillendirilmesini sağlar ve kırışma, incelme veya yırtılma gibi kusurların riskini azaltır. Ayrıca, zımba hızı, yağlama ve baskı plakası kuvveti gibi işlem parametrelerinin uygun değerde seçilmesi ürün kalitesi ve kalıp ömrü açısından son derece önemlidir.

Erichsen şişirme testi, sac metalin şekillendirilebilirliğini, çatlama veya yırtılma olmadan deforme olabilme kabiliyetini değerlendirmek için yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. İşlem esnasında, metal sac bir zımba ile bastırılarak kupa benzeri bir şekil oluşturulur. Çatlak meydana gelmeden önce metalin çekilebileceği derinlik ölçülür ve bu derinlik Erichsen Sabiti (ES) olarak adlandırılır [3], ES değeri malzemenin sünekliğini ve stres altında çatlamaya karşı direncini belirlemeye yardımcı olur [4].

Erichsen testi, kontrollü koşullar altında malzemenin şekillenme davranışını gözlemlemek ve farklı malzemeleri karşılaştırmak için standart yöntem olarak öne çıkmakta ve de şekillendirme sınırlarının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle Erichsen testi kalite kontrol ve sac malzeme seçiminde kullanılan önemli bir test yöntemidir. Erichsen testi, kalite kontrol ve malzeme seçimi için faydalanılmasının yanı sıra sac metal şekillendirme endüstrisinde araştırma ve geliştirme çalışmaları için de değerli bir test yöntemidir. Bu test yöntemi ile farklı alaşım bileşimlerinin, ısıl işlemlerin ya da yüzey kaplamalarının metallerin şekillendirilebilirliğini nasıl etkilediği incelenebilmektedir. Ayrıca, Erichsen şişirme testi, üreticilerin şekillendirme tekniklerini iyileştirmelerini sağlayarak süreç geliştirmeye yardımcı olabilir. Yağlayıcı türü, zımba hızı ve takım tasarımı gibi farklı faktörlerin şişirme derinliğini nasıl etkilediği değerlendirilerek, verimliliği arttırmak için operasyonlar optimize edilebilir. Bu bilgiler, özellikle prototip üretiminden büyük ölçekli üretime geçerken, seçilen malzeme ve süreç parametrelerinin seri üretim için uygun olduğundan emin olmak için faydalıdır.

Çekme, dairesel veya çok kenarlı metal sacın, bir zımba ve kalıp yardımıyla içi boş üç boyutlu bir şekle dönüştürülmesini sağlayan ve sac malzemelerin plastik olarak şekillendirilmesinde yaygın olarak tercih edilen bir imalat metodudur [5, 6]. Üretilen parçanın yüksekliği çapından büyük ise işlem derin çekme olarak adlandırılır [7].

Kare, daire, elips tabanlı ve benzeri pek çok türde içi boş parçanın hızlı ve ekonomik bir şekilde derin çekme ile imal edilebilmesi, bu yöntemin endüstride sıklıkla tercih edilmesini sağlamaktadır. Bu sebeple, derin çekme işlemi pek çok araştırmanın odak noktası haline gelmiştir. İçerdiği çeşitli parametreler nedeniyle sonuçlarının analiz edilmesi oldukça karmaşıktır. Çekme hızı, baskı plakası kuvveti, kalıp radyüsü, zımba radyüsü, çekme oranı, çekme boşluğu ve yağlayıcı türü gibi pek çok faktör derin çekme ile imal edilen parçanın kalitesini doğrudan etkiler. [5].

Derin çekmenin temel avantajlarından biri, yüksek hassasiyet ve en az malzeme israfıyla büyük miktarda parça üretmeye olanak sağlamasıdır. İşlem başlangıçta yalnızca düz bir metal sac gerektirdiğinden, benzer kalitede büyük miktarda parça üretmek için oldukça verimlidir. Derin çekmede kullanılan malzeme, ister çelik, ister alüminyum veya diğer metaller olsun, yırtılma olmadan yeterli deformasyona ulaşması için iyi sünekliğe sahip

olmalıdır. İşlemin başarılı olmasında ve nihai ürünün gerekli özellikleri karşılamasını sağlamada doğru malzemenin seçilmesi son derece önemlidir.

Derin çekme sırasında malzeme incelmesi, kırışması ve yırtılması gibi çeşitli imalat kusurları ortaya çıkabilir. Malzeme incelmesi, metal aşırı gerildiğinde meydana gelir, incelmeyi azaltmak için kalıp tasarımı ve işlem parametreleri dikkatlice belirlenmelidir. Derin çekme işlemi esnasında radyal yöndeki gerilmeler kritik değeri aştığında çevresel yöndeki basma gerilmeleri çok yüksek olur ve oluşan plastik burkulmalar nedeniyle kırışıma meydana gelir. Kırışma, baskı plakası kuvveti ayarlanarak ya da kalıp ve baskı plakası tasarımı ile engellenebilir [8]. Malzeme yeterince sünek değilse veya işlem parametreleri düzgün bir şekilde ayarlanmazsa yırtılma veya çatlak oluşumu meydana gelebilir. Bu zorlukların üstesinden gelmek ve malzemenin farklı koşullar altında şekillenme davranışını tahmin etmek için derin çekme işlemleri genellikle sonlu eleman analizi ile simüle edilir. Bu yöntem, parametrelerin daha hassas bir şekilde kontrol edilmesini ve parça kalitesini iyileştiren ve malzeme israfını azaltan takımlar ve kalıplar tasarlama olanağı sağlar.

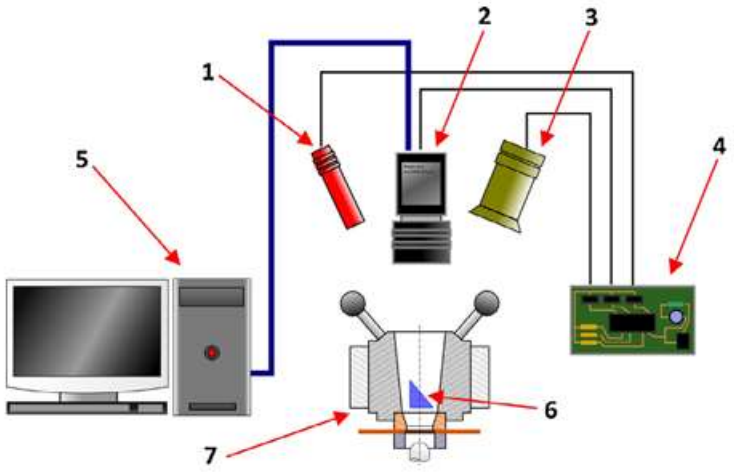
Bu çalışmada, korozyon dayanımının yüksek ve sünekliğinin iyi olması nedeniyle inşaat endüstrisinde, havacılık sanayisinde ve ambalaj sektöründe yaygın olarak kullanılan [9-11] Al3105 alüminyum alaşımı ve otomotiv endüstrisinde sıklıkla tercih edilen [12,13] DC04 çelik sac malzemenin şekillendirilebilirliği deneysel ve sonlu elemanlar analizleri ile incelenmiştir. 0,5 mm, 0,8 mm ve 1,00 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac ve 1,00 mm kalınlığında Al3105 alüminyum sacların şekillendirilebilirliği Erichsen testi ve çekme deneyleri yapılarak araştırılmıştır. Erichsen deneylerinde sac kalınlığının zımba hızının ve zımba çapının Erichsen testi sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Çekme deneylerinde ise kalıp tasarımının, baskı plakası kuvvetinin ve sac kalınlığının limit çekme oranına ve kırışıklık oluşumuna ve de yağlayıcı türünün çekme derinliğine etkileri incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Erichsen Şişirme Testi Literatür Özeti

Literatürde, malzeme içeriğinin, ısıl işlemlerin, sac üretim yöntemlerinin, çeşitli kaynak işlemlerinin, zımba çapı ve hızının, sıcaklığın ve de yağlayıcı kullanımının Erichsen Sabitine etkilerini inceleyen çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalara örnekler aşağıda sunulmuştur.

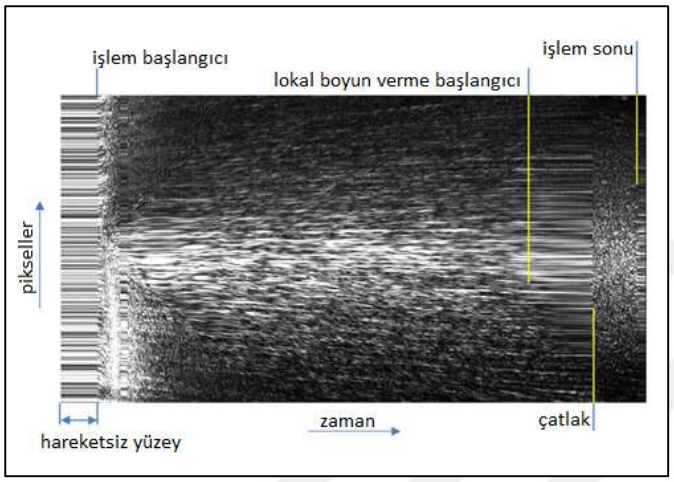
Kocanda ve Jasinski [3] çalışmalarında lazer benek yardımıyla Erichsen testi sırasında Erichsen sabitinin ve lokal boyun verme başlangıcındaki yüksekliğin tespit edildiği bir yöntem sunmuşlardır. Deneylerde sac malzeme olarak 0,8 mm kalınlığındaki 5754 H22 alüminyum alaşımı; 0,8 mm, 1 mm ve 2 mm kalınlıkta DC04 çelik ve 0,8 mm kalınlıktaki Dogal 800DP yüksek dayanımlı çelik seçilmiştir. Deneyler hidrolik test cihazı ile gerçekleştirilmiş ve izleme sistemi şişirme testi sırasında numene yüzeyinin gözlemlenebileceği şekilde Erichsen cihazının yukarısına kurulmuştur.



Şekil 2.1. Deneylerde uygulana izleme sistemi;1) Lazer ışını kaynağı, 2) Kamera, 3) LED aydınlatıcı, 4) Kontrol sistemi, 5) Görüntü kaydedici bilgisayar, 6) Yükseklik ölçmede kullanılan için prizma, 7) Hidrolik test cihazı kafası [3]

Çalışmada sunulan yöntem ile elde edilen görüntülerde özel alanların mevcut olduğu ve bu alanların Erichsen testi sırasında meydana gelen deformasyonun karakteristiği ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Deneyler sonucunda Erichsen sabiti ile lokal boyun verme başlangıcındaki yükseklik arasındaki farkın başarılı bir şekilde ölçülebileceği görülmüştür. Bu fark değerinin 5754 H22 alüminyum alaşımı için Erichsen sabitinin %6'sına; Dogal

800DP için %0'ına ve DC04 çelik sacın tüm kalınlıkları için yaklaşık %8'ine eşit olduğu tespit edilmiştir. 5754H22 alüminyum sac için Erichsen sabiti 8,02 mm, Dogal 800DP yüksek dayanımlı çelik sac için ise 9,23 mm değerinde ölçülmüştür. 0,8 mm, 1 mm ve 2 mm kalınlığındaki DC04 çelik saclar için Erichsen sabitinin sırasıyla 11,10 mm, 11,35 mm ve 12,95 mm değerlerinde olduğu tespit edilmiştir.



Resim 2.1. Erichsen şişirme testi sırasında elde edilen görüntünün karakteristik alanlarının bir örneği [3]

Zhang ve diğerleri [14] az miktarda silisyum içeren dört farklı dönüşüm kaynaklı plastisite (TRIP) çelik sacların ve karşılaştırma yapmak için ağırlıkça %1,19 Si içeren TRIP çeliği sac malzemenin sürekli soğuma dönüşüm diyagramlarını ve mekanik özeliklerini araştırmışlardır. Karbon miktarının, titanyum (Ti) ve vanadyum (V) katılarak gerçekleştirilen alaşımlamanın ve ayrıca karbon eşdeğerliğinin (CE) sürekli soğuma dönüşüm eğrileri ve mekanik özellikler üzerine olan etkileri incelenmiştir.

Çizelge 2.1. Testlerde kullanılan çeliklerin ağırlıkça kimyasal birleşimi [14]

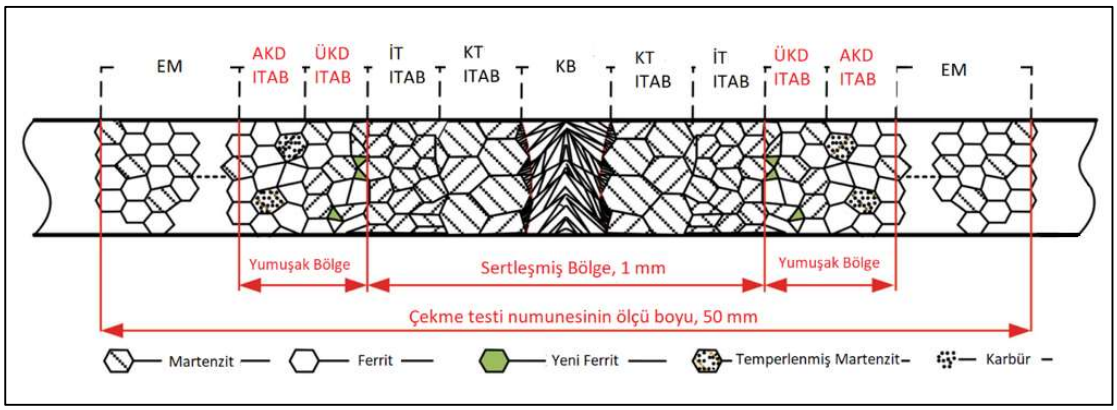
Malzeme Kodu	C	Mn	Al	Si	P	Ti	V	CE
P	0,11	1,67	0,038	1,19	0,013	-	-	0,44
O	0,21	1,64	1,37	0,31	0,081	-	0,073	0,55
Z	0,24	1,51	1,12	0,27	0,082	-	-	0,54
S	0,26	1,64	1,35	0,39	0,049	0,099	0,053	0,61
J	0,34	1,75	1,32	0,46	0,055	0,12	0,033	0,71

3,5 mm çapında ve 5 mm uzunluğundaki numuneler 2 K/s ısıtma hızında 1200 ºC olan östenitleme sıcaklığına çıkartılmış, bu sıcaklıkta 3 dakika boyunca tutulmuş; sonrasında 5

K/s soğuma hızında 950 ºC sıcaklığa soğutulmuş ve bu sıcaklıta 2 dakika bekletilmesinin ardından 0,3; 1; 2; 5; 10 ve 30 K/s soğuma hızlarında nihai olarak oda sıcaklığına soğutulmuşlardır. Çekme testi ve Erichsen testi için numuneler 1 mm kalınlık değeri elde edilinceye kadar soğuk haddelenmiştir. Haddeleme işlemi sonrası, 800 ºC sıcaklıta tavlanan numuneler 460 ºC'de östemperlenmiştir. Erichsen testi deneylerinde kullanılan numuneler 90 mm x 90 mm ölçülerinde seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda tüm çelik türleri içini CE değerinin yükselmesinin sürekli soğuma dönüşüm diyagramında ferrit ve perlit oluşum sıcaklıklarının sağ tarafa; beynit ve martenzit oluşum sıcaklıklarının ise aşağı yönde kaydırdığı görülmüştür. Ayrıca, soğuma hızının ve CE değerinin artması ile sertliğin yükseldiği tespit edilmiştir. Karbon oranının artmasıyla çekme dayanımının yükseldiği ve maksimum çekme dayanımına (1 GPa) J çeliğinin sahip olduğu tespit edilmiştir. İçeriğinde V elementi bulunan çelik sacların akma dayanımının arttığı, uniform birim uzamanın miktarının ise düştüğü belirlenmiştir. Erichsen deneyleri sonrası, çelik sac malzemelerin yapısında bulunan karbon miktarının yükselmesiyle biçimlenebilirliğin görece olarak düştüğü; Z, S, ve J çelik sacların Erichsen sabitinin yaklaşık 8 ile 10 mm arasında olduğu saptanmıştır. Çalışma sonucunda, mikro alaşımlı TRIP çelik sac malzemelerin, 800-1000 MPa arası dayanım ve %20 toplam uzamayla biçimlenebilirlik açısından oldukça iyi bir kombinasyona sahip olduğu belirtilmiştir.

Son zamanlarda, özellikle çift fazlı çelik saclar olmak üzere ileri yüksek mukavemetli çelik sacların biçimlenebilme kabiliyetleri üzerine yapılan araştırmalar hızla artış göstermektedir [15-24]. Huan ve diğerleri [15] çalışmalarında farklı oranlarda martenzit içeriğine sahip üç farklı çift fazlı çelik sac malzemenin (DP590, DP780 ve DP980) lazer kaynağı sonrası oluşan kaynak alanın mikro yapısı, sertliğini ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca lazer kaynağı yapılan saclarda meydana gelen deformasyon ve yırtılmalar Erichsen şişirme testi ile incelenmiştir. Deneylerde 1,5 mm kalınlığında çift fazlı çelik saclar kullanılmıştır. DP590, DP780 ve DP980 sacların yapısında bulunan martenzit oranı sırasıyla %19, %36 ve %45'dir. Kaynak işlemi sırasında saf argon gazı koruyucu olarak seçilmiş ve lazer gücü 2,0 kW değerinde uygulanmıştır. Tek eksenli çekme testinde deformasyon hızı 3 mm/dk, Erichsen şişirme testinde ise 17 mm/dk değerinde seçilmiştir. Lazer kaynak merkezinden farklı mesafelerde olmalarından dolayı kaynak bağlantılarındaki ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) değişik mikro yapılara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada kaynak bölgesi (KB), kaba taneli ITAB (KT-ITAB), ince taneli ITAB (İT-ITAB), üst kısmi dönüşmüş ITAB (ÜKD-ITAB), alt kısmi dönüşmüş

ITAB (AKD-ITAB) ve esas metal (EM) olmak üzere altı farkı bölge tanımlanmıştır.



Şekil 2.2. Çift fazlı çeliklerin lazer kaynak bağlantılarının mikro yapı modeli [15]

KB, KT-ITAB ve İT-ITAB'de martenzit içeriğinin esas metale göre daha fazla olduğu ve bu nedenle bu bölgelerin mikrosertlik değerlerinin EM'ye kıyasla daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgeler sertleşmiş bölge olarak tanımlanmıştır ve yaklaşık 1 mm genişliğinde olduğu belirtilmiştir. ÜKD-ITAB'nin esas metale benzer olarak mikro yapısında ferrit ve martenzit içerdiği fakat ferrit oranının esas metale göre daha yüksek, martenzit içeriğinin ise daha düşük olduğu ve bu durumun sertliği düşürdüğü belirtilmiştir. AKD-ITAB'de düşük dislokasyon yoğunluğu ve yüksek miktarda karbürler; ferrit ve temperlenmiş martenzit gözlemlenmiştir. ÜKD-ITAB ve AKD-ITAB'nin birleşimi yumuşak bölge olarak tanımlanmıştır. DP780 ve DP980 çelikler için yumuşak bölge gözlemlenirken DP590 için bu bölgede sertlik düşüşü gözlemlenmemiştir. Esas metalin sertliğine oranla DP780 ve DP980 malzemelerin yumuşak bölgelerindeki sertlik değerlerinin sırasıyla %5,7 ve %9,8 değerlerinde azaldığı görülmüştür. Tek eksenli çekme testleri sonrasında üç çelik sac türü için de yırtılmanın esas metal bölgesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Kaynak edilmiş sacların çekme ve akma dayanımı değerlerinin ana metalinkine yakın olduğu, fakat toplam uzama miktarının kaynak sonrasında düştüğü tespit edilmiştir. DP590 kaynaklı numunede toplam uzamanın kaynaksız DP590 malzemeye göre yaklaşık %11,1 oranında azaldığı belirtilmiştir. Kaynak edilmiş DP590, DP780 ve DP980 sacların Erichsen sabitleri sırasıyla 8,4; 8,7 ve 8,1 mm değerlerinde bulunmuştur. Kaynak uygulanmış DP590, DP780 ve DP980 çelik saclar için tespit edilen Erichsen sabitlerinin kaynaksız saclarınkilerin sırasıyla %81,1, %91,7 ve %85,0'i kadar olduğu görülmüştür. Erichsen testi sırasında DP980 malzeme için çatlak oluşumunun yumuşak bölgede başladığı ve kaynak dikişine paralel ilerlediği; görece olarak düşük martenzit içeriğine

sahip DP590 ve DP780 için ise çatlağın sertleşmiş bölgede oluştuğu ve kaynak bölgesine dik ilerlediği görülmüştür.

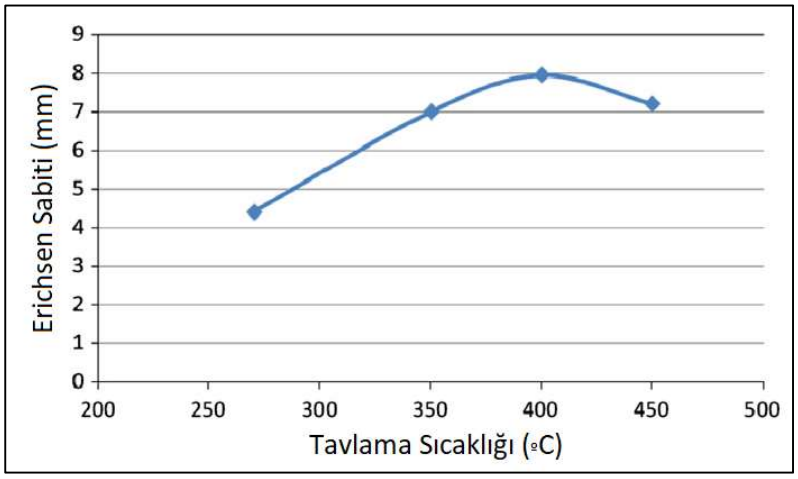
Wang ve diğerleri [16] farklı ısı girdileri ile fiber lazer kaynağı yapılmış çift fazlı DP780 çelik sacların mikro yapısını ve yırtılma davranışlarını araştırmışlardır. Kalınlığı 1,5 mm olan DP780 çelik sac malzemelere 6, 18, 24, 30, 42 ve de 66 J/mm ısı verilerek ve 0,3 mm ışın çapı ile kaynak uygulanmıştır. Saf argon gazı koruyucu olarak seçilmiş ve akış debisi 15 l/dk. değerinde ayarlanmıştır. Tek eksenli çekme testleri kaynak yönüne dik eksende 3 mm/dk. deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Erichsen şişirme deneyleri kaynak dikişi tüm numunelerde merkezde olacak şekilde 17 mm/dk. zımba hızı ile yapılmıştır. Kaynak bölgelerinin morfolojik görüntüleri incelendiğinde 6 J/mm ısı girdisinin kullanıldığı durumda birleşmenin tamamlanamadığı görülmüştür. Isı girdisinin artmasıyla kaynak bölgesinin (KB) ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) genişlediği gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesinde ve iç ITAB'da ortalama mikro sertlik değeri 373 HV olarak ölçülmüş ve bu değerin esas metalin (266 HV) sertliğinin 1,4 katı olduğu belirtilmiştir. Çalışmada bu bölgeler sertleşmiş bölge olarak adlandırılmıştır. Dış ITAB'da mikro sertlik 243 HV değerinde ölçülmüş ve ölçülen sertlik değerinin esas metalin sertliğinden az olması nedeniyle bu alana yumuşak bölge (YB) denilmiştir. Isı girdisinin artmasıyla yumuşak bölgenin genişlediği ve sertliğin azaldığı tespit edilmiştir. 6, 18, 24, 30, 42 ve 66 J/mm ısı girdileri ile yapılan kaynak sonucunda oluşan yumuşak bölgenin genişliği sırasıyla 217, 376, 399, 444, 539 ve 616 µm değerlerinde ölçülmüştür. Isı girdisindeki artış başlangıçta sac malzemelerin, akma mukavemetini, çekme mukavemetini ve de birim uzamasını artırmış; ancak ısı girdisi 66 J/mm değerine ulaştığında sac malzemelerin bu mekanik özelliklerinde düşüş görülmüştür. Esas metalin toplam uzama miktarı %19,0 iken, ısı girdisi 18, 42 ve 66 J/mm olduğunda toplam uzama miktarları sırasıyla %17,3, %20,0 ve %10,7 değerlerinde bulunmuştur. 6 J/mm ısı girdisi ile yapılan kaynakta tam birleşme olmadığından kopmanın kaynak bölgesinde, 66 J/mm ısı girdisi kullanıldığında kopmanın yumuşak bölgede ve diğer ısı girdilerinin tümü için esas metalde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Isı girdisinin artmasıyla Erichsen sabitinin ilk başta yükseldiği sonrasında ise düştüğü saptanmıştır. Isı girdisi 6 J/mm olduğunda sacın Erichsen sabiti ana metalin Erichsen sabiti değerinin yalnızca %38,8'ine ulaşabilmektedir. Isı girdisi 18-42 J/mm aralığında olduğunda ise kaynaklı sacların biçimlenebilirliğinin yükseldiği ve ES değerinin ana metalin Erichsen değerinin yaklaşık %95'ine kadar ulaştığı gözlemlenmiştir. Isı girdisi 66 J/mm iken ise ES değerinin düştüğü görülmüştür.

Çizelge 2.2. Farklı ısı girdileri ile ulaşılan ES değerleri ve deformasyon davranışı [16]

Isı girdisi (J/mm)	ES (mm)	Çatlak başlangıç bölgesi ve çatlak yönü
Esas metal	8,718	Esas metal
6	3,382	Kaynak bölgesi (Paralel)
18	8,345	Kaynak bölgesi (Dik)
24	8,194	Kaynak bölgesi (Dik)
30	8,292	Kaynak bölgesi (Dik)
42	8,537	Kaynak bölgesi (Dik)
66	7,058	Yumuşak bölge (Paralel)

Isı girdisi 18-42 J/mm aralığında iken Erichsen testi sırasında çatlağın kaynak bölgesinde oluştuğu ve kaynak dikişine dik doğrultuda ilerlediği gözlemlenmiştir. Isı girdisi 66 J/mm iken ise çatlağın yumuşak bölgede başladığı ve kaynak yönünde ilerlediği görülmüştür. Yumuşak bölge için kritik genişlik değerinin yaklaşık 539 μm olduğu belirtilmiştir. YB genişliğinin 539 μm değerinden az olduğu durumlarda kaynak bağlantısının hem mukavemetinin hem de şekillenebilirliğinin arttığı ifade edilmiştir.

Tajally ve Emadoddin [25] çeşitli sıcaklıklarda ısıl işlem görmüş 7075 alüminyum sacların mekanik özelliklerini ve biçimlenebilirliğini incelemişlerdir. Tek eksenli çekme deneyleri için 7,2 mm kalınlığındaki alüminyum alaşımı plaka %71 redüksiyonla soğuk haddelenerek 2,1 mm kalınlığa düşürülmüştür. Derin çekme ve Erichsen deneyleri için ise 3,9 mm kalınlığındaki plakalar 1,1 mm kalınlığa ulaşıncaya kadar haddelenmiştir. Haddelemeden sonra sac numunelere 270-450 ºC aralığında çeşitli sıcaklıklarda 5 dk. boyunca ısıl işlem uygulanmıştır. Tek eksenli çekme testlerinde hadde yönünde, hadde yönüne 45º ve 90º doğrultularda kesilen sac numuneler 0,5 mm/dk. deformasyon hızı ile çekilmişlerdir. Metalografik incelemeler sonucunda soğuk haddeleme işlemi sonrası 7075 Al alaşımı tanelerinin boy/en oranının 5'ten 35'e yükseldiği gözlemlenmiştir. Tek eksenli çekme testi sonucunda, hadde yönüne 45º doğrultudaki numunelerin toplam uzama miktarının diğer doğrultulara göre daha büyük olduğu ve tavlama sıcaklığının yükselmesi ile toplam uzamanın arttığı görülmüştür. Soğuk haddelenmiş ve sonrasında ısıl işlem uygulanmamış saclarda çekme dayanımı/akma dayanımı oranının 1,11 değerinde olduğu görülürken tavlama sıcaklığının yükselmesiyle bu oranın büyüdüğü ve de 450 ºC sıcaklıkta tavlanmış saclar için çekme dayanımı/akma dayanımı oranının 2,15 değerine ulaştığı belirlenmiştir. Çekme dayanımı/akma dayanımı oranının büyümesiyle biçimlenebilirliğin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.3. Erichsen sabitinin tavlama sıcaklığıyla değişimi [25]

Normal anizotropinin tavlama sıcaklığının artmasıyla büyüdüğü, 400 ºC'de en büyük değerini aldığı ve sıcaklık 400 ºC'yi aştığında düştüğü tespit edilmiştir. Bu yüzden 400 ºC sıcaklıkta tavlanan 7075 Al sacların şekillendirilebilirliğinin diğer saclardan çok daha iyi olduğu belirtilmiştir. 270 ºC'de tavlanmış sac numunenin derin çekilebilirliğinin yetersiz olduğu ve 400 ºC sıcaklıkta tavlanmış numunenin çekilebililiğinin ise en iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, Erichsen deneyleri sonucunda 400 ºC sıcaklıkta tavlanmış sacların en büyük Erichsen sabitine (7,95 mm) sahip olduğu tespit edilmiştir. 270 ºC, 350 ºC ve 450 ºC sıcaklıkta tavlanan sac numunelerin Erichsen sabiti sırasıyla 4,4 mm, 7,0 mm ve 7,2 mm değerlerinde ölçülmüştür.

Sekhar [26] kalınlığı 1 mm olan AA5052 alüminyum sac malzemenin şekillenebilirliğini Erichsen testi ile incelemiştir. Erichsen testleri öncesinde H32 kondisyonunda ticari olarak edinilen saclar 10 dakika boyunca 345 ºC sıcaklıkta tavlanmıştır. Tavlama işlemi sonucunda biçimlenebilirliğin arttığı görülmüştür. Erichsen testleri sırasında numune genişliğinin azalması sonucunda yırtılmaların sac numune merkezi yerine kalıp kenarına yakın bölgelerde meydana geldiği tespit edilmiştir.

Bai ve diğerleri [27] Mg−2Zn−0,2Mn magnezyum alaşımına samaryum (Sm) ve kalsiyum (Ca) ilavesinin alaşımın mikro yapısını, mekanik özelliklerini ve biçimlenebilirliğini nasıl değiştirdiğini incelemişlerdir. Çalışmada, döküm Mg alaşımları işlenerek 8 mm kalınlığında plakalar üretilmiş ve sonrasında plakalara 400 ºC sıcaklıkta 12 saat boyunca homojenleştirme tavı uygulanmış ve suda soğutulmuşlardır. Mg alaşımı plakalar 350 ºC'de haddelenerek 11 pasoda toplam %87 redüksiyonla 1 mm kalınlığa düşürülmüşlerdir.

Haddeleme işlemi sonrası yeniden kristalleşmiş yapı elde etmek için tüm numunelere 350 ºC sıcaklıkta 1,5 saat süresince ısıl işlem uygulanmıştır. Deneylerde farklı miktarlarda Ca ve/veya Sm içeren Mg alaşımları ve referans olması için Ca ya da Sm ile alaşımlanmamış Mg−Zn−Mn olmak üzere altı farklı alaşım kullanılmıştır. Hadde yönünde, hadde yönüne 45º ve 90º doğrultularda kesilen sac numunelerin mekanik özellikler üniversal çekme testi cihazı ile tespit edilmiştir. Mg alaşımı sacların biçimlendirilebilirliği 60 mm x 60 mm x 1 mm boyutlarındaki numuneler ile yapılan Erichsen deneyleriyle araştırılmıştır. 20 mm çapında yarı küresel zımba ile 5 mm/dk. zımba hızında deneyler gerçekleştirilmiştir. Baskı plakası kuvveti 10 kN değerinde ayarlanmış ve grafitli gres yağı ile yağlama yapılmıştır.

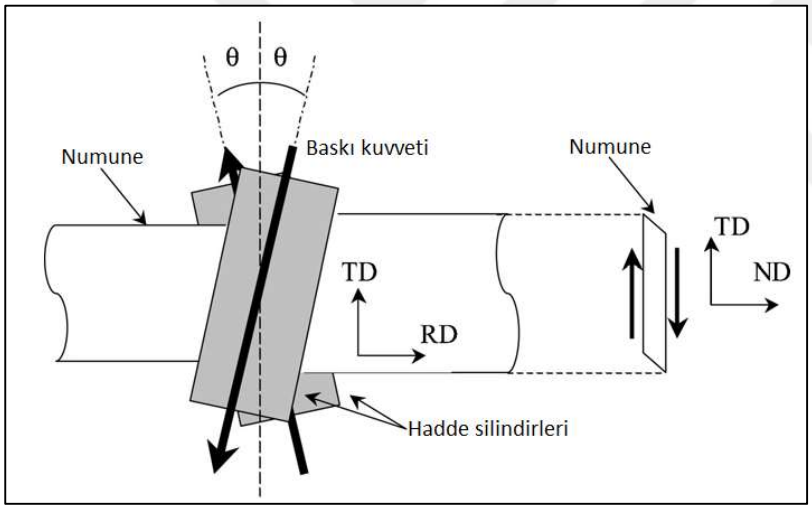
Çizelge 2.3. Deneylerde kullanılan Mg alaşımlarının kimyasal içerikleri [27]

Alaşım Numarası	Nominal bileşim (% ağırlık)	Gerçek bileşim (% ağırlık)				
		Zn	Mn	Ca	Sm	Mg
I	Mg−2Zn−0.2Mn	2,12	0,20	-	-	Geri kalan
II	Mg−2Zn−0.2Mn−0.5Ca	2,30	0,18	0,64	-	Geri kalan
III	Mg−2Zn−0.2Mn−1.0Ca	2,24	0,21	1,01	-	Geri kalan
IV	Mg−2Zn−0.2Mn−0.5Sm	2,26	0,24	-	0,48	Geri kalan
V	Mg−2Zn−0.2Mn−1.0Sm	2,03	0,22	-	0,98	Geri kalan
VI	Mg−2Zn−0.2Mn−0.5Ca−0.5Sm	1,97	0,26	0,56	0,61	Geri kalan

Mg−2Zn−0.2Mn alaşımına Ca ve Sm elementlerinin katılması sonucunda $Ca_2Mg_6Zn_3$ ve $Mg_{41}Sm_5$ fazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Ca ve Sm miktarının ağırlıkça %0,5'ten %1'e yükseltilmesinin çökelti sayısında artışa yol açtığı görülmüştür. Mg−2Zn−0.2Mn alaşımına Sm ve Ca eklenmesiyle ortalama tane boyutunun önemli ölçüde azaldığı ve kalsiyumun tane boyutunu samaryuma nazaran daha çok küçülttüğü tespit edilmiştir. Magnezyum alaşımına Ca ve Sm katılmasıyla bazal dokunun zayıfladığı ve samaryumun kalsiyuma kıyasla doku zayıflatma kapasitesinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Kalsiyum ve samaryum ile yapılan alaşımlama sayesinde sacların mekanik özelliklerinin ve biçimlenebilirliklerinin geliştiği belirtilmiştir. Alaşımdaki kalsiyum içeriği ağırlıkça %0,5'ten %1'e çıktığında sacların süneklik ve biçimlenebilirliğinin azaldığı, buna karşın alaşımda samaryum miktarının artmasıyla sac numunelerin biçimlenebilirliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. I numaralı Mg alaşımı için oda sıcaklığında Erichsen sabiti 4,2 mm değerinde bulunurken; alaşıma %0,5 Ca eklenmesiyle (II numaralı alaşım) Erichsen sabitinin 6,8 mm'ye yükseldiği gözlemlenmiştir. Ca içeriğinin %1'e çıkartılmasıyla Erichsen sabitinin 5,5 mm değerine düştüğü görülmüştür. Mg alaşımında Ca miktarının artmasının bazal dokuyu zayıflatması ve daha ince tane oluşturmasına rağmen Ca içeren

taneciklerin gerinme durumunda çatlak başlangıcı gibi davranmasında dolayı şekillenebilirliği olumsuz etkilediği çalışmada belirtilmiştir. Ağırlıkça %0,5 Sm içeren IV numaralı alaşım için Erichsen sabiti 6,9 mm; %1 Sm içeren V numaralı Mg alaşımı için ise 7,5 mm değerinde bulunmuştur. Ayrıca hem zayıf bazal dokuya sahip olması hem de Sm elementinin Ca içeren taneciklerin dağılımını etkilemesi nedeniyle VI numaralı alaşım için de yüksek Erichsen sabiti değerine (7,3 mm) ulaşıldığı ifade edilmiştir.

Chino ve diğerleri [28] çapraz haddeleme yönteminin AZ31 Mg sac malzemelerin biçimlenebilirliğine etkisini araştırmışlardır. Çapraz haddeleme yapılırken, merdane ekseni ile hadde yönüne dik eksen (TD) arasına 7,5º açı verilmiştir. Erichsen deneyleri, 433, 473 ve 493 K sıcaklık değerlerinde çapraz ve normal haddeleme ile üretimiş AZ31 Mg alaşımı sac numunelere ile gerçekleştirilmiştir.

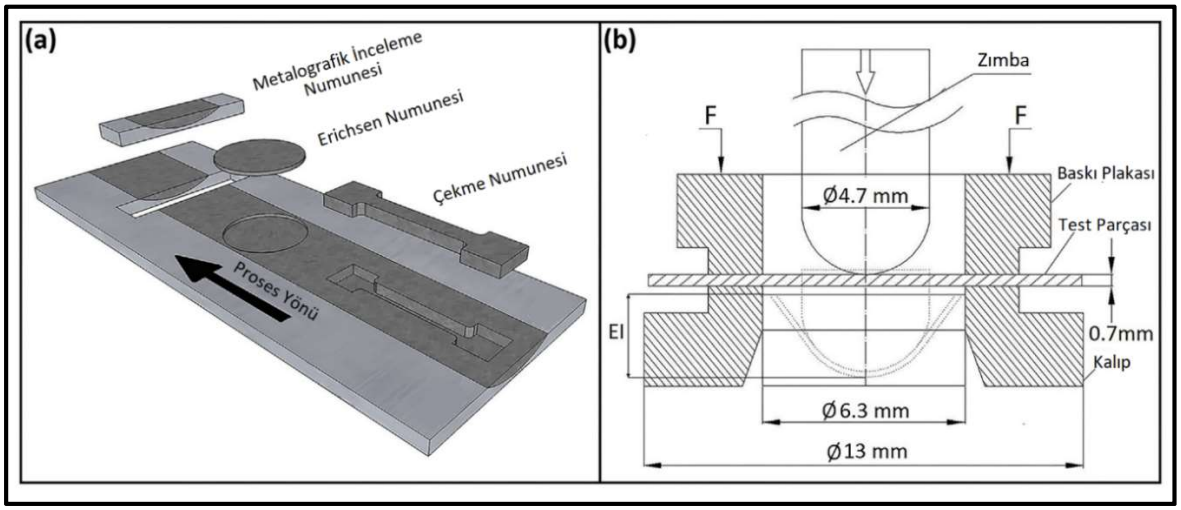


Şekil 2.4. Çapraz haddeleme işleminin şematik gösterimi [28]

Erichsen deneylerinde 1 mm kalınlığındaki ve 60 mm çapındaki Mg alaşımı saclar kullanılmıştır. Testlerde yarı küresel 20 mm çaplı zımba tercih edilmiş; baskı plakası kuvveti 10 kN ve zımba hızı 5 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Ayrıca 433 ve 493 K sıcaklık değerlerinde çekme testleri gerçekleştirilerek Mg alaşımı sac numunelerin Lankford katsayıları (r-değerleri) incelenmiştir. ES, çapraz haddelenmiş sac numuneler için 433 K, 473 K ve 493 K sıcaklıkta sırasıyla 6,4 mm, 8,7 mm 14,4 mm değerlerinde ölçülmüştür. Normal haddeleme ile üretilmiş sac numunelerin ise 433, 473 ve 493 K'de ES değerlerinin sırasıyla 3,5 mm, 5,4 mm ve 8,0 mm olduğu tespit edilmiştir. Çapraz haddeleme sayesinde magnezyum alaşımı sacların biçimlenebilirliğinde artış sağlanmıştır. Çapraz haddelenmiş

ve normal haddelenmiş saclar arasında mekanik özelikler açısından önemli bir fark olmadığı görülmüştür. Ayrıca ortalama r-değerinin ve düzlemsel anizotropinin normal haddelenmiş ve çapraz haddelenmiş numuneler için yakın büyüklüklerde; fakat boyuna gerinime bölünerek normalize edilen genişlik ve kalınlık gerinimlerindeki anizotropinin normal haddelenmiş Mg alaşımı saclarda daha yüksek olduğu görülmüştür. Çapraz haddelenmiş saclarda Erichsen testi sırasında oluşan genişlik yönündeki ve kalınlık yönündeki gerinim anizotropisinin azalmasının muhtemel nedeninin sırasıyla prizmatik kayma ile piramidal kayma olduğu ifade edilmiştir. Bu nedenle, çapraz haddelenmiş numune için bir dizi doku oluşumu meydana geldiği ve bu durumun gerinim anizotropisini azaltarak şekillenebilirliği artırdığı öne sürülmüştür.

Sekban ve diğerleri [29] sürtünme karıştırma işleminin düşük karbonlu çelik sacların biçimlenebilirlik kabiliyetini nasıl değiştirdiği araştırmışlardır. 200 mm x 40 mm x 6 mm ölçeklerindeki çelik plakaya 18 mm omuz çapına sahip tungsten karbür takım ile sürtünme karıştırma işlemi uygulanmıştır. Takım ucu uzunluğu 8 mm ve çapı 3 mm değerlerindedir. Sürtünme karıştırma işleminde takımın dakikada devir sayısı 645, ilerleme hızı 45 mm/dk ve baskı kuvveti 11 kN değerinde seçilmiştir. Sürtünme karıştırma işlemini nedeniyle sac malzemede karıştırma bölgesi (KB) ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak adlandırılan iki bölgenin ortaya çıktığı belirtilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop ile sürtünme karıştırma işlemi öncesinde ve sonrasında düşük karbonlu çelik malzemenin mikro yapısı incelenmiştir. Sürtünme karıştırma işlemi yapılmadan önce sac malzemenin mikro yapısının kaba ferrit taneleri ve bu taneler arasında yer alan perlit fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir. Sürtünme karıştırma işlemi sayesinde karıştırma bölgesindeki ferrit tanelerin küçüldüğü ve ortalama tane çapının 25µm'den 3 µm'ye indiği gözlemlenmiştir. Mekanik özellikleri incelemek için karıştırılmış bölgeden elde edilen numunelere tek eksenli çekme testi uygulanmıştır. Şekillenebilirliği incelemek amacıyla standart Erichsen deneylerinde faydalanılan kalıp seti ¼ oranında küçültülerek Erichsen test düzeneği imal edilmiştir ve testlerin uygulandığı sac numuneler karıştırılmış bölgeden alınmıştır. Karşılaştırma yapmak için sürtünme karıştırma işlemine maruz kalmayan sac numunelerle de Erichsen deneyleri yapılmıştır. Deneylerde zımba hızı 0,01 mm/s olarak ayarlanmış ve numune çapı 13 mm, kalınlığı ise 0,7 mm değerlerinde belirlenmiştir. Takım izlerinin çatlak başlatmasını önlemek amacıyla Erichsen testi için hazırlanan numuneler taşlanmış ve parlatılmışlardır.

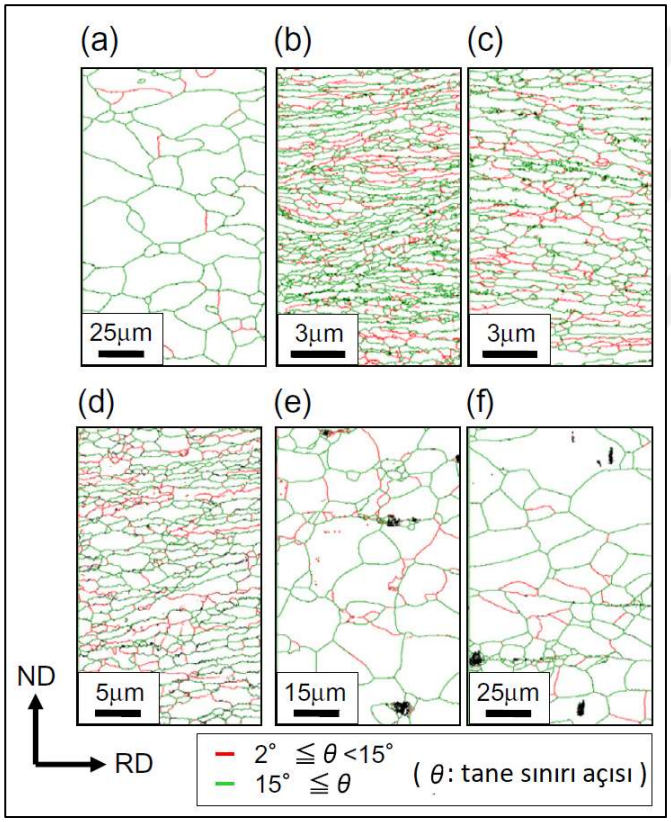


Şekil 2.5. Numuneler ve deney düzeneği; a) Sürtünme karıştırma işleminin ve numune konumların şematik gösterimi, b) Küçültülmüş Erichsen deney seti [29]

Tek eksenli çekme deneyleri sonucunda, sürtünme karıştırma prosesinin çelik sacların akma ve çekme dayanımlarını yükselttiği, sünekliğini ise bir miktar azalttığı görülmüştür. İşlenmemiş düşük karbonlu çelik sac numunelerin akma dayanımı 256 MPa, çekme dayanımı ise 435 MPa büyüklüğünde bulunmuştur. Sürtünme karıştırma işleminden sonra ise akma dayanımının 334 MPa ve çekme dayanımının 525 MPa seviyesine yükseldiği görülmüştür. Dayanımdaki yükselmenin ana sebebinin tane incelmesi olduğu ifade edilmiştir. Ek olarak, sürtünme karıştırma prosesi esnasında dislokasyon yoğunluğunda meydana gelen artışın da çelik sacların mukavemetinin artmasına katkı yaptığı saptanmıştır. Sürtünme karıştırma işleminden sonra üniform uzamanın %18'den %14, toplam uzamanın ise %44'ten yaklaşık %32 seviyelerine indiği görülmüştür. Sürtünme karıştırma işleminin Erichsen sabitinde bir miktar azalmaya, zımba yükünde ise artışa yol açtığı tespit edilmiştir. Proses sonrasında ES'nin 2,73 mm değerinden 2,66 mm değerine indiği belirtilmiştir. Erichsen testi sonrasında şişirilmiş sac numunelerin yüzeyleri incelendiğinde sürtünme karıştırma işlemi uygulanan sacların yüzey kalitesinin uygulanmayanlara göre daha iyi olduğu görülmüştür. Proses uygulanmayan numunelerde gözlemlenen portakal kabuğu görüntüsünün sürtünme karıştırma işleminden sonra tane incelmesi nedeniyle ciddi oranda azaldığı gözlemlenmiştir.

Yoda ve diğerleri [30] birikimli haddelenmiş (Accumulative roll bonding-ARB), sonrasında ısıl işlem uygulanmış çok ince taneli arayer atomsuz (IF) çelik sac malzemelerin biçimlenebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada ultra düşük karbonlu IF çelik sac 2 mm kalınlığa kadar soğuk haddelenmiş ve sonrasında saca tavlanma ısıl işlemi

uygulanmıştır. ARB işlemi yedi pasoda gerçekleştirilmiş ve sac kalınlığı 1 mm'ye düşürülmüştür. ARB prosesi sonrasında farklı sıcaklık ve sürelerde tavlama yapılarak sac malzemelerin ortalama tane çapının değişmesi sağlanmıştır. 500 ºC'de 0,5 saat, 600 ºC'de 0,5 saat; 600 ºC'de 20 saat ve 850 ºC sıcaklıkta 20 saat olmak üzere toplam dört farklı ısıl işlem uygulanmıştır. ARB ya da ısıl işlem uygulanmayan sac numuneler, sadece ARB uygulanmış numuneler ve de ARB ve ısıl işleme maruz bırakılmış sac numuneler hadde yönüne (RD) paralel kesilerek elektron geri-saçınım kırınımı (EBSD) analizi ile incelenmiştir. Erichsen testleri ARB ve ısıl işeme maruz kalmış 20 mm x 20 mm x 1 mm boyutlarındaki numuneler ile yapılmıştır.

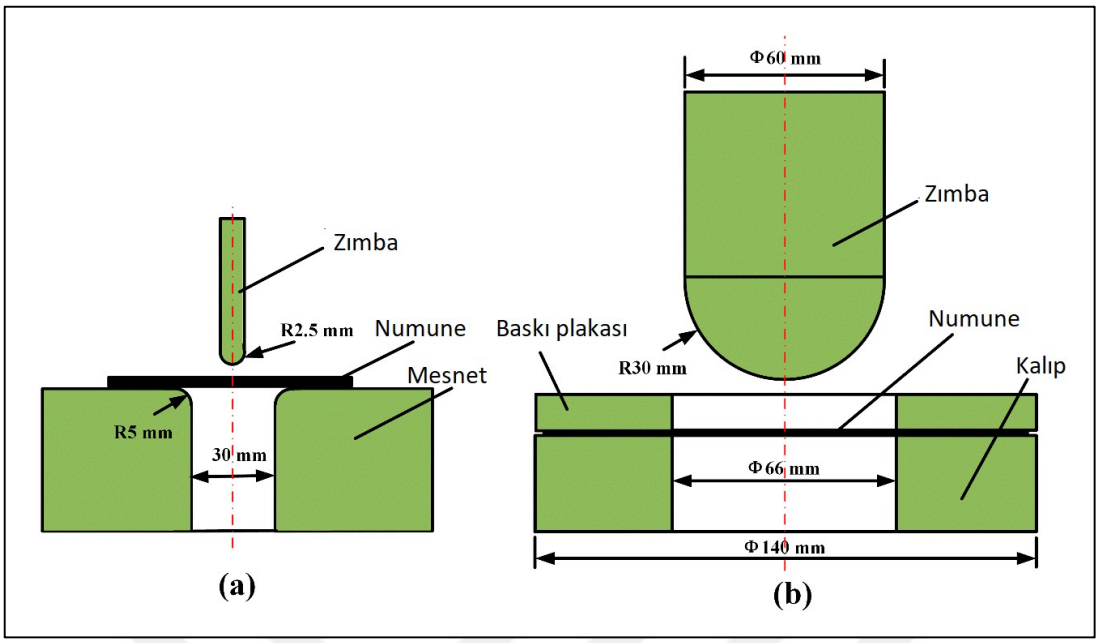


Resim 2.2. EBDS analizi sonucu elde edilen tane sınırı görüntüleri; a) Başlangıç sacı, b) ARB işlemi uygulanmış sac numune; ARB uygulanmış ve sonrasında c) 500 ºC'de 0,5 saat, d) 600 ºC'de 0,5 saat, e) 600 ºC'de 20 saat ve f) 850 ºC'de 20 saat tavlanmış numuneler [30]

EBSD analizleri sonucunda başlangıç sacının, ARB uygulanmış sacın, ARB sonrasında 500 ºC'de 0,5 saat; 600 ºC'de 0,5 saat; 600 ºC'de 20 saat ve 850 ºC'de 20 saat tavlanmış sac numunelerin ortalama tane boyutu sırasıyla 16,0; 0,24; 0,44; 1,15; 7,20 ve 13,5 µm değerlerinde bulunmuştur. Sıcaklığın yükselmesi ve daha uzun süre tavlama uygulanmasıyla ortalama tane çapının arttığı tespit edilmiştir. Mekanik testler sonucunda

başlangıç sacının çekme dayanımı 276 MPa, akma dayanımı 151 MPa üniform uzama %27 ve toplam uzama %58 değerinde bulunmuştur. ARB işlemi uygulanmış sac numunenin başlangıç sacının çekme dayanımının yaklaşık 2,8 katına denk gelen 783 MPa çekme dayanımınına sahip olduğu ve yalnızca %3 toplam uzama sergilediği görülmüştür. ARB işleminden sonra 600 ºC'de 0,5 saat tavlanmış numunenin çekme dayanımı 408 MPa toplam uzama miktarı ise %4,2 olarak ölçülmüştür. Tavlama sıcaklığının yükselmesi ve zamanının artması ile sac numunelerin çekme dayanımlarının düştüğü toplam uzama miktarlarının ise büyüdüğü saptanmıştır. Yapılan Erichsen deneyleri sonuçunda başlangıç sacının ES değerinin 5,6 mm olduğu görülmüştür. Ortalama tane çapının azalmasıyla ES'nin değerinde düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. Ancak ortalama tane çapı 0,44 μm iken bile ES 3,7 mm değerinde ölçülmüştür. Ortalama tane çapı 0,44 μm olan sac numunenin %6,1 toplam uzama sergilediği ve bunun ARB ve tavlama uygulanmayan numunelerin toplam uzamasının yaklaşık %10'u kadar olduğu belirlenmiştir. Fakat tane çapı çok küçük olan bu sac numunelerin Erichsen sabitinin, başlangıç sacının ES değerinin %66'sına kadar ulaşabildiği görülmüştür. Tek eksenli çekme ve Erichsen deneyleri sonucunda ultra ince taneli çelik saclarda ARB sonucu oluşan tane incelmesinin sacların toplam uzamasını ciddi oranda azaltmasına rağmen Erichsen sabitini daha az etkilediği tespit edilmiştir.

Gao ve diğerleri [31] örgü karbon fiber (CF) takviyeli polieter eter keton (PEEK) kompozit sac malzemelerin şekillenebilirliğini araştırmışlardır. Beş adet örgü CF/PEEK ham lifi [0/90] yönünde üst üste dizilerek basınçlı kalıplama yöntemi ile kompozit numuneler üretilmiştir. Kalıplama işleminde 400 ºC sıcaklıkta 10 dakika boyunca 3 MPa basınç uygulanmıştır ve sonrasında kompozit saclar 60 ºC sıcaklıkta 1,5 saat süresince kurumaya bırakılmıştır. Kompozit sac numunelere bükme ve Erichsen şişirme testleri uygulanmıştır. Bükme deneylerinde 80 mm x 10 mm x 0,9 mm ölçülerindeki dikdörtgen şekilli numuneler 165-325 ºC sıcaklık aralığında ve 2-200 mm/dk deformasyon hızlarında test edilmiştir. Erichsen deneyleri 138 mm çapa ve 0,9 mm kalınlığa sahip kompozit saclarla 5 mm/dk. sabit çekme hızında 165, 200, 235, 270, 305, 325 ºC sıcaklıklarda; 325 ºC değerinde olan sabit sıcaklık altında ise 2, 5, 30, 60,120 mm/dk. zımba hızlarında yapılmıştır.

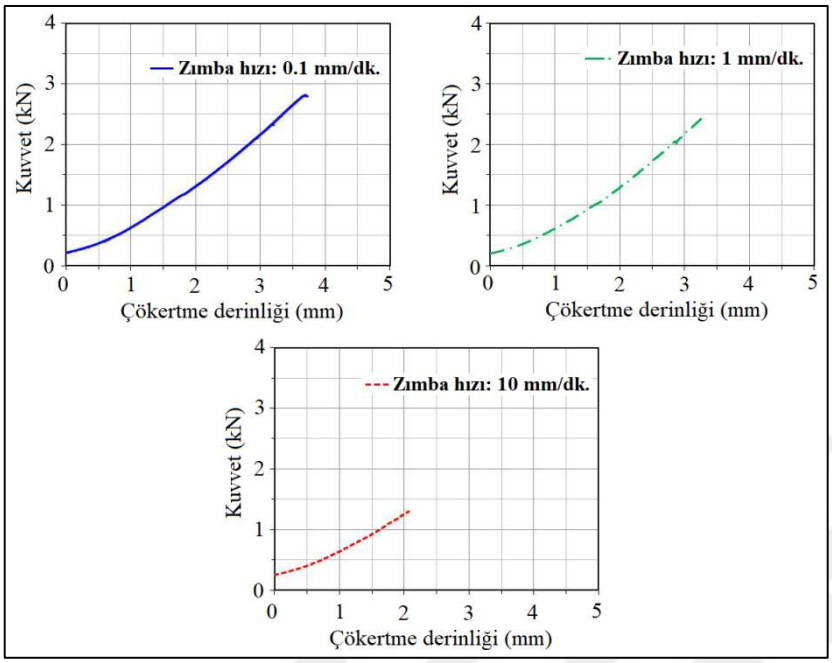


Şekil 2.6. Yüksek sıcaklıklarda bükme testi ve Erichsen testinin şematik diyagramı; a) Bükme testi, b) Erichsen testi [31]

Bükme testleri sonucunda CF/PEEK kompozit malzemenin eğilme dayanımının sıcaklığın ve deformasyon hızının yükselmesiyle azaldığı görülmüştür. Eğilme modülünün 165-235 ºC sıcalık değerlerinde yavaşça azaldığı, sıcaklık 325 ºC'ye yükselirken ise önemli ölçüde düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca eğilme modülünün deformasyon hızı 2 mm/dk'dan 60 mm/dk değerine yükselirken arttığı; 60 mm/dk hız değerinden sonra ise deformasyon hızındaki artışın eğilme modülünü azalttığı görülmüştür. Sıcaklık 165 ºC'den 325 ºC'ye çıkınca Erichsen sabitinin 2,1 katına yükseldiği; zımba hızı arttığında ise ES değerinin çok az düştüğü tespit edilmiştir. Sıcaklık 165 ºC olduğunda ES 15,6 mm değerinde tespit edilirken, sıcaklığın 325 ºC'ye yükseltimesiyle ES'nin 32,8 mm değerini aldığı görülmüştür. ES, 2 mm/dk. çekme hızı altında 33,3 mm ve çekme hızı 120 mm/dk. olduğunda ise 31,6 mm değerlerinde ölçülmüştür. Çalışmada, CF/PEEK kompozit sac malzemelerin biçimlenebilirliğinin çekme hızından ziyade sıcaklıktan etkilendiği vurgulanmıştır.

Luo ve diğerleri [32] sürtünme karıştırma metodu ile imal edilen AZ61 magnezyum alaşımı sac malzemelerin oda sıcaklığındaki biçimlenebilirliğini Erichsen deneyleri aracılığıyla araştırmışlardır. Erichsen testleri esnasında elde edilen zımba kuvvetti-çökertme derinliği eğrilerinin zımba hızı ile değişimleri incelemiştir. Artan zımba hızı ile

Erichsen Sabitinin azaldığı (Şekil 2.7) görülmüştür. ES 0,1 mm/dk. zımba hızı için 3,7 mm ve zımba hızı 10 mm/dk. olduğunda ise 2,1 mm değerinde ölçülmüştür.



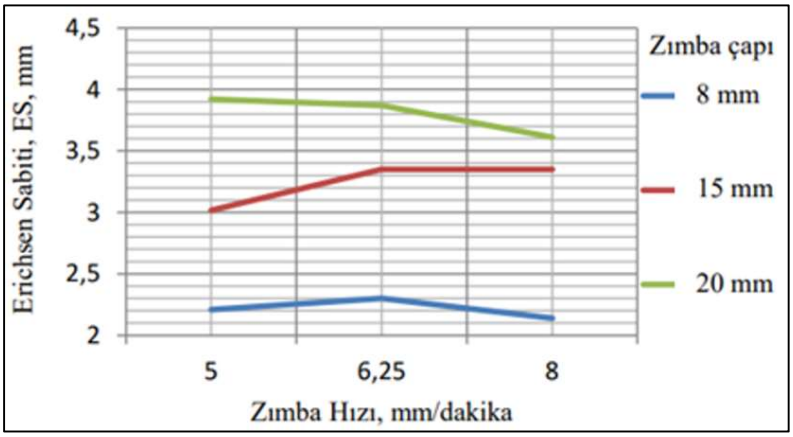
Şekil 2.7. Çeşitli zımba hızları ile gerçekleştirilen Erichsen testleri esnasında elde edilen zımba kuvvetti-çökertme derinliği eğrileri [32]

Son yıllarda, alüminyum alaşımı sacların kriyojenik ortamda şekillendirilebilme özellikleri inceleyen araştırmalar dikkat çekmektedir [33-39]. Yi ve diğerleri [33] 2Al4 alüminyum sacların kriyojenik sıcaklıklarda biçimlenebilirliğini araştırmışlardır. Kalınlığı 2 mm olan saclar ile 113 K, 203 K ve 298 K sıcaklıklarında Erichsen deneyleri yapılmıştır. 113 K sıcaklığında gerçekleştirilen tek eksenli çekme deneyleri sonucunda çekme dayanımının ve toplam uzamanın 298 K'de ulaşılan değerlere kıyasla sırasıyla yaklaşık %27 ve %51 oranında daha büyük olduğu görülmüştür. ES değeri 298 K sıcaklığında 7,87 mm olarak ölçülürken; sıcaklık 113 K'e düşürüldüğünde ES'nin 9,53 mm'ye ulaştığı gözlemlenmiştir. Kriyojenik sıcaklıklarda dislokasyon yoğunluğunun önemli ölçüde (ortalama %61) artması nedeniyle çatlak oluşumunun ve ilerlemesinin engellendiği ve bu sayede sac malzemenin şekillenebilirliğinin arttığı belirtilmiştir.

Kisko ve diğerleri [40] yüksek miktarlarda mangan içeren üç farklı ikizleme kaynaklı plastisite (TWIP) çeliği (6C22Mn, 2C21Mn2N ve 21Mn3Al3Si) sac malzemenin yüksek gerinim hızlarında biçimlenebilirliğini Erichsen deneyleri ile araştırmışlardır. Erichsen deneyleri esnasında ulaşılan gerinim hızının yaklaşık 1000 s^{-1} değerinde olduğu ifade

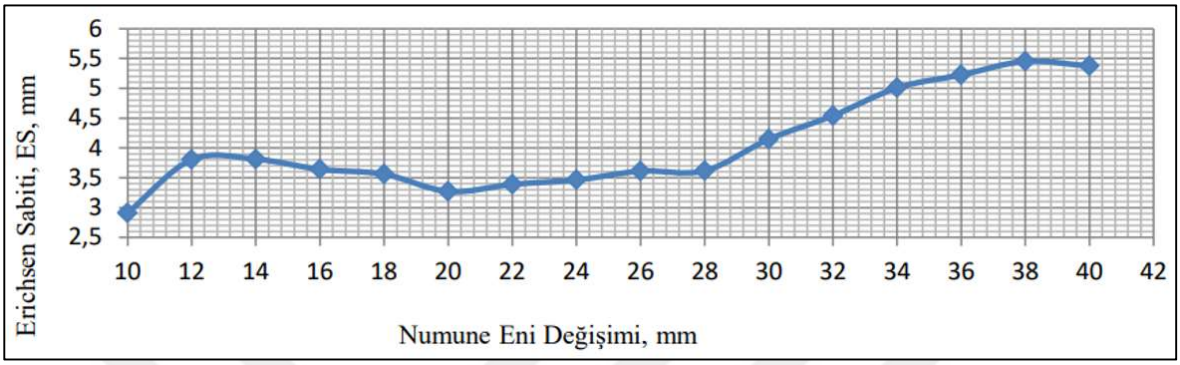
edilmiştir. Deneyler neticesinde 6C22Mn ve 2C21Mn2N sac malzemelerin Erichsen Sabitleri sırasıyla 12,8 mm ve 12,5 mm değerlerinde tespit edilmiş ve bu değerlerin düşük hızlarda gerçekleştirilen geleneksel Erichsen deneylerinde ulaşılanlar ile oldukça benzer olduğu belirtilmiştir. Yüksek gerinim hızının bu çelik sacların biçimlenebilirliğine kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmüştür. 6C22Mn ve 2C21Mn2N çelik sac malzemelerin yüksek hızlarda Erichsen Sabitinin değişmemesinin sebebi yoğun mekanik ikizlenmeye dayandırılmıştır. 21Mn3Al3Si sac malzemenin yüksek hızlı Erichsen deneyleri sonucu elde edilen ES değerinin (10,6 mm) diğer çelik sac malzemelerin ES değerlerinden daha az olduğu tespit edilmiş ve bunun nedeni olarak 21Mn3Al3Si çelik malzemenin yapısında bulunan östenit/ferrit ara yüzeylerinde meydana gelen çatlaklar işaret edilmiştir. Çalışmada, 6C22Mn ve 2C21Mn2N çelik sac malzemelerin yüksek gerinim hızlarında Erichsen deneyleri sonucunda kırılma gerinimlerinin yüksek hızlı tek eksenli çekme deneylerinde ulaşılan gerinim değerlerinden daha az olduğu dolayısıyla TWIP çelik sacların gererek biçimlendirilmesi esnasında kopmanın yayılmış boyun vermeden gerçekleşmiş olabileceği ifade edilmiştir.

Çakış ve diğerleri [41] Al 1050 sacın şekillenebilirliğinin, numune genişliği, zımba çapı ve zımba hızı ile olan ilişkisini araştırmışlardır. Testler, özel olarak imal edilmiş ve tam otomasyonlu Erichsen test cihazı ile 20 mm, 15 mm ve 8 mm çaplı küresel zımbalar kullanılarak yapılmıştır. Zımba boyutunun büyümesiyle Erichsen Sabitinin yükseldiği görülmüştür. 20 mm çaplı zımba ile yapılan deneylerde, zımba hızının artmasıyla ES değerinin küçüldüğü; zımba çapı 8 mm olduğunda ise Erichsen Sabitinin 6,25 mm/dk. zımba hızında en büyük değerine ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Erichsen sabitinin zımba boyutu ve hızı ile ilişkisi [41]

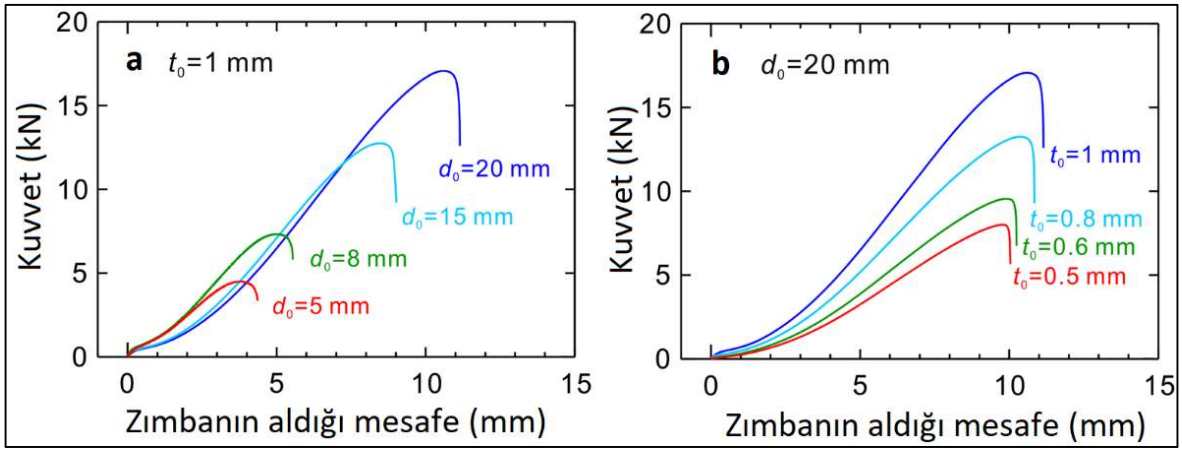
Gerçekleştirilen testler neticesinde; sac numunenin genişlik değeri zımba çapının yaklaşık 1,5 katı olduktan sonra genişliğinin büyümesiyle Erichsen sabitinin düzenli bir şekilde yükselmeye başladığı, numune genişliği zımba çapı ile aynı değerde iken ise (Şekil 2.9) Erichsen Sabitinin ve zımba kuvvetinin düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 2.9. ES değerinin sac numune genişliği ile değişimi (Zımba çapı 20 mm ve zımba ilerleme hızı 6,25 mm/dk.) [41]

Soren ve diğerleri [42] kalınlığı 2 mm olan AISI 1040 çelik sac malzemenin şekillenebilirliğini Erichsen deneyleri ile incelemişlerdir. Deneylerde kullanılan zımba çapı 20 mm ve sac numunelerin uzunluğu 75 mm değerinde belirlenmiş ve tüm testlerde bu değerler sabit tutulmuştur. 15 mm, 21 mm, 38 mm, 56 mm ve 75 mm olmak üzere beş faklı genişlikte saclar ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Sac genişliği 75 mm iken ES 11,95 mm değerinde tespit edilmiştir. En düşük Erichsen Sabiti (11,82 mm) ise 56 mm genişliğindeki sac numuneler ile yapılan deneyler sonucunda elde edilmiştir. Bu genişlik değerinden sonra sac numuneler daraldıkça ES değerlerinin arttığı tespit edilmiş ve sac genişliği 15 mm iken en yüksek ES değeri (22,17 mm) elde edilmiştir.

Kamikawa ve Morino [43] Erichsen deneyleri sonucunda oluşturulan zımba ilerlemesi-zımba kuvvetti grafiklerinin, sac kalınlığı ve zımba boyutu ile nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Zımbanın en büyük kuvvette ulaşıncaya kadar kat ettiği yol (uniform uzama bölgesi) ve bu noktadan çatlak meydana gelene kadar olan ilerleme (uniform olmayan uzama bölgesi) olmak üzere toplam zımba ilerleme mesafesi ikiye bölünerek araştırılmıştır. Sac numune kalınlığı ve zımba çapı değerleri büyüdükçe zımba yükünün arttığı görülmüştür (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Zımba ilerleme mesafesi-zımba kuvveti eğrilerinin değişimi; a) Zımba çapı ile, b) Sac kalınlığı ile [43]

Uniform uzamanın zımba boyutunun büyümesiyle artış sergilediği ancak sac kalınlığından çok az etkilendiği; uniform olmayan uzamanın ise kalınlık değerinin yükselmesiyle arttığı ve zımba çapı ile değişiminin ise önemsiz düzeyde olduğu gözlemlenmiştir.

Toros ve diğerleri [44] çeşitli kalınlıklardaki ferritik paslanmaz çelik sac malzemelerin biçimlenebilirlik kabiliyetlerinin katı oksit yakıt pillerinde kullanımları için yeterliliğini araştırmışlardır. Numunelerin kalınlık değerinin büyümesiyle ile sac metal malzemelerin şekillenebilirlik kabiliyetinde artış tespit edilmiştir. Kalınlık 0,2 mm olduğunda ES 7,0 mm ve kalınlık 1,0 mm'ye çıktığında ES 9,8 mm büyüklüklerinde elde edilmiştir. Erichsen testleri sonucunda 0,2 mm kalınlıktaki çelik sacların şekillenebilirliklerinin bile bu sac malzemenin katı oksit yakıt pillerinde kullanımı için elverişli olduğu görülmüştür.

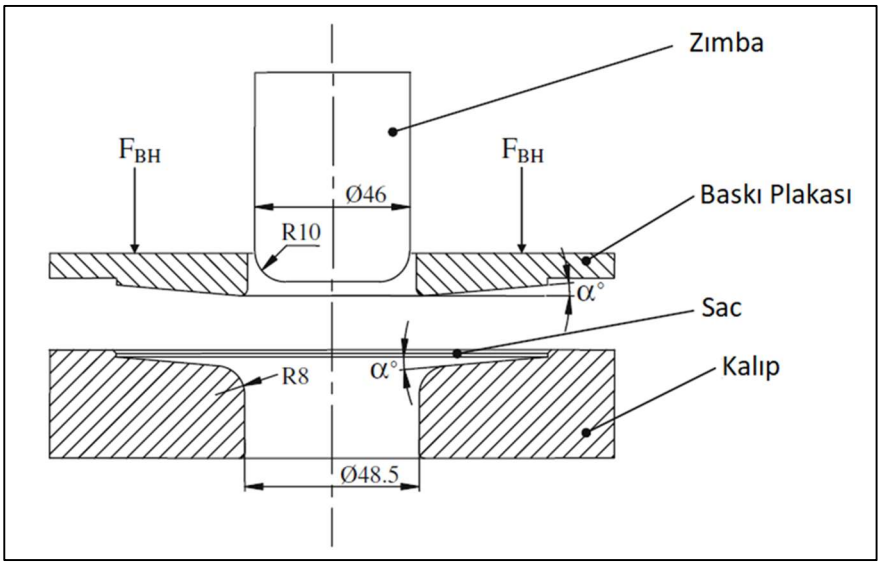
Reddy ve diğerleri [45] kalınlık ve sürtünme koşullarının bakır, paslanmaz çelik, pirinç ve alüminyum sacların biçimlenebilirliğine etkisini araştırmışlardır. Erichsen deneylerinde sürtünmeyi azaltmak amacıyla hint yağı, gres yağı ve lanthax gres, kalıp ile sac temas yüzeyine sürülmüştür. Numunelerin kalınlık değerinin büyümesiyle ile ES'nin yükseldiği gözlemlenmiştir. Yağlama işleminin ES değerlerinde artışa neden olduğu ve gres yağının, hint yağı ve lanthax gres yağına göre ES'yi en çok arttıran yağlayıcı olduğu tespit edilmiştir. Erichsen deneyleri uygulanan sac numunelerde boyun verme sonucu incelme meydana gelmekte ve çember benzeri bir iz oluşmaktadır. Oluşan çember şeklindeki alanın yarıçapı büyüdükçe ES değerinin azaldığı belirtilmiştir.

Şener ve Kayalı [46] galvaniz kaplanmış ve kaplamasız düşük karbonlu çelik sac numunelerin biçimlenebilirliğini Erichsen deneyleri yardımıyla araştırmışlardır. Deneylerde 1000 N sıkıştırma kuvveti ve 2,4 mm/dk. zımba hızı uygulanmıştır. PVC, madeni yağ, Teflon ve polietilen film yağlayıcı olarak kullanılmış ve ES değerlerinin değişimi ölçülmüştür. Deneyler sonucunda ES değerini en çok arttıran yağlayıcının PVC olduğu görülmüştür.

Yoshimura ve diğerleri [47] buğday unu ve su ile hazırladıkları süspansiyonun yağlayıcı olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Titanyum (CP Ti-1), paslanmaz çelik ve karbon çeliği sac numunelerin şekillenebilirliğinin hazırlanan yağlayıcı ile olan değişimi incelemiştir. Çeşitli miktarlarda (%5-%30) un içeriğine sahip süspansiyonlar ile yapılan Erichsen deneyleri sonucunda ES'nin un miktarının artışı ile yükseldiği gözlemlenmiştir. %30 unlu süspansiyonun uygulandığı bütün testler sonucunda gres yağıyla erişilenlerden daha büyük ES değerlerine ulaşılmıştır. Unun yapısında bulunan protein ve lipit kaplı nişasta tanelerinin sürtünmeyi azalttığı ve böylelikle ES değerini yükselttiği belirtilmiştir.

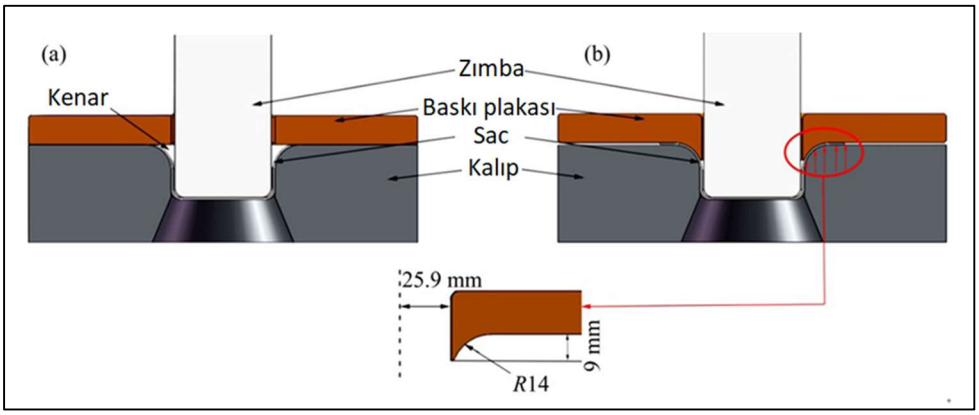
2.2. Derin Çekme İşlemi Literatür Özeti

Literatürde kalıp ve baskı plakası tasarımlarının derin çekme işlemine etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma mevcuttur. Seçgin ve Savaş'ın yapmış olduğu çalışmada [48], altı farklı sac tutucu ve kalıp kullanılarak, kalıp ve sac tutucu tasarımının etkileri incelenmiştir. 0°, 2,5°; 5,0°; 7,5°; 10,0°; 12,5° ve 15° açı değerine sahip sac tutucu ve kalıplar ile çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde 1 mm kalınlığındaki düşük karbonlu çelik (DIN 10130-99-DC05) saclar kullanılmıştır. Deneylerde 1,15 mm çekme boşluğunu sağlayan, delik çapı 48,5 mm olan kalıp ve 46,2 mm çapa sahip zımba tercih edilmiştir. Zımba ve kalıp radyüsleri sırasıyla 10 ve 8 mm olup tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Tüm testlerde zımba hızı 4 mm/s değerinde seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda limit çekme oranının kalıp açısının artmasıyla arttığı, 12,5° açı değerinden sonra ise azaldığı görülmüştür. 15° açıya sahip kalıp ve sac tutucu ile gerçekleştirilen deneylerde 2,2 limit çekme oranına sahip silindirik kabın duvarında kırışıklıkların oluştuğu gözlemlenmiştir. Kalıp ve baskı plakası açısı 12,5° seçildiğinde ise 2,2 limit çekme oranının başarılı bir şekilde elde edilebileceği çalışmada sunulmuştur. Açı değeri 0° olduğunda ise yalnızca 1,75 limit çekme oranını için başarılı üretim yapılabilmiştir.



Şekil 2.11. Derin çekme kalıbının şematik diyagramı [48]

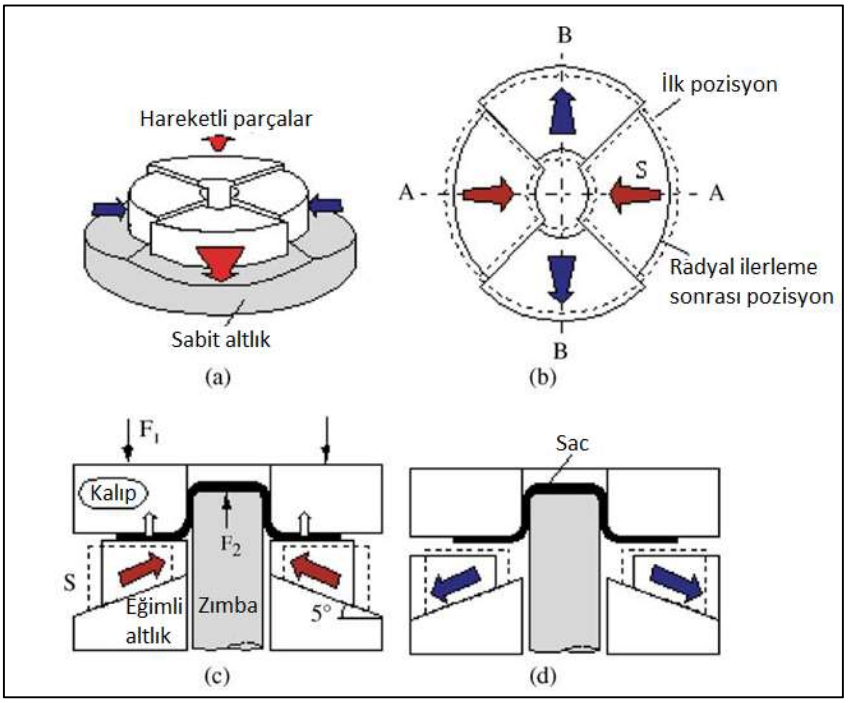
Huang ve diğerleri [49], düz sac tutucu ve kıvrımlı sac tutucunun, 5182-O alüminyum sacın oda sıcaklığında derin çekme işlemi sırasındaki deformasyonuna etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde 1 mm kalınlıktaki 5182 alümiyum alaşımı iki saat boyunca 330 °C sıcaklıkta tavlanmış ve sonrasında havada soğutulmuştur. Düz sac tutucu ile yapılan derin çekme deneylerinde, sac boyutuna bağlı olarak 3 kN ile 10 kN aralığında değişen, işlem süresince sabit tutulan sac tutucu kuvvetleri uygulanmıştır. Kıvrımlı sac tutucu kullanıldığında ise sac tutucu kuvveti için 1,5 kN ile 4 kN aralığında sabit değerler seçilmiştir. Zımba hızı tüm testler için 5 mm/dk değerinde ayarlanmış ve yağlayıcı olarak hidrolik yağ seçilmiştir. Zımba çapı ve radyüsü sırasıyla 50 mm ve 5 mm değerlerindedir, kalıp ise 53,64 mm delik çapına sahiptir.



Şekil 2.12. Derin çekme deneyinde kullanılan aparatların şematik diyagramı; a) Düz sac tutucu, b) Kıvrımlı sac tutucu [49]

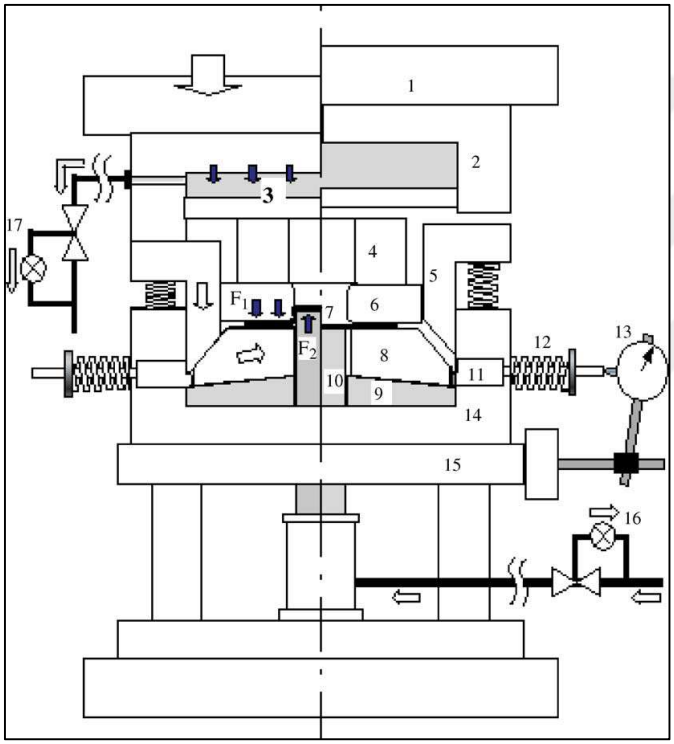
Kıvrımlı sac tutucu ile yapılan deneylerde, kıvrımlı kısmın sac metale zarar vermesinden dolayı başlangıçta düz sac tutucu kullanılmış ve zımba 9 mm'den fazla ilerledikten sonra düz sac tutucu ile kıvrımlı sac tutucu yer değiştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, düz sac tutucu kullanıldığında alüminyum sacın limit çekme oranı 1,7 değerinde bulunmuştur. Çekme oranı 1,7 değerini aştığında kırışıklık oluşumunun başladığı görülmüştür. Kıvrımlı sac tutucu ile yapılan derin çekme işlemlerininde ise kulaklanma oluşumunun azaldığı ve kırışıklık oluşumunun ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, alüminyum sacın limit çekme oranı 2,0'a yükselmiş ve kalınlık dağılımının daha homojen olduğu görülmüştür.

Hassan ve diğerleri [50] sürtünme katkılı yeni bir derin çekme yöntemini çalışmalarında sunmuştur. Geliştirilen metal sac tutucu iki katmandan oluşmaktadır: alt kısımdaki parça sabittir ve 5°'lik eğime sahip dört yüzeyi vardır, üst katman ise dört parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar radyal yönde hareket edebilmektedir. İlk adımda karşılıklı iki parça A doğrultusunda birbirine aynı hızla yaklaşırken diğer iki parça B doğrultusunda zıt yönlere hareket ederek birbirinden uzaklaşmaktadır. Bu esnada bu parçaların sac numene ile olan teması kesilmektedir. İkinci adımda ise bu kez B doğrultusunda hareket eden parçalar radyal ilerleme ile birbirine yaklaşırken A doğrultusundaki parçalar birbirinden uzaklaşır ve sac metale temas etmezler.



Şekil 2.13. Sac tutucu konstrüksiyonun ve eğimli parçaların hareketlerinin şematik gösterimi [50]

Radyal ilerleme miktarı (S) için 0,5 mm, 1 mm ve 2 mm olmak üzere üç farklı değer seçilmiştir. Deneylerde 32 mm iç çapa, 120 mm dış çapa ve 3 mm profil radyüsüne sahip kalıp ve 30 mm çaplı zımba kullanılmıştır. Zımba hızı 0,8 mm/s değerinde belirlenmiştir. Sac tutucunun eğimli sabit parçası 116 mm dış çapa ve 35 mm iç çapa sahiptir. Hareketli parçaların radyal yöndeki hızları 0,2 mm/s ve sac tutucu kuvveti 40-100 kN aralığında seçilmiştir. Deneylerde 0,5 mm kalınlığında yumuşak alüminyum (Al-O) saclar kullanılmıştır. Kullanılan sac numunelerin çapları 86 mm ve 110 mm'dir. 86 mm çaplı saclar için çekme oranı 2,87 iken 110 mm çapa sahip saçlar için 3,67 değerindedir.

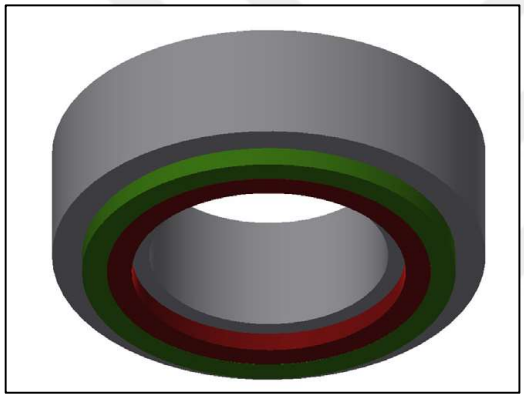


Şekil 2.14. Derin çekme deneylerinde kullanılan ekipmanların şematik gösterimi; 1-Pres koçu, 2-Hidrolik silindir, 3-Yağ basıncı, 4-Destek blok, 5-Sıkıştırma aparatı, 6-Kalıp, 7-Sac, 8-Konik sac tutucu, 9-Sac tutucu sabit taban plakası, 10-Zımba, 11-Ayarlama pimi, 12-Yay, 13-Komparatör, 14-Konteyner, 15-Kalıp seti, 16-Kontrol valfi, 17-Emniyet valfi [50]

Sac tutucu ile sac arasında sürtünme kuvveti gerekli olduğundan sac ile baskı plakası ara yüzeyine yağlama yapılmamıştır fakat sac ile kalıp arasına teflon film yerleştirilerek sürtünme azaltılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda radyal ilerleme miktarının büyümesiyle kırışıklık oluşumunun artığı gözlemlenmiştir. Radyal ilerleme miktarı çok küçük olduğunda ise istenilen yükseklikte kap üretmek için gerekli olan çekme operasyonu sayısı artmaktadır bu nedenle radyal ilerleme miktarı için uygun değer değer 1 mm olarak

seçilmiştir. Sac tutucu kuvvetinin 80 kN'dan büyük seçilmesi ile derin çekme işleminin verimliliğinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. 100 çekme operasyonu sonrasında çekme oranı 3,67 olan kap başarılı bir şekilde imal edilebilmiştir.

Costa ve diğerleri [51] yüksek mukavemetli çelik sacların şekillendirilebilirliğini artırmak için farklı rijitliğe sahip halkalardan oluşan sac tutucu tasarlamışlardır. Deneylerde 85 mm çaplı 1 ve 1,5 mm kalınlığında DP1000 ile 1 mm kalınlığındaki M1200 çelik saclar derin çekilerek 50 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde kaplar üretilmiştir. Derin çekme işlemi iki adımda gerçekleştirilmiştir, her adımda 10 mm derinlik verilmiştir ve 58,8 kN büyüklüğünde sac tutucu kuvveti uygulanmıştır.

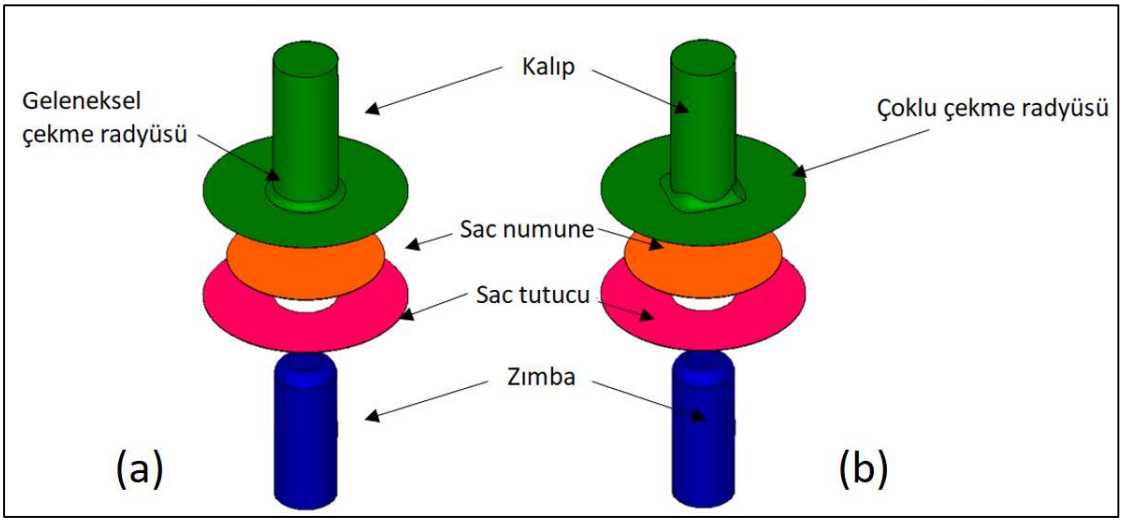


Şekil 2.15. Farklı rijitliğe sahip halkalardan oluşan sac tutucu [51]

İçteki ve dıştaki parçanın ikisi de çelik (SS); içteki ve dıştaki parçanın ikisi de teflon (TT); içteki parça çelik, dıştaki parça teflon (ST) ve içteki parça teflon, dıştaki parça çelik (TS) olacak şekilde sac tutucunun halkaları değiştirilerek dört farklı sac tutucu deneylerde kullanılmıştır. SS sac tutucu ile yapılan deneyler sonucunda 1 mm kalınlığındaki DP1000 ve M1200 çelik sacların derin çekme işleminin ikinci adımında, 1,5 mm kalınlığındaki DP1000 sacın ise birinci adımda yırtıldığı görülmüştür. TT sac tutucu ile gerçekleştirilen deneylerde 1 mm kalınlığındaki saclarda çekme işleminin ikinci adımında kırışıklıklar gözlemlenirken, 1,5 mm kalınlığındaki DP1000 çelik saclar başarıyla şekillendirilmişlerdir. Farklı rijitliğe sahip halkalardan oluşan sac tutucular (ST, TS) ile yapılan tüm deneylerin başarılı olduğu ve bu sac tutucular ile imal edilen kapların et kalınlığında meydana gelen incelmelerin azaldığı ifade edilmiştir.

Phanitwong ve Thipprakmas [52], limit çekme oranını artırmak için önerdikleri çoklu

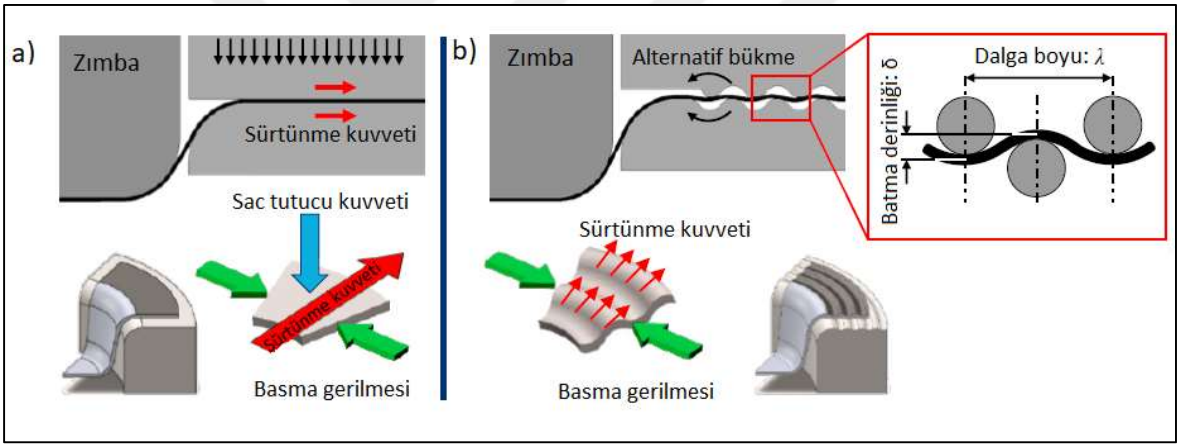
çekme radyüsüne sahip kalıp tasarımını çalışmalarında sunmuşlardır. Büyük radyüsün çekme işlemi sırasında sacın haddeleme yönüne 45°'lik doğrultuda, küçük radyüsün ise 90°'lik doğrultuda konumlanması gerektiğini belirtmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla tasarlanan çoklu çekme radyüslü kalıp ve geleneksel kalıpta yapılan çekme işlemleri sonuçları karşılaştırılmıştır. Analizlerde orta karbonlu 0,5 mm kalınlığındaki çelik sac numuneler 41 mm çapında kalıp ve 40 mm çapında zımba yardımıyla çekilmiştir. Zımba radyüsü 8 mm ve geleneksel kalıbın radyüsü 3,5 mm dir. Çoklu radyüse sahip kalıplar için radyüs değerleri 3,5-5; 3,5-7 ve 3,5-9 mm aralığında olmak üzere üç farklı tasarım yapılmıştır.



Şekil 2.16. Derin çekme simülasyon modelleri; a) Geleneksel derin çekme modeli, b) Çoklu çekme radyüsü ile derin çekme modeli [52]

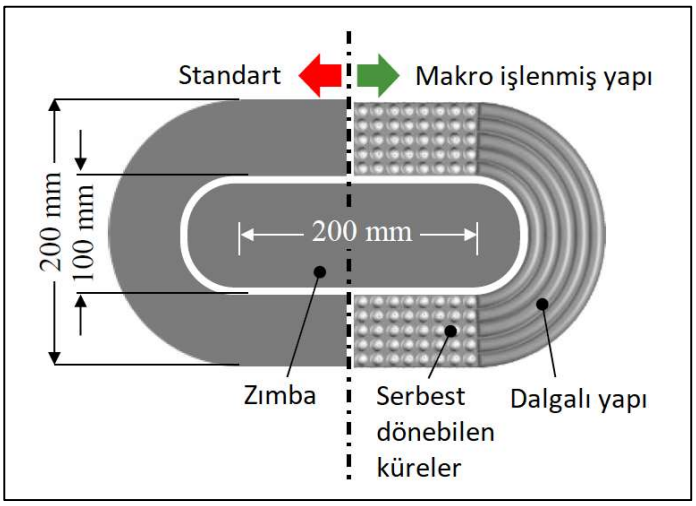
3,5-7 ve 3,5-9 mm radyüslere sahip kalıplar ile 2,75 limit çekme oranına sahip silindirik kapların üretilebileceği yapılan analizler sonucunda ortaya koyulmuştur fakat 3,5-5 mm radyüsü olan kalıpla yapılan analizlerde 2,75 limit çekme oranı için sonuç başarısız olmuştur. 3,5-9 mm radyüsleri olan kalıptan çekilerek üretilen kaplar, 3,5-7 mm radyüslü kalıpla imal edilenler ile kıyaslandığında kulaklanmanın azaldığı görülmüştür. Radyüs değerinin büyümesi, hadde yönüne göre 45°'lik doğrultudaki malzeme akışını kolaylaştırmış ve böylelikle daha simetrik kaplar üretilebilmiştir. Yapılan deneyler ve sonlu elemanlar analizleri sonucunda, geleneksel kalıp ile karşılaştırıldığında çoklu radyüse sahip kalıp kullanımı ile limit çekme oranının %22 arttığı, kulaklanma oluşumunun ise yaklaşık %40 azaldığı ve daha homojen duvar kalınlığı olan kapların üretilebildiği görülmüştür.

Mousavi ve diğerleri [53] yağlayıcı olmadan uygulanabilecek derin çekme işlemi için tasarlanan çekme takımı ve takım aşınmasını azaltmak amacıyla geliştirilen koruyucu kaplamayı çalışmalarında incelemişlerdir. Sürtünmeyi azaltmak için sac numune ile kalıp ve sac tutucu arasındaki temas alanını küçültmeye yönelik makro işlenmiş çekme takımı tasarlanmıştır. Makro işlenmiş yapı sac ile kalıp arasındaki temasın çizgisel ya da noktasal olmasını sağlamaktadır. Bu durumun sacın kırışma riskini yükselttiği belirtilmiş ve alan atalet momentinin arttırılması ile bu problemin çözülebileceği çalışmada bildirilmiştir. Sac tutucunun kalıp içerisine batırılma miktarı ile sacın alan atalet momentinin ayarlanabildiği ve kırışık oluşumuna karşı sacın dirençli hale getirilebileceği ifade edilmiştir. Dalga yapısı kullanıldığında sac ile kalıp temas alanının %80, serbest dönebilen küresel elemanlarla ise %95 oranında küçültülebileceği görülmüştür. Dalga boyu (λ) ve batma derinliği (δ), alan atalet momentinin ayarlanmasında faydalanılan iki parametredir.



Şekil 2.17. Derin çekme deney düzenekleri; a) Standart çekme kalıbı ve sac tutucu, b) Makro işlenmiş çekme kalıbı ve sac tutucu [53]

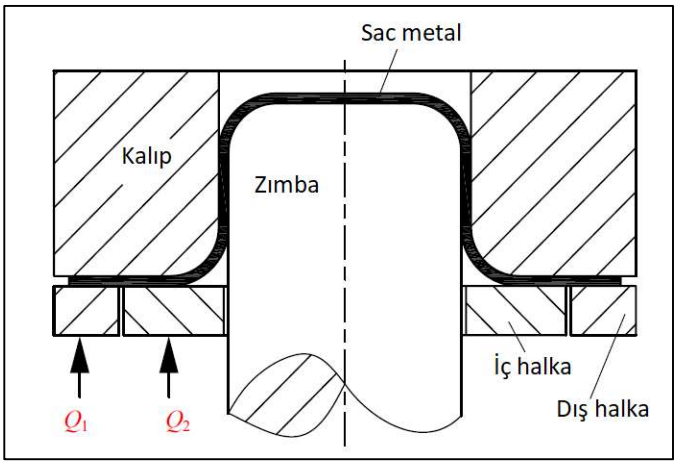
Kalıp radyüsü düşük sürtünme katsayısına ve yüksek aşınma direncine sahip olan tetrahedral amorf karbon (ta-C) ile kaplanmıştır. Çalışmada DC04 çelik sac numuneler malzeme olarak seçilmiş ve ta-C kaplama kalınlığı 3-4 μm'dir. Kaplama yüzeyi lazer ile işlenerek mikro düzeyde işlenmiş yüzey dokusu elde edilmiştir. Analizler sonucunda, standart çekme takımı kullanıldığında 160 kN zımba kuvvetine ihtiyaç olduğu, serbest dönebilen küresel elemanlar ve dalgalı yapının birleşiminden oluşan makro yapıya sahip çekme takımında (Şekil 2.18) ise 95 kN değerinde çekme kuvvetinin yeterli olduğu tespit edilmiştir.



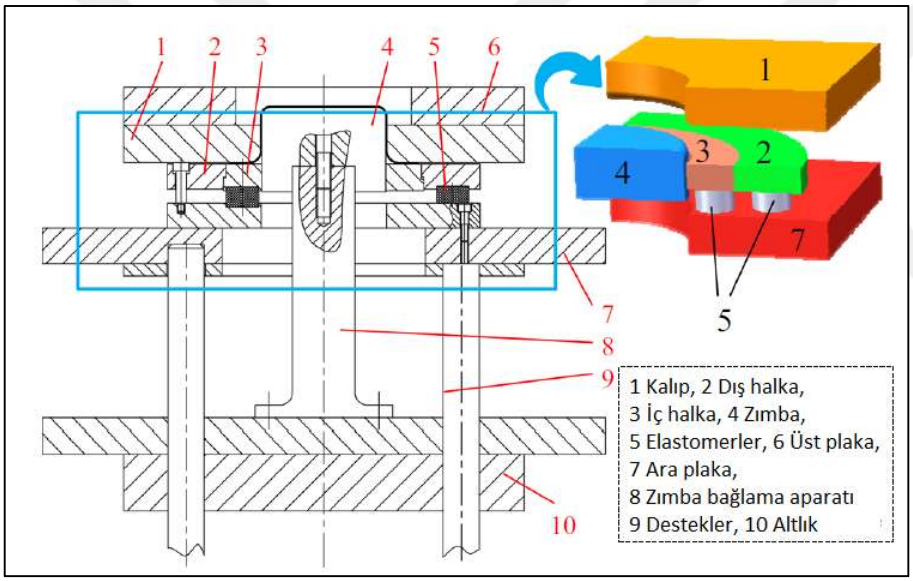
Şekil 2.18. Standart (Sol) ve dalgalı yapı ile beraber kürelerden oluşan (Sağ) derin çekme tasarımı [53]

Yapılan kaplama sonrasında sürtünme katsayısı 0,17 değerinde bulunmuştur ve bu değerin kaplama olmayan yüzey ile elde edilenden neredeyse %25 daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Lazer ile kaplama yüzeyinin mikro ölçekte işlenmesinin, sürtünme katsayısını değiştirmediği fakat aşınma direncini yükselttiği gözlemlenmiştir.

Zhang ve diğerleri [54], baskı plakası kuvvetini farklı flanş bölgelerine bağımsız ve efektif olarak aktarabilen iç içe iki halkadan oluşan yeni bir sac tutucuyu çalışmalarında sunmuşlardır. Geleneksel baskı plakası ile iki parçadan oluşan baskı plakasının karşılaştırılması sonlu elemanlar yöntemi ve de deneysel çalışmalar ile yapılmıştır. Çalışmada baskı plakasının dış halkasına uygulanan kuvvet Q_1, iç halkasına uygulanan kuvvet ise Q_2 olarak tanımlanmıştır. İki halkadan oluşan baskı plakasının derin çekme üzerine etkileri iç halka ile dış halka arasındaki kesişim çapına (D_p) ve Q_2/Q_1 oranına (λ) bağlı olarak incelenmiştir. Farklı değişkenlerin (D_p, λ) baskı plakası kuvvetinin dağılımına etkisini incelemek için ANSYS yazılımı kullanılmış ve toplam baskı plakası kuvveti 4 kN değerinde seçilmiştir. λ=1/3 seçildiğinde her D_p (200, 180, 160, 140 mm) değeri için en büyük sac tutucu basıncının dış halkada olduğu görülmüştür ve bu basınç dağılımının kırışıklıkların önlenmesi için gerekli olduğu belirtilmiştir. λ=3/1 iken ise en yüksek basınç değerinin iç halkada ortaya çıktığı ve bunun istenmeyen bir basınç dağılımı olduğu ifade edilmiştir. D_p değerinin artmasıyla basıncın dış halkada yükseldiği, iç halkada ise düştüğü görülmüştür.



Şekil 2.19. İki halkadan oluşan baskı plakasının şematik diyagramı [54]

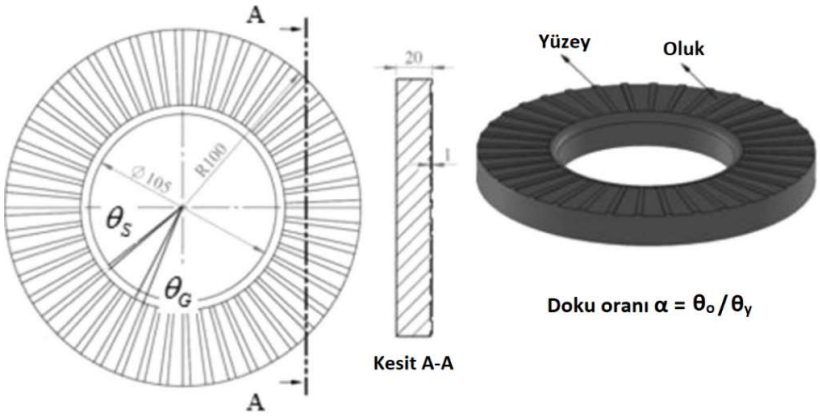


Şekil 2.20. Derin çekme düzeneğinin aparatları [54]

Tasarlanan baskı plakasının sac şekillendirmeye etkisi DYNAFORM yazılımı ile simülasyonlar yapılarak araştırılmıştır. Çapı 220 mm ve kalınlığı 1 mm olan saclar, λ=1/1, λ=1/2, λ=1/3 oranları ve 156 mm D_p değeri seçilerek ve de 3 kN basma kuvveti altında analiz edilmişlerdir. Karşılaştırma için geleneksel baskı plakası ile de simülasyonlar yapılmıştır. λ=1/1 oranı ile yapılan simülasyon sonucunda geleneksel baskı plakası ile yapılana kıyasla daha fazla kırışıklık oluştuğu gözlemlenmiştir. λ=1/2 seçildiğinde kırışıklık oranının ciddi oranda azaldığı ve λ=1/3 olduğunda hatasız bir şekilde çekilmiş kap elde edildiği görülmüştür. Simülasyon sonuçlarını doğrulamak için deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Toplamda 12 adet 20 mm çapında ve 25 mm yüksekliğinde poliüretan çubuklar istenilen λ oranını ayarlamak için sac tutucu altına yerleştirilmiştir.

Deneylerde iç halkanın çapı 103,2 mm, D_p çap değeri 156 mm ve dış halka çapı 220 mm olarak seçilmiş ve bu değerler sabit tutulmuştur. Tüm deneyler oda sıcaklığında 10 mm/s çekme hızında ve makine yağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 1 mm kalınlığında ve 220 mm çapındaki 08Al ve AA3003 sac malzemeler derin çekme işlemi için seçilmişlerdir. 08Al malzemenin 6,8 kN baskı plakası altında 33 mm çekme derinliğine ulaşıncaya kadar çekilmesiyle elde edilen kaplar incelenmiştir. Geleneksel sac tutucu kullanıldığında kırışıklıkların oluştuğu, λ oranı 1/1 olduğunda kırışıklık miktarının azaldığı, λ =1/3 iken kırışıklıkların ortadan kaybolduğu ve λ=3/1 değerinde ise kabın yırtıldığı görülmüştür. 12 kN baskı plakası kuvveti altında ve λ=1/3 iken AA3003 malzemeden başarılı bir şekilde silindirik kap imal edilebileceği ortaya koyulmuştur.

Zhen ve diğerleri [55] çalışmalarında makro ölçekte işlenmiş yüzeye sahip sac tutucu kullanılarak çekilen alüminyum silindirik kabın flanş kısmında oluşan kırışmaların davranışlarını analitik ve deneysel yöntemlerle incelemişlerdir. Deneylerde 1,5 mm kalınlığında ve 170 mm, 180 mm ve 190 mm çaplarındaki AA6082-T6 alüminyum saclar ve de 1,7; 1,8 ve 1,9 çekme oranlarını sağlayan 100 mm çapında zımba kullanılmıştır. Zımba radyüsü 10 mm ve çekme hızı saniyede 75 mm olarak seçilmiştir. Çekme boşluğu sac kalınlığının %10'u kadardır. Deneylerde bir tanesi düz ve diğer üçü makro dokulu yüzeye sahip dört farklı sac tutucu kullanılmıştır. Yüzey ve oluk açıları sırasıyla θ_y ve θ_o olarak tanımlanmıştır ve doku oranı (α) oluk açısının yüzey açısına oranıdır.

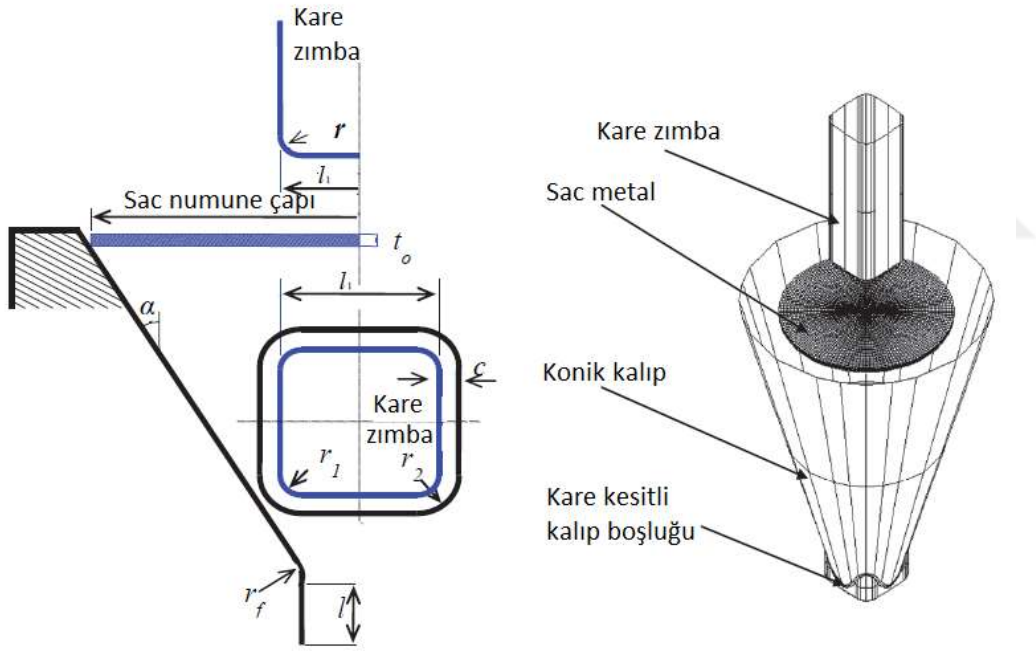


Şekil 2.21. Makro ölçekte işlenmiş sac tutucunun yüzey dokusu [55]

Çalışma sonucunda düşük doku oranı kullanıldığında (α = 1) alüminyum saclar kırışıklık oluşmadan derin çekilebilmektedir. α=3 ve α=5 olduğu deneylerde çekme işlemi sırasında

çaptaki azalma belirli bir eşik değerini aştığında (bu eşik değeri α'nın artması ile azalmaktadır) kırışıkların oluştuğu görülmüştür. Ayrıca, çekme oranının artmasının kırışık oluşumunu artırdığı gözlemlenmiştir.

Pirinç ve alüminyum malzemeden kare şeklinde kapların çekilebilirliğini arttırmak için Hezam ve diğerleri [56] tarafından yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem basit bir kalıp setine sahiptir, dairesel kesitli sac metal düz alınlı kare zımba ile konik kalıbın kare formundaki kalıp boşluğundan kolaylıkla çekilebilmektedir. Geometrik parametrelerin kare kabın şekillendirilebilirliğine etkilerini incelemek için sonlu elemanlar yönteminden faydalanılmıştır. Kalıp ve zımba köşe radyüslerinin, yarım koniklik açısının (α) ve sac kalınlığının etkileri ağırlıklı olarak incelenmiştir. Bu parametrelerin etkilerini değerlendirmek için limit çekme oranı dikkate alınmıştır.

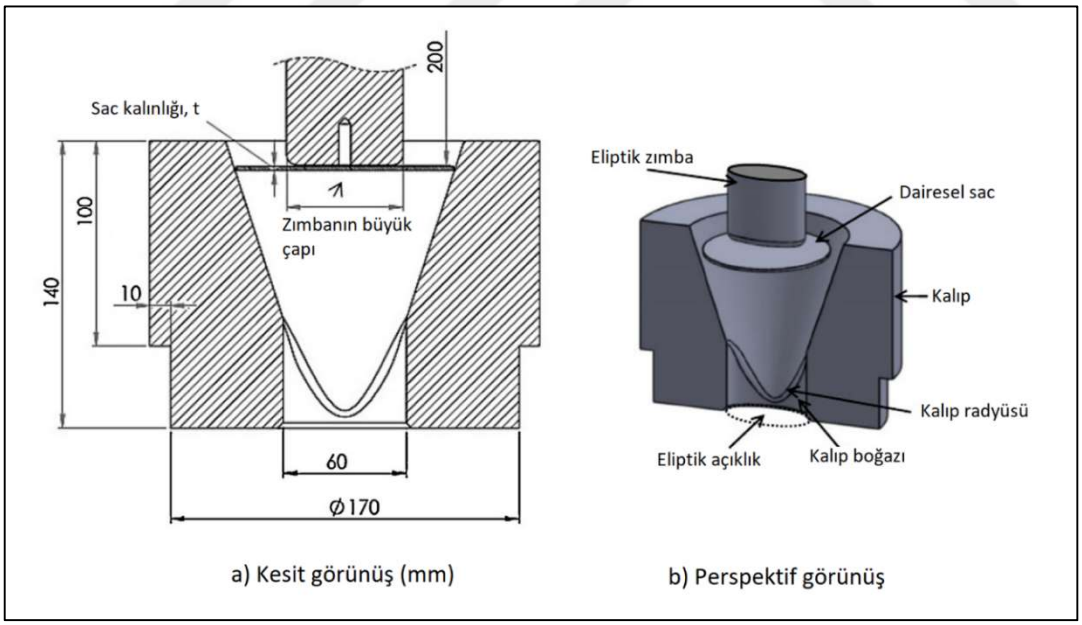


Şekil 2.22. Geometrik parametreler ve sonlu elmanlar modeli [56]

Yarım koniklik açısı α=18° derece olduğunda alüminyum ve pirinç numuneler için limit çekme oranının en yüksek seviyeye ulaştığı görülmüştür. Analizler 5, 7, 10, 15 ve 22 mm olmak üzere beş farklı kalıp köşe radyüsü ile gerçekleştirilmiş. Alüminyum malzeme için 10 mm kalıp köşe radyüsü, pirinç sac için ise 14 mm kalıp köşe radyüsü seçildiğinde en büyük limit çekme oranına erişilebileceği tespit edilmiştir. Analizlerde 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 ve 3,0 mm olmak üzere altı farklı sac kalınlığı kullanılmıştır. Limit çekme oranının 2,0 mm sac kalınlığına kadar ciddi oranda arttığı; 2,0 mm sac kalınlığından sonra ise az

miktarda yükseldiği gözlemlenmiştir. Simülasyonlar, parametrelerin optimize edilmesi ile alüminyum için 3,15 ve pirinç için ise 3,1 limit çekme oranına ulaşılabileceğini göstermiştir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalar, pirinç için 3,07 ve alüminyum için ise 2,93 limit çekme oranlarına sahip kare kapların başarılı bir biçimde üretilebileceğini kanıtlamıştır. Geleneksel derin çekme yöntemlerinde sac tutucu kullanılmasına rağmen limit çekme oranının nadiren 2,3 değerini aştığı belirtilmiştir. Geleneksel derin çekme yöntemleri ile kıyaslandığında limit çekme oranlarındaki artışın oldukça dikkate değer olduğu ortaya konmuştur.

Dhaiban ve diğerleri [57] eliptik kabın, sac tutucu kullanılmadan, düz alınlı eliptik bir zımba ve konik kalıptan faydalanılarak çekilebilirliğini inceleyen yeni bir yöntemi çalışmalarında sunmuşlardır. Yarım koniklik açısının, kalıp arayüz radyüsünün, çekme boşluğunun sac kalınlığına oranının (c/t) ve kalıbın eliptik boşluk derinliğinin limit çekme oranına ve çekme yüküne olan etkileri sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Analizler sonrasında 18° ve 10° yarım koniklik açı değerlerinde zımba yükünün minimum olduğu görülmüş ve kalıp boyunu küçültmek için 18° uygun açı değeri olarak seçilmiştir.

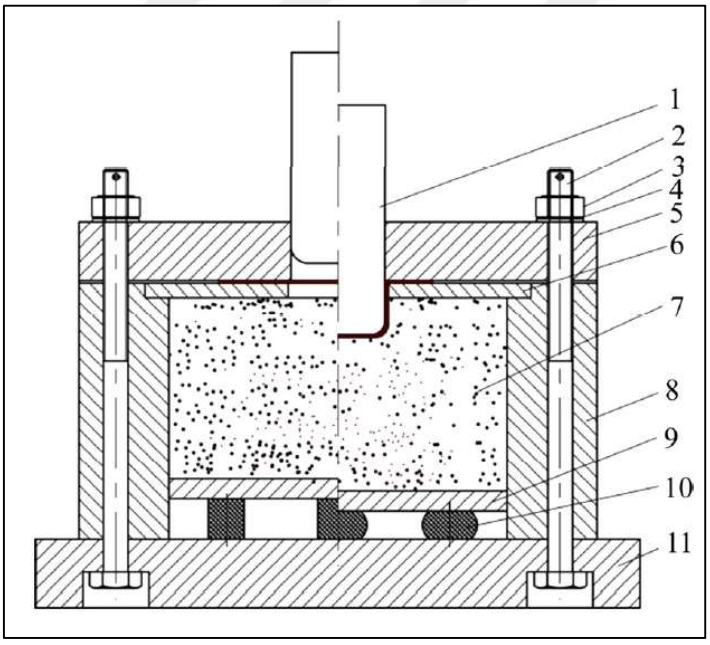


Şekil 2.23. Eliptik zımba ve konik kalıp ile eliptik kap çekme işlemi [57]

Deneyleri gerçekleştirmek için tasarlanan kalıp konik ve eliptik olmak üzere iki yüze sahiptir ve eliptik boşluğun büyük çapı 60 mm, küçük çapı ise 30 mm değerindedir. Büyük çapı 54 mm ile 57 mm aralığında, küçük çapı ise 24 mm ile 27 mm aralığında değişen eliptik kesite sahip yedi farklı zımba deneyler için imal edilmiştir. Zımba çapları 0,5 mm

artış adımları ile tasarlanmış ve elipsin büyük çap/küçük çap oranının 2,00- 2,25 aralığında olduğu belirtilmiştir. Deneylerde çekilen pirinç (CuZn33) sac kalınlıkları 1,5; 1,9; 2,4 ve 3,0 mm değerlerindedir. Yapılan simülasyonlar sonucunda eliptik kalıp açıklığı derinliğinin artmasının zımba yükünü artırdığı gözlemlenmiştir ve 3 mm derinlik uygun değer olarak belirlenmiştir. Kalıp içerisindeki konik yüzey ile eliptik yüzey arasındaki radyüs değerinin küçülmesinin çekme kuvvetini artırdığı tespit edilmiştir. Zımba yükünün c/t oranının büyümesi ile düştüğü ve 1,5 mm, 1,9 mm ile 2,4 mm kalınlığındaki saclar için c/t oranının artmasıyla limit çekme oranının yükseldiği gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda 2,28 limit çekme orasına sahip eliptik şekilli pirinç kabın başarılı bir şekilde üretildiği ve bu çekme oranının geleneksel yöntemler ile elde edilenlere kıyasla oldukça yüksek olduğu vurgulanmıştır.

Literatürde kalıp boşluğunun sıvı veya toz ile doldurulduğu derin çekme çalışmaları da bulunmaktadır. Chen ve diğerleri [58] toz yardımı ile sac metallerin şekillendirilebileceği yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmada kalıp boşluğu toz ile doldurulmuş ve yöntem, toz boşluklu esnek şekillendirme olarak adlandırmıştır.



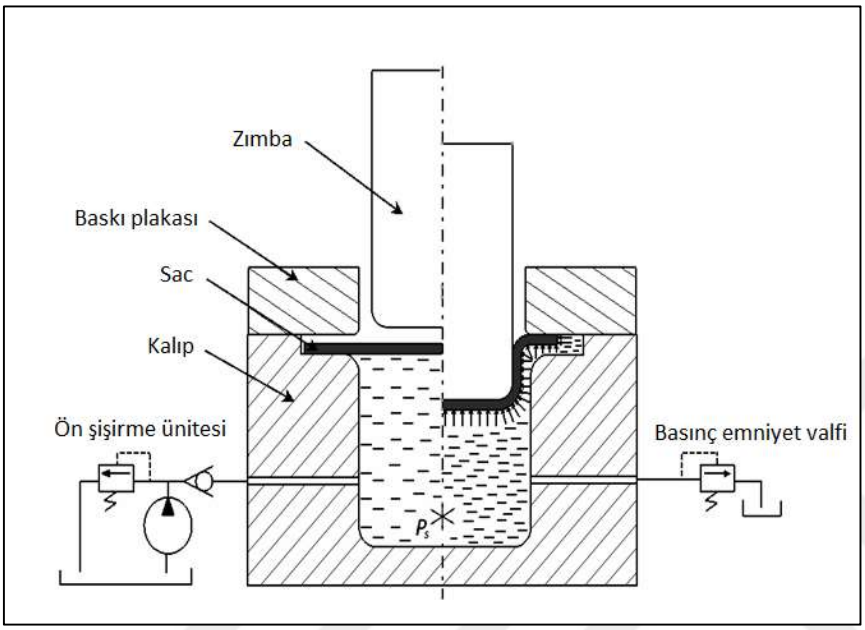
Şekil 2.24. Toz boşluklu esnek şekillendirme kalıbının çizimi (1-Zımba, 2-Cıvata, 3-Somun, 4-Düz pul, 5-Klavuz plaka, 6-Boşluk plakası, 7-Toz, 8-Boşluk destek plakası, 9-Alt plaka, 10-Kauçuk bar, 11-Kalıp tutucu) [58]

Çekme işlemi sırasında tozlar ile sac numune arasındaki kuvvetin tozların kademeli olarak sıkışması nedeniyle arttığı böylelikle deformasyon bölgesindeki gerilmelerin azaldığı ve sac parçanın kritik bölgesindeki aşırı incelmenin önlenebildiği belirtilmiştir. Deneylerde kalıp boşluğunu doldurmak için seçilen bor nitrür (BN) tozları 80-100 μm aralığında ortalama çapa sahiptir ve deneyler 80 mm çapında ve 1,0 mm kalınlığında 436 paslanmaz çelik saclar çekilerek gerçekleştirilmiştir. Rijit kalıp ile yapılan deneylerde 20 mm çekme derinliğine ulaşılamadan kap tabanının yırtıldığı, toz boşluklu esnek çekme yönteminin kullanıldığı deneylerde ise 37 mm kap derinliğine ulaşılabildiği görülmüştür.

Shen ve diğerleri [59] rijit zımba yerine, sadece katı granül ve dört farklı oranda grafit tozu-katı granül karışımını (1/5, 1/10, 1/15 ve 1/20 oranlarında) zımba ile sac arasına yerleştirerek gerçekleştirilen derin çekme işlemlerini deneysel ve sonlu elemanlar analizleriyle incelemişlerdir. 1 mm kalınlığında ve 125 mm çapındaki 08Al sac numunelerle derin çekme deneyleri ve ABAQUS yazılımı ile simülasyonlar yapılmıştır. Derin çekme deneyleri ve sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen kalınlık dağılımı eğrilerinin son derece uyumlu olduğu ve hata payının %5'in altında kaldığı görülmüştür. Katı granül yerine, grafit tozu-katı granül karışımı kullanımı ile derin çekme işleminde daha iyi sonuçlar elde edilebileceği deneyler ve sonlu elmanlar analizleriyle tespit edilmiştir. En uygun grafit tozu-katı granül karışımı oranının 1/10 olduğu görülmüştür. Bu karışım oranında derin çekilen silindirik kabın en çok incelmenin olduğu bölgesindeki et kalınlığında, sadece katı granül kullanımına kıyasla %16,16 artış sağlandığı belirtilmiştir.

Madanloo ve diğerleri [60] hidrodinamik derin çekme işleminde basınçlı sıvı seçiminin üretilen kabın kalınlık değişimine ve zımba kuvvetine olan etkilerini incelemişlerdir. Hidrodinamik derin çekme işlemi ABAQUS yazılımı ile simüle edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Bakır ve St14 saclar 2,5 mm kalınlığında ve 80 mm çapında seçilerek simülasyonlarda ve deneylerde kullanılmıştır. Deneyler, 38,5 mm çap ile 6 mm radyüse sahip zımba ve 44 mm çapında kalıp yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Zımba hızı 200 mm/dk. seçilmiş ve çekme işlemi süresince sabit tutulmuştur. Çalışmada bakır sac için 7,5 MPa, St14 sac için ise 8,5 MPa ön şişirme basınçları uygulanmıştır. $8{,}94 \times 10^{-4}$ Pa.s viskoziteye sahip su ve $86{,}54 \times 10^{-4}$ Pa.s viskoziteli yağ şekillendirme sıvısı olarak seçilmiştir. Bu akışkanların imal edilen silindirik kabın kalınlık dağılımına ve çekme kuvvetine olan etkileri araştırılmıştır. Derin çekme işlemi sırasında zımbanın ilerlemesiyle kalıp içi basıncı artmakta ve belirli bir süre sonra maksimum seviyesine ulaşmakta ve bu

seviyede sabit kalmaktadır. Bu basınç değerinin üretilen kabın kalınlık dağılımına önemli ölçüde etki ettiği belirtilmiştir. Basınç değerinin büyümesi ile sac incelmesinin azaldığı fakat basıncın belirli bir sınırı aşmasının sac incelmesine önemli bir katkı sağlamadığı gözlemlenmiştir

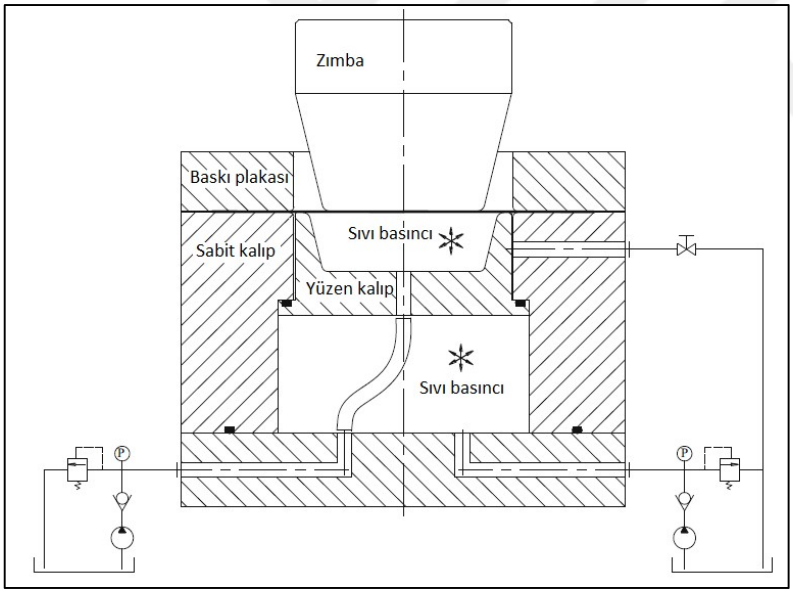


Şekil 2.25. Hidrodinamik derin çekme işleminin şematik gösterimi [60]

Yapılan simülasyonlar sonucunda en yüksek basınç değeri bakır sacı şekillendirirken 34 MPa, St14 sacın biçimlendirirken ise 32 MPa değerlerinde bulunmuştur. Çalışmanın sonuçları basınçlı sıvı olarak yağ seçildiğinde sac kalınlığında meydana gelen incelmenin azaldığını ortaya koymuştur. Yağ kullanılması durumunda sac kenarına 27,7 MPa radyal basınç etki ederken su için bu değer yalnızca 2,8 MPa büyüklüğündedir. Yağın suya göre yaklaşık on kat daha yüksek basınç oluşturması yağın viskozitesinin fazla olmasından kaynaklanmıştır. Radyal basıncın sacı kenarlarından kalıp boşluğuna doğru iterek sacın şekillendirilmesini kolaylaştırdığı ifade edilmiştir. Ayrıca, simülasyon ve deney sonuçları incelendiğinde şekillendirme sıvısının viskozitesinin artmasıyla çekme kuvvetinin büyüdüğü görülmüştür.

Wang ve Shen [61] yüzen ve sabit kalıp boşluğundan oluşan yeni bir hidrodinamik derin çekme yöntemi geliştirmiş ve bu yöntemi kullanarak konik kap üretimini deneysel ve de sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Karşılaştırma yapmak için geleneksel hidrodinamik derin çekme işlemi ile de deneyler ve simülasyonlar yapılmıştır. Yüzen kalıp

sabit kalıp boşluğu içinde aşağı ve yukarı yönlerde hareket edebilmekte, derin çekme işlemi sırasında sac malzemeyi desteklemektedir. Yüzen kalıptan faydalanılarak geliştirilen yeni yöntemde derin çekme işlemi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada yüzen kalıp hareketsiz tutulmakta ve derin çekme işlemi yüzen kalıp boşluğunda gerçekleşmektedir, ilk aşama sac numune yüzen kalıbın tabanına temas ettiği anda bitmekte ve ikinci aşama başlamaktadır. İkinci aşamada yüzen kalıp zımba ile birlikte aşağı yönde hareket etmekte ve hidrodinamik derin çekme işlemi için gerekli basıncı sabit kalıp boşluğunda bulunan sıvı sağlamaktadır. Deneylerde ve simülasyonlarda 0,6 mm kalınlığındaki TA2-M titanyum alaşımı sac malzeme kullanılmış ve zımba hızı yaklaşık 5 mm/s olarak ayarlanmıştır. Geleneksel ve bu çalışmada sunulan yeni hidrodinamik derin çekme simülasyonlarında basınç değerinin sıfırdan başlayıp lineer olarak arttırıldığı, belirli bir zımba ilerlemesinde en yüksek seviyesine ulaştığı ve işlem sonuna kadar bu değerde sabit tutulduğu belirtilmiştir.

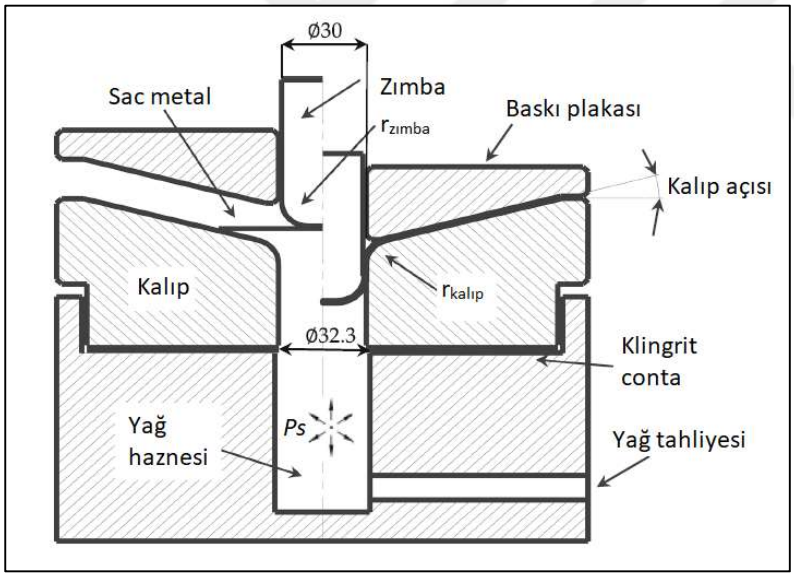


Şekil 2.26. Yüzen kalıp ve sabit kalıptan oluşan hidrodinamik derin çekme düzeneğinin şematik diyagramı [61]

En yüksek basınç 14, 16, 18 ve 20 MPa değerlerinde seçilmiş ve bu basınç koşullarında yapılan deneyler ile simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Yüzen kalıp ile yapılan deney ve simülasyonlar sonucunda elde edilen kapların kalınlık farkının en fazla %4 ve flanş bölgesinde olduğu ifade edilmiştir. Yüzen kalıplı hidrodinamik derin çekme simülasyonları, en yüsek basıncın 20 MPa olduğu ve bu basınca 20, 25, 30, 35 ve 40 mm zımba ilerlemesi değerlerinde ulaşıldığı beş farklı basınç artış hızı ile gerçekleştirildiğinde,

maksimum basınç değerine ulaşma hızının üretilen konik kabın duvar kalınlığının incelmesine dikkate değer bir etki yapmadığı gözlemlenmiştir. Geleneksel hidrodinamik derin çekme yöntemiyle yapılan deney ve simülasyonlar sonucu konik kapta kırışıklıkların oluştuğu görülmüştür. Yüzen kalıplı hidrodinamik derin çekme işleminde ise yüzen kalıbın ağız kenarı ile sacın temasının kırışıklık oluşumunun engellenmesine katkı sağladığı belirtilmiştir.

Ballıkaya ve diğerleri [62] açılı kalıp ile hidromekanik derin çekme işleminde kalıp açısının, baskı plakası kuvvetinin, zımba ile kalıp radyüslerinin ve kalıp içi basıncının limit çekme oranına etkilerini araştırmışlardır. Kalıp açısı için altı farklı değer, diğer parametreler için ise üç seviye belirlemişlerdir. Taguchi yöntemi ile deneyler tasarlanmış ve ANSYS programıyla da analizler gerçekleştirilmiştir. Bulunan sonuçlar ANOVA yöntemi ile istatiksel olarak incelenmiştir.



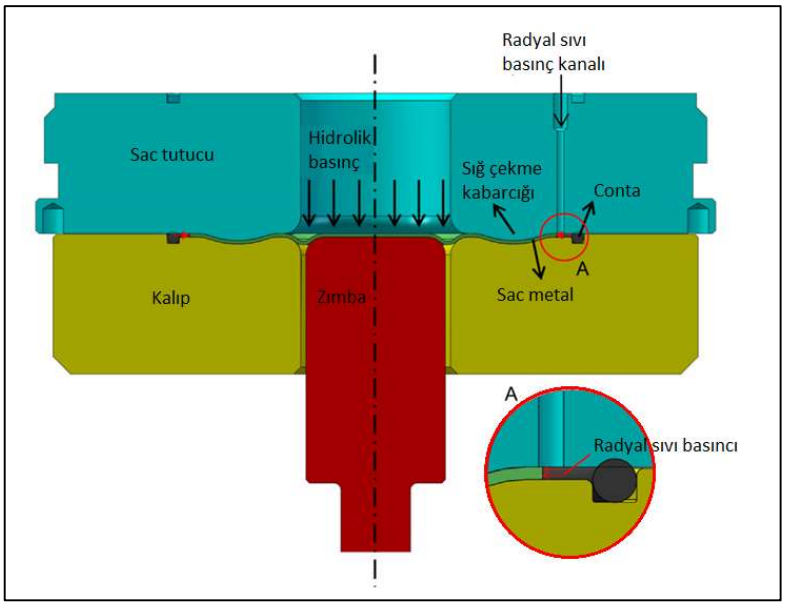
Şekil 2.27. Hidromekanik derin çekme işlemi için tasarlanan açılı kalıp seti [62]

Çizelge 2.4. Hidromekanik derin çekme işlemi için parametreler ve seviyeleri [62]

Parametre/Seviye	1	2	3	4	5	6
Kalıp açısı (°)	0	2,5	5	10	12,5	15
Kalıp radyüsü (mm)	6	8	10	-	-	-
Zımba radyüsü (mm)	6	8	10	-	-	-
Kalıp içi basıncı (MPa)	6	8	10	-	-	-
Baskı plakası kuvveti (N)	1946,95	5882,78	9507,64	-	-	-

Deneylerde zımba hızı 4 mm/s değerinde sabit tutulmuştur ve malzeme olarak 0,9 mm kalınlıkta DIN EN 10130-1999 çelik sac seçilmiştir. Şekillendirici sıvı için hidrolik yağ tercih edilmiştir. Yapılan deney ve simülasyonlar sonucunda limit çekme oranının kalıp açısının artmasıyla yükseldiği, kalıp açısı 12,5° olduğunda en yüksek seviyesine ulaştığı (2,6) ve kalıp açısı bu değeri aştığında azaldığı görülmüştür. Limit çekme oranının zımba radyüsünün büyümesi ile arttığı ve en büyük limit çekme oranını elde etmek için gerekli olan kalıp radyüsünün ise 8 mm olduğu ifade edilmiştir. Düşük baskı plakası kuvvetinin yağ sızıntısına yol açtığı, yüksek baskı plakası kuvvetinin ise sürtünmeyi artırdığı belirtilmiş ve en yüksek limit çekme oranı için baskı plakası kuvvetinin 5882 N değerinde seçilmesi gerektiği görülmüştür. ANOVA yöntemiyle yapılan analizler sonucunda limit çekme oranına en çok etki eden parametrenin %84,51 oranla zımba radyüsü, ikinci parametrenin ise %12,76 katkı ile kalıp açısı olduğu tespit edilmiştir.

Halkacı ve diğerleri [63] yapmış oldukları çalışmada, AA5754-O alüminyum alaşımının limit çekme oranını artırmak için yeni bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada deneyler hidromekanik derin çekme yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve yöntemde kullanılan sac tutucuya sığ çekme kabarcığı eklenmiştir, ayrıca derin çekme işleminden önce sac numunelere ön şişirme işlemi de uygulanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde ve deneylerde sac kalınlığı 1 mm değerinde seçilmiştir.



Şekil 2.28. Sığ çekme kabarcığı eklenmiş hidromekanik derin çekme sistemi [63]

Çekme kabarcığının en uygun boyutlarını belirlemek için ABAQUS programı ile analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda, çekme kabarcığı derinliğinin 2 mm seçildiği durumda sac incelmesinin maksimum olduğu görülmüş, bu nedenle deneyler için çekme kabarcığı derinlikleri 1 mm ve 1,5 mm değerlerinde belirlenmiştir. Ayrıca 15, 17, 21, 23 ve 25 mm olmak üzere beş farklı çekme kabarcığı genişliği için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, çekme kabarcığı genişliğinin 15 ve 17 mm seçilmesi halinde sac incelmesinin diğer genişlik değerleri ile elde edilenlere göre daha fazla olduğunu ortaya çıkartmıştır. Diğer genişlik değerleri için ise incelmenin hemen hemen aynı seviyede olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle çekme kabarcığı genişliği deneyler için 23 mm değerinde seçilmiştir. Deneylerde, sığ çekme kabarcığı derinliği, zımba yüzey pürüzlülüğü, ön şişirme yüksekliği ve ön şişirme basıncı olmak üzere dört parametrenin her biri için üç farklı değer kullanılmıştır.

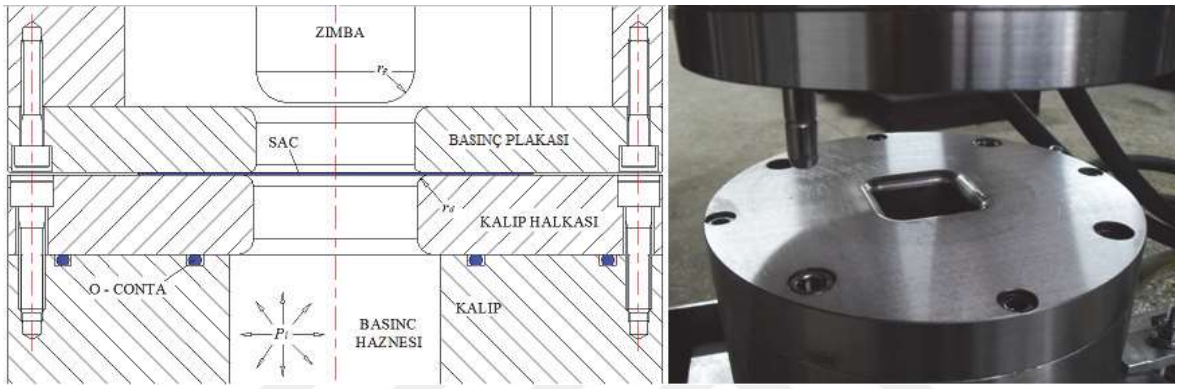
Çizelge 2.5. Çekme kabarcıklı sac tutucu ile hidromekanik derin çekme deneyi parametreleri ve seviyeleri [63]

Parametreler	Seviyeler		
	1	2	3
Sığ çekme kabarcığı derinliği (mm)	0	1	1,5
Zımba yüzey pürüzlülüğü (μm)	0,5	2,8	5,5
Ön şişirme yüksekliği (mm)	2	3,5	5
Ön Şişirme basıncı (MPa)	2,5	5	10

Deneyler sonucunda AA5754-O alüminyum sacın limit çekme oranı, çekme kabarcığı olmayan düz sac tutucu kullanıldığında 2,65 değerinde bulunmuştur. 1 mm çekme kabarcığı derinliği, 5 mm ön şişirme yüksekliği, 10 MPa ön şişirme basıncı ve 2,8 μm zımba yüzey pürüzlülüğü seçildiğinde limit çekme oranının maksimum değerine (2,787) ulaştığı gözlemlenmiştir. 1 mm derinliğinde çekme kabarcığı kullanıldığında limit çekme oranının yükseldiği; 1,5 mm derinliğinde çekme kabarcığının tercih edilmesi durumunda ise elde edilen limit çekme oranlarının düz sac tutucu ile erişilen limit çekme oranlarıyla hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Limit çekme oranını etkileyen en önemli faktörün çekme kabarcığı derinliği, sonrasında ise sırasıyla ön şişirme basıncı, ön şişirme yüksekliği ve zımba yüzey pürüzlülüğü olduğu yapılan analizler sonucunda bulunmuştur.

Özdemir ve Karaağaç [64], hidromekanik derin çekme yöntemiyle, DC01 ve bakır sac metallerin kare geometrili kap olarak şekillendirilebilirliğini incelemişlerdir. Deneyler

50x50 mm ölçüye sahip kare zımba ile gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme hızı için 6, 12 ve 18 mm/s olmak üzere üç farklı değer seçilmiştir. 0,5 mm, 0,8 mm ve 1,0 mm kalınlığındaki saclar için ilkel parça çapı 120, 130 ve 140 mm değerlerinde belirlenmiştir. Kalıp içi hidrolik sıvı basıncı 10, 20 ve 30 MPa olarak kararlaştırılmış ve hidromekanik derin çekme deneyleri 4, 6 ve 8 mm radyüslü kalıplar ile yapılmıştır. Şekillendirici sıvı olarak ISO 11158 standartlarına uygun, 40 ºC'de 46 mm^2/s değerinde kinematik viskoziteye sahip olan hidrolik yağ tercih edilmiştir.



Şekil 2.29. Zımba ve kalıp grubunun kesit görüntüsü ve fotoğrafı [64]

Yapılan deneyler sonucunda, zımba hızının yükselmesiyle şekillendirme kuvvetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, zımba hızının artmasının şekillendirilebilirliği olumsuz etkilediği belirtilmiştir. DC01 ve bakır sac malzemelerin 4 mm radyüslü kalıp ile derin çekme deneyleri sonucunda; 6 mm/s ve 12 mm/s zımba hızlarında en fazla 2,6 çekme oranı elde edilebilirken, 18 mm/s zımba hızında ise tüm deneylerin başarısız olduğu görülmüştür. Kalıp kavisi değerinin yükselmesinin şekillendirilebilirliği arttırdığı ve şekillendirme kuvvetini düştüğü tespit edilmiştir. 0,8 ve 1 mm kalınlığındaki bakır ve DC01 çelik saclar 4 mm kavisli kalıp ile çekildiğinde en fazla 2,4 değerinde çekme oranına ulaşılabilirken; kalıp kavisinin 6 ve 8 mm değerlerinde seçilmesi ile çekme oranının 2,6 büyüklüğünde elde edilebileceği görülmüştür. Çalışmada, kalıp içi basıncının hidromekanik derin çekme yönteminde en önemli parametre olduğu ifade edilmiştir. 10 MPa hidrolik sıvı basıncının ve 4 mm kavisli kalıbın kullanıldığı hidromekanik derin çekme deneyleri sonucunda 2,4 değerinde çekme oranına ulaşılabilirken, kalıp içi basıncının 20 MPa veya 30 MPa değerlerine yükseltilmesiyle 2,6 büyüklüğünde çekme oranının elde edilebileceği görülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda, sac malzeme kalınlığının artması durumunda hidrolik sıvı basıncının yükseltilmesinin gerekli olduğu

belirtilmiştir. Kalıp içerisindeki hidrolik sıvı basıncının sac malzemeyi zımbaya doğru itebilecek büyüklükte olması gerektiği; aksi halde, hidromekanik derin çekme yöntemi için kilit parametre olan kalıp içi basıncının etkisinin tümüyle görülemediği ve sac malzemenin yırtılabileceği ifade edilmiştir. Hidromekanik derin çekme yöntemiyle, klasik derin çekme yöntemine göre daha homojen kalınlık dağılımına sahip ürünler imal edilebileceği ve daha yüksek çekme oranlarına ulaşılabileceği yapılan çalışmada sunulmuştur.

Literatürde kalıp ve zımba radyüslerinin, baskı plakası kuvvetinin ve yağlayıcı türünün etkilerini araştıran pek çok çalışma vardır. Roohi ve Hashemi [65] St14 çelik sacdan derin çekme işlemi ile imal edilen silindirik kaptaki geri esneme ve incelmeyi sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Sac tutucu kuvvetinin, kalıp profil ve zımba köşe radyüslerinin geri esneme ve sac duvarında meydana gelen incelmeye olan etkileri simülasyonlar ile araştırılmış ve bu parametreler optimize edilmiştir. Sac tutucu kuvveti için 85 kN, zımba köşe radyüsü için 15 mm ve kalıp profil radyüsü için 5,6 mm değerlerinin optimum olduğu tespit edilmiştir. Optimum parametre değerleri kullanılarak 195 mm çapında ve 0,9 mm kalınlığındaki sac numuneler ile deneyler yapılmıştır. Deney sonucunda, üretilen kapta maksimum incelme oranının %13,5 ve geri yaylanmanın 0,45° olduğu görülmüştür. Sac tutucu kuvvetinin, zımba ve kalıp radyüslerinin artmasının geri yaylanma miktarını arttırdığı ve en etkin parametrenin zımba radyüsü olduğu gözlemlenmiştir. Zımba radyüsünün %13,3 arttırılması ile geri yaylanmanın yaklaşık %40 oranında yükseldiği simülasyonlar sonucunda tespit edilmiştir. Silindirik parçanın et kalınlığındaki incelme oranını en çok etkileyen parametrenin ise kalıp radyüsü olduğu tespit edilmiştir. Kalıp radyüsü %55,5 oranında arttığında incelmenin %60 civarında azaldığı görülmüştür.

Sac kalınlığının, kalıp radyüsünün ve kalıp içi basıncının DC01 çelik sac malzemenin şekillenebilirliğine olan etkileri hidromekanik ve de geleneksel derin çekme yöntemleri ile deneysel olarak Gürün ve Karaağaç [66] tarafından incelemiştir. Deneylerde 120, 130 ve 140 mm çapındaki sac numuneler 60 mm çapındaki zımba ile 6 mm/s çekme hızında çekilerek silindirik kaplar üretilmiştir. Sac kalınlığı için 0,5 mm, 0,8 mm ve 1,0 mm; kalıp radyüsü için 4, 6 ve 8 mm; kalıp içi basıncı için ise 10, 20 ve 30 MPa olmak üzere her bir parametre için üç farklı değer seçilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. ISO 11158 standardına uygun hidrolik yağ, hidromekanik derin çekme deneylerinde kalıp içerisinde şekillendirme sıvısı olarak kullanılmıştır. Deneyler sonucunda, kalıp içi basıncı, sac kalınlığı ve kalıp radyüsü parametrelerinin birbiri ile ilişkili olduğu, birbirinden bağımsız

olarak değerlendirilemeyeceği vurgulanmıştır. 20 MPa kalıp içi basıncında ve 4 mm radyüse sahip kalıp ile yapılan deneylerde 0,8 mm kalınlığındaki sac için en fazla 2,16 değerinde çekme oranına ulaşılabildiği görülmüştür. Oysaki aynı koşullar altında 0,5 mm kalınlığındaki sac için 2,36 değerinde çekme oranının elde edildiği ve bunun nedenin sac kalınlığının düşmesi ile kalıp içi basıncının etkisinin artması olduğu ifade edilmiştir. Geleneksel yöntemde kalıp radyüsü değerinin büyümesiyle sac malzemenin şekillenebilirliğinin arttığı; fakat hidromekanik derin çekme yönteminde kalıp radyüs etkisinin, sac malzeme ile kalıp radyüsü temasının yüksek kalıp içi basıncı nedeniyle ortadan kaybolmasından dolayı azalabileceği belirtilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, hidromekanik derin çekme yöntemiyle DC01 çelik sac malzeme için en fazla 2,33; geleneksel yöntemle ise 2,16 değerlerinde çekme oranlarının elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Hidromekanik derin çekme işleminde kalıp içi basıncının yükselmesiyle zımba şekillendirme kuvvetinin arttığı görülmüştür. Bu yöntemle üretilen silindirik kaplarda en büyük incelme oranı %12, geleneksel derin çekme işleminde ise bu oran %16 olarak ölçülmüştür.

Gürün ve Çavuşoğlu [67], çekme hızının DP600 ve DP780 sac malzemelerin çekilebilirliğine ve mekanik özelliklerine etkilerini sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla araştırmışlardır. Üç farklı hadde yönünde (0º, 45º, 90º); 7,5 mm/dk, 75 mm/dk, 225 mm/dk ve 450 mm/dk olmak üzere dört farklı deformasyon hızı için tek eksenli çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Her bir sac malzemenin çekme dayanımı, akma dayanımı ve toplam uzama miktarı yapılan testler sonucunda dört farklı deformasyon hızı için belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda deformasyon hızının artmasının her iki malzemenin de akma dayanımını yükselttiği gözlemlenmiştir. Akma dayanımının artmasından dolayı malzemelerin çekme dayanımınında yükseldiği belirtilmiştir. DP600 sac malzemenin DP780 sac malzemeden daha fazla uzadığı görülmüştür. Her iki çelik sacın şekilendirme hızının atması ile daha fazla uzadığı tespit edilmiş ve DP780 sac malzemenin deformasyon hızından daha çok etkilendiği gözlemlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle DP600 ve DP780 çift fazlı çelik sacların derin çekme işlemi sonrası geri yaylanmaları ve kalınlık dağılımları araştırılmıştır. Deformasyon hızındaki yükselmenin, ürünün kavis bölgesindeki incelmeyi azalttığı ve etek kısımlarında ise kalınlaşmaya neden olduğu görülmüştür. Ayrıca DP780 sacın DP600 sac malzemeye nazaran yüksek akma dayanımına sahip olmasından dolayı bu sacdan üretilen kabın etek kısmında daha az kalınlaşma görülmüştür. Deformansyon hızının yükselmesinin her iki sac malzemenin geri esneme miktarını

arttırdığı tepit edilmiş ve DP780 sacın DP600 saca göre daha fazla geri esneme davranışı sergilediği gözlemlenmiştir.

Kardan ve diğerleri [68] çalışmalarında kalıp ile zımba radyüsleri, sac kalınlığı, zımba hızı, baskı plakası kuvveti, zımba-sac, sac-kalıp ve baskı plakası-sac ara yüzeylerindeki sürtünme koşulları olmak üzere sekiz ana parametrenin derin çekme işleminde çekme kuvvetine ve kalınlık dağılımına olan etkilerini incelemişlerdir. Taguchi yönteminden faydalanılarak sekiz parametrenin üç seviyesi için 27 farklı deney planlanmıştır. Deneyler için 1mm kalınlığındaki AISI 1006 çelik sac, malzeme olarak seçilmiştir.

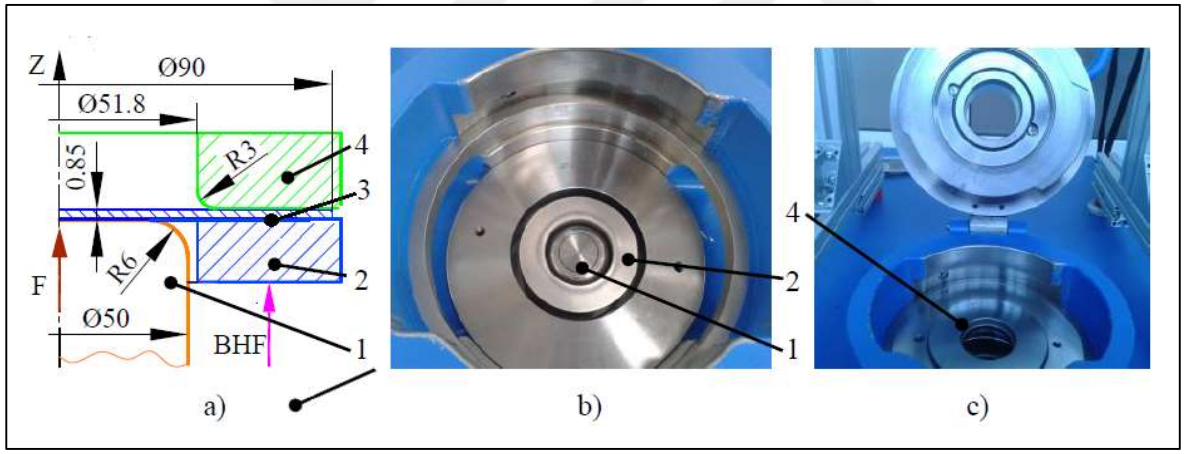
Çizelge 2.6. Derin çekme işlemi parametreleri ve seviyeleri [68]

Parametre/Seviye	1	2	3
Sac kalınlığı (mm)	0,6	1	1,5
Zımba radyüsü (mm)	6	8	10
Kalıp radyüsü (mm)	5	8	10
Baskı plakası kuvveti (kN)	1,1	1,53	1,95
Zımba-sac ara yüzeyi yağlama durum	Yok	Parafin	Silikon emisyonu
Baskı plakası-sac ara yüzeyi yağlama durum	Yok	Parafin	Silikon emisyonu
Kalıp-sac ara yüzeyi yağlama durum	Yok	Parafin	Silikon emisyonu
Zımba hızı (mm/dk.)	20	30	40

Deneyler ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizler sonucunda, zımba kuvvetinin en çok sac kalınlığından etkilendiği görülmüş, sac kalınlığının artmasıyla çekme kuvvetinin ciddi miktarlarda yükseldiği belirtilmiştir. Kalıp radyüs değerinin büyümesiyle zımba kuvvetinin düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca 1,53 kN baskı plakası kuvveti uygulanması halinde minimum çekme kuvvetinin ölçüldüğü ve bu baskı plakası kuvvetinin kırışıklık oluşumunu engellemek için yeterli olduğu böylelikle daha düşük zımba kuvvetine ulaşıldığı belirtilmiştir. Zımba-sac ara yüzeyinin parafinle, kalıp-sac ara yüzeyinin silikon emisyonuyla yağlanması ve baskı plakası-sac ara yüzünün ise kuru olması hallerinde minimum çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. Zımba hızının artması ile çekme kuvvetinin lineer olarak yükseldiği görülmüştür. Sac kalınlığının, kalınlık dağılımını etkileyen en baskın parametre olduğu ve daha kalın sac kullanıldığında kalınlık dağılımındaki homojenliğin azaldığı tespit edilmiştir. Kalınlık dağılımındaki sapmayı en aza indirmek için kalıp ve zımba radyüs değerlerinin 8 mm seçilmesi gerektiği çalışmada ortaya koyulmuştur. Yüksek baskı plakası kuvvetlerinde ve zımba hızlarında kalınlık değişimin azaldığı görülmüştür. Zımba-sac ve kalıp-sac ara yüzeylerinin silikon

emisyonuyla, baskı plakası-sac ara yüzeyinin ise parafin ile yağlanması sonucu elde edilen kalınlık dağılımının daha homojen olduğu belirtilmiştir.

Lazarescu ve Banabic [69] derin çekme işlemi için gerekli olan zımba kuvvetinin değişimini farklı sürtünme koşulları altında incelemişlerdir. Referans değeri olarak kabul edilen yağsız, hidrolik yağ, lityumlu gres ve hayvansal yağ olmak üzere dört farklı sürtünme koşulu için derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir sürtünme durumu için 10 kN, 20 kN ve 25 kN değerlerinde üç farklı baskı plakası kuvveti uygulanmıştır. Deneyler sonrası elde edilen yük-ilerleme eğrileri, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan simülasyonlar sonrası çizilen kalibrasyon eğrileri ile çakıştırılarak her bir sürtünme durumu için sürtünme katsayıları tahmin edilmiştir. Deneylerde 90 mm çapında, 0,85 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac 50 mm çapındaki zımba ile derin çekilmiştir. Kalıp çapı 51,8 mm, kalıp profil radyüsü 3 mm ve zımba radyüsü 6 mm değerlerinde seçilmiştir.



Şekil 2.30. Derin çekme deney düzeneği; a) Takım ölçüleri, b) ve c) Üniversal sac metal test cihazı (Erichsen tipi); 1-Zımba, 2-Baskı plakası, 3-Sac metal, 4-Kalıp [69]

Yapılan deneyler sonucunda çekme kuvvetinin sürtünme koşullarından oldukça etkilendiği gözlemlenmiştir. Beklenildiği üzere en yüksek çekme kuvveti yağsız sürtünme koşulunda gerçekleşmiştir. En küçük çekme kuvvetinin ise hayvansal yağ kullanıldığında ortaya çıktığı görülmüştür. Hidrolik yağ ile yapılan deneylerde elde edilen zımba kuvvetinin lityumlu yağ ile yapılan derin çekme işlemlerinde oluşan çekme kuvvetlerine göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Çekme kuvvetinin baskı plakası kuvvetine duyarlılığının yağsız durumda en yüksek olduğu görülmüştür. Baskı plakası kuvveti 10 kN'dan 25 kN'a yükselttiğinde en büyük çekme kuvvetinin 40,55 kN'dan 43,09 kN'a çıktığı

gözlemlenmiştir. Hayvansal yağ ile yağlama yapıldığında ise çekme kuvvetinin baskı plakası kuvvetine duyarlılığı en az seviyeye ulaşmıştır. Hayvansal yağlı sürtünme koşulunda baskı plakası kuvveti 10 kN'dan 25 kN'a arttırıldığında en büyük zımba kuvveti 35,81 kN'dan 36,74 kN'a yükselmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan simülasyonlar sonucunda hayvansal yağlı sürtünme koşulu için sürtünme katsayısının 0,1 ile 0,15 arasında, lityumlu yağ için 0,15-0,20 aralığında, hidrolik yağlı sürtünme durumunda 0,2 değerine çok yakın ve yağsız durum için 0,2 değerinden büyük olduğu belirtilmiştir.

Şen ve diğerleri [70] HC300LA ve HC420LA çelik sac numuneler ile yapılan ılık derin çekme işlemlerinde uygulanan yağlayıcı çeşidinin çekme oranına ve zımba kuvvetine olan etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde yağlayıcı olarak grafit sprey ve grafit sprey ile teflon (PTFE) bileşimi olmak üzere iki farklı yağlayıcı uygulanmıştır. Grafit sprey ve teflon bileşiminden oluşan yağlayıcı ile yapılan deneylerde sürtünme kuvvetinin daha çok azaldığı ve dolayısıyla zımba kuvvetlerinin grafit sprey yağlayıcı ile gerçekleştirilen deneylerde elde edilenlere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Grafit sprey yerine grafit sprey ve teflon bileşiminden oluşan yağlayıcı ile yapılan deneyler sonucunda çekme oranının, sac kalınlığı ve çelik malzeme türüne bağlı olarak %6 ile %15 aralığında arttığı görülmüştür.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde Erichsen testlerinde genel olarak zımba çapının ve hızının, sac kalınlığının, sac malzemenin mikro yapısının, sıcaklığın ve yağlayıcı türünün test sonuçlarına etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak sac kalınlığı/zımba çapı ve kalıp delik çapı/zımba çapı oranlarının Erichsen Sabitine ve efektif gerinimlere etkileri deneyler ve sonlu elemanlar analizleri yardımıyla incelenmiştir. Ayrıca DC04 çelik sac malzeme ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrilerinden faydalanılarak efektif gerilme-efektif gerinim eğrileri elde edilmiştir.

Baskı plakası kuvvetinin, deformasyon hızının, yağlayıcı türünün, sac malzemenin kalınlığının ve mikro yapısının, kalıp ve zımba radyüslerinin, çekme boşluğunun ve de kalıp ve baskı plakası tasarımının derin çekme işlemine etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma literatürde mevcuttur. Baskı kuvvetini sac numune yüzeyine farklı oranlarda aktarmak için iki veya daha fazla parçadan oluşan baskı plakaları, konik ve açılı çekme

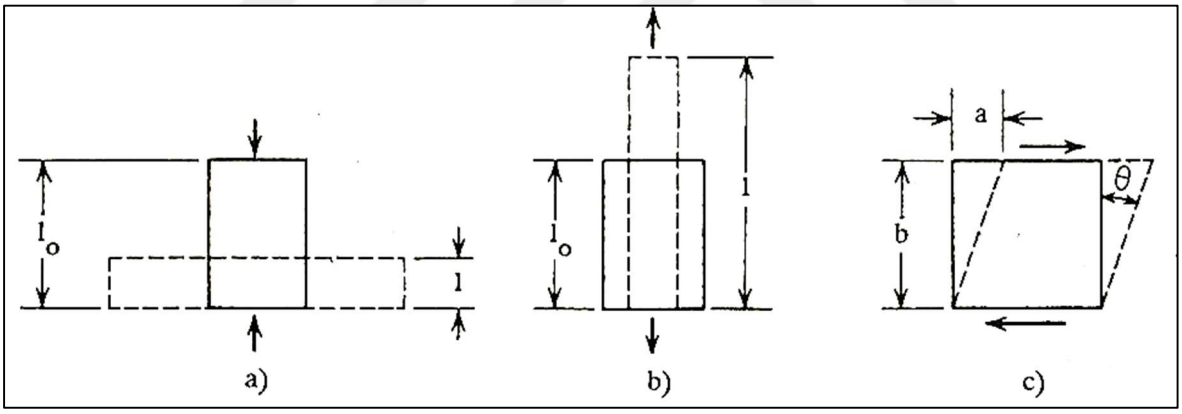
kalıpları üzerine yapılmış pek çok çalışma literatürde bulunmaktadır, fakat iç bükey kavisli kalıp ve dış bükey kavisli baskı plakasından oluşan çekme setinin derin çekme işlemine etkilerini araştıran bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmada standart çekme kalıpları ile kavisli kalıplar karşılaştırılmış, kavisli kalıp tasarımının limit çekme oranına, çekme işlemi sonrası meydana gelen sac kalınlığı değişimine ve kırışıklık oluşumuna olan etkileri araştırılmıştır.

3. TEORİK BİLGİLER VE KURAMSAL TEMELLER

3.1. Plastik Deformasyon

Plastik deformasyon, bir malzeme elastik sınırının ötesinde bir gerilmeye maruz kaldığında oluşan kalıcı deformasyona denir. Malzemenin, gerilmenin kaldırılmasından sonra orijinal şekline döndüğü elastik deformasyonun aksine, plastik deformasyon malzemenin yapısında kalıcı bir değişikliğe yol açar [71, 72] . Katı haldeki malzemelere istenilen şekli vermek için kullanılan ve işlem esnasında kütle ve malzeme bileşeninde herhangi bir değişiklik meydana getirmeyen imalat yöntemleri plastik şekillendirme yöntemleri olarak adlandırılır [73].

Plastik şekil verme işlemlerinin tamamında, malzeme çekme, basma ve kayma olmak üzere üç ana gerilme durumundan en az biri veya birkaçına maruz kalır [73].

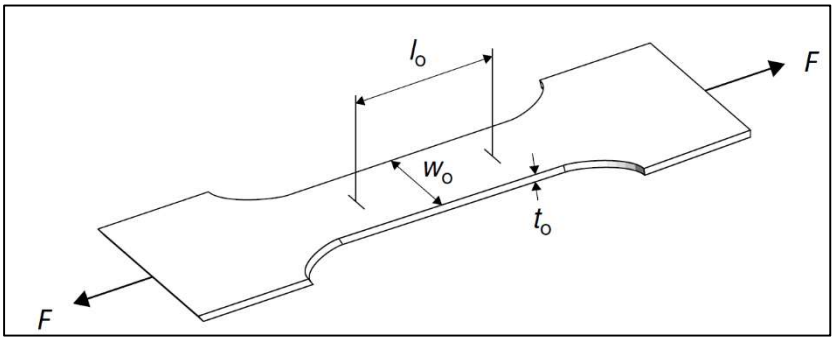


Şekil 3.1. Şekil değişimi sırasında oluşan üç ana gerilme durumu [73]; a) Basma, b) Çekme, c) Kayma

Çekme gerilmesi altında malzemelerin deformasyon davranışlarını incelemek için genellikle tek eksenli çekme testi yapılır. Bu teste numuneye tek yönde çekme kuvveti uygulanır ve numune kopuncaya kadar kuvvet ve uzama değerleri ölçülür. Tek eksenli çekme testi ile malzemenin mühendislik gerilmesi-mühendislik gerinimi eğrileri oluşturulabilir.

Mühendislik gerilmesi ve gerinimi hesaplanırken numunenin ilk ölçüleri dikkate alınır ve test esnasında numunenin kesit alanında meydana gelen daralma hesaba katılmaz. Bu

nedenle mühendislik gerilmesi değeri gerçek gerilme değerinden küçük ölçülür [71]. Şekil 3.2'de sac malzemeler için tek eksenli çekme testi numunesinin şekli verilmiştir.



Şekil 3.2. Sac malzemeler için tek eksenli çekme testi numunesi [71]

Başlangıç kesit alanı (A_0), sac kalınlığının (t_0) sac genişliğiyle (w_0) çarpılmasıyla hesaplanır. Numunenin çekme yönünde uzama miktarı (Δl), başlangıç numune uzunluğuna (l_0) bölünerek mühendislik gerinimi (e) hesaplanır. Kuvvet (F) başlangıç kesit alanına bölünerek mühendislik gerilmesi (σ_e); anlık kesit alanına (A) bölünerek gerçek gerilme (σ) değeri elde edilir.

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{3.1}$$

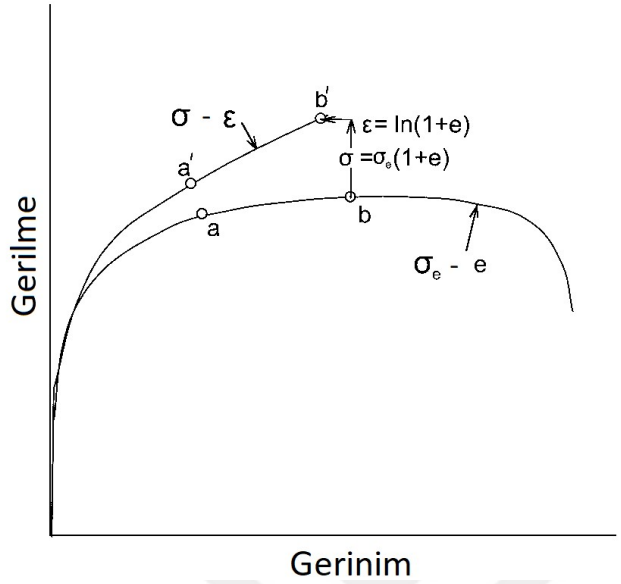
$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \tag{3.2}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.3}$$

Mühendislik gerilmesi ve gerinimi değerleri kullanılarak gerçek gerinim (ε) ve gerilmeler hesaplanabilir. Plastik şekil değiştirme sonrası malzemenin hacmi sabit kabul edildiği için başlangıç ölçüm uzunluğunun (l_0) başlangıç kesit alanı ile çarpımı ($l_0.A_0$), anlık numune ölçüm uzunluğu (l) ile anlık kesit alanının çarpımına (l.A) eşittir [71,72].

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{\Delta l + l_0}{l_0}\right) = \ln(1 + e) \tag{3.4}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0}\frac{A_0}{A} = \sigma_e \frac{A_0}{A} = \sigma_e \frac{l}{l_0} = \sigma_e(1+e) \quad (3.5)$$



Şekil 3.3. Mühendislik ve gerçek gerilme-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması [72]

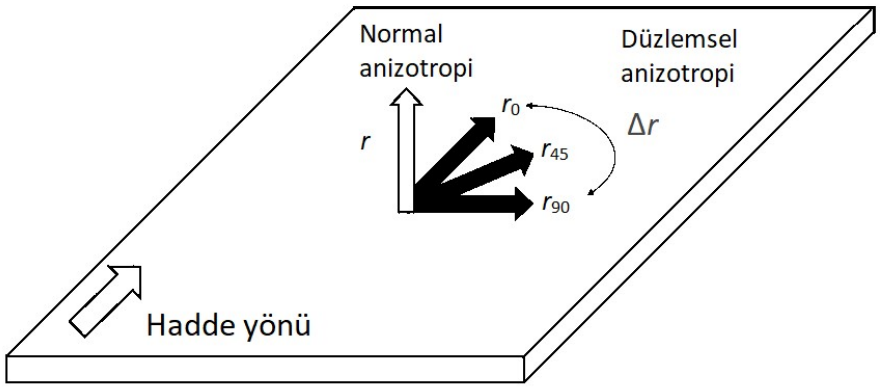
Hooke kanununa göre elastik şekil değiştirme bölgesinde gerilme gerinim ile lineer olarak artar, gerilme-gerinim eğrisinin eğimi elastisite modülü (E) olarak tanımlanır. Plastik şekil değiştirme bölgesinde ise gerilme ve gerinim arasındaki ilişki lineer değildir. Bu bölgede gerçek gerinim ile gerçek gerilme arasındaki ilişki için yaygın olarak Holloman kanunu (Eş. 3.6) kullanılır. Bu eşitlikte K mukavemet katsayısı, n ise pekleşme üssü olarak isimlendirilir. Pekleşme üssü değerinin büyümesiyle sac malzemelerin çekilebilirliği artmaktadır [72].

$$\sigma = K.\varepsilon^n \quad (3.6)$$

Sıcak işlem koşulları altında, malzemede deformasyon sertleşmesi gerçekleşmez ve gerilme sabit kalır. Malzemenin ergime noktasının yarısından büyük sıcaklıklarda deformasyon hızının plastik gerilme üzerindeki etkisi oldukça fazladır [73]. Eş. 3.7'de plastik gerilmenin, deformasyon hızı ($\dot{\varepsilon}$) ve deformasyon hızı duyarlılığı üssü (m) ile olan değişimi sunulmuştur. C, malzeme sabitidir ve birimi N/mm^2'dir.

$$\sigma = C.\dot{\varepsilon}^m \quad (3.7)$$

Sac malzemelerde mikro yapı her doğrultuda aynı (izotropik) olabilir veya yöne bağlı olarak değişebilir. Sac malzemeler üretilirken haddeleme işlemi esnasında taneler hadde yönünde uzayabilir ve malzemenin mekanik özellikleri yöne bağlı olarak değişebilir. Malzemenin özelliklerinin yöne bağlı olarak değişmesi anizotropi olarak isimlendirilir. Sac malzemeler için normal anizotropi ve düzlemsel anizotropi olmak üzere iki farklı tanımlama yapılmaktadır. Normal anizotropi, sac kalınlığı boyunca farklılık gösteren malzeme özelliklerindeki değişimi ölçerken, düzlemsel anizotropi, sac düzlemi içindeki çeşitli yönlerdeki malzeme karakteristik farklılıklarını ölçer (Şekil 3.4) [72].



Şekil 3.4. Hadde yönüne göre normal ve düzlemsel anizotropinin şematik gösterimi [72]

Lankford katsayısı olarak da bilinen plastik gerinim oranı (r) genişlik gerinimin (ε_w) kalınlık gerinimine (ε_t) oranıdır. Hadde yönünde (r_0), hadde yönü ile 45° açıda (r_{45}) ve hadde yönüne dik doğrultularda (r_{90}) plastik gerinim oranları tespit edildikten sonra ortalama normal anizotropi (r_{ort}) Eş. 3.8 ile hesaplanır [74]. Normal anizotropi sacın incelmeye karşı olan direncini göstermektedir ve normal anizotropi değerinin artmasıyla sac malzemelerin çekilebilirliği artar [72].

$$r_{ort} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \tag{3.8}$$

Düzlemsel anizotropi (Δr) derin çekme işlemi sonrası kulaklanma oluşumunu etkileyen bir malzeme özelliğidir ve Eş. 3.9 ile hesaplanır [72]. Düzlemsel anizotropi değeri büyüdükçe derin çekme işlemi ile üretilen kaplardaki kulaklanmanın arttığı belirtilmiştir [75,76].

$$\Delta r = \frac{r_{0°} - 2r_{45°} + r_{90°}}{2} \tag{3.9}$$

Plastik şekil verme işlemi yapılırken, akmanın ne zaman başlayacağı son derece önemlidir. Bir parçaya uygulanan gerilme, akma dayanımını aştığı anda plastik deformasyon başlamaktadır. Tek eksenli gerilme koşulu için çekme testi ideal bir uygulamadır fakat çok eksenli gerilme durumunda akmayı tespit etmek için Von Misses veya Tresca kriterlerinden yararlanılır [77].

Von Misses kriteri, çok eksenli gerilmeler nedeniyle şekil değiştirme enerjisinin kritik bir değeri aşmasıyla akmanın meydana geleceğini ifade eder [77]. Asal gerilmeler ile elde edilen eşdeğer gerilme Eş. 3.10'da verilmiştir.

$$\sigma_{eş} = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\ ]^{1/2} \tag{3.10}$$

Tresca kriteri, çok eksenli gerilmeler altındaki parçada meydana gelen en büyük kayma gerilmesinin, tek eksenli çekme testlerinde elde edilen kayma gerilmesinden daha büyük olduğu anda akmanın başlayacağını iddia etmektedir [77]. Tresca kriteri Eş. 3.11'de sunulmuştur.

$$\sigma_{eş} = \sigma_1 - \sigma_3, \qquad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \tag{3.11}$$

Akış gerilmesi, tek eksenli deformasyon koşulu altında çekme veya basma gibi testler ile belirlenir. Ancak, sac metal şekillendirmede gerilmeler çok eksenlidir. Von Misses akma kriteri, plastik deformasyonun başlangıcını tahmin etmek için çok eksenli gerilim durumlarını tek eksenli koşullarla ilişkilendirir. Çok eksenli gerilim koşulları altında akma kriteri kullanılarak hesaplanan gerilme, tek eksenli koşul altındaki gerilmeye eşdeğerdir ve genellikle eşdeğer veya efektif gerilme olarak adlandırılır. Bu gerilmeye karşılık gelen efektif gerinim ve efektif gerinim hızı, çok eksenli gerilme durumundaki deformasyonun gücü ve enerjisi tek eksenli gerilme durumuna eşitlenerek tahmin edilebilir [72]. Eşdeğer gerinim, asal gerinimler yardımıyla Eş. 3.12 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\varepsilon_{eş} = \sqrt{\frac{2}{3}\ (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \tag{3.12}$$

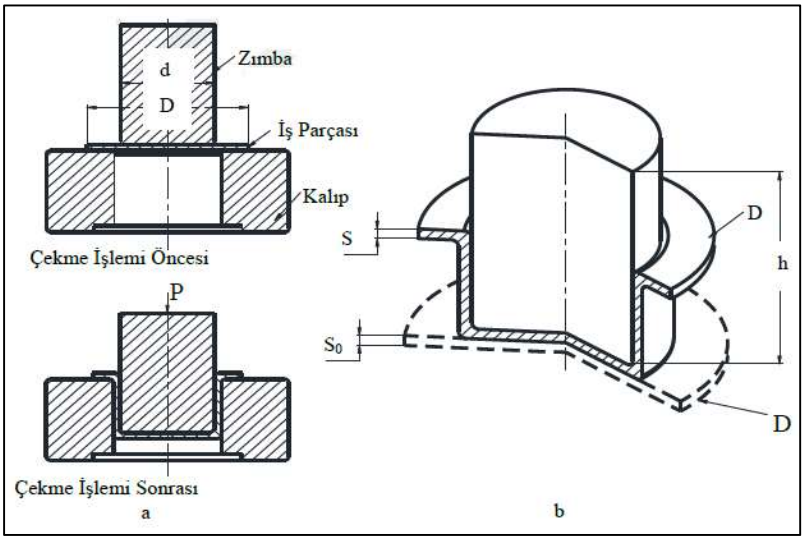
3.2. Derin Çekme İşlemi

Derin çekme işlemi, sac metal malzemelere kalıcı şekil vermek için sıklıkla tercih edilen bir imalat yöntemidir. Bu imalat yöntemiyle karmaşık geometride, konik, silindirik veya köşeli içi boş parçalar üretmek mümkündür [5].

Seri imalata uygun ve ekonomik olması gibi pek çok avantajı nedeniyle derin çekme yöntemi, otomotiv, havacılık, savunma ve gıda endüstrisi gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Araba parçaları, yemek kapları, konserve ve teneke kutuları, mutfak evyeleri ve benzeri ürünler bu yöntem ile imal edilebilir [5].



Resim 3.1. Derin çekme işlemiyle imal edilmiş parçalar [5]

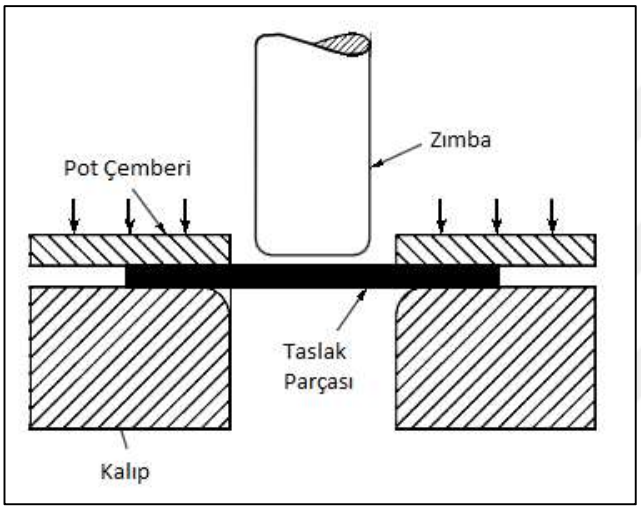


Şekil 3.5. Derin çekme yöntemi [6]; a) 2 boyutlu, b) Perspektif

Dairesel veya çok kenarlı sac plakaların çekme kalıbı içerisine zımba yardımıyla çökertilerek kap, kovan, çanak ve benzeri içi boş üç boyutlu parçalar elde edilmesi işlemine “çekme” denir. Üretilen parçaya birden fazla çekme işlemi uygulanıyorsa ya da

imal edilen parçanın yüksekliği çapından büyük ise işlem derin çekme olarak adlandırılır [6,7].

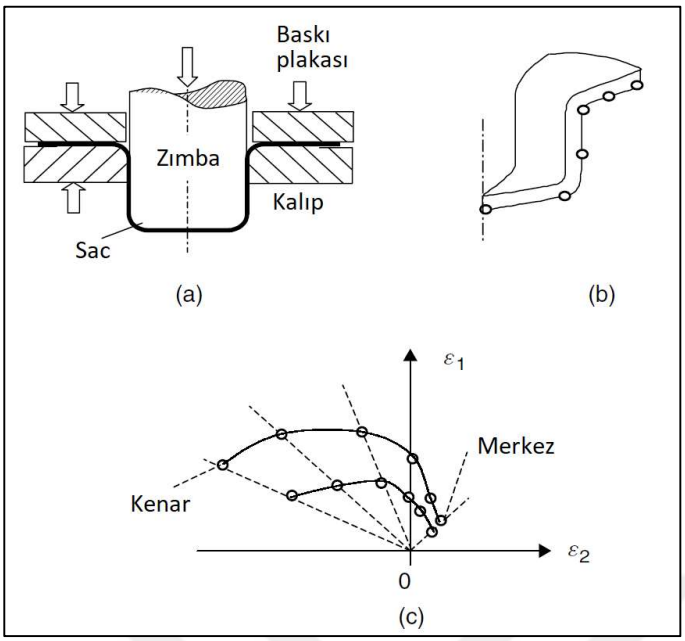
Derin çekme işleminde kullanılan temel aparatlar Şekil 3.6'da görülmektedir. Çekme işleminde taslak parça, bir başka ifade ile sac numune zımba ile bastırılarak kalıp boşluğuna itilir. Pot çemberinin (baskı plakası veya sac tutucu olarak ta isimlendirilir) görevi çekme işlemi esnasında baskı kuvveti uygulayarak kırışıklık oluşumunu engellemektir.



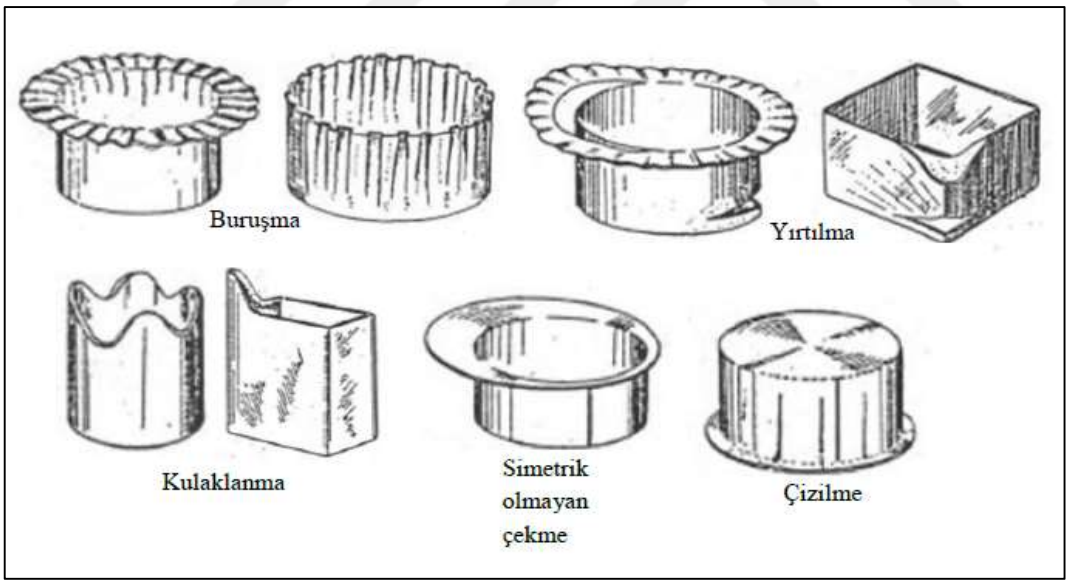
Şekil 3.6. Derin çekme için yararlanılan temel aparatlar [5]

Derin çekme işlemi esnasında radyal yönde çekme gerinimleri oluşurken sacın baskı plakası ile temas ettiği flanş kısmında teğetsel yönde basma gerinimleri oluşur. Sacın kenar kısmına yaklaştıkça basma gerinimlerinin değeri büyümektedir (Şekil 3.7). Oluşan basma gerilmeleri sacı bükerek kırışıklık oluşumuna neden olabilir, sac tutucu plaka ile basma gerilimleri baskılanarak kırışıklık oluşumu engellenmeye çalışılır.

Derin çekme işlemi sonucu çeşitli hatalar meydana gelebilir (Şekil 3.8). Baskı plakası kuvvetinin fazla büyük olması, çok küçük kalıp radyüsü, yetersiz yağlama ve çekme boşluğu gibi nedenlerle üretilen parçada yırtılmalar oluşabilir. Yetersiz baskı plakası kuvveti, kalıp radyüsünün ve çekme boşluğunun fazla büyük olması, kırışıklıklar oluşmasına neden olabilir. Yağlamanın homojen yapılamaması, zımba ya da kalıbın eksenden kaçık olması ve sac numunenin düzgün yerleştirilememesi gibi hatalar nedeniyle üretilen parçada kulaklanmalar oluşabilir veya parça simetrisi bozulabilir [73].



Şekil 3.7. Derin çekme işlemi sırasında oluşan gerinimler [71]; a) Silindirik derin çekme işlemi çizimi, b) Gerinimlerin ölçüldüğü bölgelerin gösterildiği kap kesiti, c) İki kademeli çekme işlemi için gerinim grafikleri



Şekil 3.8. Derin çekme işleminde oluşabilecek hatalar [6]

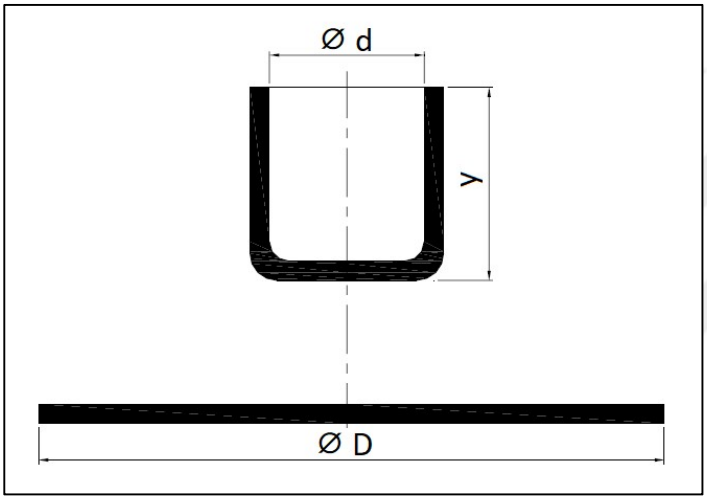
3.3. İlkel Parça Çapının ve Çekme Oranının Belirlenmesi

Derin çekme işleminde çekilecek sac parçaya "ilkel parça" denir. Tasarlanan parçanın hatasız olarak üretilebilmesi için işlem öncesinde ilkel parça boyutlarının doğru hesaplanması son derece önemlidir. Diğer plastik şekil verme işlemlerinde olduğu gibi

derin çekme işleminde de çekme işlemi sonrasında ilkel parçanın hacminin değişmediği kabul edilir [6].

3.3.1. Alan yöntemi

Silindirik parçaların derin çekme ile imalatında ilkel parça çapı belirlenirken, sac parçasının işlem öncesindeki kesit alanının, çekme işlemi sonrası oluşan kesit alanına eşit olduğu var sayılır ve ilkel parça çapı aşağıdaki Eşitlikler ile hesaplanır [6].



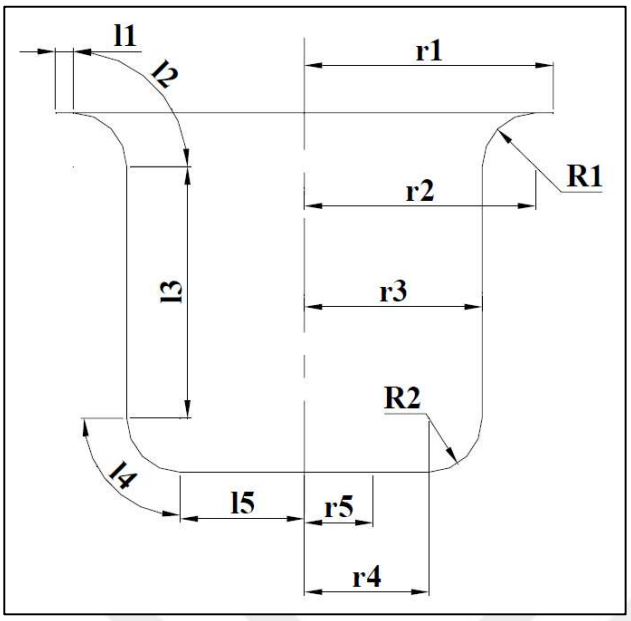
Şekil 3.9. Alan yöntemi ile ilkel parça çapının hesaplanması [73]

$$\frac{(D^2\pi)}{4} = \frac{(d^2\,\pi)}{4} + d.\pi.y \tag{3.13}$$

$$D = \sqrt{d^2 + 4.d.y} \tag{3.14}$$

3.3.2. Uzunluk ve ağırlık merkezi yöntemi

Bu yöntemde, ilkel parça çapını belirlemek için, parçanın simetrik kesiti alınır ve parça bölgelere ayrılır ve her bir kenarın uzunlukları ayrı ayrı belirlenir. Bu uzunluklar ile ağırlık merkezlerinin parça eksenine olan uzaklıkları çarpımının toplamı, ilkel parçanın alanına eşitlenir [73].



Şekil 3.10. Uzunluk ve ağırlık merkezi yöntemiyle ilkel parça çapın belirlenmesi [73]

$$\text{İlkel parça alanı} = \frac{(D^2\pi)}{4} \tag{3.15}$$

$$\text{Üretilen kabın alanı} = 2\pi r_1 l_1 + 2\pi r_2 l_2 + 2\pi r_3 l_3 + 2\pi r_4 l_4 + 2\pi r_5 l_5 \tag{3.16}$$

Eşitlikleri kullanılarak;

$$\text{D} = [8r_1 l_1 + 8r_2 l_2 + 8r_3 l_3 + 8r_4 l_4 + 8r_5 l_5]^{1/2} \tag{3.17}$$

Eş. 3.17 elde edilir.

3.4. Limit Çekme Oranı

Limit çekme oranı, yırtılma ya da kırışma olmadan başarılı bir şekilde çekilebilecek sacın en büyük ilkel çapının (D_{max}) işlem sırasında kullanılan zımba çapına (d) oranı olarak tanımlanmıştır [6].

Limit çekme oranının (LDR) hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılır [6].

$$\text{LDR} = \frac{D_{max}}{d} \tag{3.18}$$

3.5. Çekme İşlemine Etki Eden Parametreler

3.5.1. Çekme boşluğu

Kalıp boşluğu yarıçapı ile zımba yarıçapı arasındaki mesafe çekme boşluğu olarak isimlendirilir ve "c" ile gösterilir. Çekme boşluğu değeri, işlemde kullanılacak sac parçanın kalınlığı ile orantılı olarak artırılmalıdır[6].

Çekme boşluğunun uygun değerde seçilmesi son derece önemlidir. Çekme boşluğu çok dar olursa, sürtünme artar, kalıp çok fazla ısınır ve de sac parça sıkışabilir. Boşluk gereğinden fazla olursa bu kez sacda katlanma ve kırışma oluşabilir [6].

Çekme boşluğu için Oehler eşitliği aşağıda verilmiştir [6].

$$c = t + k.\sqrt{10.t} \tag{3.19}$$

Eşitlikte t, sac kalınlığını sembolize etmekte ve k değeri malzemeye bağlı bir sabittir.
Çelik sac malzemeler için k = 0,07;
Demir içermeyen saclar için k = 0,04;
Alüminyum saclar için ise k = 0,02 değerinde alınır.

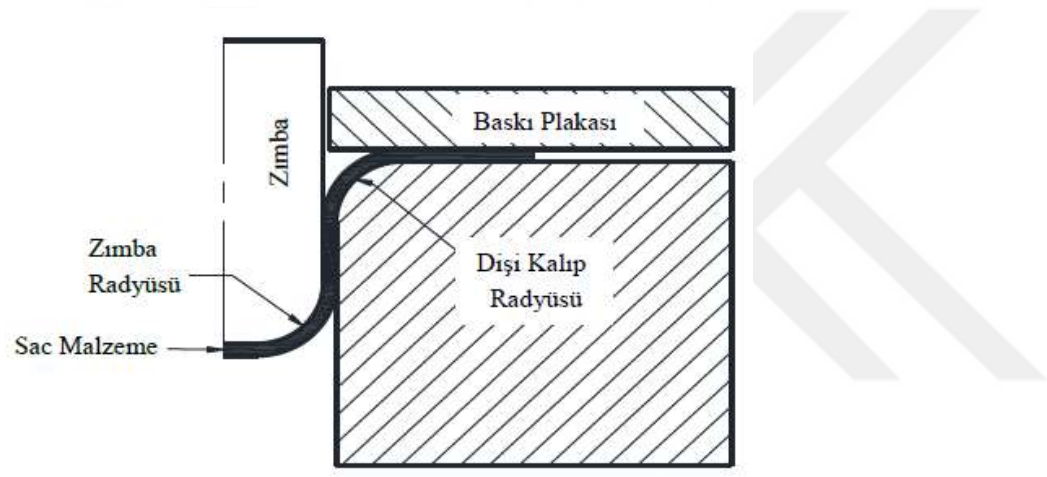
3.5.2. Kalıp ve zımba radyüsleri

Derin çekme işleminde sacın kalıp boşluğuna akmasını kolaylaştırmak için zımba ve kalıp radyüslerinin yeterince büyük olması gerekmektedir. Fakat gereğinden fazla büyük kalıp radyüsü sac tutucu plakanın sac ile temas ettiği alanı azaltır ve sacda kırışmalar oluşmasına sebep olabilir [6].

Kalıp ve zımba radyüslerinin çok küçük olması durumunda ise sacın kalıp boşluğuna akması daha zor hale gelecek; çekme kalıbı, kesme kalıbı gibi davranacak ve sac, çekme

işlemi tamamlanamadan yırtılacaktır [6].

Derin çekme işleminde sacda yırtılmalar genellikle kap duvarının alt kısmında meydana gelir (zımba radyüsünün kap duvarıyla birleştiği yer). Kabın alt kısımda sac malzemenin dayanımı en azdır çünkü bu bölgede kabın yan duvarları kadar pekleşme sertleşmesi olmaz. Kap duvarlarının dayanımı, sacın kalıp radyüsü üzerinde eğilmesi nedeniyle pekleşme sertleşmesiyle artar. Zımba radyüsü arttıkça, yırtılma yeri pekleşme sertleştirmesiyle güçlendirilmiş olan malzemeye (kap duvarlarına) doğru yukarı yönde kayar [72].



Şekil 3.11. Zımba ve kalıp radyüsleri [6]

3.5.3. Çekme kuvveti

Çekme kuvveti, derin çekme işleminin başlangıcından işlem tamamlanana kadar sac parça üzerine etki eden kuvvet olarak tanımlanır. Çekme kuvveti sac kalınlığına, malzemenin çekme dayanımına, zımba çapına, baskı plakası kuvvetine, sürtünme koşullarına, kalıp ve zımba radyüslerine bağlıdır [6].

3.5.4. Sac tutucu (baskı plakası) kuvveti

Baskı plakası kuvveti, çekme işlemi sırasında malzemede oluşabilecek kırışmaları engellemek amacıyla uygulanabilecek en önemli parametrelerden biridir. Baskı plakası kuvveti gereğinden büyük olursa kalıp ile sac ara yüzeyinde oluşan sürtünme kuvveti artar

ve sacda hasarlar oluşur. Bu kuvvet yetersiz olduğunda ise sac malzemede kırışmalar ortaya çıkar [6].

3.5.5. Çekme hızı

Çekme hızı, sac malzemenin şekil değiştirmesini etkileyen önemli bir parametredir. Sac malzemeye akması için yeterli süre tanınmazsa elde edilen ürünler üzerinde çatlaklar oluşabilir [77].

Kranklı preslerde koça bağlı olarak deformasyon hızı değişkendir, hidrolik preslerde ise çekme hızı hidrolik donanımların kontrolü sayesinde çekme işlemi süresince sabitlenebilir. Klasik çekme işlemlerinde çekme hızı için kesin kurallar yoktur. Fakat Çizelge 3.1'de ortalama çekme hızlarına için tavsiye edilen değerler sunulmuştur [77].

Çizelge 3.1. Derin çekme işlemi için önerilen çekme hızları (mm/s) [77]

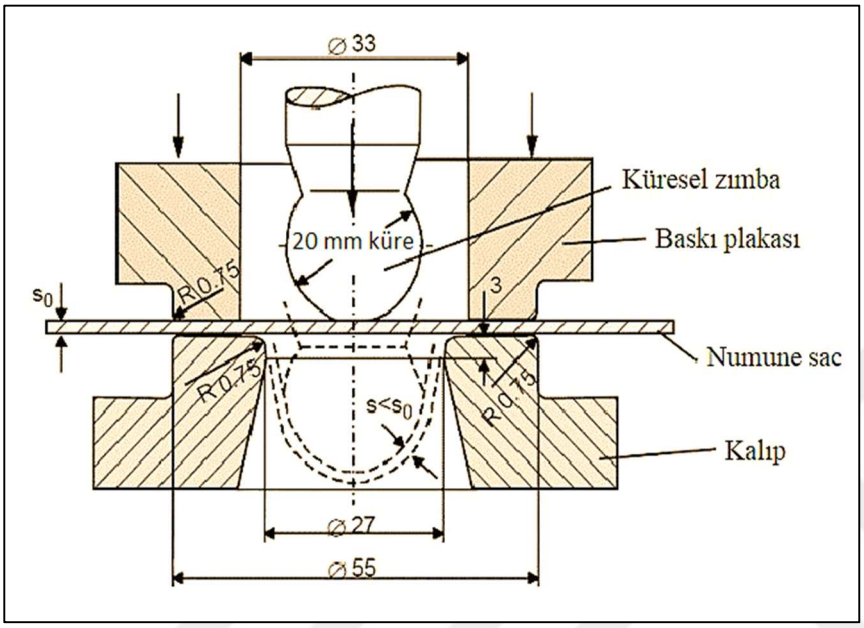
Malzeme	Tek etkili presler	Çift etkili presler
Alüminyum	900	500
Al. Alaşımları	-	150-200
Pirinç	1000	500
Bakır	750	430
Çelik	300	180-250
Paslanmaz çelik	-	100-150

3.6. Erichsen Şişirme Testi

Erichsen şişirme testi, sac metalin şekillenme kabiliyetini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Erichsen şişirme deneylerinin nasıl gerçekleştirileceği ISO 20482:2013 standardında açıklanmıştır. Test sırasında, metal sac numune bir zımba yardımıyla bastırılarak sac numune üzerinde kupa benzeri bir şekil meydana getirilir. Sacın tüm kalınlığı boyunca uzanan çatlak meydana geldiği ana kadar zımbanın aldığı mesafe derinliği ölçülür ve bu derinlik Erichsen Sabiti (ES) olarak adlandırılır [3].

Erichsen deneylerinde çapı 20 mm olan küresel başlı zımba kullanılır. Kalıp deliğinin çapı 27 mm ve kalıp radyüsü 0,75 mm değerlerindedir (Şekil 3.11). Sac numuneyi sıkıştırmak

için 10 kN baskı plakası kuvveti uygulanır ve standarda göre deneyler kuru ortamda yapılmalı, kalıp veya sac numuneye yağlayıcı madde sürülmemelidir. Erichsen deneyleri neticesinde ulaşılan ES değeri ne denli büyükse sac malzemenin şekillenebilirliği o kadar iyidir [4].

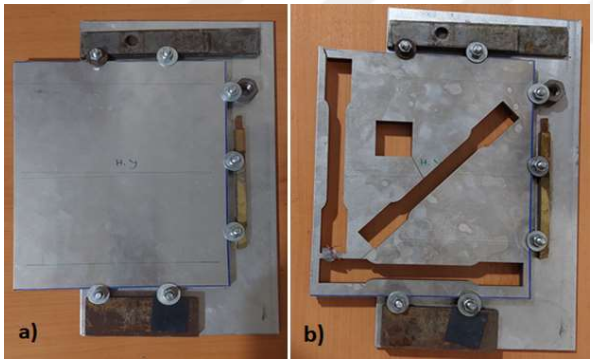


Şekil 3.12. Erichsen şişirme testi [4]

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada Al3105 alüminyum ve DC04 çelik sac numuneler Erichsen testlerine ve derin çekme deneylerine maruz bırakılmışlardır. Öncelikle sac malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için tek eksenli çekme testleri yapılmıştır. Sonrasında ise Erichsen şişirme testleri ve derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hata olasılığını azaltmak için deneyler 3 kez tekrarlanmıştır.

Erichsen şişirme testleri ve tek eksenli çekme testi numunelerinin hazırlanması için sac plakalar (1 mm kalınlığında alüminyum ve 0,5 mm; 0,8 mm; 1mm kalınlığındaki çelik saclar) markalanmış ve giyotin ile kesilmişlerdir. 180 mm x 210 mm boyutlarında kesilen sac plakalar (Resim 4.1) tel erozyon tezgâhında (Resim 4.2) kesilerek tek eksenli çekme numuneleri (ISO 6892-1:2009 standardında) ve malzemelerin kimyasal içeriğini belirlemek için optik emisyon spektrometre cihazında kullanılan numuneler elde edilmiştir (Resim 4.3).



Resim 4.1. Sac plakalar; a) Kesimden önce, b) Tel erozyon ile kesildikten sonra



Resim 4.2. Tel erozyon tezgahında tek eksenli çelme testi numunelerinin kesimi



Resim 4.3. Alüminyum ve çelik sac plakalardan kesilen tek eksenli çekme ve karakterizasyon testi numuneleri

Tek eksenli çekme testi için hadde yönünde (0°), hadde yönüne 45° ve hadde yönüne dik (90°) doğrulta kesilerek hazırlanan numuneler Utest test cihazı ile 1 mm/dk. çekme hızında deforme edilmiştir (Resim 4.4). Tel erozyon ile kesme işlemi sonucunda numune kenarlarında meydana gelen mikro yapı değişiminin test sonuçlarına etkisi ihmal edilmiştir.



Resim 4.4. Tek eksenli çekme testi cihazı

Sac malzemelerin karakterizasyon testi Bruker Q4 TASMAN cihazında (Resim 4.5) yapılmış ve testler sonucunda malzemelerin elde edilen kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.



Resim 4.5. Optik emisyon spektrometre cihazı

Çizelge 4.1. Alüminyum alaşımı sacın ağırlıkça (%) kimyasal bileşimi

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Al
0,24	0,77	0,101	0,508	0,83	0,048	0,014	97,35

Çizelge 4.2. Çelik sacların ağırlıkça (%) kimyasal bileşimi

Kalınlık (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	N	Fe
0,5	0,088	<0,01	0,159	<0,005	<0,002	0,038	0,045	0,042	99,46
0,8	0,06	<0,01	0,163	<0,005	<0,002	0,021	0,028	0,055	99,52
1	0,072	<0,01	0,197	<0,005	<0,002	0,026	0,029	0,075	99,43

Test sonuçlarının malzeme veri tabanındaki bileşimlerle karşılaştırılmasıyla alüminyum alaşımının Al 3105 ve çelik sacların DC04 olduğu belirlenmiştir.

4.1. Erichsen Test Cihazının Kalibrasyonu

FDK-2023-8497 kodlu proje kapsamında, tasarımı ve imalatı yapılmış bir Erichsen test cihazı satın alma yoluyla temin edilmiştir. Erichsen test cihazının 50 kN'luk kapasiteye sahip yük hücresinin kalibrasyonu ve tahrik motorunun gücünün yüzde oranının kontrol

paneline girilmesiyle ayarlanan baskı plakası kuvvetinin kalibrasyonu 6 adet yaydan oluşan düzenek ile yapılmıştır (Resim 4.6).

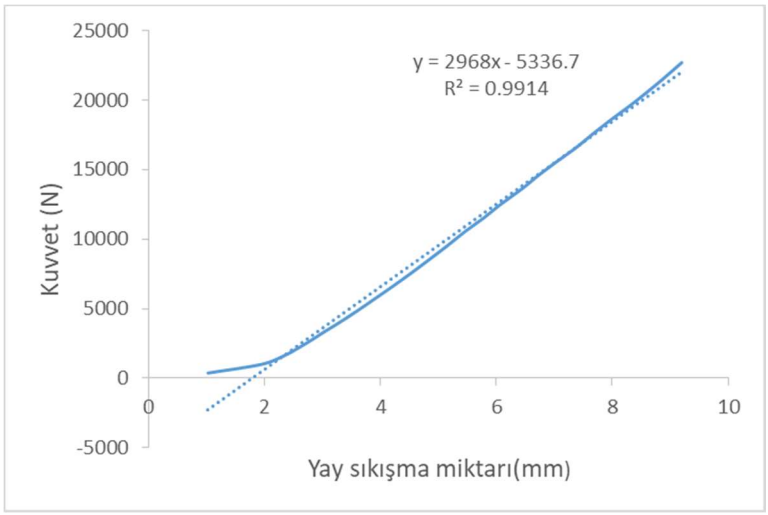


Resim 4.6. Kalibrasyon işleminde kullanılan yaylı düzenek

Zımba kuvvetinin kalibrasyonu yapılırken baskı plakası ve zımba arasına yerleştirilen düzenekteki yayların sıkışma miktarı komparatör ile ölçülmüş (Resim 4.7) ve bu ölçümün yapıldığı anda Erichsen test cihazının kontrol panelinden okunan zımba kuvveti kaydedilmiştir. Elde edilen veriler birleştirilerek kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 4.1).



Resim 4.7. Yaylı düzenek ve komparatör yardımıyla Erichsen test cihazının kalibrasyonu

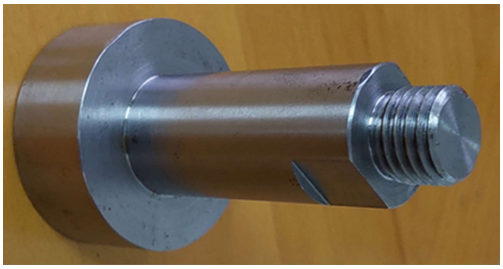


Şekil 4.1. Zımba kuvveti kalibrasyon eğrisi

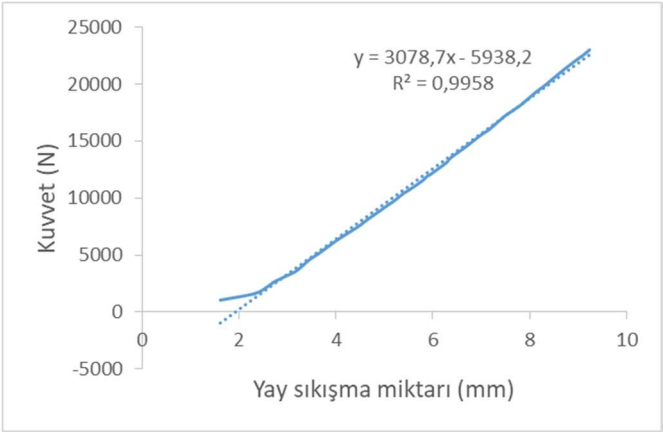
Baskı plakası kuvvetinin kalibrasyonu yapılırken, yük hücresine bağlanan düz silindir başlı zımba (Resim 4.8) ile yaylı düzenek bir miktar yükseltilmiş ve zımba hareketi durdurulmuş sonrasında ise baskı plakası kuvveti ayarında kullanılan her bir yüzde değeri (%12 ile % 50 aralığında) kontrol paneline girilerek ekranda okunan yük değeri ve komparatör ile ölçülen sıkışma miktarı ölçülmüş (Çizelge 4.3) ve kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 4.2).

Çizelge 4.3. Baskı plakası kuvvetinin kalibrasyon ölçümleri

Motor gücü (%)	Yay sıkışma miktarı (mm)	Kuvvet (N)	Motor gücü (%)	Yay sıkışma miktarı (mm)	Kuvvet (N)
12	1,61	1055	31	5,51	10 709
13	2,32	1624	32	5,78	11 500
14	2,58	2218	33	5,88	11 900
15	2,72	2640	34	5,96	12 100
16	2,94	3100	35	6,09	12 500
17	3,16	3554	36	6,28	13 100
18	3,3	4030	37	6,37	13 531
19	3,44	4552	38	6,64	14 360
20	3,68	5250	39	6,98	15 472
21	3,84	5750	40	7,16	16 000
22	3,99	6217	41	7,39	16 837
23	4,18	6750	42	7,53	17 327
24	4,46	7500	43	7,80	18 100
25	4,63	8050	44	8,13	19 286
26	4,79	8530	45	8,30	19 820
27	4,88	8800	46	8,56	20 738
28	5,07	9370	47	8,75	21 400
29	5,2	9750	48	9,00	22 200
30	5,39	10394	49	9,10	22 500
			50	9,24	23 000



Resim 4.8. Kalibrasyon işlemi sırasında yük hücresine bağlanan zımba



Şekil 4.2. Baskı plakası kuvveti kalibrasyon eğrisi

Kalibrasyon eğrilerinin eğimi dikkate alındığında eşdeğer yay sabitinin ortalama 3024 N /mm civarında olduğunu tespit edilmiştir. Tek bir yayın yay sabiti ise 504 N/mm olarak hesaplanmış ve bu değerin yayın seçiminin yapıldığı katalogda beyan edilen değere (528 N/mm) oldukça yakın ve hata oranının % 4,45 olduğu tespit edilmiştir. Başlangıçta yayların yuvalarına tam oturmaması ve baskı kuvvetini sağlayan hareketli plakanın yüzeyi ile kalibrasyonda kullanılan yaylı düzeneğin yüzeylerinin tam paralel olmaması gibi kusurlar nedeniyle düşük sıkışma miktarlarında hata oranı fazladır. Şekil 4.2 incelendiğinde yay sıkışma miktarı 2,32 mm değerini aştığında hata miktarının azaldığı ve kalibrasyon eğrisi ile gerçek değerlerin örtüştüğü görülmektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilen R^2 değerleri dikkate alındığında kalibrasyon eğrilerinin ölçülen kuvvet değerleri ile % 99 üzerinde uyumlu olduğu görülmektedir.

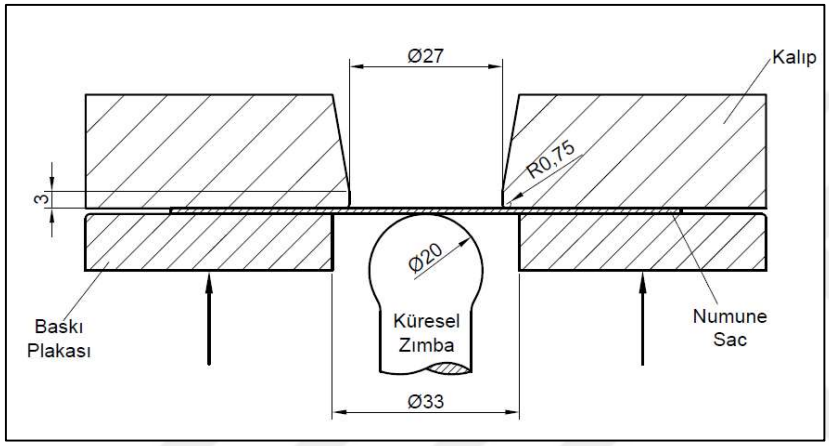
4.2. Erichsen Testlerinin Tasarımı

Standart Erichsen deney düzeneğinin şematik gösterimi; deneylerde kullanılan zımbalar ve baskı plakaları Şekil 4.3 ve Resim 4.9'da verilmiştir. Erichsen şişirme testinde zımba çapı

değiştiğinde kalıp ve baskı plakası çapları da değişmektedir (Çizelge 4.4). Erichsen deneylerinde kullanılan tüm sac numuneler 90 mm x 90 mm ölçülerindedir (Resim 4.10).

Çizelge 4.4. Erichsen şişirme testi aparatlarının ölçüleri

Kalıp Seti No	Zımba çapı (mm)	Baskı plakası delik çapı (mm)	Kalıp delik çapı (mm)
1	8	10	11
2	20	33	27
3	25	40	40



Şekil 4.3. Erichsen şişirme testinin şematik gösterimi



Resim 4.9. Deneylerde kullanılan farklı çaplardaki zımba ve kalıplar



Resim 4.10. Erichsen testi için hazırlanmış çelik ve alüminyum numuneler

Erichsen testlerinin tasarımı için Taguchi L9 ortogonal dizini tercih edilmiştir. Çelik saclar ile yapılan deneylerde sac kalınlığı, zımba hızı ve zımba çapı olmak üzere üç faktör ve her bir faktör için üç seviye belirlenmiştir. Çizelge 4.5'te deney tasarımı verilmiştir. Çelik saclar ile yapılan deneylerde baskı plakası kuvveti sabit ve 10 kN değerindedir. Hiçbir Erichsen deneyinde yağlayıcı kullanılmamıştır. Alüminyum saclar ile yapılan deneylerde baskı plakası kuvveti, zımba hızı ve çapı olmak üzere üç faktör ve her faktör için üç seviye kullanılmıştır. Taguchi yöntemi ile hazırlanan deney tasarımı Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Çelik saclar için Taguchi deney tasarımı

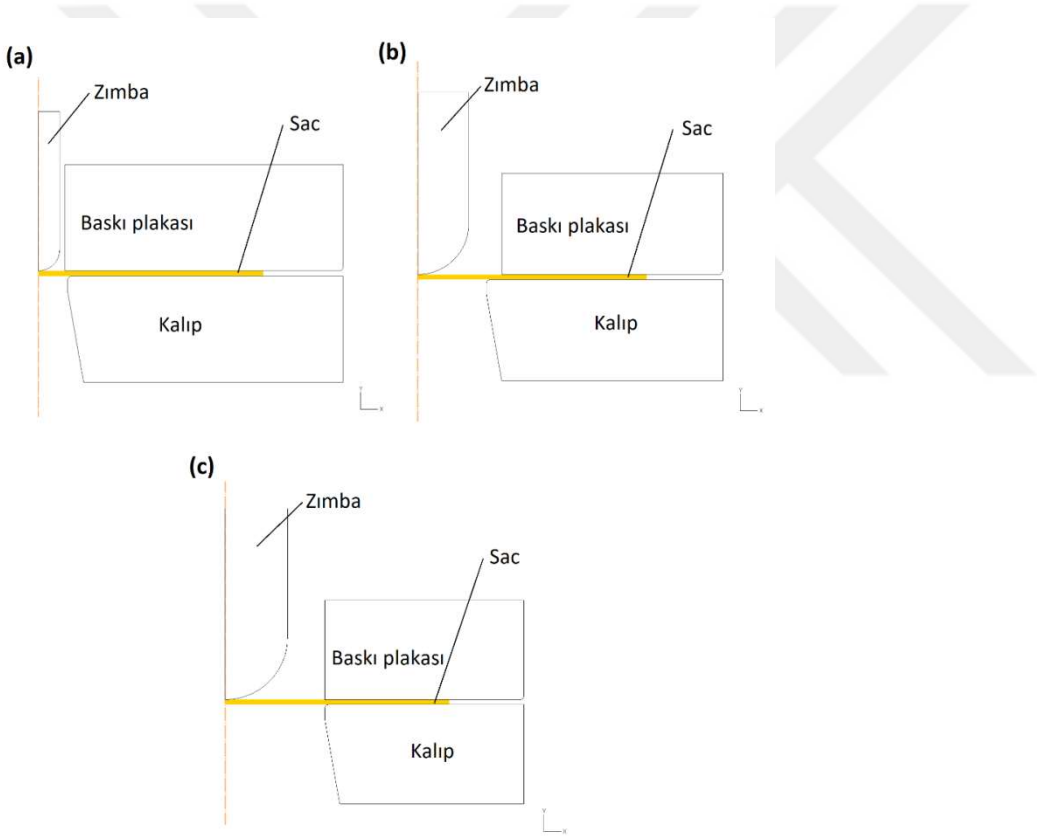
Deney No	Sac Kalınlığı (mm)	Zımba Hızı (mm/s)	Zımba Çapı (mm)
1	0,5	0,1	8
2	0,5	0,4	20
3	0,5	1	25
4	0,8	0,1	20
5	0,8	0,4	25
6	0,8	1	8
7	1	0,1	25
8	1	0,4	8
9	1	1	20

Çizelge 4.6. Alüminyum saclar için Taguchi deney tasarımı

Deney No	Baskı Kuvveti (kN)	Zımba Hızı (mm/s)	Zımba Çapı (mm)
1	3,5	0,1	8
2	3,5	0,4	20
3	3,5	1	25
4	6,2	0,1	20
5	6,2	0,4	25
6	6,2	1	8
7	10,4	0,1	25
8	10,4	0,4	8
9	10,4	1	20

4.3. Erichsen Deneylerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonları

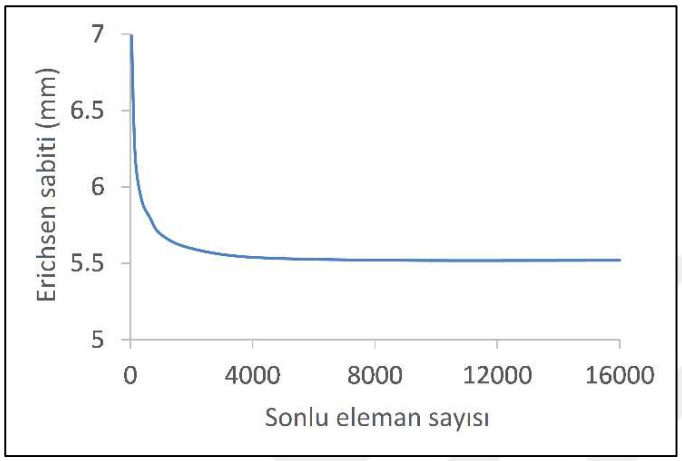
Simülasyonlar, Taguchi yöntemi ile tasarlanan Erichsen deneylerinde kullanılan aynı parametre değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Kuru sürtünme koşulları altında yürütülen çalışmalar dikkate alınarak, zımba ile sac numune arasındaki sürtünme katsayısı 0,3 değerinde belirlenmiştir [78]. Zımba, baskı plakası ve kalıp analitik rijit olarak modellenmiş (Şekil 4.4) ve sac numunelerin izotropik olduğu kabul edilmiştir. Simülasyonlarda yapısal dört kenarlı sonlu elemanlar ağı kullanılmıştır. Her bir adımda zımba ilerleme mesafesi 0,03 mm olarak ayarlanmış ve 20 adımda bir yeniden ağ örme (remesh) yapılmıştır. Simülasyonlar Deform-2D yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4. Deform 2D programı ile farklı kalıp setleri için simülasyon tasarımları; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm

Simülasyon sonuçlarının sonlu eleman sayısına bağımlılığını değerlendirmek için 1 mm kalınlığındaki sac ve 8 mm çapındaki zımba kullanılarak değişen sayıda sonlu eleman ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta 40 eleman ile ağ örgüsü oluşturulmuş ve sayı kademeli olarak artırılmıştır. 40 eleman ile yapılan simülasyon sonucunda Erichsen sabiti 6,99 mm değerinde bulunmuştur. Eleman sayısı 4000 değerini aştığında ise Erichsen

sabitinin 5,54 mm'ye yakınsadığı görülmektedir (Şekil 4.5). Bundan dolayı her bir deneyin simülasyonu 4000 sonlu elaman kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda sac metal malzemelerin sünek kırılma özelliklerini tahmin etmek için normalize edilmiş Cockcroft & Latham hasar kriteri esas alınmıştır. Bu kritere göre Kritik Hasar Değeri (Critical Damage Value / CDV), Eş. 4.1'de verilen formül ile hesaplanmaktadır.

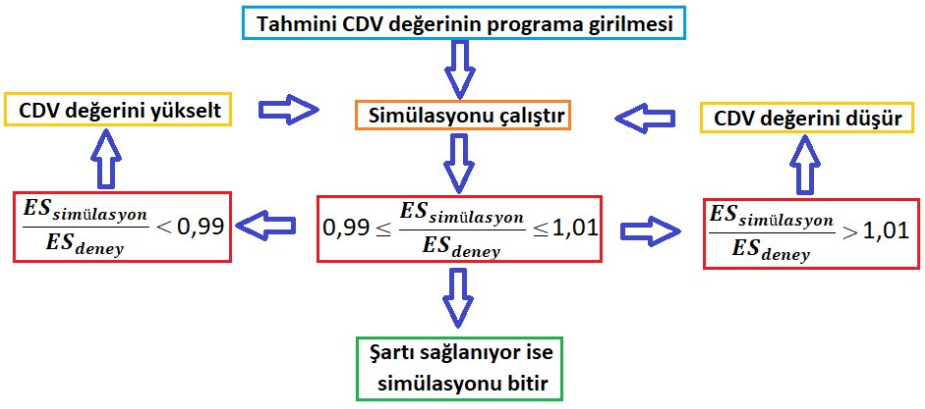


Şekil 4.5. Erichsen sabitinin sonlu eleman sayısı ile değişimi

$$CDV = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} \tag{4.1}$$

Burada σ* en büyük asal gerilme; $\bar{\sigma}$ efektif gerilme ve $\bar{\varepsilon}$ ise efektif gerinimdir.

CDV belirlenirken 20 mm çaplı zımba ile yapılan Erichsen deneyleri dikkate alınmış ve simülasyonlarda bulunan Erichsen Sabiti değeri deneylerde elde edilen değere yeterince yaklaşıncaya kadar simülasyonlar tekrar edilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Simülasyonlar sırasında CDV değerinin belirlenmesinin şematik gösterimi

0,5 mm, 0,8 mm ve 1,0 mm kalınlığındaki DC04 çelik saclar için CDV sırasıyla 0,622; 0,723 ve 0,817 değerlerinde bulunmuştur. Daha sonra, ideal sürtünmesiz durum için formüle edilen analitik çözümler [79] yardımıyla tüm Erichsen deneyleri için çatlak oluşumu sırasında ulaşılan efektif gerinimler hesaplanmıştır. Efektif gerilme izotropik sac malzemelerde asal gerilmelere eşit olduğundan [80], Eş. 4.1 dikkate alındığında CDV değerinin çatlama anında ulaşılan efektif gerinime (limit gerinime) eşit olduğu varsayılabilir. Bu nedenle, 20 mm çaplı zımba ile yapılan simülasyonlardan elde edilen CDV değerleri sürtünmesiz durumda çatlak oluşumu anında ulaşılan teorik efektif gerinimler ile karşılaştırılmıştır. Sürtünme altındaki 1 mm, 0,8 mm ve 0,5 mm kalınlıkta çelik ve 1 mm kalınlığında alüminyum saclar için çatlak başlama anında elde edilen efektif gerinimlerin, sürtünmesiz durumdaki değerlerinin sırasıyla %75, %73, %68 ve %77,6'sına eşit olduğu görülmüştür. Bu yüzdelerle, diğer Erichsen deneyleri için CDV değerleri hesaplanmış ve simülasyonlara girilmiştir. Simülasyonlar ile deneyler arasındaki hata oranını hesaplamak için Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) yöntemi tercih edilmiştir (Eş. 4.2).

$$MAPE = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|Xs_i - X_i|}{Xd_i} \tag{4.2}$$

Xs ve Xd sırasıyla simülasyonlardan ve deneylerden elde edilen verileri, n ise gerçekleştirilen toplam deney sayısını ifade etmektedir.

4.4. Standart Kalıp ile Yapılan Derin Çekme Simülasyonları

Standart derin çekme simülasyonlarında zımba radyüsü 4 mm seçilmiş ve tüm simülasyonlarda aynı değerdedir. Eş. 3.19 ile çekme boşluğu, 1 mm kalınlığındaki alüminyum sac ve 0,5 mm, 0,8 mm ve 1,0 mm kalınlığındaki çelik saclar için hesaplanmış ve Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Derin çekme simülasyonlarında kullanılan çekme boşluğu değerleri

Sac malzeme	Kalınlık (mm)	Çekme boşluğu (mm)
Al3105 alüminyum	1	1,06
DC04 çelik	0,5	0,65
	0,8	1,00
	1	1,22

Literatürde kalıp radyüsü değerini hesaplamak için önerilen Eşitlik [81] aşağıda verilmiştir.

$$r = 0{,}8\sqrt{(D-d)t} \tag{4.3}$$

D: İlkel sac çapını,

d: Zımba çapını,

t: Sac kalınlığını ifade etmektedir.

Baskı plakası kuvvetini hesaplamak için ise Eşitlik 4.4 önerilmektedir [81, 82].

$$BHF = \frac{\pi dt[D/d-0{,}6)\sigma_y}{3} \tag{4.4}$$

BHF: Baskı plakası kuvvetini,

σ_y: Akma dayanımını sembolize etmektedir.

Tek eksenli çekme testleri ile Al3105 alüminyum alaşımı için akma dayanımı ortalama 117 MPa ve DC04 çelik için ise 210 MPa değerlerinde belirlenmiştir. Eş. 4.3 ve Eş. 4.4 dikkate alınarak Al3105 alüminyum ile yapılan derin çekme simülasyonlarında kalıp radyüsü (2 mm, 2,5 mm ve 3 mm) ve baskı plakası kuvveti (2 kN, 3 kN ve 4 kN) için üç farklı değer belirlenmiştir. DC04 çelik sac ile yapılan derin çekme simülasyonlarında ise kalıp radyüsü için yine 2 mm, 2,5 mm ve 3 mm değerleri ve baskı plakası kuvveti için ise 4 kN, 7 kN ve 10 kN değerleri kullanılmıştır.

Tüm simülasyonlarda zımba çapı sabit ve 20 mm değerindedir. Ayrıca zımba-sac yüzeyindeki sürtünme katsayısı 0,25 [63]; sac-kalıp ve sac-baskı plakası temas yüzeyleri için ise sürtünme katsayısı 0,15 [1] değerlerinde girilmiştir. Simülasyonlarda sonlu eleman sayısı 4000 ve her bir adımda zımba ilerleme mesafesi 0,03 mm'dir.

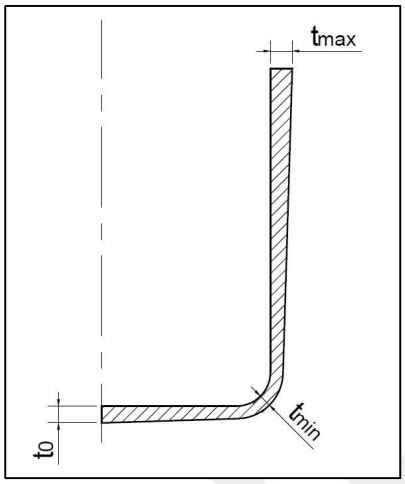
Şekil 4.7'de derin çekme işlemi sonrası elde edilen silindirik kabın et kalınlığında meydana gelen kalınlık değişimi temsili olarak gösterilmiştir. İlkel parça sac kalınlığı t_0, en büyük sac kalınlığı t_{max} ve en ince sac kalınlığı t_{min} ile sembolize edilmiştir.

En büyük incelme ve kalınlaşma değerleri aşağıdaki Eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$En\ büyük\ kalınlaşma\ (\%) = \frac{t_{max}-t_0}{t_0} x100 \tag{4.5}$$

$$En\ büyük\ incelme\ (\%) = -\frac{t_{min} - t_0}{t_0} x100 \quad (4.6)$$

$$En\ büyük\ kalınlık\ farkı\ (\%) = \frac{t_{max} - t_{min}}{t_0} x100 \quad (4.7)$$



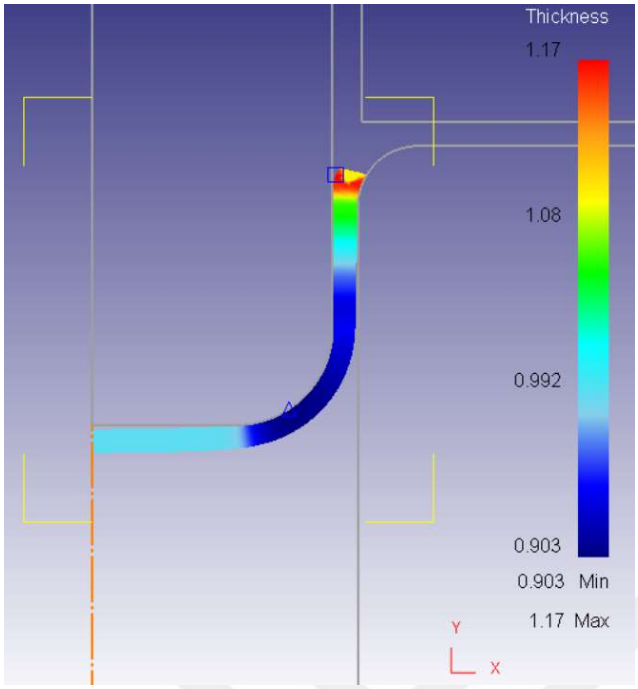
Şekil 4.7. Derin çekme işlemi sonrası sac kalınlığının değişimi

İlkel parça çapı 34 mm olan Al3105 alüminyum saclar ile yapılan derin çekme simülasyonları sonucunda sacda meydana gelen en büyük incelme ve kalınlaşma değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir. Sac kalınlığında meydana gelen en fazla kalınlaşmanın ve incelmenin %20'yi aşmadığı derin çekme simülasyonları başarılı kabul edilmiştir.

6 numaralı simülasyonda en az kalınlaşmanın ve kalınlık değişiminin gerçekleştiği görülmüştür. Bu nedenle Al3105 alüminyum sac için kalıp radyüsü 2,5 mm ve baskı plakası kuvveti 4 kN olarak belirlenmiştir. Simülasyon esnasında oluşan kalınlık değişimi Resim 4.11'de görülmektedir.

Çizelge 4.8. Al3105 sac ile yapılan standart derin çekme simülasyonları

Simülasyon no	Kalıp radyüsü (mm)	Baskı plakası kuvveti (kN)	Kalınlık farkı (%)	Kalınlaşma (%)	İncelme (%)
1	2	2	32,8	23	9,8
2	2	3	32,4	21	11,4
3	2	4	30,3	19	11,3
4	2,5	2	32,0	23	9,0
5	2,5	3	29,5	20	9,5
6	2,5	4	26,7	17	9,7
7	3	2	31,8	23	8,8
8	3	3	29,3	20	9,3
9	3	4	27,6	18	9,6



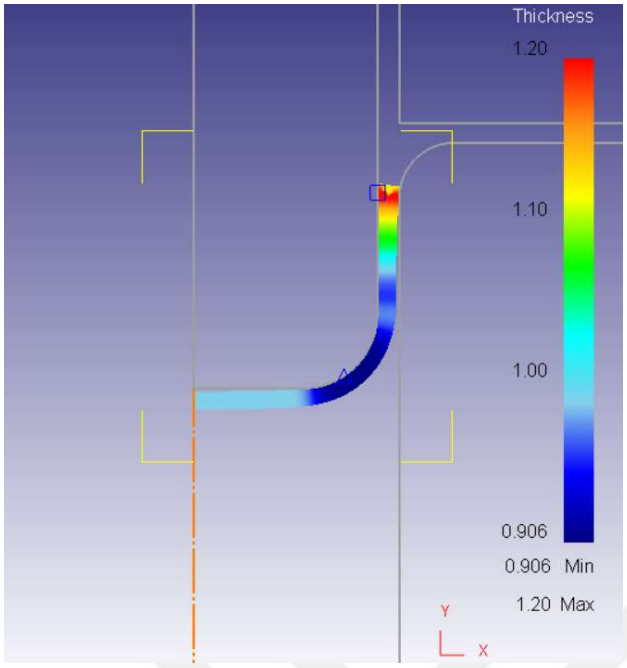
Resim 4.11. Al3105 alüminyum sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü 2,5 mm ve baskı plakası kuvveti 4 kN).

1 mm kalınlığındaki 35 mm çaplı DC04 çelik saclar ile yapılan derin çekme simülasyonları sonucunda sacda meydana gelen maksimum incelme ve kalınlaşma değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. DC04 sac ile yapılan standart derin çekme simülasyonları (Sac kalınlığı 1 mm)

Simülasyon no	Kalıp radyüsü (mm)	Baskı plakası kuvveti (kN)	Kalınlık değişimi (%)	Kalınlaşma (%)	İncelme (%)
1	2	4	34,2	25	9,2
2	2	7	33,5	23	10,5
3	2	10	31,4	20	11,4
4	2,5	4	33,7	25	8,7
5	2,5	7	32,3	23	9,3
6	2,5	10	29,7	20	9,7
7	3	4	32,5	24	8,5
8	3	7	31,1	22	9,1
9	3	10	29,4	20	9,4

En az kalınlaşmanın ve kalınlık değişiminin 9 numaralı simülasyonda gerçekleştiği görülmüştür. Bu nedenle 1 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac için kalıp radyüsü 3 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN olarak belirlenmiştir. Simülasyon esnasında oluşan kalınlık değişimi Resim 4.12'de sunulmuştur.

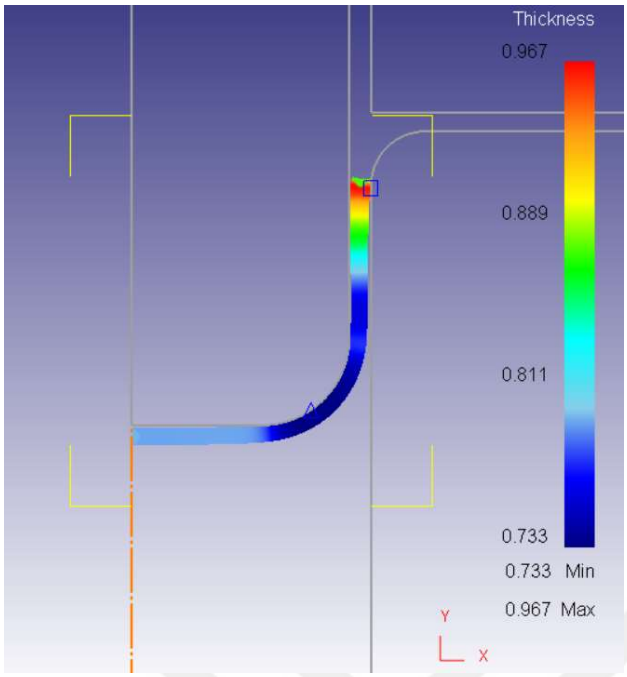


Resim 4.12. 1 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü 3 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN).

0,8 mm kalınlığındaki 35 mm çaplı DC04 çelik saclar ile yapılan derin çekme simülasyonları sonucunda sacda meydana gelen maksimum incelme ve kalınlaşma değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Çizelge 4.10 dikkate alındığında en az kalınlaşmanın ve kalınlık değişiminin 6 numaralı simülasyonda gerçekleştiği görülmüştür. Bu nedenle 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac için kalıp radyüsü 2,5 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN olarak belirlenmiştir. Simülasyon esnasında oluşan kalınlık değişimi Resim 4.13'te sunulmuştur.

Çizelge 4.10. DC04 sac ile yapılan standart derin çekme simülasyonları (Sac kalınlığı 0,8 mm)

Simülasyon no	Kalıp radyüsü (mm)	Baskı plakası kuvveti (kN)	Kalınlık değişimi (%)	Kalınlaşma (%)	İncelme (%)
1	2	4	34,25	26,25	8,00
2	2	7	32,75	23,75	9,00
3	2	10	31,375	21,375	10,00
4	2,5	4	34,00	26,25	7,75
5	2,5	7	31,75	23,625	8,125
6	2,5	10	29,25	20,875	8,375
7	3	4	32,75	25,00	7,75
8	3	7	31,375	23,25	8,125
9	3	10	29,375	21,00	8,375

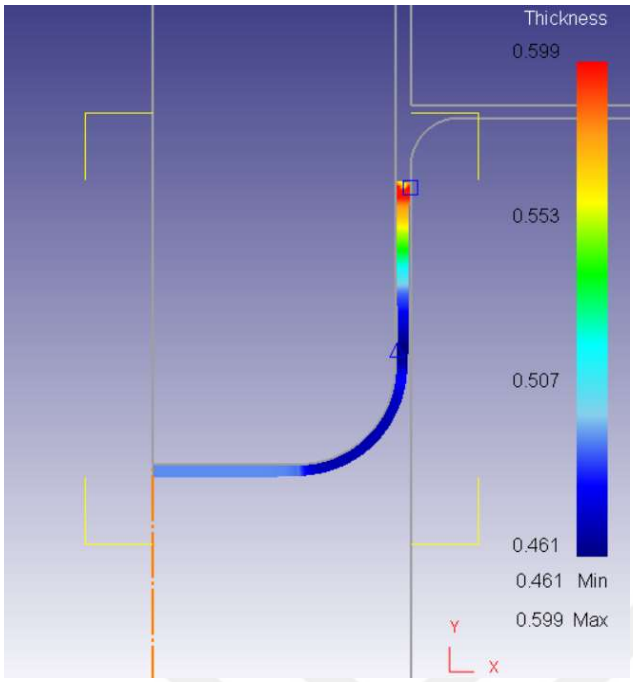


Resim 4.13. 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü 2,5 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN).

0,5 mm kalınlığındaki 35 mm çaplı DC04 çelik saclar ile yapılan derin çekme simülasyonları sonucunda sacda meydana gelen maksimum incelme ve kalınlaşma değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir. Çizelge 4.11 dikkate alındığında en az kalınlaşmanın 3 numaralı simülasyonda gerçekleştiği görülmüştür. Bu nedenle 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac için kalıp radyüsü 2 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN olarak belirlenmiştir. Simülasyon esnasında oluşan kalınlık değişimi Resim 4.14'te sunulmuştur.

Çizelge 4.11. DC04 sac ile yapılan standart derin çekme simülasyonları (Sac kalınlığı 0,5 mm)

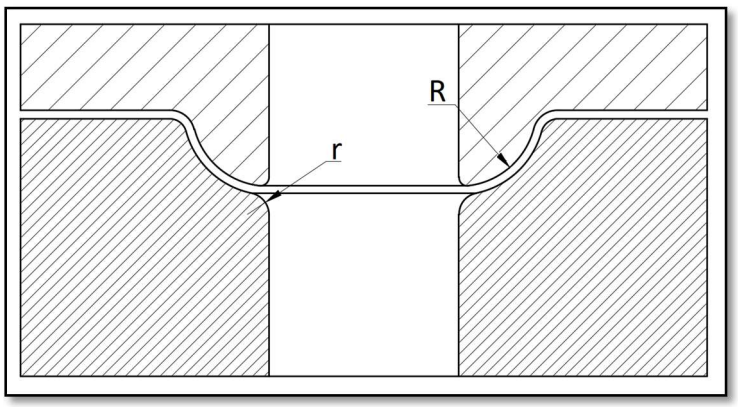
Simülasyon no	Kalıp radyüsü (mm)	Baskı plakası kuvveti (kN)	Kalınlık değişimi (%)	Kalınlaşma (%)	İncelme (%)
1	2	4	33,6	27,8	5,8
2	2	7	30,2	23,8	6,4
3	2	10	27,6	19,8	7,8
4	2,5	4	33,0	27,4	5,6
5	2,5	7	30,4	24,4	6,0
6	2,5	10	27,0	20,8	6,2
7	3	4	33,0	27,2	5,8
8	3	7	29,8	23,8	6,0
9	3	10	27,8	21,2	6,4



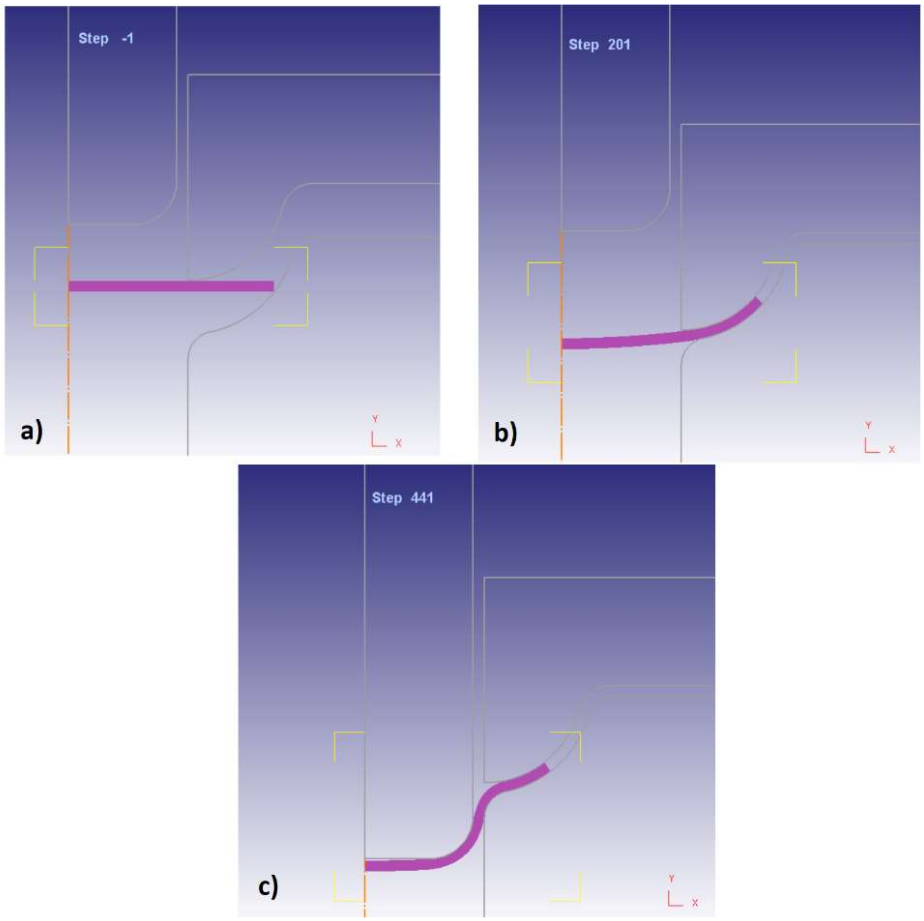
Resim 4.14. 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü 2 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN).

4.5. Kavisli Kalıp ve Baskı Plakası ile Yapılan Derin Çekme Simülasyonları

Şekil 4.8'de tasarlanan kalıp ve baskı plakasının kesit görünümü verilmiştir. Farklı baskı plakası yarıçapları (R) kullanılarak limit çekme oranının artırılması planlanmıştır. Simülasyon aşamaları Resim 4.15'te görülmektedir.



Şekil 4.8. Kavisli kalıp ve baskı plakasının kesit görünümü

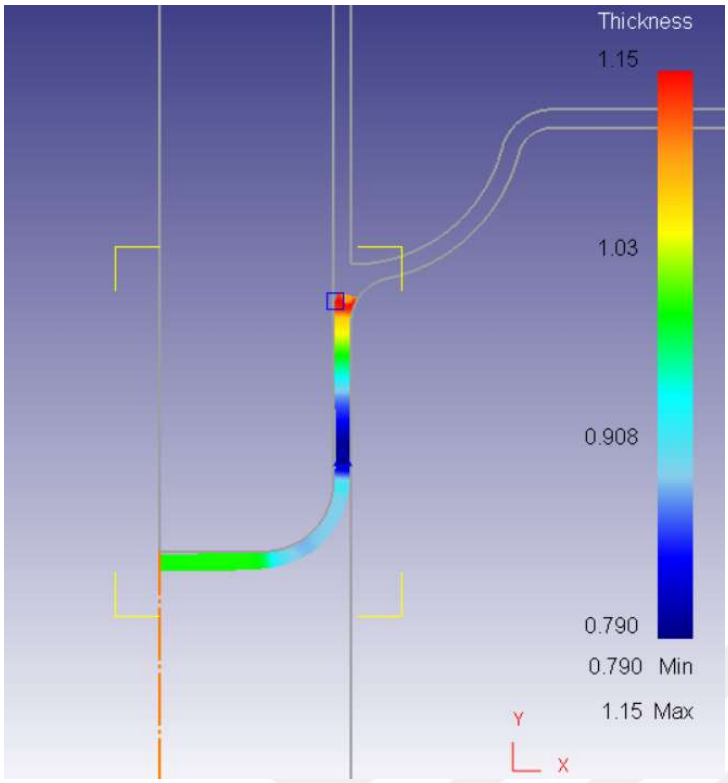


Resim 4.15. Kavisli kalıp ve baskı plakasıyla yapılan simülasyonların aşamaları; a) Başlangıç adımı, b) Baskı plakası ile sacın sıkıştırılması, c) Zımba ile sacın çekilmesi

1mm kalınlığındaki Al3105 alüminyum sac ile farklı kavis radyüsü (10 mm, 15 mm 25 mm ve 45 mm) kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları Çizelge 4.12'de sunulmuştur. Kavis radyüsü değerinin artmasıyla sac kalınlığında meydana gelen incelmenin azaldığı kalınlaşmanın ise arttığı görülmüştür. En az kalınlık farkı (%36) kavis radyüsü 10 mm iken elde edilmiştir.

Çizelge 4.12. Al3105 sac ile yapılan simülasyonlar sonucunda sacın kalınlık değişimi (Limit çekme oranı:1,9)

Simülasyon No	Kalıp Radyüsü (r) (mm)	Kavis Radyüsü (R) (mm)	BHF (kN)	Kalınlık Farkı (%)	Kalınlaşma (%)	İncelme (%)
1	2,5	10	4	36	15	21
2	2,5	15	4	37	17	20
3	2,5	25	4	38,5	19	19,5
4	2,5	45	4	37	18	19

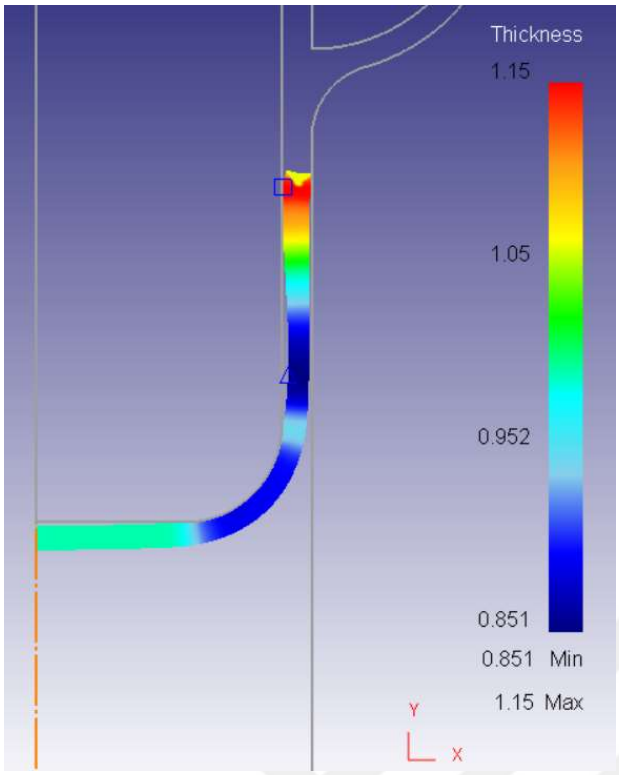


Resim 4.16. Al3105 alüminyum sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü (r) 2,5 mm, kavis radyüsü (R) 10 mm ve baskı plakası kuvveti 4 kN)

1 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac ile farklı kavis radyüsü kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları Çizelge 4.13'te sunulmuştur. Kavis radyüsü değerinin artmasıyla sac kalınlığında meydana gelen incelmenin azaldığı kalınlaşmanın ise önce arttığı sonra ise sabit kaldığı görülmüştür. En az kalınlık farkı (%29,9) ve kalınlaşma (%15) kavis radyüsü 7 mm iken elde edilmiştir. 1 mm kalınlığındaki sacın simülasyon ile elde edilen kalınlık dağılımı Resim 4.17'de görülmektedir.

Çizelge 4.13. DC04 çelik sac ile yapılan simülasyonlar sonucunda sacın kalınlık değişimi (Sac kalınlığı:1 mm ve limit çekme oranı:1,9)

Simülasyon No	Kalıp Radyüsü (r) (mm)	Kavis Radyüsü (R) (mm)	BHF (kN)	Kalınlık Farkı (%)	Kalınlaşma (%)	İncelme (%)
1	3	5	10	31,5	15	16,5
2	3	7	10	29,9	15	14,9
3	3	10	10	30,9	16	14,9
4	3	15	10	33,7	20	13,7
5	3	25	10	33,2	20	13,2
6	3	45	10	33,0	20	13,0

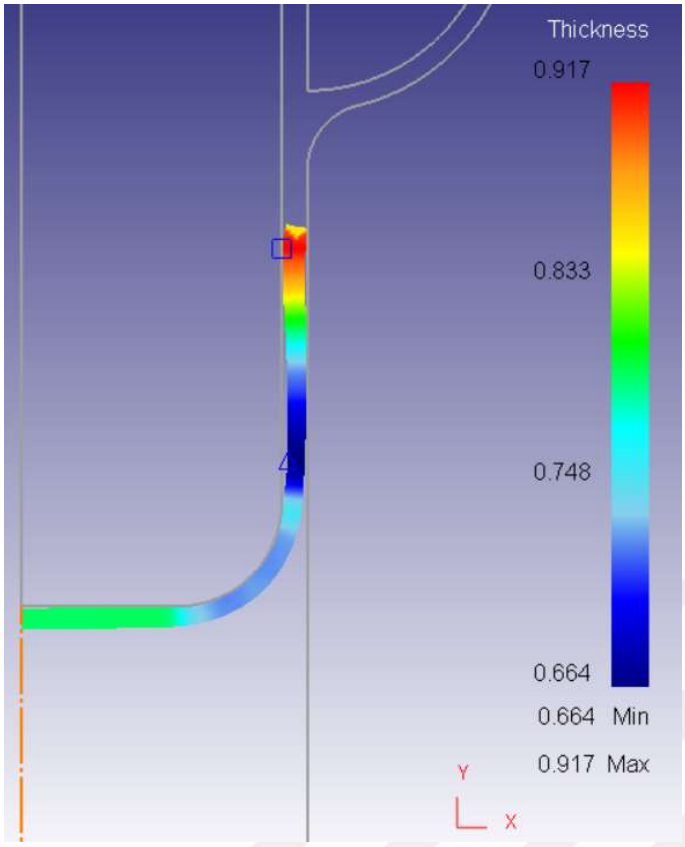


Resim 4.17. 1 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü (r) 3 mm, kavis radyüsü (R) 7 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN)

0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac ile farklı kavis radyüsü kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları Çizelge 4.14'te sunulmuştur. Kavis radyüsü değerinin artmasıyla sac kalınlığında meydana gelen incelmenin azaldığı kalınlaşmanın ise arttığı görülmüştür. En az kalınlık farkı (%31,63) kavis radyüsü 7 mm iken elde edilmiştir. 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın kalınlık dağılımı Resim 4.18'de görülmektedir.

Çizelge 4.14. DC04 çelik sac ile yapılan simülasyonlar sonucunda sacın kalınlık değişimi (Sac kalınlığı: 0,8 mm ve limit çekme oranı:1,9)

Simülasyon No	Kalıp Radyüsü (r) (mm)	Kavis Radyüsü (R) (mm)	BHF (kN)	Kalınlık Farkı (%)	Kalınlaşma (%)	İncelme (%)
1	2,5	5	10	36,91	11,75	25,16
2	2,5	7	10	31,63	14,63	17
3	2,5	10	10	32,87	16	16,87
4	2,5	15	10	33	17,12	15,88
5	2,5	25	10	34,37	19,25	15,12
6	2,5	45	10	35	20,25	14,75

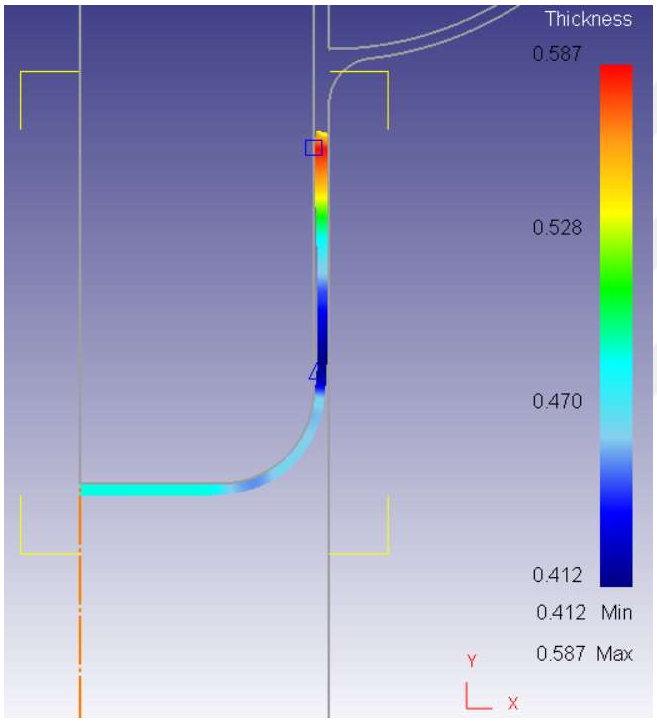


Resim 4.18. 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü (r) 2,5 mm, kavis radyüsü (R) 7 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN)

0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac ile farklı kavis radyüsü kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları Çizelge 4.15'te sunulmuştur. Kavis yarıçapı 10 mm olduğunda kalınlaşmanın en az olduğu görülmektedir fakat incelmenin %20'nin üzerinde olduğu görülmektedir. Literatürde derin çekme ile üretilen otomotiv parçaları için incelme oranının %20 değerini aşmaması istenmektedir [83]. Bu nedenle kavis yarıçapının 10 mm olduğu tasarım için baskı plakası kuvveti 10 kN yerine 7 kN girilerek tekrarlanmıştır. 5 numaralı simülasyon sonuçlarında görüldüğü üzere sac kalınlığının incelme oranının azalmasına karşın kalınlaşma değeri (%17,4) kavis radyüsünün 15 mm olduğu tasarım ile aynıdır. Tüm simülasyonlar göz önüne alındığında 1 ve 0,8 mm kalınlığındaki çelik saclar için 7 mm değerindeki kavis radyüsü en iyi sonuçları verirken 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac için kavis radyüsünün 15 mm seçilmesi daha uygun olacaktır. 15 mm kavis radyüslü kalıpla yapılan simülasyon sırasında 0,5 mm kalınlığındaki sacın kalınlık dağılımı Resim 4.19'da görülmektedir.

Çizelge 4.15. DC04 çelik sac ile yapılan simülasyon sonucunda sacın kalınlık değişimi (Sac kalınlığı: 0,5 mm ve limit çekme oranı:1,9)

Simülasyon No	Kalıp Radyüsü (r) (mm)	Kavis Radyüsü (R) (mm)	BHF (kN)	Kalınlık Farkı (%)	Kalınlaşma (%)	İncelme (%)
1	2	10	10	35,4	14,2	21,2
2	2	15	10	35,0	17,4	17,6
3	2	25	10	38,2	21,6	16,6
4	2	45	10	36,2	19,2	17,0
5	2	10	7	35,4	17,4	18,0



Resim 4.19. 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın derin çekme işlemi esnasında sac kalınlığında meydana gelen değişim (Kalıp radyüsü (r) 2 mm, kavis radyüsü (R) 15 mm ve baskı plakası kuvveti 10 kN)

1 mm kalınlığındaki Al3105 alüminyum sac için uygun kavis yarıçapı (R) 10 mm; 1 mm ve 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik saclar için ise 7 mm değerlerinde bulunmuştur. 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac için 15 mm değerindeki kavis yarıçapının sac kalınlığının kabul edilebilir değişimi açısından daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

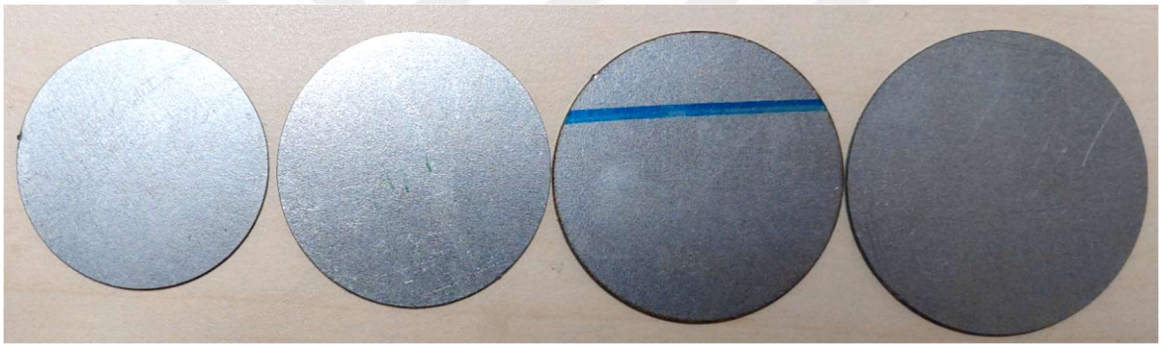
Simülasyonlar sonrasında kalıp ve baskı plakalarının ölçüleri belirlenmiş ve Çizelge 4.16'da sunulmuştur. Standart derin çekme kalıplarının kalıp radyüs (r) değerleri ile özel

tasarlanmış kavisli kalıpların “r” değerleri aynıdır. Zımba çapı tüm kalıp setleri için aynı ve 20 mm değerindedir.

Çizelge 4.16. Kavisli kalıp ve baskı plakası derin çekme setinin ölçüleri

Sac malzeme	Sac kalınlığı	Kalıp radyüsü (r)	Baskı plakası kavis değeri (R)
Al 3105	1 mm	2,5 mm	10 mm
DC04 çelik	0,5 mm	2 mm	15 mm
	0,8 mm	2,5 mm	7 mm
	1 mm	3 mm	7 mm

Derin çekme deneyleri için dairesel sac numuneler 32 mm ile 46 mm çap aralığında lazer kesim ile elde edilmiştir (Resim 4.20).



Resim 4.20. Derin çekme işleminde kullanılan sac numune örnekleri

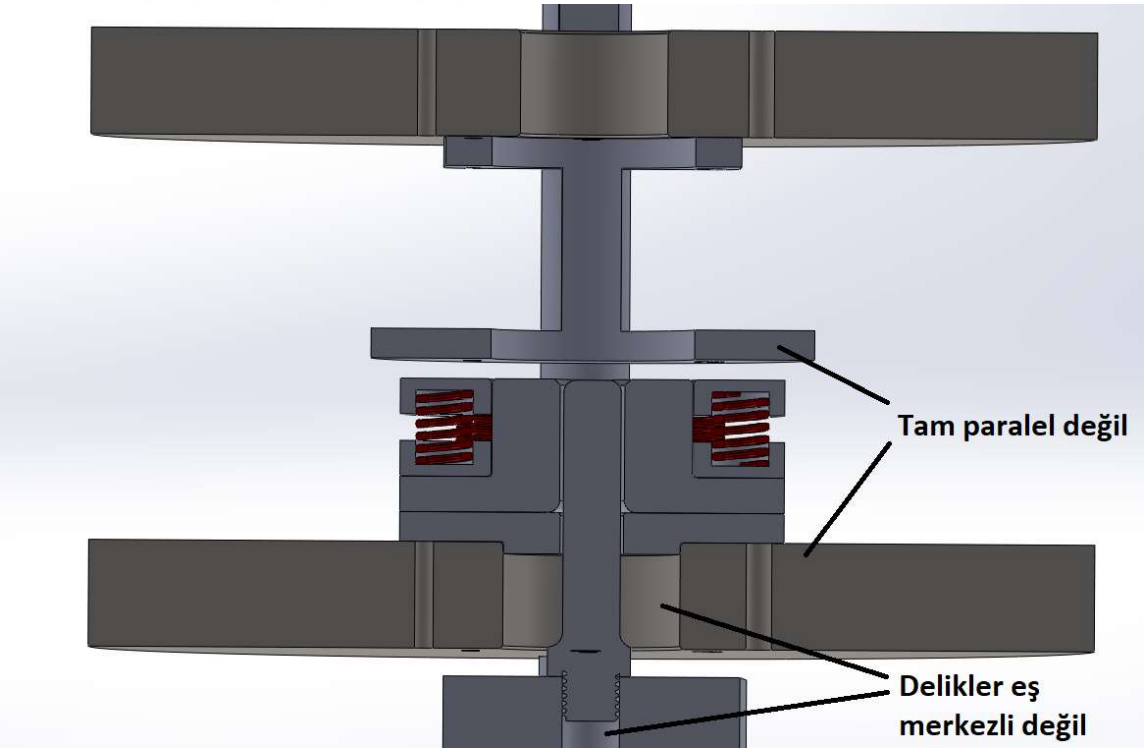
Yapılan Erichsen testleri sonucunda zımba hızının Erichsen sabitine anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ayrıca endüstriyel uygulamalarda derin çekme işleminde zımba hızının son derece yüksek olması (çelik için 25 mm/s ve alüminyum için 66 mm/s hıza kadar) [84,85] ve FDK-2023-8497 kodlu proje kapsamında temin edilen cihazın Erichsen testine özel olarak üretilmesinden dolayı yüksek zımba hızlarına çıkamaması (en yüksek zımba hızı 1,66 mm/s ve ayrıca bu hızda gösterge panelinden çok az sayıda veri okunabilmektedir) nedeniyle tüm derin çekme deneylerinde zımba hızı 0,5 mm/s değerinde seçilmiş ve sabit tutulmuştur.

Derin çekme deneyleri farklı baskı plakası kuvvetleri altında yapılarak limit çekme oranın en büyük değeri aldığı baskı plakası kuvvetinin her bir sac malzeme (Al 3105 ve DC04) ve sac kalınlığı için (0,5 mm; 0,8 mm ve 1 mm) tespit edilmesi planlanmıştır. Ayrıca ilkel sac numunenin çapının artması derin çekme işlemi esnasında kırışıklık oluşumu ihtimalini

yükseltmekte ve bu nedenle kırışıklık oluşumunu engellemek için gerekli olan baskı plakası kuvvetinin de yükseltilmesi gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı baskı plakası kuvvetinin sabit değerlerde belirlenmesi yerine aralık olarak seçilmesinin daha uygun olacağı düşünülmüştür. Deneyler sonucunda sacda kırışıklık oluşuyorsa baskı plakası kuvveti yükseltilecek; sacda yırtılma meydana geliyorsa baskı plakası kuvveti azaltılacaktır. Alüminyum sac için baskı plakası kuvvetti 2-5 kN ve çelik saclar için ise 5-15 kN aralığında seçilmiştir. Deneylerde yağlayıcı olarak 40 ºC sıcaklıkta 66 mm^2/s kinematik viskoziteye sahip Castrol Edge 5W-30 LL motor yağı tercih edilmiştir.

4.6. Derin Çekme Setinin Tasarımı ve İmalatı

Standart derin çekme ve kavisli kalıplar ile yapılacak derin çekme işlemleri için toplam 8 çift derin çekme seti tasarlanmış ve imal ettirilmiştir. Erichsen cihazının baskı plakası ve sabit plakası birbirine tam olarak paralel olmadığı (Resim 4.21) için baskı kuvvetini daha homojen dağıtabilmek adına yay sabiti 216 N/mm olan özdeş 10 adet yay ve plakalardan oluşan bir tasarım planlanmış ve imal edilmiştir (Resim 4.22).

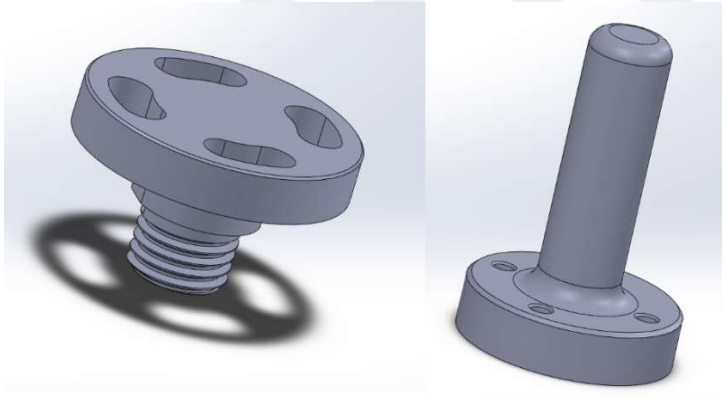


Resim 4.21. Erichsen test cihazı ve derin çekme setinin 3D çizimin kesit gösterimi

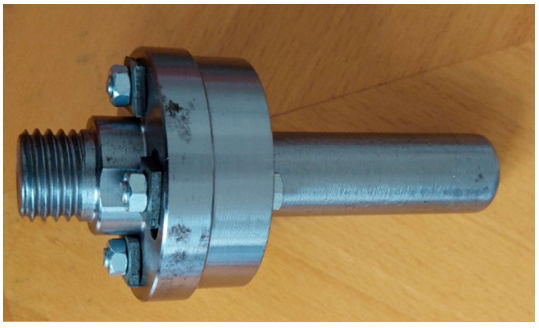


Resim 4.22. Yaylı baskı aparatı

Ayrıca Erichsen testlerinde çekme boşluğunun oldukça büyük olması nedeniyle zımba ekseni ile baskı plakasının merkezlendiği delik arasındaki eksen kaçıklığı; Erichsen deneylerinde bir soruna neden olmazken derin çekme işlemlerinde çekme boşluğunun son derece hassas olmasından dolayı sacın sıkışmasına yol açmaktadır. Zımba ve kalıp seti arasındaki eş merkezliliği sağlamak için ayarlanabilir zımba takımı modellenmiş ve imal edilmiştir (Resim 4.23-4.24).



Resim 4.23. Ayarlanabilir zımba aparatları



Resim 4.24. Ayarlanabilir zımba

Resim 4.25'te görülen mastar cihazın sabit plakasında bulunan deliğe yerleştirilerek zımba ekseni hizalanmış ve sonrasında cıvata ve somun kullanılarak zımba montajı yapılmıştır.



Resim 4.25. Zımba eksenini hizalamak için kullanılan mastar

Maliyet ve ağırlığı azaltmak için kalıpların yerleştirilebileceği dış kalıp tasarlanmış ve imal edilmiştir (Resim 4.26). Dış kalıbın içerisine yerleştirilmek üzere 4 adet düz ve 4 adet kavisli kalıp çekirdeği imal edilmiştir. Resim 4.26'da dış kalıp ve kavisli kalıbın montaj hali; Resim 4.27'de ise düz ve kavisli kalıp çekirdeği örnekleri görülmektedir.



Resim 4.26. Dış kalıp ve kavisli kalıp çekirdeği ile dış kalıbın montajı



Resim 4.27. Düz ve kavisli kalıp çekirdekleri

Standart derin çekme deneyleri için tek bir baskı plakası (düz baskı plakası) yeterli olurken her bir kavisli kalıp için ayrı olarak baskı plakası imal edilmiştir. 1 adet düz ve 4 adet kavisli olmak üzere toplam 5 baskı plakası imal edilmiştir.



Resim 4.28. Kavisli baskı plakası

4.7. Kırışma Analizi Deneylerinin Tasarımı

Derin çekme simülasyonları sonucunda kavisli kalıp ve baskı plakasının derin çekme işlemi sırasında sacın kalınlaşmasını azalttığı görülmüştür. Dolayısıyla bu kalıp seti ile çekilecek olan sac parçalarda standart kalıp ile çekilenlere nazaran daha az kırışma oluşacağı öngörülmektedir. Kırışma analizi için standart kalıp ve kavisli kalıplar ile ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. Deneyler DC04 çelik sac numuneler ile yağlayıcı uygulanmadan gerçekleştirilmiştir. Baskı plakası kuvveti, sac kalınlığı ve ilkel parça çapı olmak üzere 3 parametre ve her bir parametre için 3 seviye seçilerek Taguchi L9 ortogonal dizini ile deney tasarımı yapılmıştır (Çizelge 4.17).

Çizelge 4.17. Standart ve kavisli kalıp için kırışıklık oluşumu üzerine deney tasarımı

Deney No	Sac kalınlığı (mm)	İlkel parça çapı (mm)	Baskı plakası kuvveti (kN)
1	0,5	33	0
2	0,5	35	1,5
3	0,5	37	3
4	0,8	33	1,5
5	0,8	35	3
6	0,8	37	0
7	1	33	3
8	1	35	0
9	1	37	1,5

4.8. Değişken Baskı Plakası Kuvveti ile Çekme Deneyleri

Önceki derin çekme deneylerinde baskı plakası kuvveti işlem süresince sabit tutulmuştur. Baskı plakası kuvvetinin derin çekme işlemi esnasında değiştirilmesinin limit çekme oranına etkisini araştırmak için 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac numeneler ile standart kalıp seti kullanılarak deneylerin yapılması planlanmıştır. Çekme işlemleri 3 adımdan oluşmaktadır ve her adım için 3 farklı baskı kuvveti seviyesi seçilerek Taguchi L9 ortoganal dizini ile deney tasarımı yapılmıştır (Çizelge 4.18). İlk adımda en büyük baskı plakası kuvveti uygulanarak zımba 4,5 mm ilerletildikten sonra, baskı plakasının ve zımbanın sac ile teması ortadan kaldırılmış ve ikinci adımda sac numuneye daha düşük bir baskı plakası kuvveti uygulanarak zımba sac ile tekrar temas ettirildikten sonra, zımba yine 4,5 mm ilerletilmiştir. Sonrasında tekrar baskı plakası ve zımba geri çekilerek sac ile teması ortadan kaldırılmış ve son adımda ikinci adımdan daha düşük baskı plakası kuvveti uygulanarak zımba ilerletilmiş ve derin çekme işlemi tamamlanmıştır.

Çizelge 4.18. Değişken baskı plakası kuvveti ile derin çekme işlemi için deney tasarımı

Deney no	Birinci adım		İkinci adım		Üçüncü (son) adım	
	Baskı plakası kuvveti (kN)	Zımba ilerleme mesafesi (mm)	Baskı plakası kuvveti (kN)	Zımba ilerleme mesafesi (mm)	Baskı plakası kuvveti (kN)	Zımba ilerleme mesafesi (mm)
1	19,8	4,5	14,4	4,5	11,5	Kalan
2	19,8	4,5	13,1	4,5	10,4	Kalan
3	19,8	4,5	11,9	4,5	8	Kalan
4	18,1	4,5	14,4	4,5	10,4	Kalan
5	18,1	4,5	13,1	4,5	8	Kalan
6	18,1	4,5	11,9	4,5	11,5	Kalan
7	16	4,5	14,4	4,5	8	Kalan
8	16	4,5	13,1	4,5	11,5	Kalan
9	16	4,5	11,9	4,5	10,4	Kalan

4.9. Farklı Yağlayıcılar ile Çekme Deneyleri

Yağlayıcı türünün derin çekme işlemine etkisini araştırmak için kalıp ile sac numune arasına motor yağı (Castrol Edge 5W-30 LL), Hindistan cevizi yağı ve 15 µm kalınlığında polietilen film uygulanarak Al3105 alüminyum sac numuneler çekilmiştir. Yağın zımbaya bulaşmasını engellememek için yağlayıcı sadece kalıp ile sac numune ara yüzeyine uygulanmıştır. Yağlayıcılar bol miktarda sürülerek yağın tüm yüzeye temas etmesi sağlanmış, baskı plakası numune üzerine kuvvet uyguladığında ise fazla yağ kalıp boşluğundan akıtılarak uzaklaştırılmıştır.

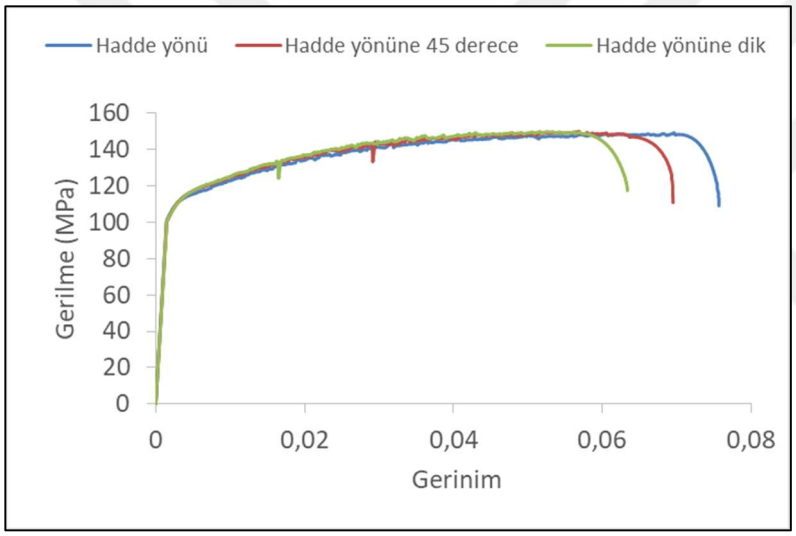
Baskı plakası kuvveti, ilkel parça çapı ve yağlayıcı türü olmak üzere 3 parametre ve her parametre için 3 seviye belirlenerek Taguchi L9 ortogonal dizini ile deneyler tasarlanmıştır (Çizelge 4.19). Minitab programına sayısal veri girilmesi gerektiğinden polietilen film "1" rakamıyla, motor yağı "2" rakamıyla ve Hindistan cevizi yağı "3" rakamı ile kodlanmıştır.

Çizelge 4.19. Farklı yağlayıcı türleri ile çekme deneyleri tasarımı

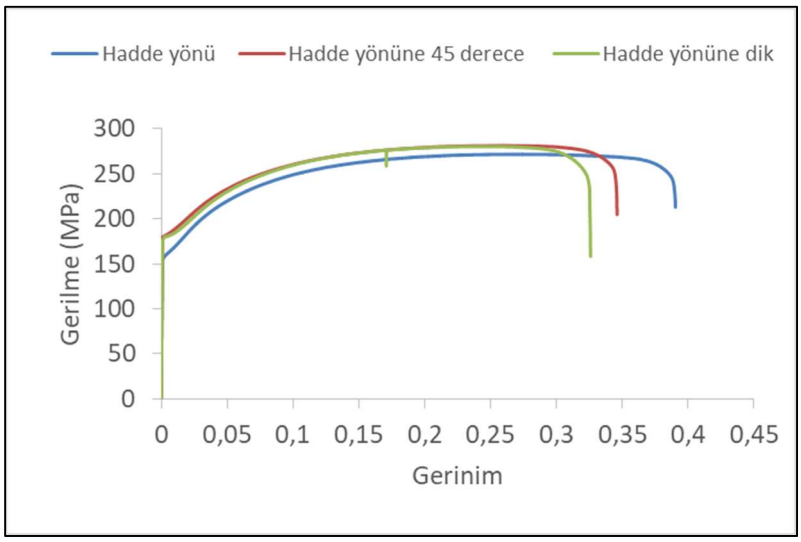
Deney no	İlkel parça çapı (mm)	Baskı plakası kuvveti (kN)	Yağlayıcı türü
1	40	10,5	Polietilen film (1)
2	40	6,75	Motor yağı (2)
3	40	3	Hindistan cevizi yağı (3)
4	42	10,5	Motor yağı (2)
5	42	6,75	Hindistan cevizi yağı (3)
6	42	3	Polietilen film (1)
7	44	10,5	Hindistan cevizi yağı (3)
8	44	6,75	Polietilen film (1)
9	44	3	Motor yağı (2)

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

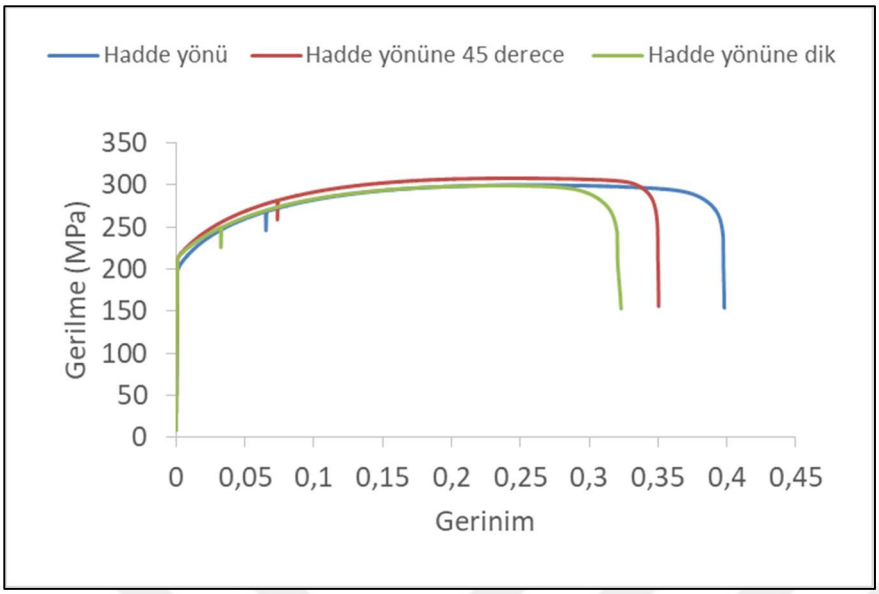
Tek eksenli çekme deneyleri sonucu elde edilen mühendislik gerilme-gerinim eğrileri aşağıdaki şekillerde sunulmuştur (Şekil 5.1-Şekil 5.4). Eş. 3.4 ve Eş. 3.5 yardımıyla gerçek gerilme (σ)-gerçek gerinim (ε) eğrileri oluşturulmuştur ve Ek.1'de verilmiştir. Simülasyonlar yapılırken gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrileri dikkate alınmıştır. Şekil 5.1'de görüldüğü üzere gerilme-gerinim eğrileri tırtıklı bir yapıya sahiptir, bu durumun magnezyum içeren alüminyum alaşımlarında sıklıkla meydana gelen dinamik gerinim yaşlanması [86] nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmektedir.



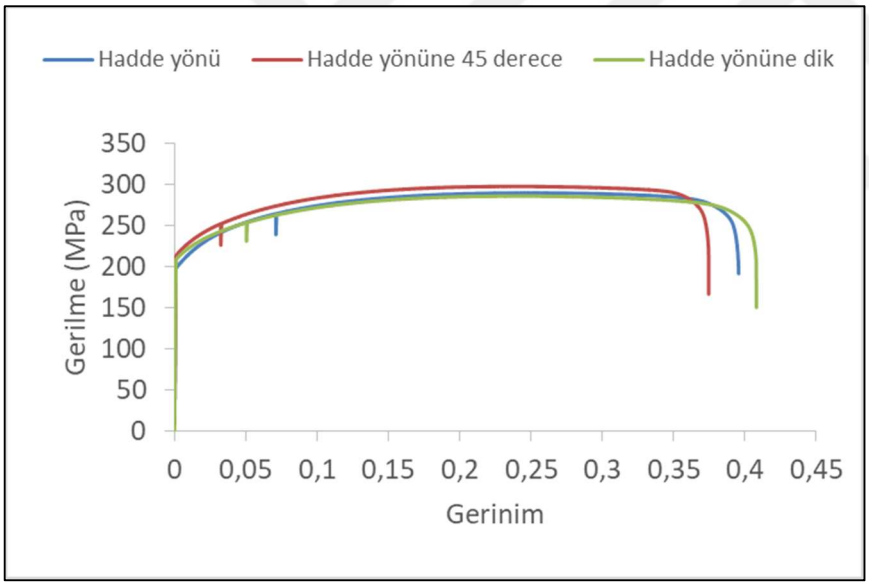
Şekil 5.1. Al3105 alüminyum sacın gerilme-gerinim eğrileri



Şekil 5.2. DC04 çelik sacın gerilme-gerinim eğrileri (Kalınlık 0,5 mm)



Şekil 5.3. DC04 çelik sacın gerilme- gerinim eğrileri (Kalınlık 0,8 mm)



Şekil 5.4. DC04 çelik sacın gerilme- gerinim eğrileri (Kalınlık 1 mm)

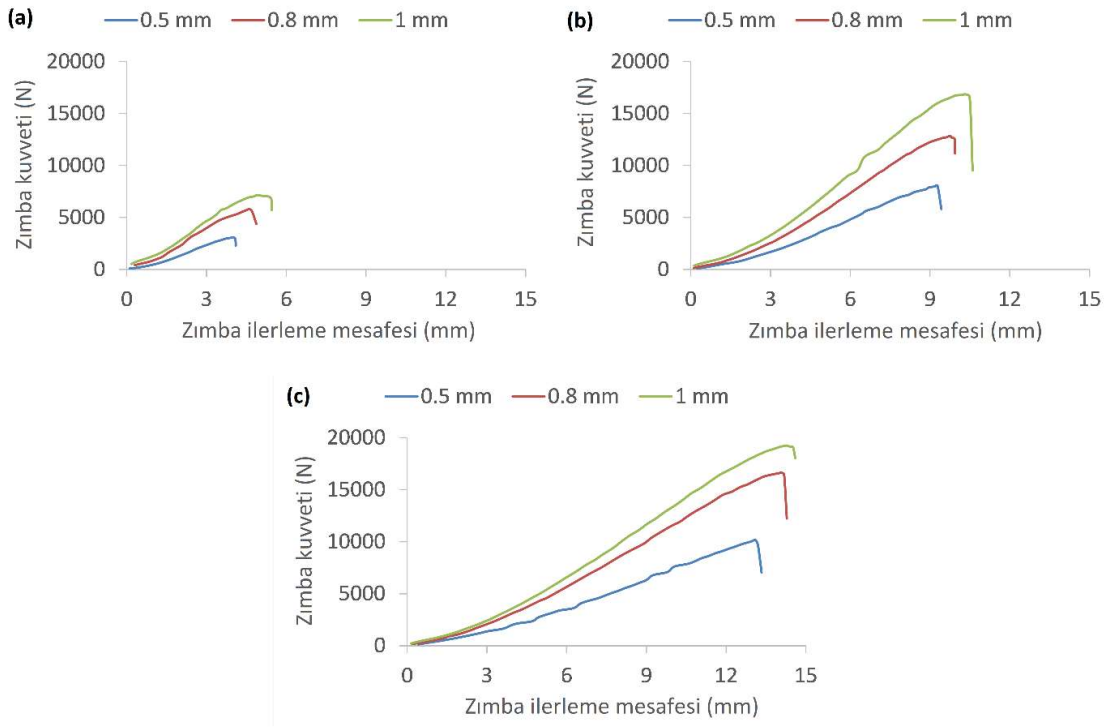
DC04 saclar ve Al3105 alüminyum sac için tek eksenli çekme testi sonuçları Çizelge 5.1'de ayrıntılı olarak verilmiştir. 0,5 mm ve 0,8 mm kalınlığındaki çelik sacların en büyük uzamalarının haddeleme yönünde olduğu görülmüştür. Ancak, 1 mm kalınlığındaki sac hadde yönüne dik doğrultuda daha fazla uzamış ve tüm kalınlıklar için çelik sacların haddeleme yönündeki uzamaları yaklaşık %40 civarındadır. Alüminyum sac için ise en fazla uzama hadde yönünde (%7,56) ve en az uzama (%6,34) ise hadde yönüne dik doğrultuda gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.1. Tek eksenli çekme testleri sonuçları

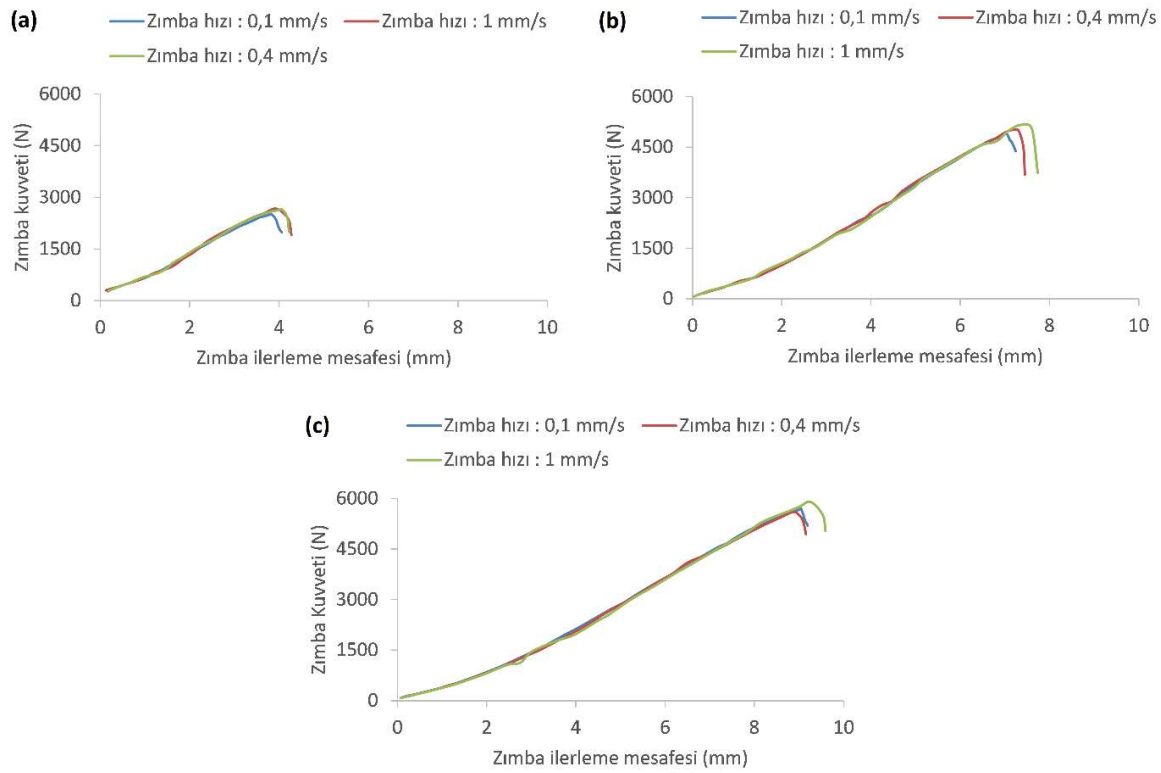
Malzeme	Sac kalınlığı (mm)	Hadde yönü ile yapılan açı	Akma dayanımı (MPa)	En büyük çekme gerilmesi (MPa)	Toplam uzama (%)
DC04	0,5	0°	156	272	39
		45°	182	281	34,6
		90°	181	280	32,5
	0,8	0°	199	300	39,8
		45°	214	308	35
		90°	216	299	32,3
	1	0°	198	289	39,5
		45°	215	297	37,4
		90°	210	286	40,8
Al3105	1	0°	115	149,2	7,56
		45°	117	149,8	6,95
		90°	120	149,8	6,34

5.1. Erichsen Deneyleri ve Simülasyonları Sonuçları

Erichsen testleri sırasında zımba kuvvetinin zımba ilerleme mesafesinin artmasıyla yükseldiği, sonrasında ise boyun verme nedeniyle hızla azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6).



Şekil 5.5. Çeşitli sac kalınlığı için DC04 çelik sacların zımba ilerlemesi-zımba kuvveti eğrileri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm



Şekil 5.6. Farklı zımba hızlarında Al3105 sacların zımba ilerlemesi-zımba kuvveti eğrileri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm

Zımba ilerledikçe sac metal numunelerindeki deformasyonun, efektif gerinimin ve buna karşılık gelen efektif gerilimin artması zımba kuvvetini artırmaktadır. Ancak, boyun vermeden sonra, gerilim ve gerinimdeki sürekli artışa rağmen, sacın hızla incelmesi deforme olmuş kesit alanını azaltmakta ve bu da zımba kuvvetinde ani bir azalmaya neden olmaktadır.

Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te Erichsen sabiti değerleri ve Erichsen şişirme deneylerinden elde edilen en büyük zımba kuvvetleri verilmiştir. 20 mm çapındaki zımba ile yapılan deneyler sonucunda DC04 saclar için bulunan ES değerlerinin literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Jasinski ve diğerleri [87] çalışmalarında DC04 çelik sacların Erichsen sabitlerini 1,0 mm kalınlık için 11,46 mm ve 0,8 mm kalınlık için ise 10,98 mm değerlerinde tespit etmişlerdir. Diegelmann ve diğerleri [88] 1 mm kalınlığındaki DC04 sac malzemeler için ES değerini 11,3 mm olarak bulmuştur. Burdek [89] 0,8 mm kalınlığındaki DC04 sac için Erichsen sabitinin 10,4 mm değerinde olduğunu tespit etmiştir. Bu çalışmada, 20 mm çapında zımba kullanıldığında, 1,0 mm kalınlığındaki DC04 çelik saclar için ES değerleri 10,6 mm ve 0,8 mm kalınlığındaki saclar için ise 9,94 mm olarak ölçülmüştür, bulunan sonuçlar literatür ile uyumludur.

Çizelge 5.2. DC04 çelik sacların Erichsen testi sonuçları

Deney No	Sac Kalınlığı (mm)	Zımba Hızı (mm/s)	Zımba Çapı (mm)	ES(mm)	En Büyük Zımba Kuvvetti (N)
1	0,5	0,1	8	4,1013	3067
2	0,5	0,4	20	9,4257	8060
3	0,5	1	25	13,3339	10167
4	0,8	0,1	20	9,9375	12840
5	0,8	0,4	25	14,281	16640
6	0,8	1	8	4,8763	5717
7	1	0,1	25	14,5968	19259
8	1	0,4	8	5,4482	7133
9	1	1	20	10,6003	16855

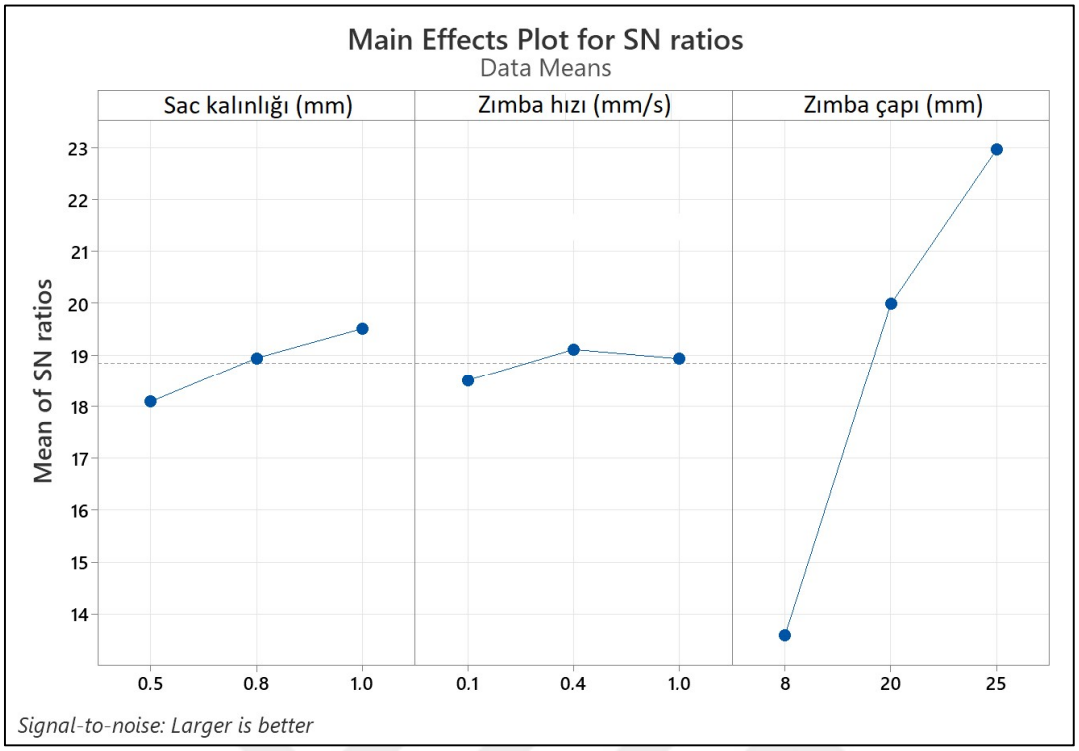
Çizelge 5.3. Alüminyum sacların Erichsen testi sonuçları

Deney No	Baskı Plakası Kuvveti (kN)	Zımba Hızı (mm/s)	Zımba Çapı (mm)	ES (mm)	En Büyük Zımba Kuvveti (N)
1	3,5	0,1	8	4,0573	2500
2	3,5	0,4	20	7,4469	5015
3	3,5	1	25	9,5935	5896
4	6,2	0,1	20	7,2425	4898
5	6,2	0,4	25	9,1584	5598
6	6,2	1	8	4,2743	2667
7	10,4	0,1	25	9,1945	5700
8	10,4	0,4	8	4,2194	2634
9	10,4	1	20	7,7383	5156

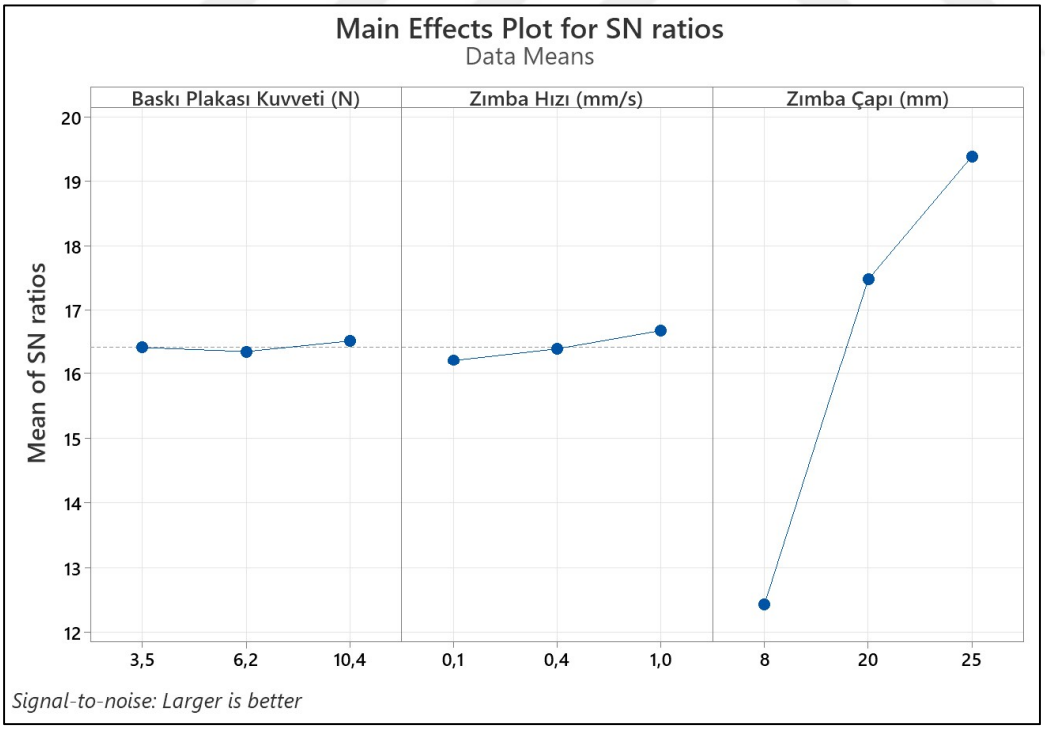
ANOVA ve Taguchi analizleri (Şekil 5.7 ve Şekil 5.8) göz önüne alındığında, ES değerini en çok artıran faktörün zımba çapı olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5). Ayrıca, çelik sacların ES değeri sac kalınlığı arttıkça az da olsa artmaktadır (Şekil 5.7) ve Çizelge 5.4'te görüldüğü üzere P değerinin 0,33 olması zımba hızının DC04 çelik sacların ES değerine anlamlı bir etkisi olmadığını göstermektedir. Çizelge 5.5 ve Şekil 5.8 incelendiğinde ise zımba hızının Al3105 alüminyum sac numunelerin ES değerleri üzerine anlamlı bir etkisinin olduğu ve artan zımba hızı ile ES değerlerinin büyüdüğü tespit edilmiştir. Bunun nedeni artan deformasyon hızı ile dinamik gerinim yaşlanması etkisinin azalmasıdır. Dinamik gerinim yaşlanmasının magnezyum içeren alüminyum alaşımlarının şekillenebilirliğini azalttığı bilinmektedir [86].

Çizelge 5.4. DC04 sac malzemenin Erichsen sabiti için ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F-Değeri	P-değeri	Katkı
Sac kalınlığı (mm)	2	3,082	1,5412	10,78	0,085	2,18%
Zımba hızı (mm/s)	2	0,581	0,2904	2,03	0,33	0,41%
Zımba çapı (mm)	2	137,761	68,8803	481,69	0,002	97,21%
Hata	2	0,286	0,143			0,20%
Toplam	8	141,71				100,00%



Şekil 5.7. DC04 çelik sacların ES üzerine yapılan Taguchi analizi



Şekil 5.8. Al3105 alüminyum sacların ES üzerine yapılan Taguchi analizi

Çizelge 5.5. Al3105 sac malzemenin Erichsen sabiti için ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F-Değeri	P-değeri	Katkı
Baskı plakası kuvveti (kN)	2	0,0419	0,0209	7,24	0,1214	0,05%
Zımba hızı (mm/s)	2	0,3302	0,1651	57,09	0,0172	0,42%
Zımba çapı (mm)	2	77,4145	38,7073	13386	0,0001	99,51%
Hata	2	0,0058	0,0029			0,01%
Toplam	8	77,7923				100,00%

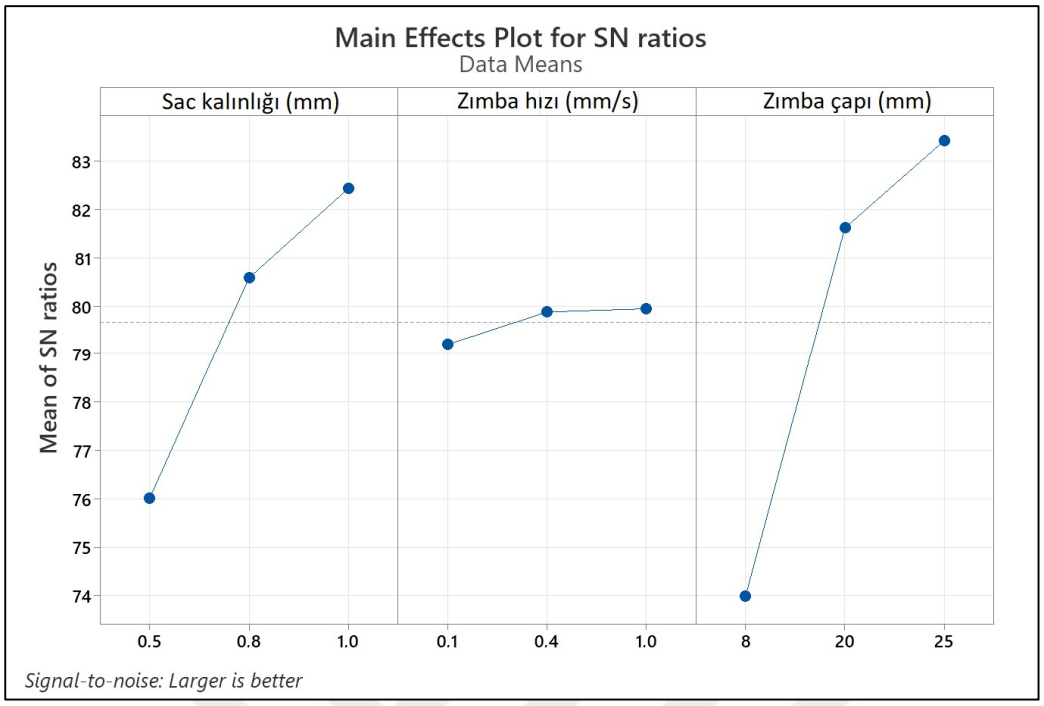
Çizelge 5.6; Çizelge 5.7 ve Şekil 5.9; Şekil 5.10'da görüldüğü üzere, zımba çapı zımba kuvvetini etkileyen temel parametredir. Sac kalınlığının en büyük zımba kuvveti üzerine etkisi Erichsen sabitine olandan çok daha büyüktür. Seçilen zımba hızı aralığında, zımba hızının zımba kuvvetine önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca alüminyum saclarla yapılan deneylerde baskı plakası kuvveti değişiminin zımba kuvvetini ve Erichsen sabitini etkilemediği görülmüştür. Kalıp radyüsünün çok küçük (0,75 mm) olması nedeniyle sac malzemenin kalıp boşluğuna akışı düşük baskı plakası kuvvetleri altında bile engellenebilmiştir.

Çizelge 5.6. DC04 sacların Erichsen deneyleri sonucunda ulaşılan en büyük zımba kuvveti için ANOVA tablosu

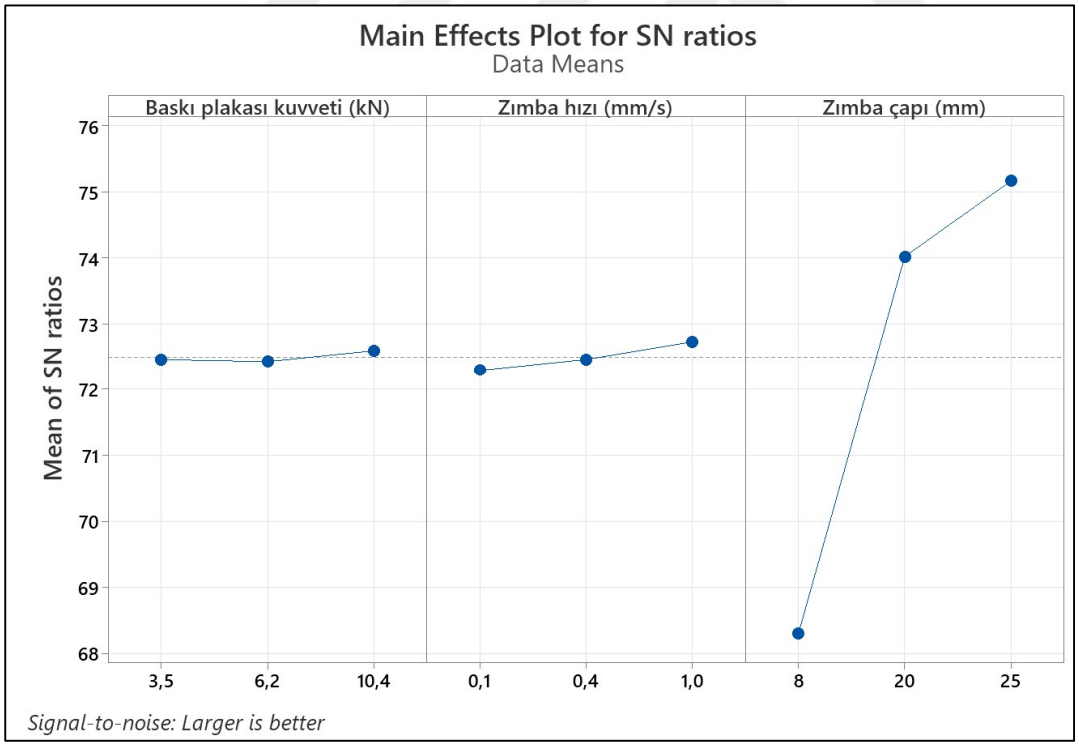
Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F-Değeri	P-değeri	Katkı
Sac kalınlığı (mm)	2	65,719	32,8595	818,94	0,001	30,23%
Zımba hızı (mm/s)	2	1,006	0,5031	12,54	0,074	0,46%
Zımba çapı (mm)	2	150,578	75,2892	1876,39	0,001	69,27%
Hata	2	0,08	0,0401			0,04%
Toplam	8	217,384				100,00%

Çizelge 5.7. Al3105 sacların Erichsen deneyleri sonucunda ulaşılan en büyük zımba kuvveti için ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F-Değeri	P-değeri	Katkı
Baskı plakası kuvveti (kN)	2	0,046	0,023	0,94	0,514	0,06%
Zımba hızı (mm/s)	2	0,2871	0,1436	5,89	0,145	0,35%
Zımba çapı (mm)	2	81,1737	40,5868	1666,36	0,001	99,53%
Hata	2	0,0487	0,0244			0,06%
Toplam	8	81,5555				100,00%

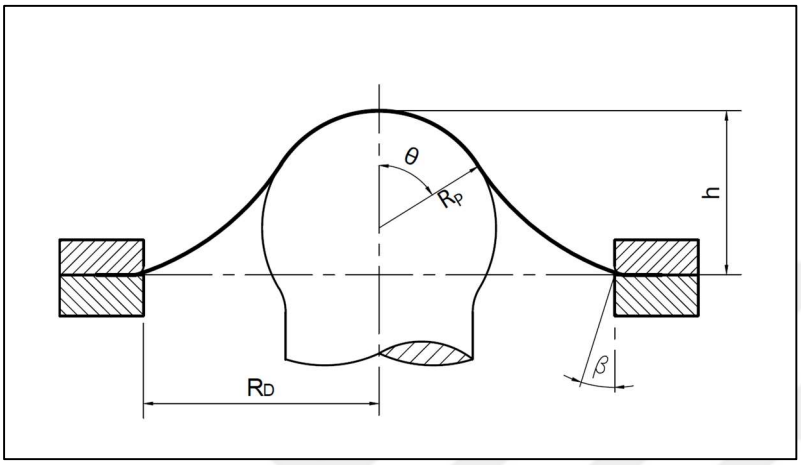


Şekil 5.9. DC04 çelik sacların en büyük zımba kuvveti üzerine yapılan Taguchi analizi



Şekil 5.10. Al3105 alüminyum sacların en büyük zımba kuvveti üzerine yapılan Taguchi analizi

Zımba çapının ve sac kalınlığının Erichsen sabitini nasıl etkilediğini derinlemesine kavrayabilmek için literatürde [79] sürtünmesiz ideal durum için sunulan teorik çözümden faydalanılmıştır. Şekil 5.11, Erichsen testi sırasında oluşan temas açısını (θ), zımba ilerleme mesafesini (h) ve yüzey normalinin sınırda oluşturduğu açıyı (β) göstermektedir. R_P ve R_D sırasıyla zımba yarıçapını ve kalıp deliği yarıçapını ifade etmektedir.



Şekil 5.11. Erichsen testi sırasında oluşan deformasyon geometrisi [79]

Chakrabarty [79], zımba ilerleme mesafesi ile temas açısı arasındaki ilişkiyi açıklayan aşağıdaki denklemleri türetmiştir.

$$\sin\beta = \frac{R_P}{R_D}\sin^2\theta \tag{5.1}$$

$$h = R_P\{(1-\cos\theta) + sin^2\theta\, ln\frac{\tan(\theta/2)}{\tan(\beta/2)}\} \tag{5.2}$$

Sürtünmesiz durumda, en fazla kalınlık azalması tepe noktasında meydana gelir ve bu bölgedeki sac kalınlığı Eş. 5.3 kullanılarak belirlenebilir. Bu denklemde, t_i başlangıç sac kalınlığını belirtirken, t_p tepe noktasındaki sac kalınlığını temsil eder [79].

$$t_p = \frac{t_i(1+\cos\ )^4}{4(1+\cos\ )^2} \tag{5.3}$$

Sürtünmesiz durumda en büyük efektif gerinim $(\overline{\varepsilon}_{max})$ Eş 5.4 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\bar{\varepsilon}_{max} = \ln\left(\frac{t_i}{t_p}\right) = \ln\left(\frac{4(1+\cos\ )^2}{(1+\cos\ )^4}\right) \tag{5.4}$$

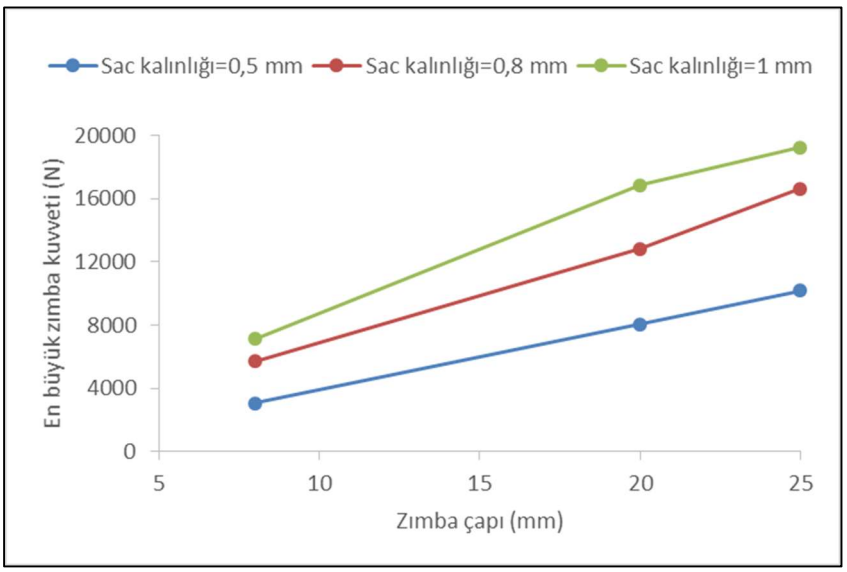
Eş. 5.6, zımba kuvvetinin (P) zımba yarıçapı, temas sınırındaki efektif gerilim ($\bar{\sigma}_\theta$) ve sac kalınlığı (t_θ) ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Ayrıca, temas sınırındaki efektif gerinim ($\bar{\varepsilon}_\theta$) Eş. 5.7 ve sac kalınlığı da Eş. 5.5 ile hesaplanabilir.

$$t_\theta = t_i\left[\frac{1+\mathrm{co}}{1+\cos}\right]^2 \tag{5.5}$$

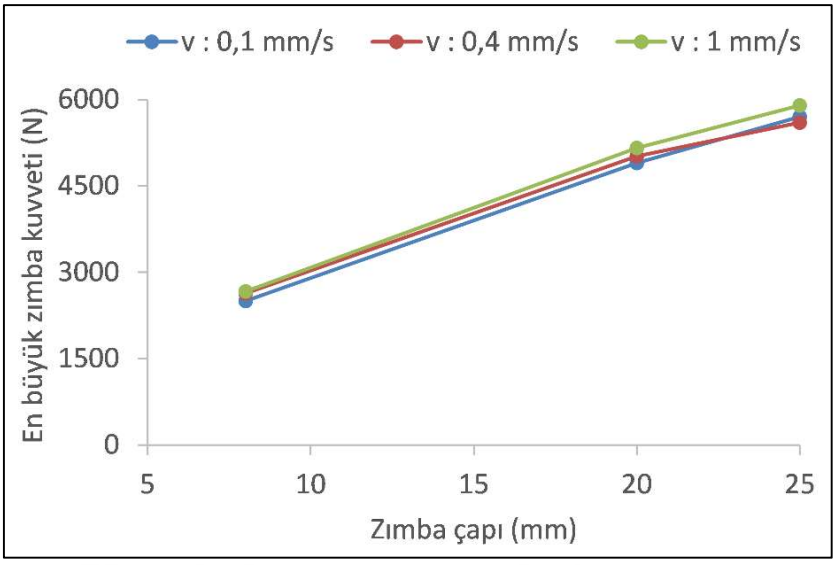
$$P = 2\pi R_P t_\theta \bar{\sigma}_\theta \sin^2\theta \tag{5.6}$$

$$\bar{\varepsilon}_\theta = \ln\left(\frac{t_i}{t_\theta}\right) = 2\ln\left(\frac{1+\cos}{1+\cos}\right) \tag{5.7}$$

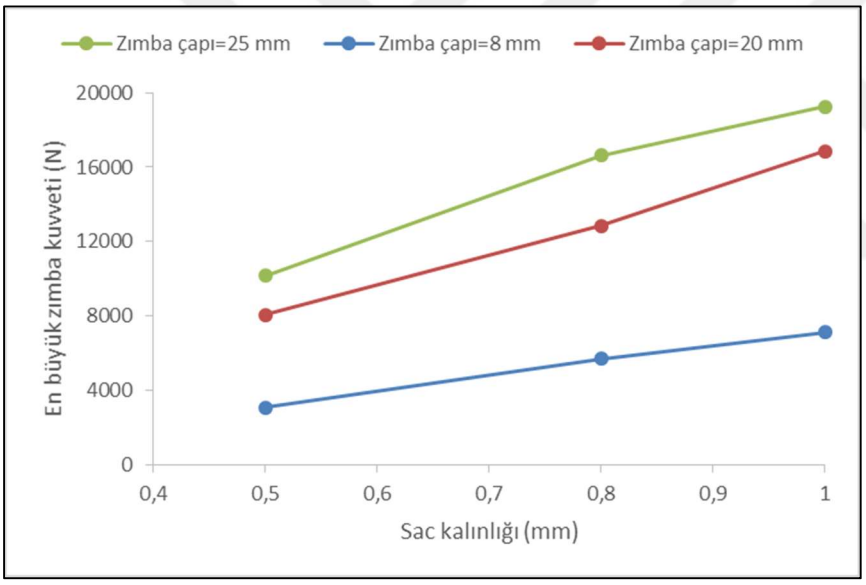
Eşitlik 5.5 ve Eşitlik 5.6 dikkate alındığında, zımba kuvveti hem başlangıç sac kalınlığı hem de zımba çapı ile doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Ancak, pekleşme ve sürtünme nedeniyle, en büyük zımba kuvvetinin sac kalınlığı ve zımba çapı ile değişimi lineerlikten yaklaşık %5 sapmaktadır. (Şekil 5.12-5.14).



Şekil 5.12. Zımba çapının en büyük zımba kuvvetine etkisi (DC04 çelik sac)

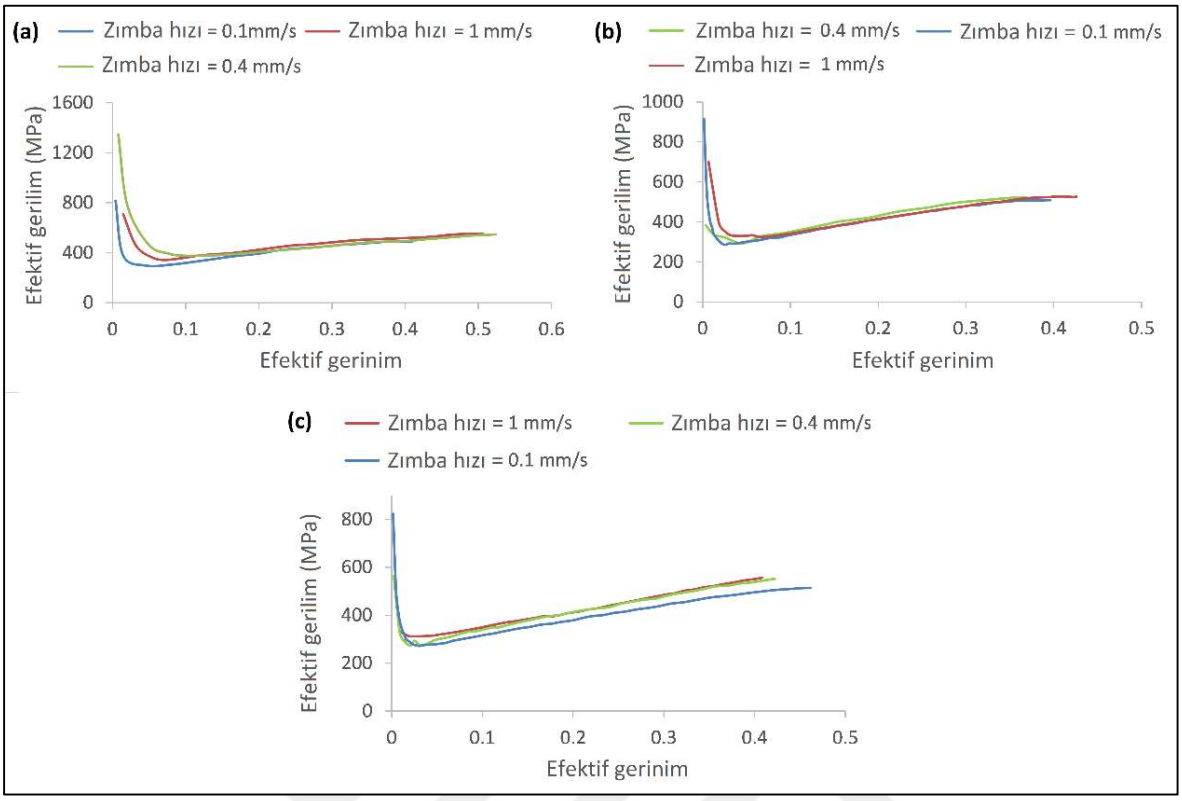


Şekil 5.13. Zımba çapının en büyük zımba kuvvetine etkisi (Al3105 alüminyum sac)



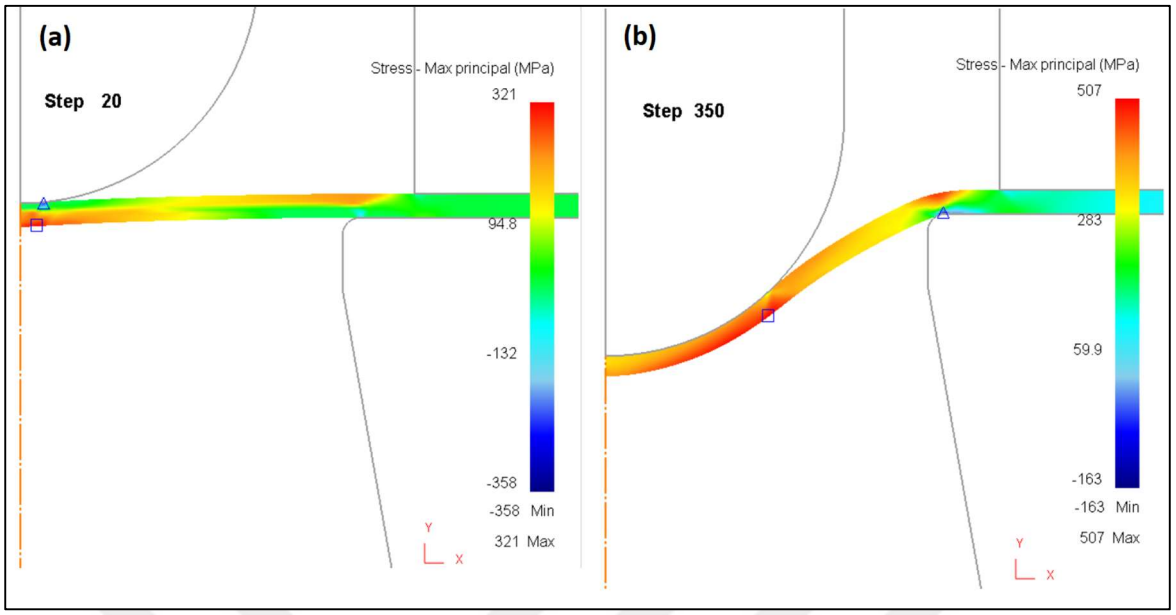
Şekil 5.14. Sac kalınlığının en büyük zımba kuvvetine etkisi

Efektif gerilimin deformasyon hızı dolayısıyla zımba hızı ile değişmesi ve zımba kuvvetini etkilemesi beklenmektedir. Ancak bu etki, zımba çapı ve sac kalınlığının etkilerine kıyasla oldukça küçüktür. Sonuç olarak, zımba hızının zımba kuvveti üzerindeki etkisinin ANOVA sonuçlarına göre çelik saclar için %0,46 ve alüminyum saclar için ise %0,35 olduğu tespit edilmiştir. Zımba hızının etkisini daha net bir şekilde görebilmek için, Erichsen deneylerinden elde edilen zımba kuvvetti-zımba ilerleme mesafesi grafikleri, yukarıdaki denklemlerle birlikte, efektif (eşdeğer) gerilim-gerinim eğrilerini (Şekil 5.15) elde etmek için kullanılmıştır.



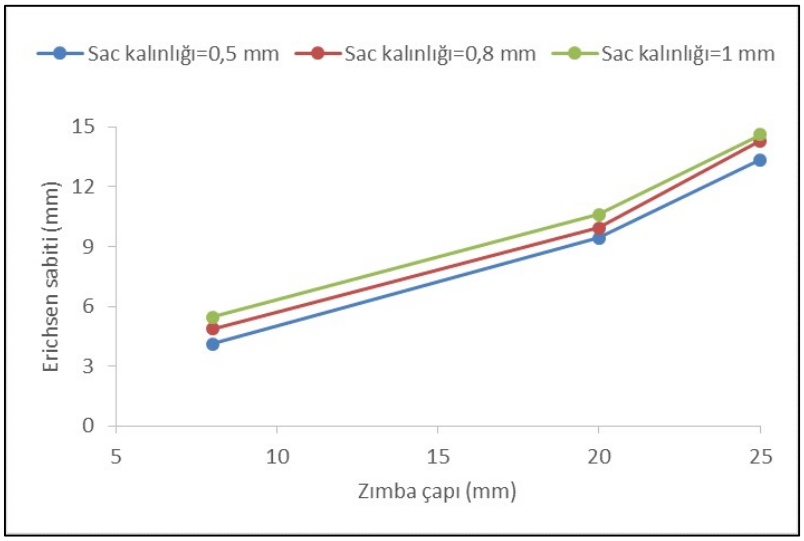
Şekil 5.15. Farklı zımba hızlarında DC04 çelik saclar için elde edilen gerilme-gerinim eğrileri; a) Zımba çapı=8 mm, b) Zımba çapı=20 mm, c) Zımba çapı=25 mm

Şekil 5.15'te görüldüğü gibi, başlangıç gerinim değerlerindeki gerilmeler hatalıdır. Erichsen deneylerinin başlangıcında, sac numunelerde meydana gelen eğilme gerilmeye göre daha baskındır ve göz ardı edilemez. Eğilme nedeniyle, zımba ile temas eden sacın iç yüzeyinde basma gerilmeleri oluşurken, dış yüzeyinde çekme gerilmeleri meydana gelmektedir (Resim 5.1). Zımba ilerlemesi arttıkça, eğilme etkisi azalmakta ve Eş. 5.6 kullanılarak hesaplanan gerilmelerdeki hata miktarı küçülmektedir. Eğilme etkisi, zımba yarıçapının sac kalınlığına oranı (R_p/t_i) arttıkça azalır. 8 mm zımba çapı ile yapılan deneylerde efektif gerinim 0,1'i aştığında makul gerilme değerleri elde edilirken, 25 mm zımba çapı ile geçekleştirilen Erichsen testlerinde gerinim 0,03'ü aştığında gerilme değerleri güvenilir hale gelmiştir. Ayrıca, hesaplanan efektif gerilmeler, sürtünmenin zımba kuvvetini arttırması nedeniyle olması gerekenden biraz daha yüksektir. Şekil 5.15 'de görüldüğü üzere, sürtünme ve eğilmenin birleşik etkisi nedeniyle, zımba hızının efektif gerilim üzerindeki etkisini ayırt etmek zor olsa da, artan zımba hızı, pekleşme nedeniyle efektif gerilim değerlerinde ortalama %6 oranında artışa yol açmıştır.

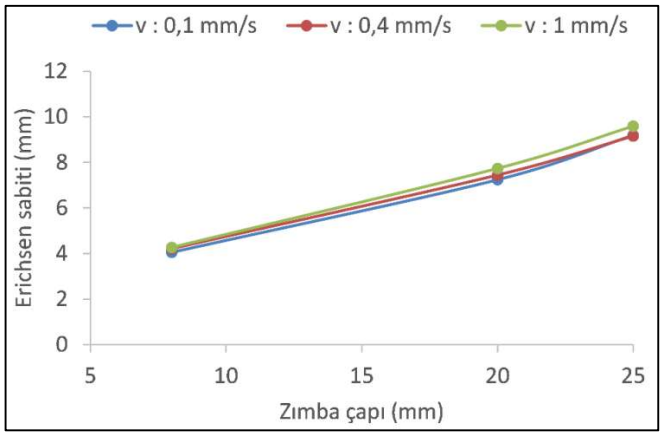


Resim 5.1. Erichsen testi simülasyonu sırasında oluşan asal gerilmeler; a) Zımba ilerlemesi = 0,4 mm, b) Zımba ilerlemesi = 7,0 mm

Eş. 5.2 dikkate alındığında, Erichsen sabitinin zımba çapıyla doğrusal olarak artması gerektiği görülmektedir. Şekil 5.16 ve 5.17, Erichsen sabitinin zımba çaplarıyla değişimini göstermektedir. Zımba çapı 25 mm olduğunda, ES değerlerinin lineerlikten saptığı ve daha büyük (yaklaşık %14) olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, 25 mm çapında zımbanın kullanıldığı deney düzeneğinin diğer deney düzeneklerine kıyasla daha büyük kalıp deliği yarıçapı/zımba yarıçapı oranına (R_D/R_P) sahip olmasıdır. Bu orandaki artış, β açısını azaltmakta ve bu da daha büyük ES değerlerine ulaşılmasını sağlamaktadır.

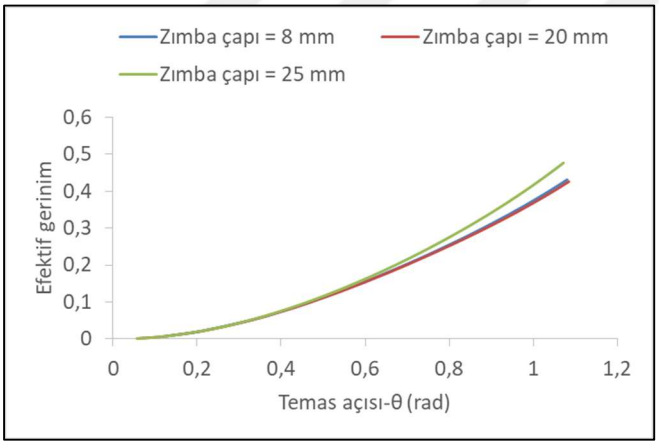


Şekil 5.16. Erichsen sabitinin zımba çapı ile değişimi (DC04 çelik)



Şekil 5.17. Erichsen sabitinin zımba çapı ile değişimi (Al3105 alüminyum)

Efektif gerinim, Eş. 5.7'de görüldüğü üzere yalnızca θ ve β açılarına bağlıdır. Şekil 5.18, efektif gerinimin θ açısıyla değişimini göstermektedir. 25 mm çaplı zımbanın kullanıldığı deney düzeneğinde, R_D/R_P oranı 8 mm ve 20 mm çaplı zımbaların kullanıldığı düzeneklere kıyasla daha büyüktür. Sonuç olarak, aynı θ açısında 25 mm çaplı zımba ile daha büyük efektif gerinim değerleri elde edilmektedir.



Şekil 5.18. Efektif gerinimin ($\bar{\varepsilon}_\theta$) temas açısı (θ) ile değişimi

Çizelge 5.8'de, hem temas açısının hem de çatlak oluşumu anındaki efektif gerinim değerinin (limit gerinim) sac kalınlığının artmasıyla büyüdüğü görülmektedir. Kamikawa ve Morino [43], Erichsen sabiti değerinin sac kalınlığının artmasıyla yükselmesini, boyun verme sonrası (düzensiz) uzamanın numune kesit alanının kareköküyle orantılı olarak arttığını belirten Barba yasasına [90] dayandırmışlar ve üniform uzamanın sac kalınlığından bağımsız olduğunu iddia etmişlerdir. Ancak, bu yasa tek eksenli çekme testleri için önerilmiştir ve sac kalınlığıyla Erichsen sabitinin değişimini tam olarak

açıklamak için yeterli değildir. Örneğin, Kocanda ve Jasinski [3], DC04 çelik saclar ile yapılan Erichsen testlerinde sac kalınlığının 1 mm'den 2 mm'ye yükseltilmesiyle hem uniform hem de düzensiz uzamanın sırasıyla %14 ve %13 arttığını gözlemlemişlerdir.

Çizelge 5.8. Boyun verme bölgesi için hesaplanan temas açıları ve tahmini limit gerinimler (DC04 çelik sac)

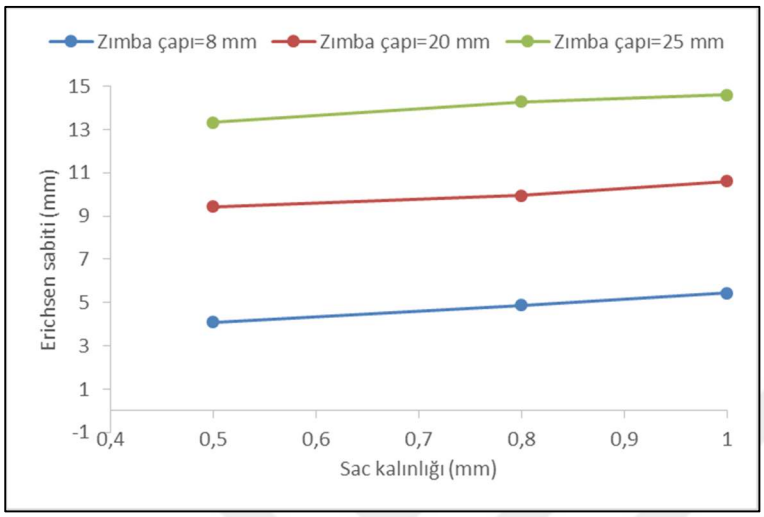
Deney-No	Zımba yarıçapı (mm)	Sac kalınlığı (mm)	Temas açısı- θ (°)	Sürtünmesiz durum için hesaplanan limit gerinim	Tahmin edilen limit gerinim
1	4	0,5	61,17	1,020	0,6936
2	10	0,5	58,14	0,916	0,6230
3	12,5	0,5	57,48	0,945	0,6424
4	10	0,8	60,50	0,991	0,7234
5	12,5	0,8	60,44	1,046	0,7636
6	4	0,8	69,30	1,319	0,9630
7	12,5	1	61,41	1,080	0,8100
8	4	1	74,72	1,554	1,1655
9	10	1	63,48	1,090	0,8175

Çizelge 5.9. Boyun verme bölgesi için hesaplanan temas açıları ve tahmini limit gerinimler (Al3105 alüminyum sac)

Deney-No	Zımba yarıçapı (mm)	Sac kalınlığı (mm)	Temas açısı- θ (°)	Sürtünmesiz durum için hesaplanan limit gerinim	Tahmin edilen limit gerinim
1	4	1	60,67	1,004	0,7791
2	10	1	48,45	0,645	0,5005
3	12,5	1	44,99	0,582	0,4516
4	10	1	47,41	0,619	0,4803
5	12,5	1	43,46	0,544	0,4221
6	4	1	63,06	1,085	0,8419
7	12,5	1	43,59	0,547	0,4245
8	4	1	62,46	1,064	0,8257
9	10	1	49,93	0,683	0,5300

Aynı sac kalınlığı kullanıldığında ve zımba yarıçapı 4 mm iken diğer zımba yarıçaplarıyla elde edilenlere kıyasla limit gerinimlerin daha büyük olduğu Çizelge 5.8'de görülmektedir. Bu nedenle, sac kalınlığının Erichsen sabiti üzerindeki etkisi zımba yarıçapıyla birlikte dikkate alınmalıdır. Zımba çapı 8 mm olduğunda sac kalınlığının Erichsen sabiti üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir (Şekil 5.19). Zımba yarıçapı 4 mm iken ve sac kalınlığı 0,5 mm'den 1 mm'ye çıkarıldığında, limit gerinim ve ES değerlerinin

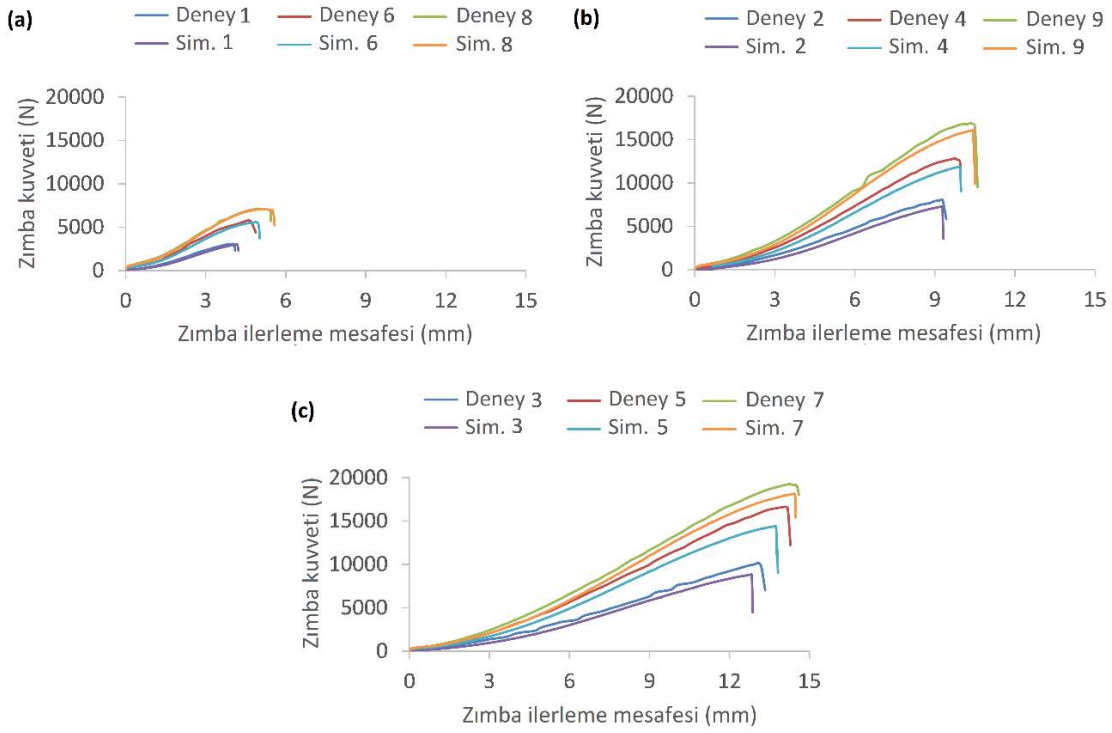
sırasıyla %68 ve %32,8 oranında arttığı tespit edilmiştir. Ancak, zımba yarıçapı 10 mm olduğunda, sac kalınlığının 0,5 mm'den 1 mm'ye yükseltilmesi, limit gerinimde %31,2 ve ES değerinde ise %12,5 oranında bir artış sağlayabilmiştir.



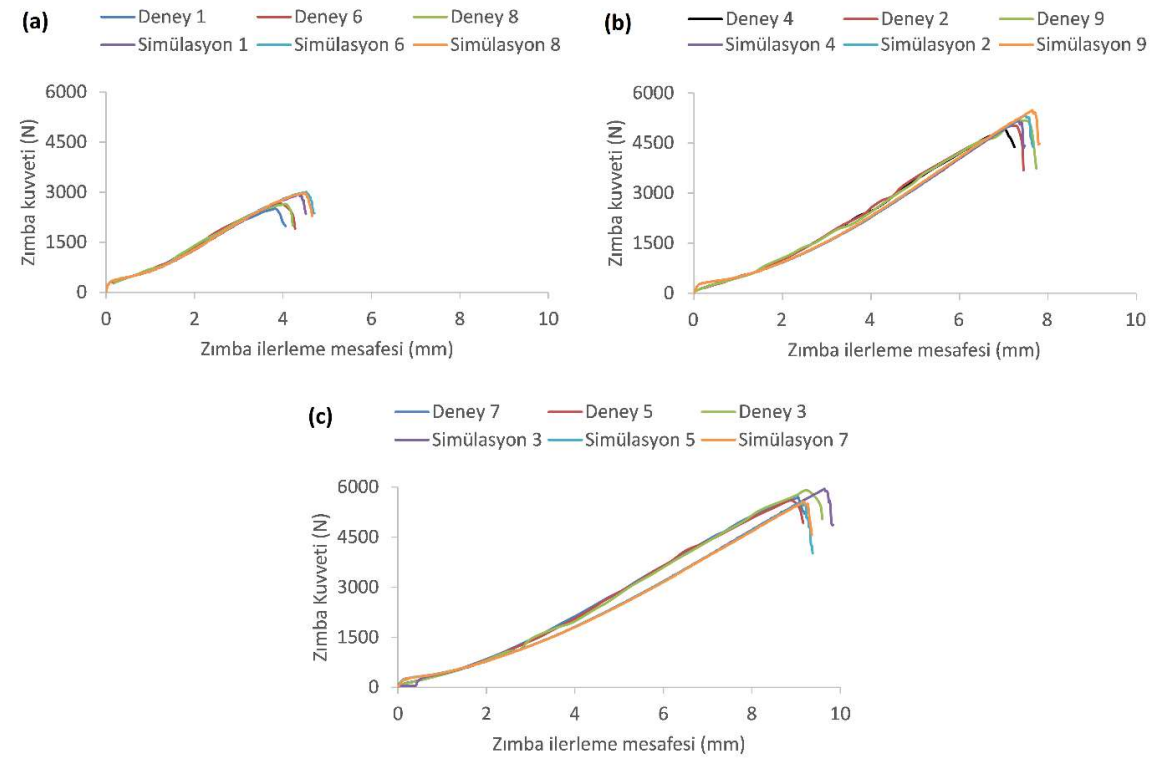
Şekil 5.19. Erichsen sabitinin sac kalınlığı ile değişimi

Aynı zımba çapına sahip deneyler karşılaştırıldığında, sac kalınlığı zımba yarıçapı (t_i/R_p) oranının büyümesiyle eğilme etkisinin arttığı ve daha yüksek limit gerinimlere ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Bunun, eğilme etkisi ile oluşan gerilim gradyanlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Gerilme gradyanları boyun vermeyi geciktirmekte ve çatlama anında daha büyük gerinimlere ulaşılmasına imkân vermektedir. Literatürdeki çeşitli çalışmalar, eğilme etkisinin ve gerilim gradyanlarının boyun vermeyi geciktirebileceğini öne sürmektedir. Örneğin, Fictorie ve diğerleri [91], sacın kalınlığı boyunca bir gerilim gradyanı olduğunda sacın dış katmanındaki boyun vermenin plastik dengesizliğe yol açmadığını, iç katmanların boyun vermeyi geciktirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, Tharrett ve Stoughton [92], boyun vermenin, sacın içbükey yüzeydeki gerinimin, düzlem içi deformasyon sırasında ulaşılan limit gerinimini aştığında meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Tahmin edilen limit gerinimler (Çizelge 5.8 ve 5.9) dikkate alınarak yapılan simülasyonlardan elde edilen zımba kuvveti-yer değiştirme eğrileri, Şekil 5.20 ve 5.21'de sunulmuştur. Simülasyondan elde edilen ES değerlerinin, DC04 çelik saclar için %2 ve Al3105 alüminyum saclar için ise %4,97 Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) ile deneysel sonuçlarla oldukça yakın olduğu görülmektedir.

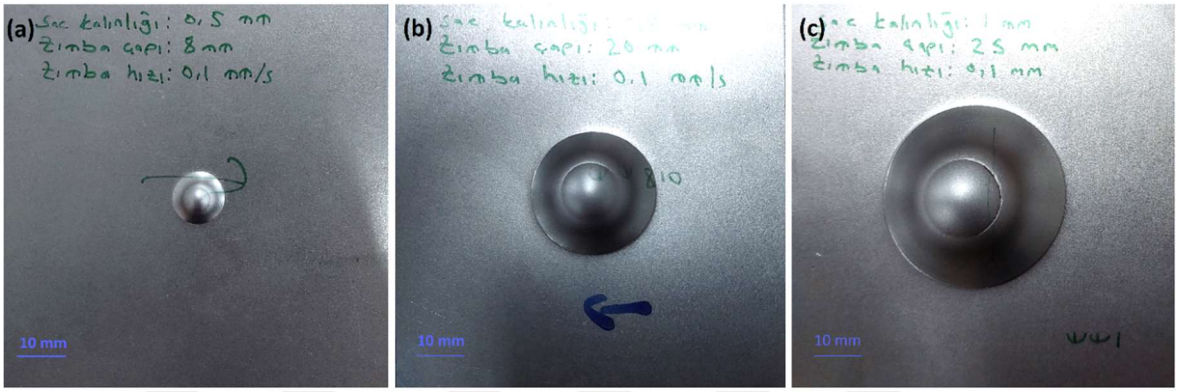


Şekil 5.20. DC04 çelik sacların deneyler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen zımba ilerlemesi-zımba kuvveti eğrileri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm

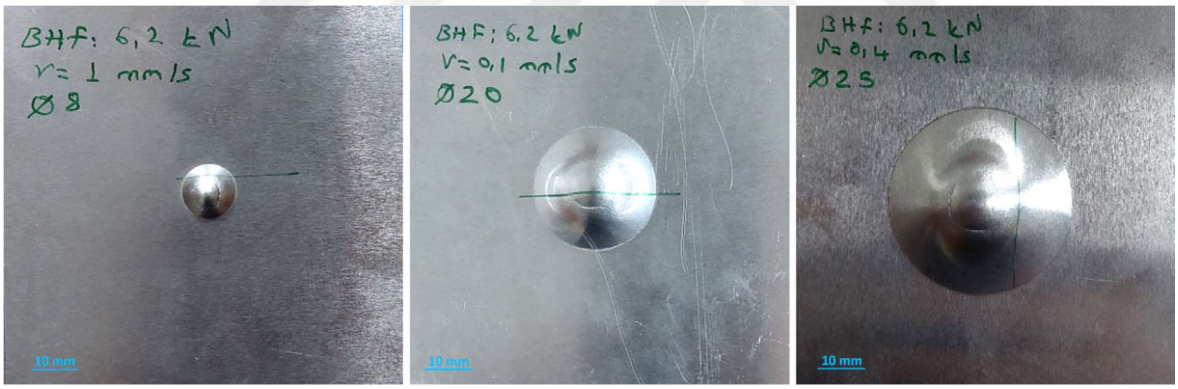


Şekil 5.21. Al3105 alüminyum sacların deneyler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen zımba ilerlemesi-zımba kuvveti eğrileri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm

Resim 5.2 ve 5.3'te görüldüğü üzere, çelik ve alüminyum saclarla yapılan tüm deneylerde çatlaklar, lokal incelmenin (boyun vermenin) meydana geldiği halka şekilli bölgelerde ortaya çıkmıştır. Zımba çapı arttıkça hem deformasyon bölgesinin hem de halka şekilli çatlak alanının çapının arttığı açıkça görülmektedir.

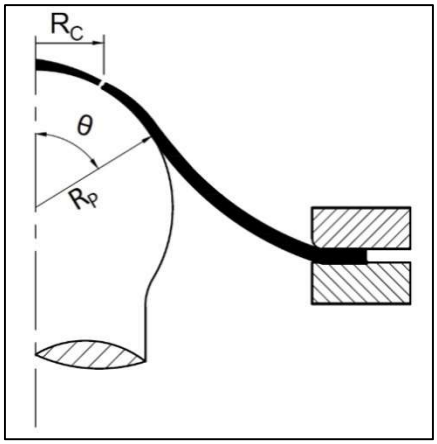


Resim 5.2. DC04 çelik sac numunelerinde Erichsen testlerinden sonra oluşan deformasyonlar; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm



Resim 5.3. Al3105 alüminyum sac numunelerinde Erichsen testlerinden sonra oluşan deformasyonlar; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm, c) Zımba çapı = 25 mm

Şekil 5.22, Erichsen testi sonrası sac metalde meydana gelen deformasyon ve çatlakların şematik bir gösterimini sunmaktadır. Sürtünmesiz durumda, çatlağın Erichsen testi sırasında deforme olmuş sacın tepe noktasında oluşması beklenir [79]. Ayrıca, halka şeklindeki çatlak bölgesinin yarıçapının (R_C) sürtünme katsayısının büyümesiyle genişlediği belirtilmiştir [45].



Şekil 5.22. Erichsen testi sırasında çatlak oluşumunun şematik gösterimi

Deneyler ve simülasyonlar sonrasında ölçülen çatlak bölgesi yarıçapı (R_C) Çizelge 5.10 ve 5.11'de verilmiştir. Erichsen testi sırasında sac metal numunelerde meydana gelen deformasyonlar simülasyonlar ile doğru bir şekilde tahmin edilmiştir ve R_C değerleri çelik saclar için %3,5; alüminyum saclar için ise %4,54 Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) ile elde edilmiştir.

Simülasyonlarda sürtünme katsayısı değeri test esnasında sabit tutulmuştur. Gerçekte ise sürtünme katsayısı işlem esnasında gerinim hızının değişmesi, plastik şekil değiştirme sonucu numune yüzeyinde meydana gelen değişimler, sürtünme nedeniyle ortaya çıkan ısı gibi pek çok faktör nedeniyle değişmektedir. Simülasyonlarda faydalanılan yazılım bu faktörlerin sürtünme katsayısını nasıl etkilediğini hesaplayamamaktadır. Bu nedenlerden dolayı simülasyona ortalama sürtünme katsayısı girilmiş ve bu değerin doğruluğu simülasyonlarda ortaya çıkan çatlak bölgesi çapının deneyler sonrasında oluşanlar ile kıyaslanmasıyla belirlenmiştir. En büyük ortalama mutlak yüzde hatanın %4,54'ü aşmadığı dolayısıyla seçilen sürtünme katsayısının kabul edilebilir değerde olduğu tespit edilmiştir.

1 mm kalınlığındaki DC04 çelik ve Al3105 alüminyum sacların Erichsen simülasyonları sonucunda oluşan çatlaklar ve efektif gerinimler Resim 5.4 ve 5.5'te sunulmuştur. Zımba çapının artmasıyla eğilme etkisinin azaldığı ve bunun sonucunda çatlak başlangıcından önce ulaşılan efektif gerinimlerin azaldığı görülmektedir. Al3105 alüminyum sacın sünekliğinin DC04 çelik sacdan az olması sebebiyle çelik sacda meydana gelen gerinimlere kıyasla alüminyum sacda daha düşük efektif gerinim değerlerinde çatlak oluşumunun başladığı görülmüştür. 1 mm sac kalınlığı ve 20 mm zımba çapı ile yapılan

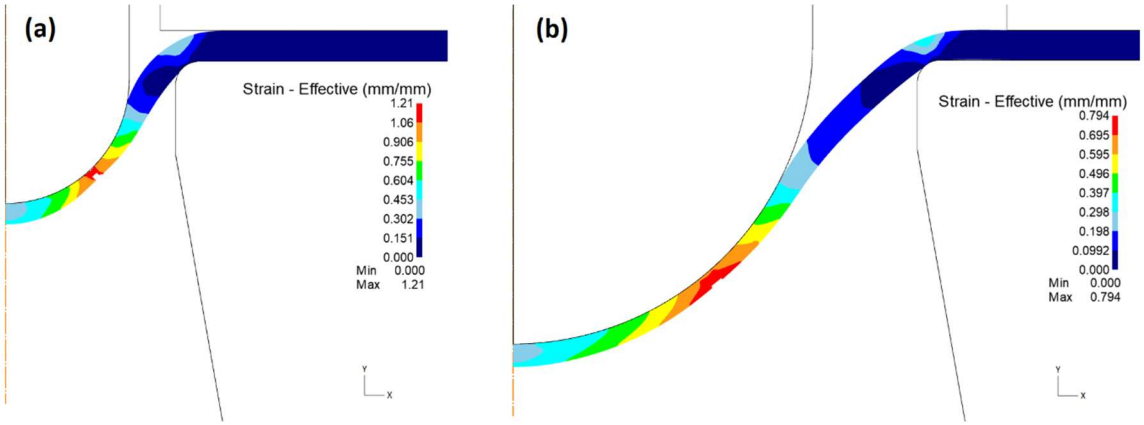
analizler neticesinde çatlak başlangıcında ulaşılan limit gerinimlerin alüminyum için 0,519 değerinde, çelik sac için ise 0,794 değerinde olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.10. Deneyler ve simülasyonlar sonrasında oluşan halka şekilli çatlak bölgelerinin yarıçapları (DC04 çelik sac)

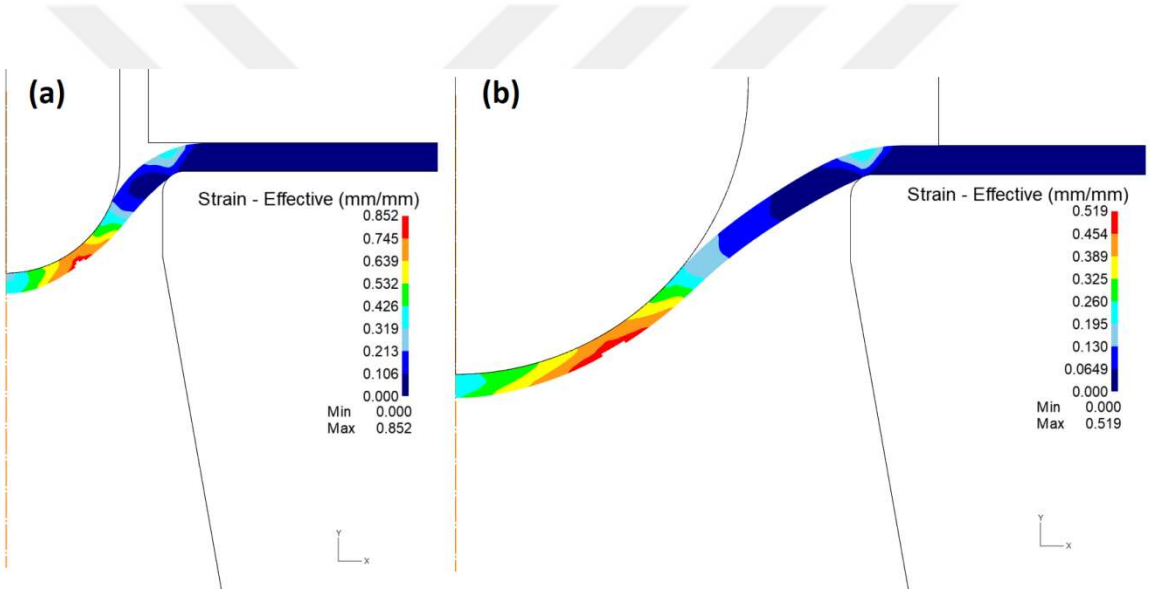
Deney-Simülasyon No	Zımba yarıçapı (mm)	Çatlak bölgesi yarıçapı-mm (Deney)	Çatlak bölgesi yarıçapı –mm (Simülasyon)
1	4	2,81	2,67
2	10	6,82	6,58
3	12,5	8,76	8,14
4	10	6,86	6,68
5	12,5	8,47	8,09
6	4	2,86	2,76
7	12,5	8,7	8,42
8	4	2,97	2,94
9	10	6,75	6,68

Çizelge 5.11. Deneyler ve simülasyonlar sonrasında oluşan halka şekilli çatlak bölgelerinin yarıçapları (Al3105 alüminyum sac)

Deney-Simülasyon No	Zımba yarıçapı (mm)	Çatlak bölgesi yarıçapı-mm (Deney)	Çatlak bölgesi yarıçapı–mm (Simülasyon)
1	4	2,36	2,57
2	10	4,72	4,91
3	12,5	6,25	6,34
4	10	4,602	4,86
5	12,5	5,49	5,73
6	4	2,5	2,59
7	12,5	5,42	5,72
8	4	2,426	2,52
9	10	4,85	5,02



Resim 5.4. Çatlak başlangıcında DC04 çelik saclarda oluşan efektif gerinim değerleri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm



Resim 5.5. Çatlak başlangıcında Al3105 alüminyum saclarda oluşan efektif gerinim değerleri; a) Zımba çapı = 8 mm, b) Zımba çapı = 20 mm

Zımba hızının yük altında iken değişimini belirlemek için DC04 çelik sac numuneler ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen ES değerleri deney süresine bölünerek zımba hızları hesaplanmıştır (Çizelge 5.12). Cihaza girilen hız değerleri ile deneyler sonucunda hesaplanan zımba hızları arasındaki en büyük hata oranının %1,22'yi aşmadığı belirlenmiş ve bu nedenle zımba hızının yük altında iken değişiminin deney sonuçlarına etkisi ihmal edilmiştir.

Çizelge 5.12. Zımba yük altında iken zımba hızında meydana gelen hata oranları

Deney no	Sac kalınlığı (mm)	Zımba çapı (mm)	Cihaza girilen zımba hızı (mm/s)	Ölçülen zımba hızı (mm/s)	Hata oranı (%)
1	0,5	8	0,1	0,10024	0,24
2	0,5	20	0,4	0,40060	0,15
3	0,5	25	1,0	1,00790	0,79
4	0,8	20	0,1	0,10039	0,39
5	0,8	25	0,4	0,40172	0,43
6	0,8	8	1,0	0,98780	1,22
7	1,0	25	0,1	0,09994	0,06
8	1,0	8	0,4	0,40128	0,32
9	1,0	20	1,0	1,00670	0,67

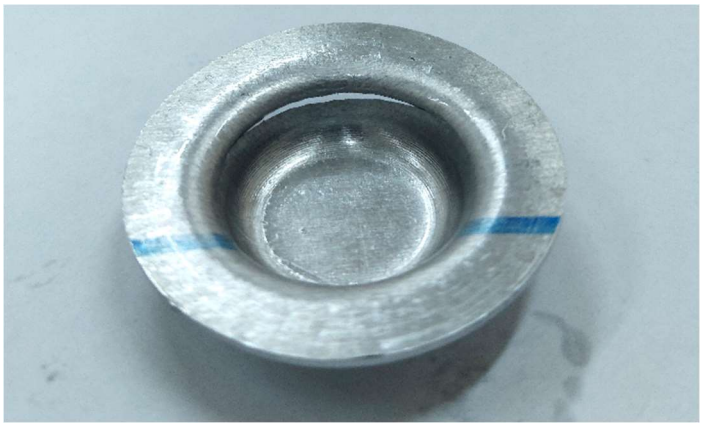
5.2. Derin Çekme Deneyleri ve Simülasyon Sonuçlarıyla Mukayese

Standart kalıp setleri ile yapılan derin çekme deneyleri sonucunda Al3105 sac için limit çekme oranı 1,9 değerinde 3 kN baskı plakası kuvveti altında elde edilmiştir (Resim 5.6).



Resim 5.6. Standart kalıp seti ile Al3105 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 3 kN; limit çekme oranı: 1,9)

Çekme oranı 1,95 e yükseldiğinde ise 3 kN baskı kuvveti altında sac yırtılmıştır (Resim 5.7). Limit çekme oranı 1,9 ve baskı plakası kuvveti 1,5 kN olduğunda sacda kırışmalar gözlemlenmiştir (Resim 5.8).



Resim 5.7. Standart kalıp seti ile Al3105 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 3 kN; çekme oranı: 1,95)



Resim 5.8. Standart kalıp seti ile Al3105 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 1,5 kN; çekme oranı: 1,9)

Kavisli kalıp seti ile yapılan deneylerde de Al3105 sac için limit çekme oranı 1,9 değerinde bulunmuştur (Resim 5.9). Çekme oranı 1,95 olduğunda ise sac yırtılmıştır (Resim 5.10).



Resim 5.9. Kavisli kalıp seti ile 1 mm kalınlığındaki Al3105 sacın derin çekme sonucu (Limit çekme oranı: 1,9; baskı plakası kuvveti sol: 1,5 kN ve sağ: 3 kN)



Resim 5.10. Kavisli kalıp seti ile 1 mm kalınlığındaki Al3105 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 3 kN; çekme oranı: 1,95)

Standart kalıp seti kullanılarak 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik saclarla 1,8 çekme oranına sahip kap10 kN baskı plakası kuvveti altında başarılı olarak üretilirken, baskı plakası kuvveti 5 kN olduğunda sac kabın flaş kısmında kırışmalar görülmüştür (Resim 5.11). Çekme oranı 1,9 olduğunda 10 kN baskı plakası kuvveti altında yapılan deneylerde sac yırtılmıştır (Resim 5.12). 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac için limit çekme oranı 1,85 değerinde bulunmuştur (Resim 5.13).



Resim 5.11. Düz kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Çekme oranı: 1,8; baskı plakası kuvveti sol: 10 kN ve sağ: 5 kN)



Resim 5.12. Düz kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 10 kN; çekme oranı: 1,9)



Resim 5.13. Düz kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Limit çekme oranı: 1,85; baskı plakası kuvveti: 10 kN)

Kavisli kalıp seti ile 10 kN baskı plakası kuvveti altında 2,05 çekme oranı için yapılan deney sonucunda kırışmalar oluştuğu görülmüştür (Resim 5.14). Çekme oranı 1,95 değerine düşürüldüğünde 10 kN baskı plakası kuvveti altında sac malzemede kırışmalar oluşurken, 12 kN baskı plakası kuvveti uygulandığında sac yırtılmıştır (Resim 5.15). Çekme oranı 1,9 olduğunda ise kırışma ve yırtılma olmadan 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac başarılı bir şekilde çekilmiştir (Resim 5.16).



Resim 5.14. Kavisli kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 10 kN; çekme oranı: 2,05)



Resim 5.15. Kavisli kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Çekme oranı: 1,95; baskı plakası kuvveti sol: 10 kN ve sağ: 12 kN)



Resim 5.16. Kavisli kalıp seti ile 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Limit çekme oranı: 1,9; baskı plakası kuvveti: 12 kN)

Standart kalıp seti kullanılarak 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik saclarla 2,05 çekme oranında yapılan deneyler sonucunda,10 kN baskı plakası kuvveti kullanıldığında sac yırtılmış, baskı plakası kuvveti 6,75 kN olduğunda ise sacda kırışmalar görülmüştür (Resim 5.17). Çekme oranı 2,0 olduğunda 10 kN baskı plakası kuvveti altında yapılan deneyler başarılı olmuştur. 10 mm kavis yarıçaplı baskı plakası ve kalıp seti kullanıldığında ise 2,3 çekme oranına sahip kaplar kırışma ve yırtılma olmadan başarılı bir şekilde üretilebilmiştir (Resim 5.18).



Resim 5.17. Standart kalıp seti ile 0,8 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Çekme oranı: 2,05; baskı plakası kuvveti sol: 10 kN ve sağ: 6,75 kN)



Resim 5.18. 0,8 mm kalınlığındaki DC04 sac ile derin çekme deneyleri (Sol standart kalıp - limit çekme oranı 2,0 ve sağ kavisli kalıp seti - limit çekme oranı 2,3)

Standart kalıp seti ile 1 mm kalınlığındaki çelik saclarla 2,2 çekme oranı için yapılan deneyler sonucunda sacda yırtılmalar meydana gelmiştir (Resim 5.19). 2,1 çekme oranı için başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Resim 5.20). Kavisli kalıp ile yapılan deneylerde de 1 mm kalınlığındaki çelik sacın limit çekme oranı 2,1 değerinde tespit edilmiştir.

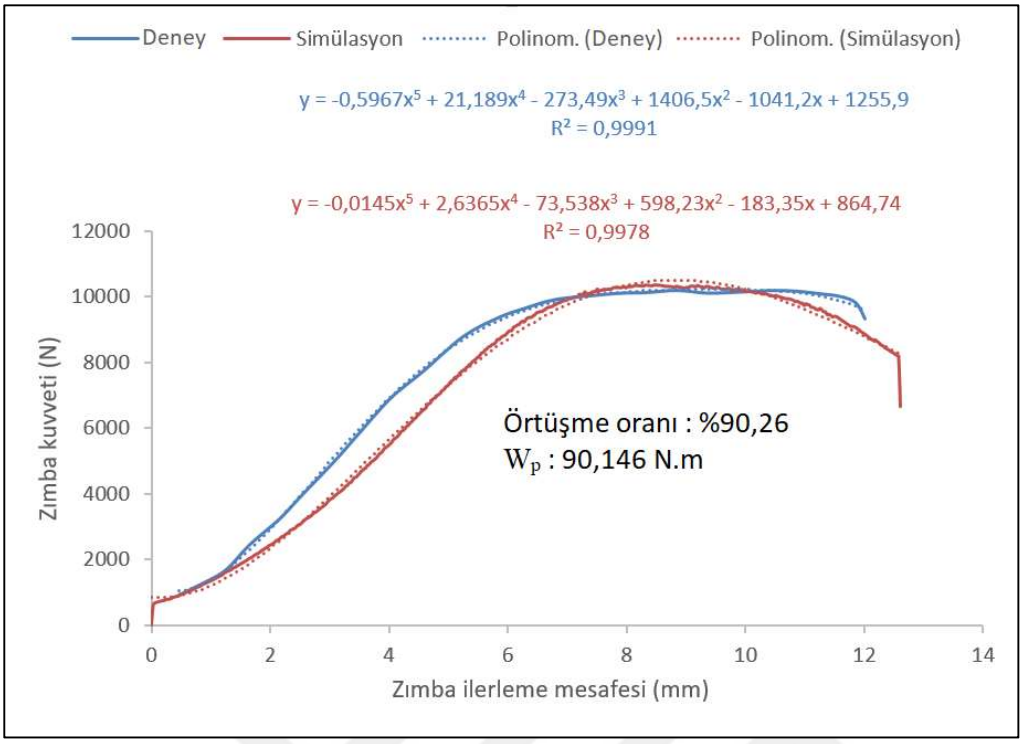


Resim 5.19. Standart kalıp seti ile 1 mm kalınlığındaki DC04 sac numunelerle yapılan derin çekme deneyleri (Çekme oranı 2,2; sol baskı plakası kuvveti 10 kN ve sağ 5,25 kN)

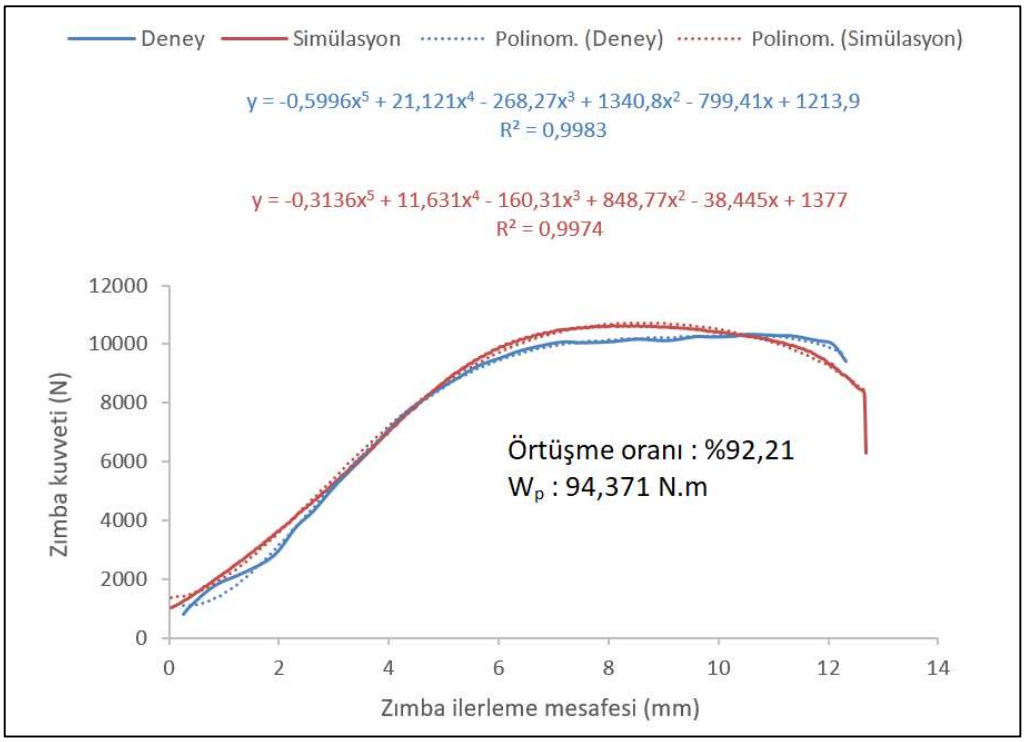


Resim 5.20. Standart kalıp seti ile 1 mm kalınlığındaki DC04 sacın derin çekme sonucu (Baskı plakası kuvveti: 12 kN; limit çekme oranı: 2,1)

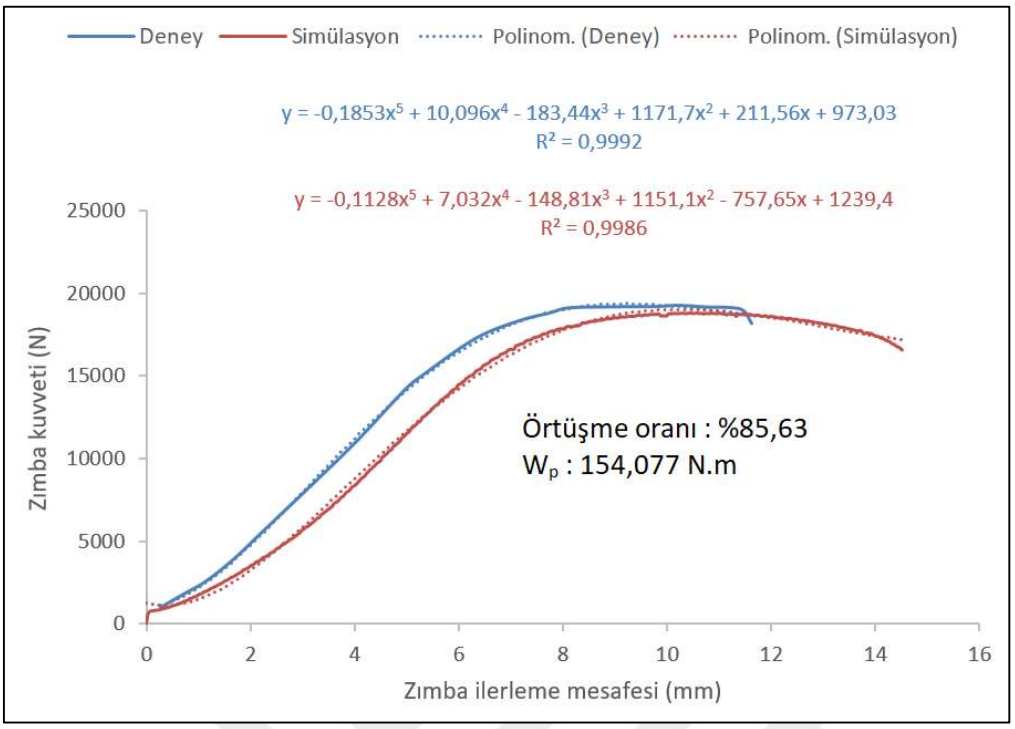
Derin çekme deneyleri ve simülasyonları sonucunda elde edilen zımba kuvveti-zımba ilerlemesi grafikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 2.23-5.27).



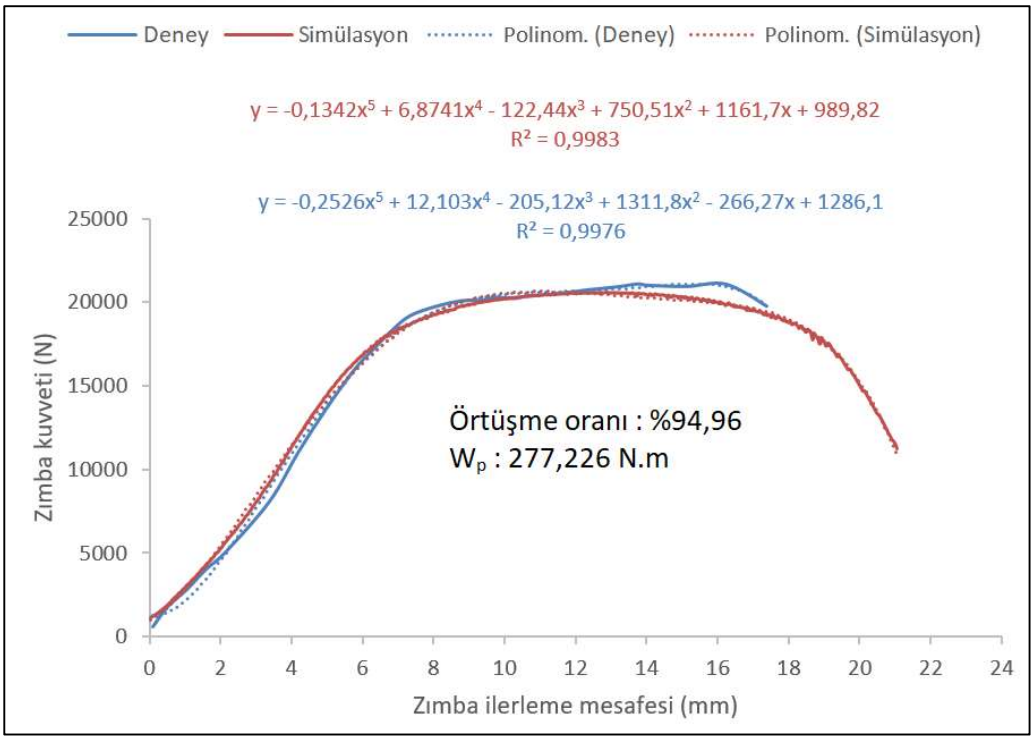
Şekil 5.23. Al3105 sac numunelerin standart kalıp seti ile yapılan derin çekme işlemi sırasında oluşan zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrileri (Çekme oranı:1,9 ve baskı plakası kuvveti: 3 kN)



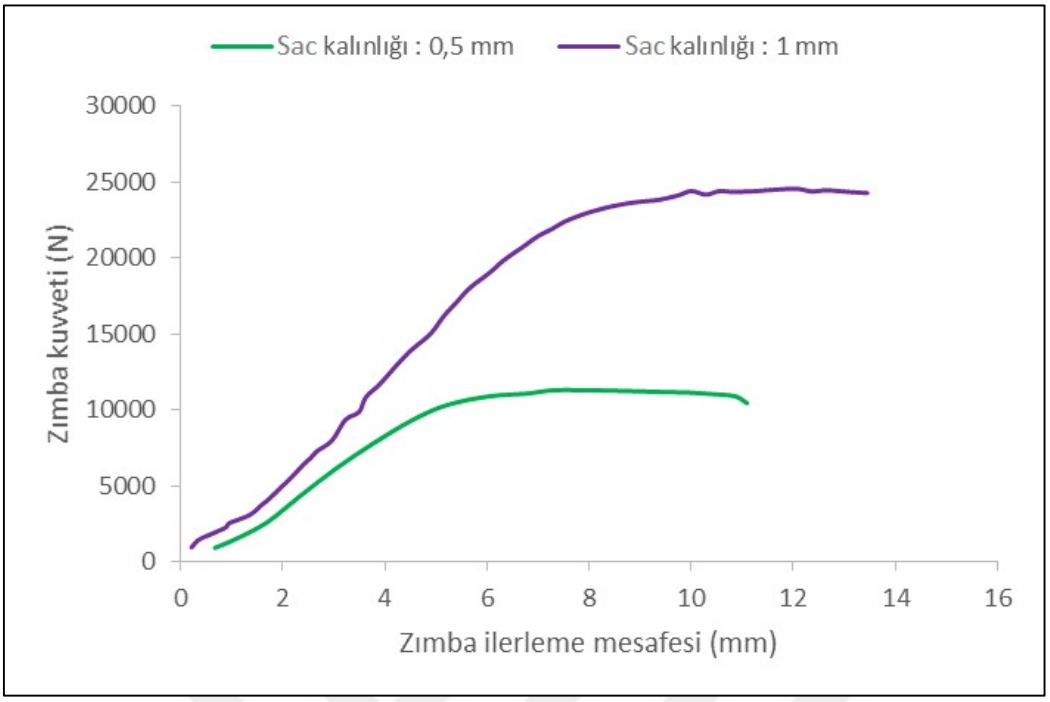
Şekil 5.24. Al3105 sac numunelerin kavisli kalıp seti ile yapılan derin çekme işlemi sırasında oluşan zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrileri (Çekme oranı:1,9 ve baskı plakası kuvveti: 3 kN)



Şekil 5.25. DC04 çelik sac numunelerin standart kalıp seti ile yapılan derin çekme işlemi sırasında oluşan zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrileri (Sac kalınlığı:0,8 mm, çekme oranı:2,0 ve baskı plakası kuvveti:10 kN)



Şekil 5.26. DC04 çelik sac numunelerin kavisli kalıp seti ile yapılan derin çekme işlemi sırasında oluşan zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrileri (Sac kalınlığı:0,8 mm, çekme oranı:2,3 ve baskı plakası kuvveti:13 kN)



Şekil 5.27. Farklı kalınlıklardaki DC04 çelik sac numunelerin standart kalıp seti ile yapılan derin çekme deneyleri sırasında oluşan zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrileri (0,5 mm kalınlığındaki sac 1,85 çekme oranı; 1 mm kalınlığındaki sac 2,1 çekme oranı)

Literatürde [93] zımba kuvvetini hesaplamak için önerilen eşitlik aşağıda sunulmuştur.

$$F_{d,max} = \frac{1}{\eta}\pi dt\sigma_f \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (5.8)$$

Eş. 5.8 dikkate alındığında en büyük zımba kuvvetinin ($F_{d,max}$), zımba çapı (d), sac kalınlığı (t) ve malzemenin akış gerilmesi (σ_f) ile lineer olarak arttığı görülmektedir. Çekme oranının (D/d) büyümesiyle ise zımba kuvveti logaritmik olarak yükselmektedir.

Eşitlikte yer alan "η" ise şekillendirme verimliliğini sembolize etmektedir. Sürtünme nedeniyle şekillendirme verimliliği azalır ve zımba yükü artar [93].

Şekil 5.23-5.26 incelendiğinde; deneyler ile simülasyonlar sonucu elde edilen zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrilerinin uyumlu olduğu ve en büyük zımba kuvvetleri arasındaki hata oranın % 3,16'yı geçmediği tespit edilmiştir. Grafik altında kalan alan zımbanın yaptığı işi ifade etmektedir. Deneyler esnasında zımbanın yaptığı iş (W_p) sac malzeme kalınlığının, malzemenin akma dayanımının ve zımba ilerleme mesafesinin

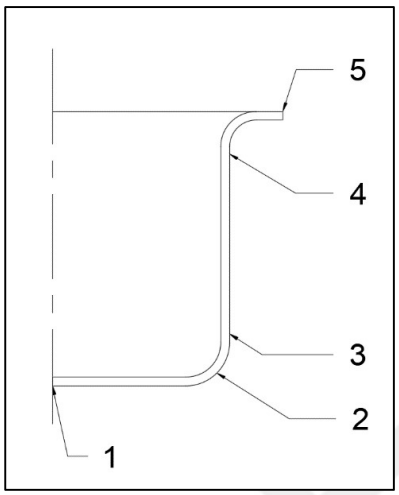
artmasıyla büyümektedir. Deney ve simülasyonların örtüşme oranını belirlemek için zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrileri Microsoft Excel programı yardımıyla 5. dereceden polinomlar ile ifade edilmiştir. Zımba ilerleme mesafesi 0,1 mm arttırılarak deneyler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen zımba kuvvetlerinin farkı yüzde olarak hesaplanmış ve bu oranların aritmetik ortalaması alınarak hata miktarı bulunmuştur. Hata oranı yüzden çıkartılarak simülasyonlar ile deneylerin örtüşme oranları tespit edilmiştir. Simülasyonlar ile deneylerin en az %85,63 oranında örtüştüğü belirlenmiştir.

Şekil 5.27'de DC04 çelik saclar için sac kalınlığının iki katına çıkması ve çekme oranının 1,85 değerinden 2,1 ile yükselmesiyle ile zımba kuvveti-zımba ilerleme mesafesi eğrisinin değişimi sunulmuştur. Sac kalınlığındaki artışın yanı sıra çekme oranındaki artış ve de sürtünme nedeniyle 1 mm kalınlığındaki sac ile yapılan deneyler sonucunda ulaşılan en büyük zımba kuvvetinin (24550 N) 0,5 mm kalınlığındaki çelik sac ile elde edilen en büyük zımba kuvvetinin (11310 N) 2,17 katı olduğu tespit edilmiştir.

Çekme işlemi ile üretilen silindirik kapların sac kalınlığında meydana gelen değişimi incelemek için çeşitli noktalardan (Şekil 5.28) ölçümler yapılmıştır. Farklı çekme oranları ve başlangıç sac kalınlığı ile imal edilen kapların sac kalınlığı değişimi Çizelge 5.13'te sunulmuştur. Et kalınlığının en çok 3 numaralı bölgede inceldiği tespit edilmiştir. Literatürde [72] çekme işlemlerinde yırtılmaların çoğunlukla zımba ucu radyüsünün kap duvarıyla birleştiği yerde (3 numaralı nokta) meydana geldiği belirtilmiştir. Kap duvarlarının dayanımının, sacın kalıp radyüsü üzerinde eğilmesi nedeniyle daha çok pekleşerek yükseldiği ve kabın alt kısmında ise kabın yan duvarları kadar pekleşme sertleşmesi olmadığından malzeme dayanımının en az bu bölgede olduğu ifade edilmiştir.

Çekme işlemlerinde kavisli kalıp ve baskı plakası kullanıldığında standart çekme setine kıyasla kritik bölgedeki (3 numaralı bölge) incelmenin arttığı fakat kabın etek kısmında (5 numaralı bölge) meydana gelen kalınlaşmanın azaldığı görülmüştür. Literatürde [72] belirtildiği üzere kalıp radyüsünde sacın eğilmesinin pekleşmeyi artırmasına benzer şekilde, kavisli kalıp ve baskı plakası sac malzemede pekleşme sertleşmesini artırarak kabın duvarı ile alt kısmı arasındaki dayanım farkını büyütmüş ve bu nedenle bu kısımdaki incelmenin artışına yol açmıştır. Pekleşme nedeniyle zımba yükünde artış beklenirken aynı çekme oranına sahip deneylerden elde edilen verilen kıyaslandığında (Şekil 5.23 ve 5.24) kavisli kalıp ve standart kalıp ile ulaşılan zımba kuvvetlerinin aynı olduğu görülmüştür.

Kavisli kalıp ve baskı plakası bir yandan pekleşme nedeniyle zımba yükünü artırırken diğer yandan açılı kalıplarda [48] olduğu gibi baskı plakası kuvveti ile sacın kalıp boşluğuna akmasına yardımcı olmaktadır, bu iki zıt etki nedeniyle zımba kuvveti sabit kalmıştır.

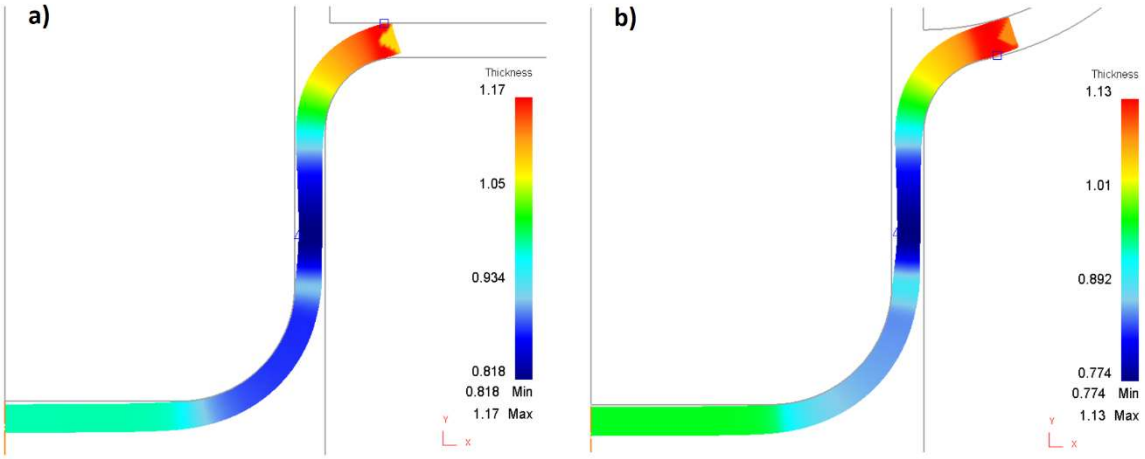


Şekil 5.28. Sac kalınlığı değişimi ölçüm noktaları

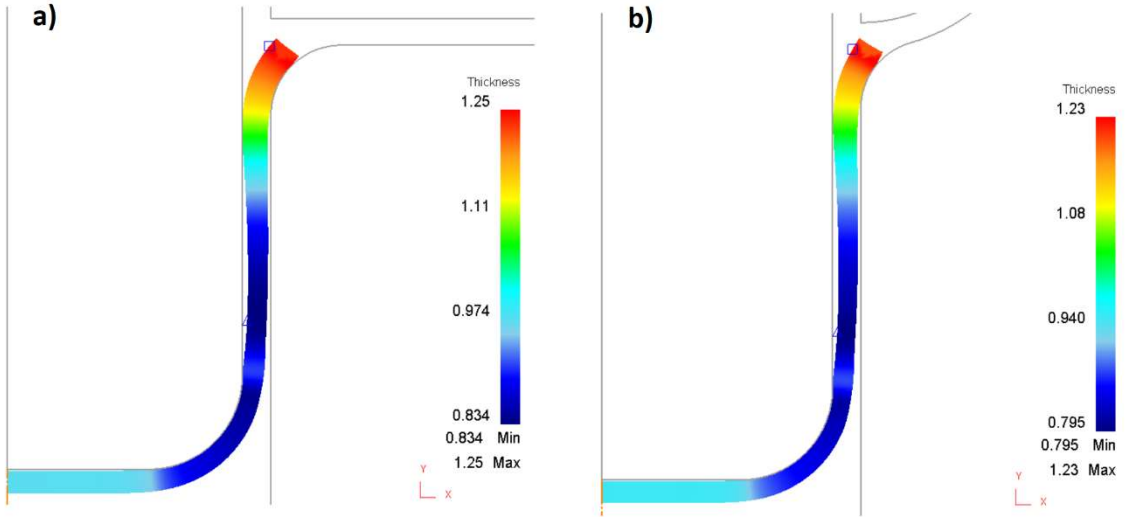
Çizelge 5.13. Derin çekme işlemi ile üretilen kapların et kalınlığı değişimi

Malzeme		Al3105	Al3105	DC04	DC04	DC04	DC04
Başlangıç sac kalınlığı (mm)		1,00	1,00	0,80	0,80	1,00	1,00
Çekme oranı		1,90	1,90	2,00	2,30	2,10	2,10
Çekme kalıbı		Standart	Kavisli	Standart	Kavisli	Standart	Kavisli
Ölçüm noktası	1	1,00	1,00	0,79	0,78	1,00	1,00
	2	0,87	0,84	0,68	0,66	0,89	0,87
	3	0,80	0,76	0,65	0,61	0,85	0,82
	4	1,01	0,94	0,78	0,81	1,11	1,08
	5	1,18	1,09	0,93	0,94	1,27	1,23

Derin çekme simülasyonları ile elde edilen sac kalınlığı dağılımları Resim 5.21 ve 5.22'de verilmiştir. Simülasyon sonuçlarının deneyler ile uyumlu olduğu görülmüş ve en çok incelmenin olduğu bölgedeki hata oranı %3,14'ü geçmemektedir.

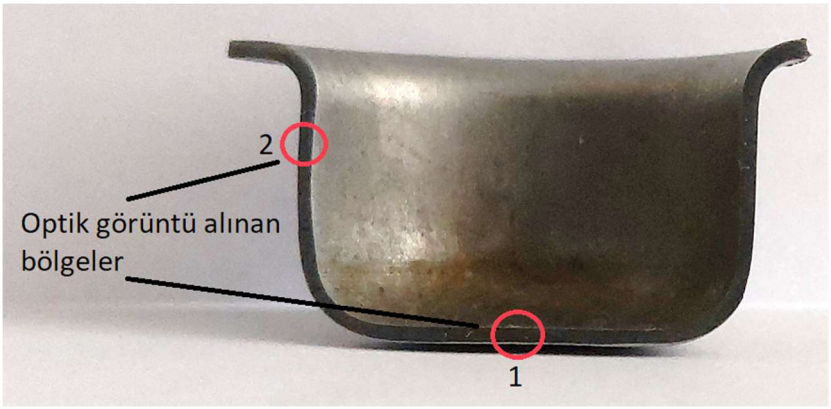


Resim 5.21. Al3105 saclar ile yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen kalınlık dağılımı (Limit çekme oranı: 1,9; sol standart kalıp ve sağ kavisli kalıp)



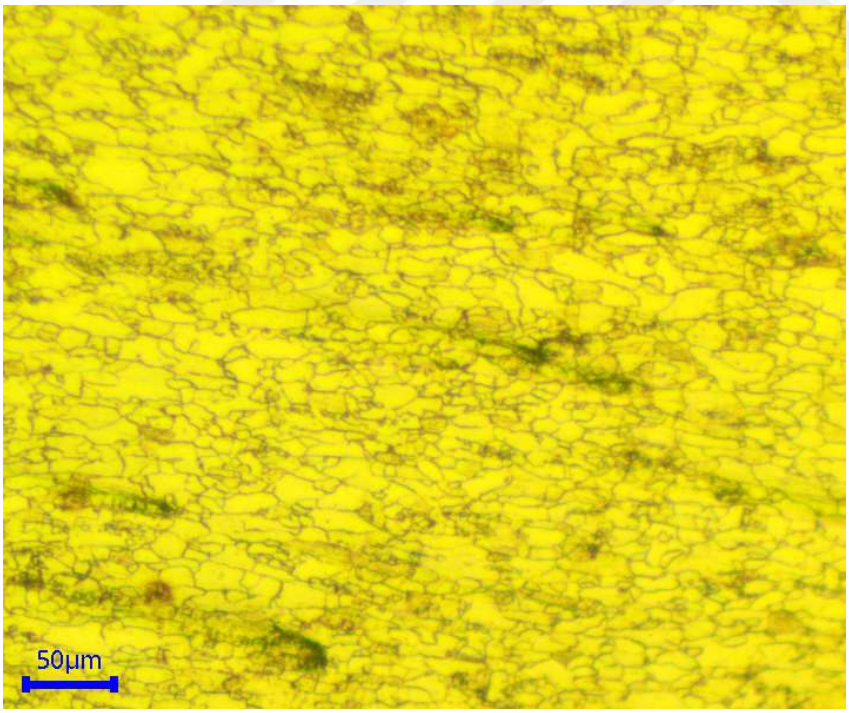
Resim 5.22. DC04 çelik saclar ile yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen kalınlık dağılımı (Limit çekme oranı: 2,1; sol standart kalıp ve sağ kavisli kalıp)

Derin çekme işlemi sonrasında sac malzemenin mikro yapısında meydana gelen değişimleri incelemek için 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac ile üretilen parçalar hadde yönüne paralel olarak kesilmiştir (Resim 5.23).

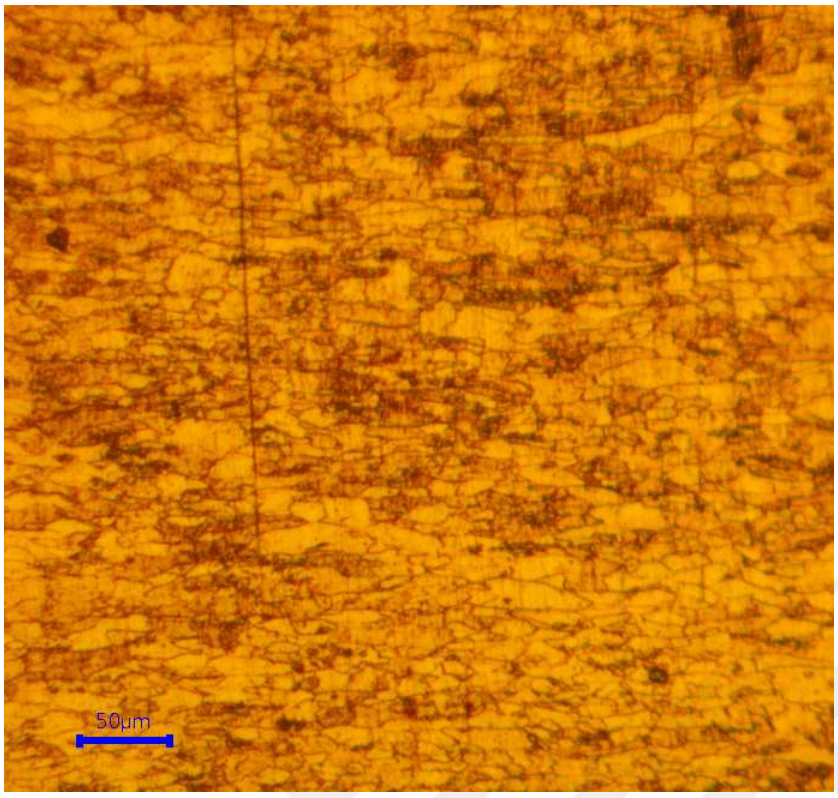


Resim 5.23. Mikro yapı incelemesi için kesilen sac numune

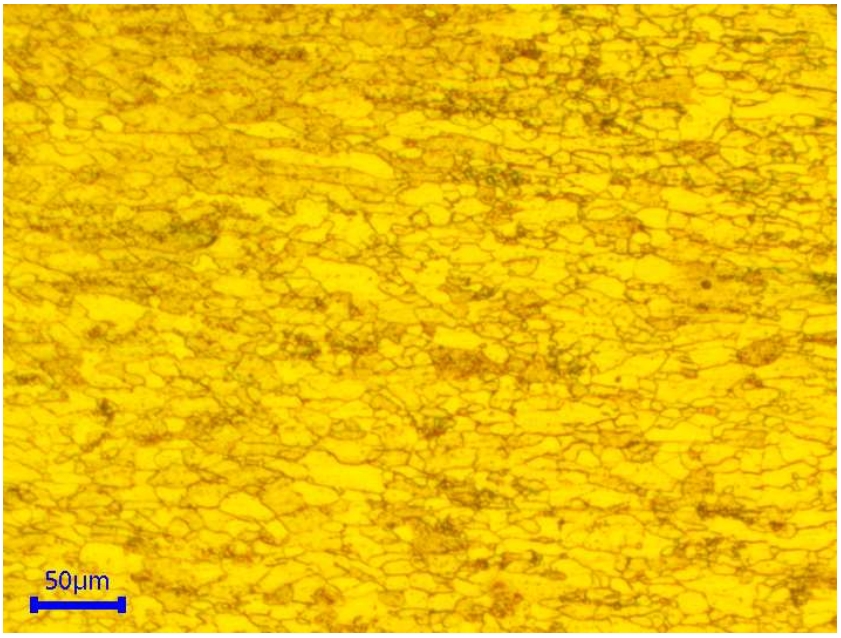
Kesim işlemi sonrasında zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmış ve optik mikroskopla inceleme öncesinde sac numuneler nital (% 5 nitrik asit ve %95 etil alkol) çözeltisi ile yaklaşık 10 sn. süresince dağlanmıştır. Kavisli kalıp seti ve standart derin çekme seti ile üretilen sac numunelerin 100 kat büyütme yapılarak elde edilen tane yapıları aşağıdaki resimlerde verilmiştir.



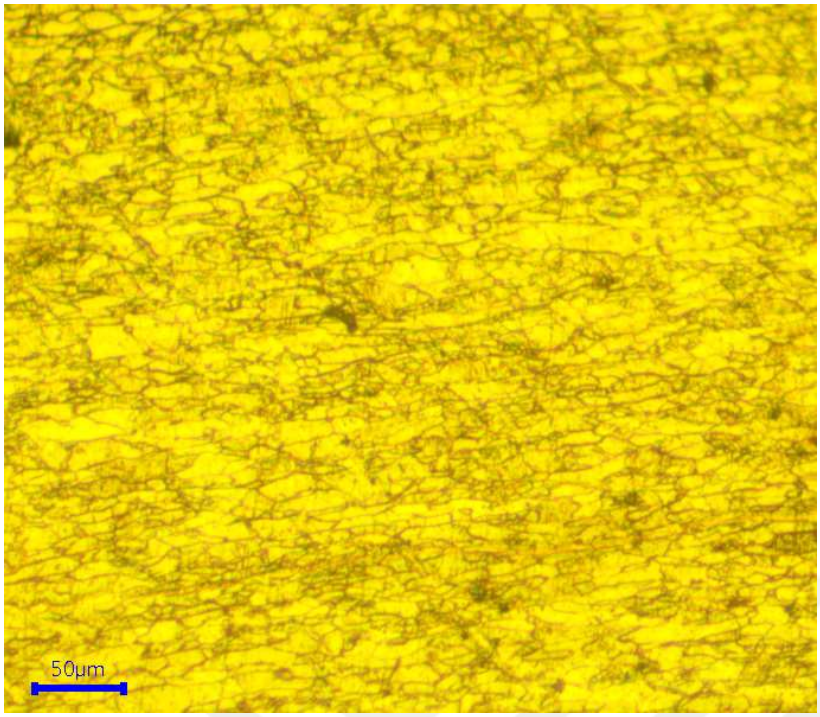
Resim 5.24. Standart kalıp ile üretilen silindirik kabın 1 numaralı bölgesinin 100 kat büyütülmesi sonucu elde edilen tane yapısı (Limit çekme oranı: 1,95)



Resim 5.25. Standart kalıp ile üretilen silindirik kabın 2 numaralı bölgesinin 100 kat büyütülmesi sonucu elde edilen tane yapısı (Limit çekme oranı: 1,95)



Resim 5.26. Kavisli kalıp ile üretilen silindirik kabın 1 numaralı bölgesinin 100 kat büyütülmesi sonucu elde edilen tane yapısı (Limit çekme oranı: 1,95)



Resim 5.27. Kavisli kalıp ile üretilen silindirik kabın 2 numaralı bölgesinin 100 kat büyütülmesi sonucu elde edilen tane yapısı (Limit çekme oranı: 1,95)

Resim 5.24 ve Resim 5.26 incelendiğinde, sac parçaların taban bölgesinde (1 numaralı bölge) tanelerin hadde yönünde uzadığı açıkça görülmektedir. Resim 5.25 ve 5.27 standart ve kavisli kalıp setleri ile üretilen silindirik sac parçaların duvar bölgesindeki (2 numaralı bölge) tane yapısını göstermektedir. Derin çekme işlemi esnasında bu bölgelerin daha fazla plastik deformasyona uğramasından dolayı tane uzunlukları taban kısımlarına kıyasla daha küçüktür. Derin çekme işlemi sonrasında plastik deformasyon sebebiyle tane çapının küçülmesi beklenen bir durumdur [94]. Kavisli kalıp setinin tane boyutuna etkisini daha iyi incelemek için Toupview yazılımı kullanılarak lineer kesişim yöntemi [95] ile hadde yönünde ve sac kalınlığı doğrultusundaki ortalama tane uzunlukları hesaplanmıştır (Çizelge 5.14). Tane boyutu belirlenirken hadde yönünde ve sac kalınlığı doğrultusunda Toupview yazılımı yardımıyla gerçek uzunluğu 250 µm olan 6 çizgi çizilmiş ve çizgilerin tane sınırları ile kesiştiği noktalar sayılmıştır. Toplam çizgi uzunluğu toplam kesişim noktası sayısına bölünerek ortalama tane uzunluğu hesaplanmıştır.

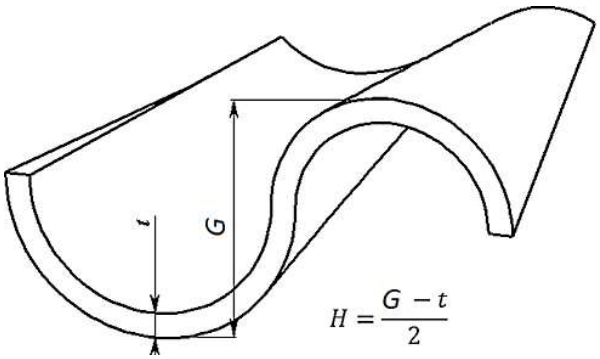
Çizelge 5.14. Derin çekme işlemi sonrasında sac numunelerin tane boyutunun değişimi

	Standart kalıp ile üretilen sac numunelerin ortalama tane uzunluğu (μm)		Kavisli kalıp ile üretilen sac numunelerin ortalama tane uzunluğu (μm)	
	1 numaralı bölge	2 numaralı bölge	1 numaralı bölge	2 numaralı bölge
Sac kalınlığı doğrultusunda	5,37	4,93	5,32	4,54
Hadde yönünde	12,39	10,87	11,81	8,57

Çizelge 5.14 incelendiğinde, hadde yönündeki ortalama tane uzunluğunun sac kalınlığı doğrultusundaki ortalama tane uzunluğunun yaklaşık iki katı olduğu görülmektedir. Kavisli kalıp standart kalıp ile kıyaslandığında kavisli kalıp seti ile üretilen parçanın tane boyutunun daha fazla küçüldüğü anlaşılmaktadır. Hadde yönündeki tane uzunlukları karşılaştırıldığında kavisli kalıp ile üretilen sac numunenin duvar kısmındaki tanelerin ortalama uzunluğu sac kabın taban kısmındaki ortalama tane uzunluğundan yaklaşık %27 daha küçük iken standart kalıp ile üretilen parçada bu oran %12 civarındadır. Kavisli kalıp ortalama tane boyutunun daha fazla küçülmesine neden olmuştur, bu durum kavisli kalıp tasarımı nedeniyle oluşması beklenen Bauschinger etkisinin gözlemlenmesini engellemiş olabilir. Bauschinger etkisi ile zımba kuvvetinde düşüş beklenirken tane boyutunun azalması nedeniyle akış gerilmeleri artmakta [96] bu da zımba kuvvetinde artışa neden olmaktadır. Bu iki zıt etki birbirini ortadan kaldırarak standart kalıp ve kavisli kalıp ile elde edilen zımba kuvvetlerinin aynı olmasına yol açmış olabilir.

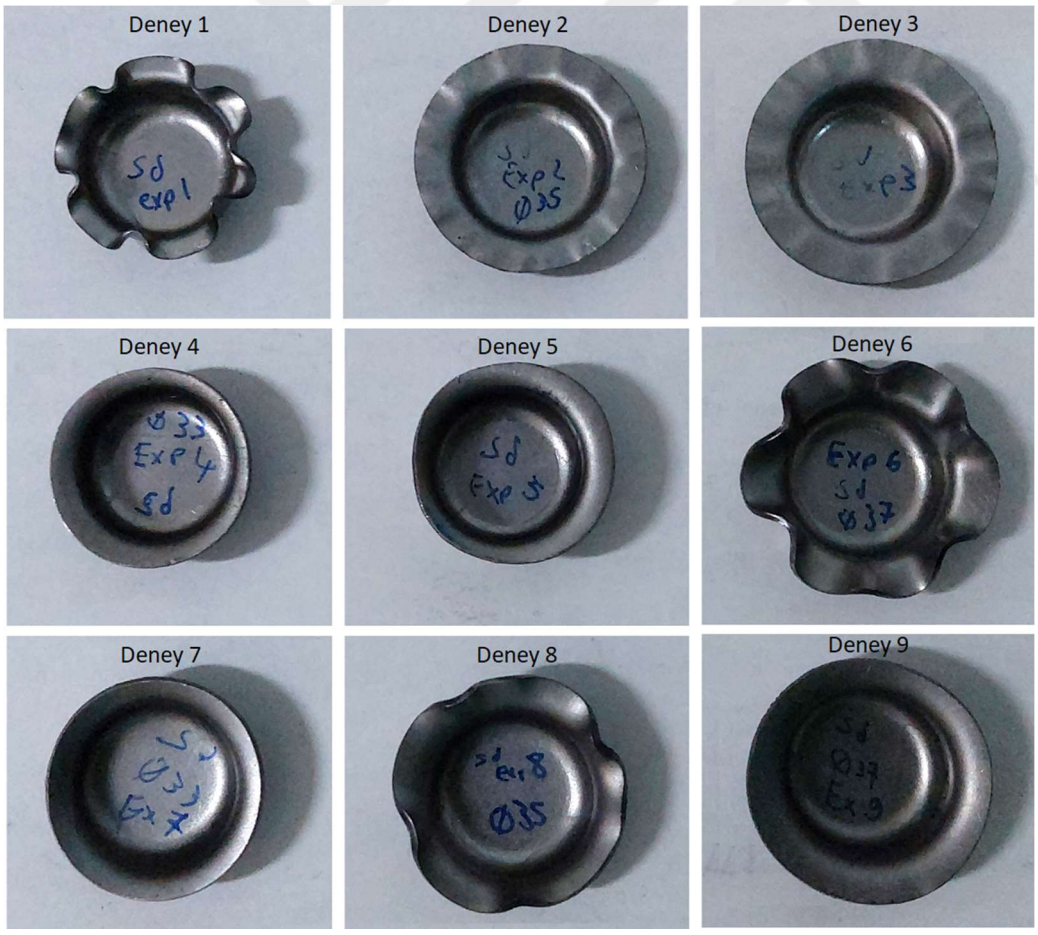
5.3. Kırışma Analizi Deneyleri Sonuçları

Derin çekme işlemiyle üretilen içi boş silindirik kabın yüzeyinde oluşan kırışmaların şekli dalgaya benzer ve genliği flanşın dış çevresinde en büyüktür ve kabın iç çapına radyal doğrultuda yaklaşırken azalır. Deneyler sonrasında oluşan kırışmaların yüksekliği (genliği) (H) Şekil 5.29'da gösterildiği şekilde ölçülmüştür.



Şekil 5.29. Kırışma yüksekliğinin ölçümü [97]

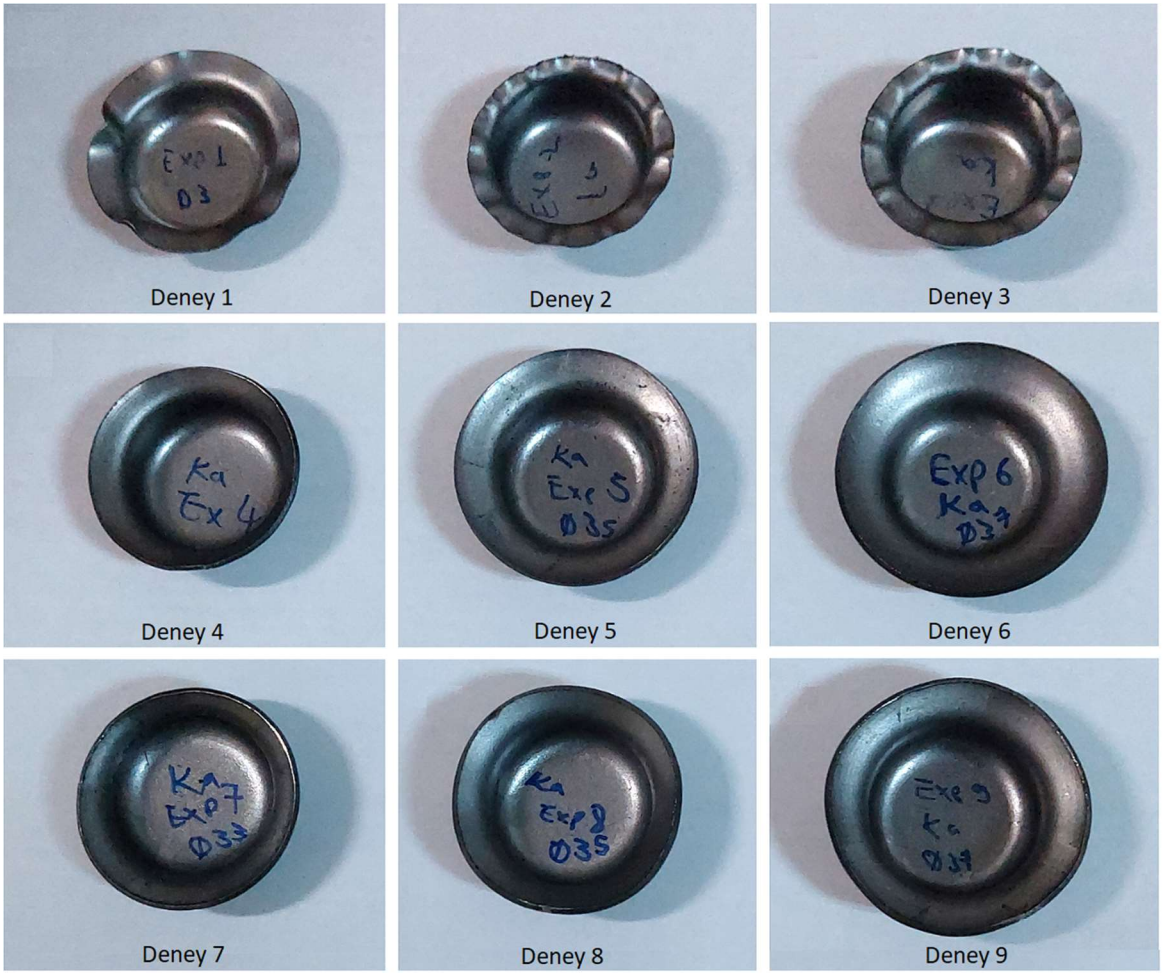
Standart çekme seti ve kavisli çekme seti ile elde edilen kırışma sayıları ve kırışma genliği Çizelge 5.15 ve 5.16'da sunulmuştur. Kırışıklık oluşumunun gözle görülmediği durumlarda sacda meydana gelen kalınlaşma dikkate alınmış ve genlik değeri hesaplanmıştır. Deneyler sonucu üretilen kaplar Resim 5.28 ve 5.29'da görülmektedir.



Resim 5.28. Standart (Geleneksel) kalıp seti ile yapılan kırışma analizi deney sonuçları

Çizelge 5.15. Standart kalıp ile yapılan deneylerin kırışma analizi sonuçları

Deney No	Sac kalınlığı (mm)	İlkel parça çapı (mm)	Baskı plakası kuvveti (kN)	Kırışıklık sayısı	Kırışıklık veya kalınlaşma yüksekliği (mm)
1	0,5	33	0	6	1,41
2	0,5	35	1,5	20	0,19
3	0,5	37	3	18	0,18
4	0,8	33	1,5	0	0,075
5	0,8	35	3	0	0,12
6	0,8	37	0	6	1,885
7	1,0	33	3	0	0,085
8	1,0	35	0	4	1,04
9	1,0	37	1,5	0	0,14

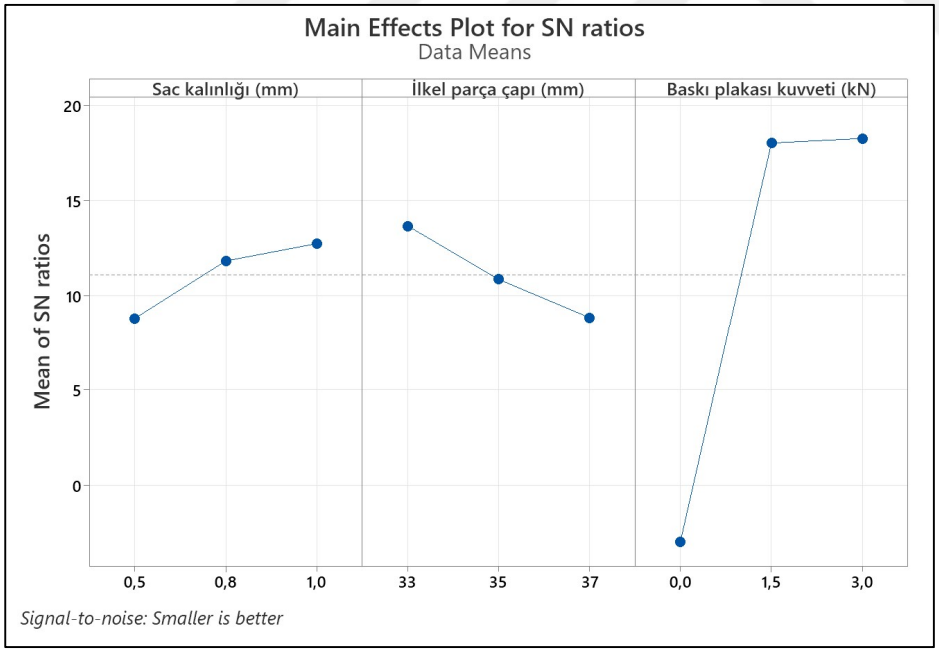


Resim 5.29. Kavisli kalıp seti ile yapılan kırışma analizi deney sonuçları

Çizelge 5.16. Kavisli kalıp ile yapılan deneylerin kırışma analizi sonuçları

Deney no	Sac kalınlığı (mm)	İlkel parça çapı (mm)	Baskı plakası kuvveti (kN)	Kırışıklık sayısı	Kırışıklık veya kalınlaşma yüksekliği (mm)
1	0,5	33	0	6	0,675
2	0,5	35	1,5	14	0,17
3	0,5	37	3	15	0,125
4	0,8	33	1,5	0	0,04
5	0,8	35	3	0	0,065
6	0,8	37	0	0	0,115
7	1,0	33	3	0	0,03
8	1,0	35	0	0	0,15
9	1,0	37	1,5	0	0,08

Standart kalıplar ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen genlik değerleri kullanılarak Minitab yazılımı ile Taguchi analizleri yapılmıştır. Analizler öncesinde, kırışıklık yüksekliğinin az olması istendiğinden "daha küçük daha iyi" (smalller is better) seçeneği işaretlenmiştir. Taguchi analizi sonuçları Şekil 5.30'da verilmiştir.

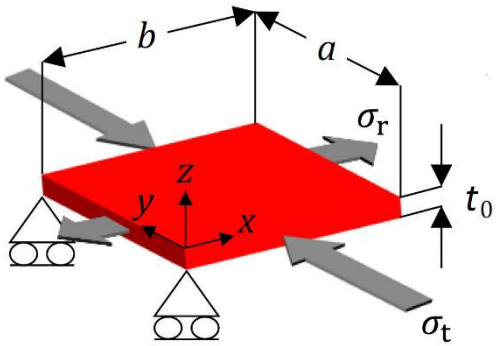


Şekil 5.30. Standart kalıp seti ile elde edilen kırışıklar üzerine yapılan Taguchi analizi

Şekil 5.30. ve Çizelge 5.15 incelendiğinde sac kalınlığının ve baskı plakası kuvvetinin artmasıyla kırışıklık yüksekliğinin azaldığı görülmektedir. İlkel parça çapının veya bir başka ifadeyle çekme oranının artmasıyla kırışıklık oluşma riskinin arttığı ve kırışıklık genliğinin büyüdüğü tespit edilmiştir. Bulunan sonuçların literatür ile uyumlu olduğu

görülmüştür. Literatüre göre çekme oranının dolayısıyla ilkel parça çapının artmasıyla kırışıklık oluşma riski artmakta, oluşan kırışıklık sayısı ise azalmaktadır [98]. Baskı plakası kuvvetinin artması kırışıklık oluşma ihtimalini azaltmaktadır, fakat baskı plakası kuvveti kırışıklık oluşumunu engelleyecek kadar büyük değilse artan baskı kuvveti ile oluşan kırışıklık sayısı artmakta ve kırışıklık yüksekliği azalmaktadır [98, 99]. Sac kalınlığının artmasıyla ise sacın kırışıklık oluşumuna karşı direnci artmaktadır [100].

Literatürde [100] çekme ve basma gerilmeleri altındaki dikdörtgen bir plakanın (Şekil 5.31) bükülerek kırışması için gerekli olan kritik basma gerilmesinin ($\sigma_{t,cr}$) hesaplanması için Eş. 5.9 önerilmektedir. Eşitlikte "m" oluşan kırışıklık sayısını, "ν" poisson oranını ve E_0 ise plastik bükülme modülünü sembolize etmektedir. Plastik bükülme modülü Eş. 5.10 ile hesaplanır. Bu eşitlikte E, elastisite modülünü ve P_e ise tek eksenli çekme testi ile elde edilen gerçek gerilme-gerçek gerinim grafiğindeki eğim değeridir. Dolayısıyla P_e ve E_0 değerleri gerinime bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 5.31. Dikdörtgen kesitli plakanın çekme ve basma gerilmeleri altında bükülmesi [100]

$$\sigma_{t,cr} = \frac{\pi^2 E_0 \, t_0{}^2 \left(\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2\right)^2}{12(1-\nu^2)\left(\left(\frac{m}{a}\right)^2 - \left(\frac{\sigma r}{\sigma_t}\right)\left(\frac{1}{b}\right)^2\right)} \tag{5.9}$$

$$E_0 = \frac{4EP_e}{\left(\sqrt{E}+\sqrt{P_e}\right)^2} \tag{5.10}$$

Eş. 5.9 ve 5.10 dikkate alındığında sac malzemenin kalınlığının, elastisite modülünün ve pekleşme üssünün artmasıyla malzemenin kırışıklık oluşumuna karşı direnci artmaktadır.

Artan baskı plakası kuvveti ile kırışıklık oluşumunun gerçekleştiği kritik basma gerilmesi ($\sigma_{t,cr}$) değerinin artacağı ve bu nedenle baskı plakası kuvveti kırışıklık oluşumunu engelleyemez ise daha fazla sayıda kırışıklık oluşacağı görülmektedir.

Kavisli kalıp kullanımıyla standart kalıp ile çekilen saclarda oluşan kırışmalara nazaran kırışıklık oluşumunun azaldığı görülmüştür. Kavisli kalıp derin çekme işlemi sırasında sacın alan atalet momentini artırmakta ve böylelikle kırışıklık oluşumuna karşı sacın direncini yükseltmektedir. Literatürde alan atalet momentinin artmasının derin çekme işlemi sırasında kırışıklık oluşumunu engelleyebileceği belirtilmiştir [100].

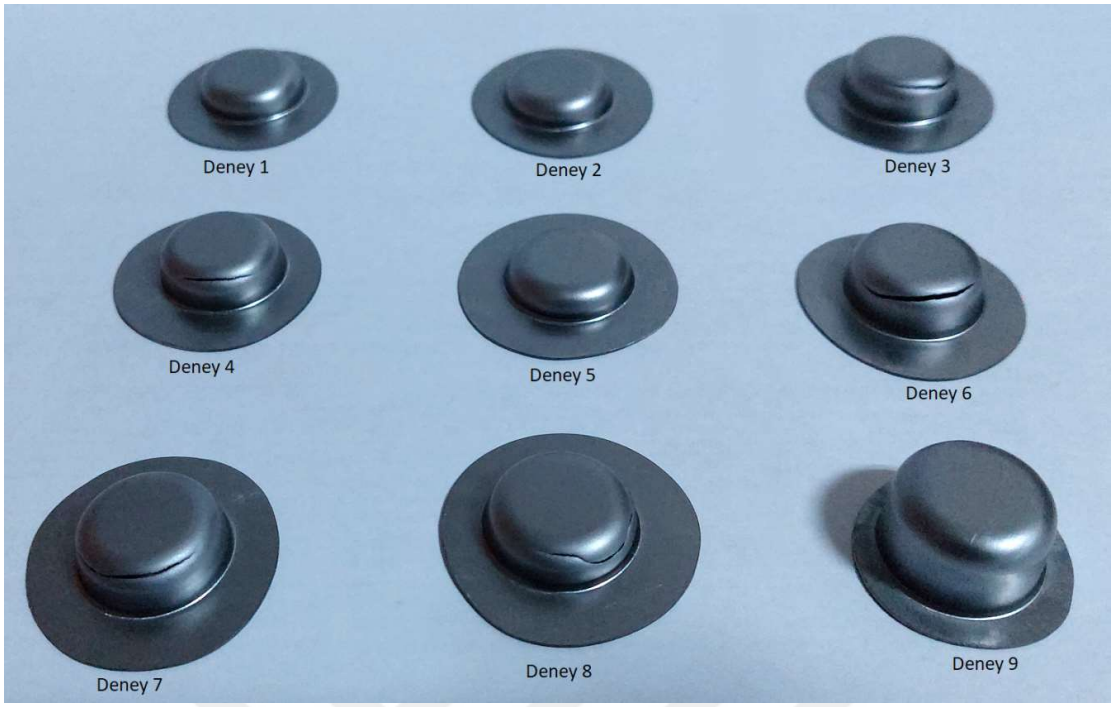
5.4. Değişken Baskı Plakası Kuvveti ile Yapılan Çekme Deneyleri Sonuçları

İlkel parça çapı 39 mm olan 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac numuneler ile yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 5.17'de verilmiştir. Sadece 9 numaralı deney başarılı olmuştur, 6 numaralı deneyde sac 3. adımda diğer deneylerin tamamında ise 2. adımda yırtılmıştır (Resim 5.30).

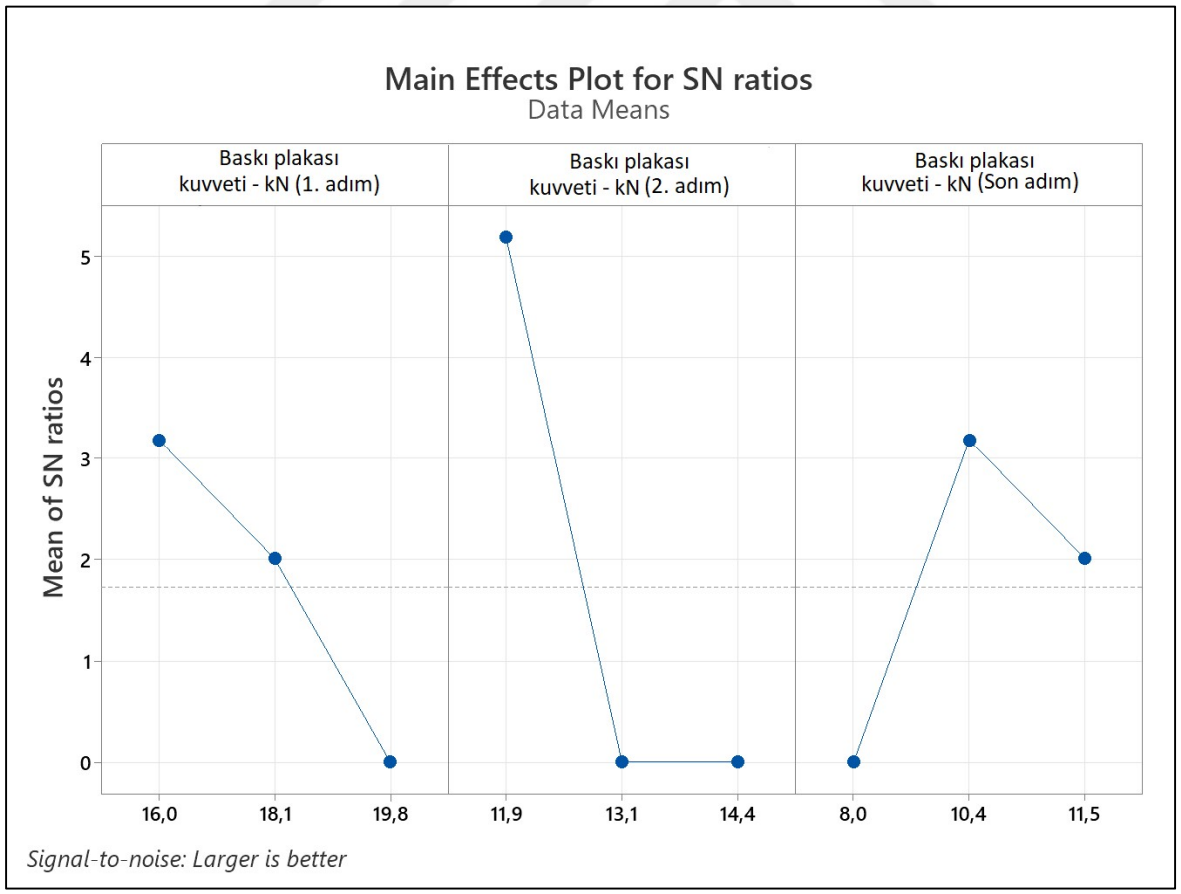
Taguchi analizlerini yapabilmek için sonuçların sayısal olarak ifade edilmesi gereklidir. Bu nedenle çekme işlemi sırasında başarı ile tamamlanan her bir adım için 1 puan verilmiş ve sonrasında Taguchi analizi yapılmıştır (Şekil 5.32).

Çizelge 5.17. Değişken baskı plakası kuvveti ile gerçekleştirilen çekme deneyleri sonuçları

Deney no	1. adım	2. adım	Son adım	Sonuçlar	Puan
	Baskı plakası kuvveti (kN)	Baskı plakası kuvveti (kN)	Baskı plakası kuvveti (kN)		
1	19,8	14,4	11,5	2. adımda yırtılma	1
2	19,8	13,1	10,4	2. adımda yırtılma	1
3	19,8	11,9	8	2. adımda yırtılma	1
4	18,1	14,4	10,4	2. adımda yırtılma	1
5	18,1	13,1	8	2. adımda yırtılma	1
6	18,1	11,9	11,5	3. adımda yırtılma	2
7	16	14,4	8	2. adımda yırtılma	1
8	16	13,1	11,5	2. adımda yırtılma	1
9	16	11,9	10,4	Başarılı	3



Resim 5.30. Değişken baskı plakası kuvveti ile yapılan çekme deneyleri sonuçları



Şekil 5.32. Değişken baskı plakası kuvvetinin çekme deneyleri üzerine etkisinin Taguchi analizi ile incelenmesi

Şekil 5.32'de görüldüğü üzere en iyi sonuç için Taguchi analizi 9 numaralı deneyde kullanılan parametre seviyelerini önermektedir. İkici öneri ise çekme işlemi sırasında 1. adımda 18,1 kN, 2. adımda 11,9 ve son adımda 10,4 kN baskı plakası kuvveti uygulamaktır.

İlkel parça çapı 42 mm olan sac numuneler ile 9 numaralı deneyde kullanılan baskı plakası kuvvetleri uygulanarak gerçekleştirilen deneylerde sacın 1. adımda yırtıldığı görülmüştür. Sonrasında aynı deney 41 mm çaplı sac numuneler ile tekrarlandığında sac numuneler bu kez 2. adımda yırtılmıştır. Taguchi analizinin önerdiği ikinci seçenek (18,1 kN;11,9 kN ve 10,4 kN baskı plakası kuvvetleri ile) uygulandığında yine 42 mm çapındaki sac numuneler 1. adımda yırtılmıştır. İlkel parça çapı 41 mm seçildiğinde ise çekme işlemi başarılı olmuştur.



Resim 5.31. 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac ile üretilen silindirik kaplar (Sol sabit baskı plakası kuvveti; sağ değişken baskı plakası kuvveti)

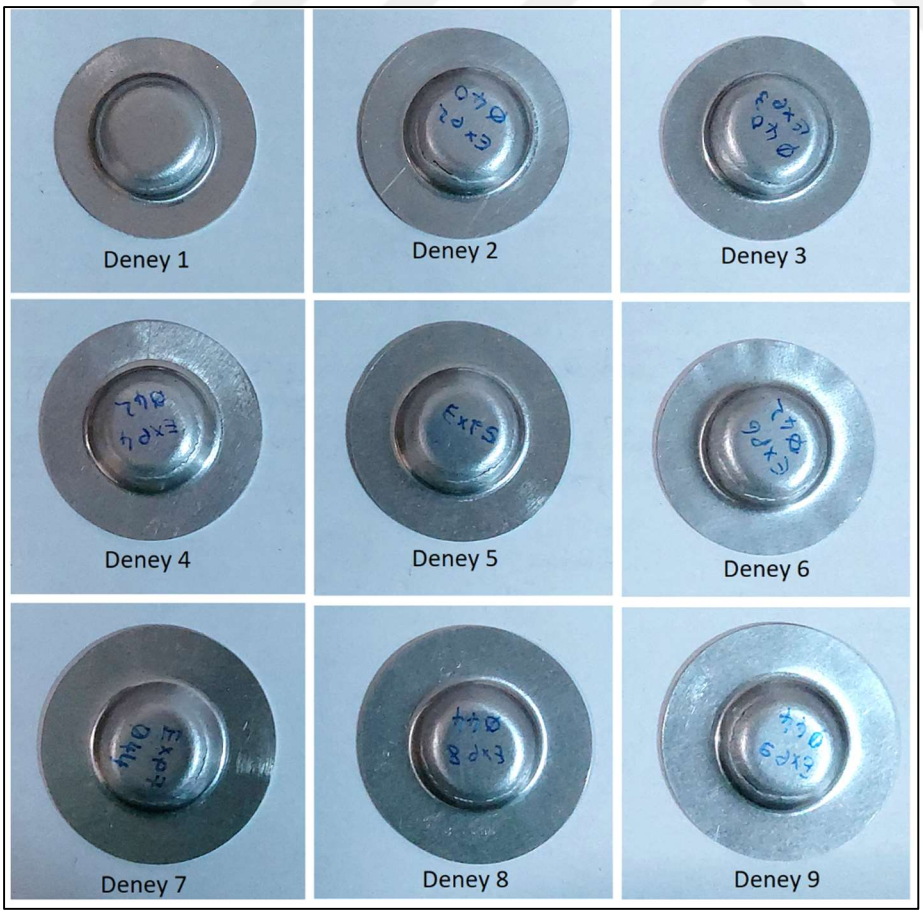
Sonuç olarak 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın sabit baskı plakası kuvveti ile 1,85 değerinde elde edilen limit çekme oranı değişken baskı plakası kuvvetleri sayesinde 2,05'e yükselmiştir (Resim 5.31). Çekme işleminin başlangıcında büyük baskı plakası kuvveti uygulamak sacda kırışıklık oluşumunu engellemiştir, sonrasında kademeli olarak baskı plakası kuvvetini düşürmek sacın yırtılma ihtimalini azaltmıştır ve bu sayede limit çekme oranında artış sağlanmıştır. Ayrıca her adımın sonunda zımba ve baskı plakasının sac ile teması kesilmiştir (attach-detach işlemi). Bu işlemin sürtünme kuvvetini [101,102] ve sacın geri yaylanmasına izin vererek gerilme yığılmasını azalttığı [102] ve bu sayede sacın incelmesini geciktirdiği ve de çekme derinliğini arttırdığı belirtilmiştir.

5.5. Yağlayıcı Türünün Çekme Deneyleri Sonuçlarına Etkisi

Farklı yağlayıcılar ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen çekme derinlikleri Çizelge 5.18'de verilmiştir. Tüm deneylerde sac numunelerde yırtılma meydana gelmiştir (Resim 5.32).

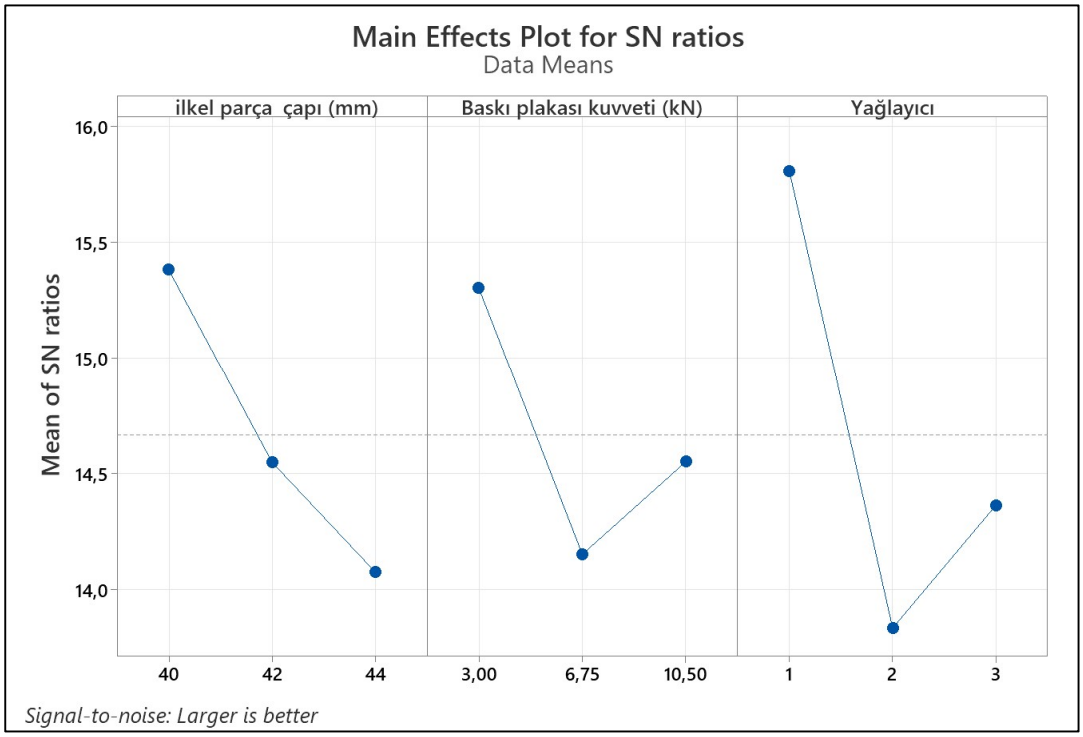
Çizelge 5.18. Farklı yağlayıcı türleri ile gerçekleştirilen çekme deneyleri sonuçları

Deney no	İlkel parça çapı (mm)	Baskı plakası kuvveti (kN)	Yağlayıcı türü	Çekme derinliği (mm)
1	40	10,5	Polietilen film (1)	6,6828
2	40	6,75	Motor yağı (2)	4,9427
3	40	3	Hindistan cevizi yağı(3)	6,1377
4	42	10,5	Motor yağı (2)	4,8127
5	42	6,75	Hindistan cevizi yağı (3)	4,9126
6	42	3	Polietilen film (1)	6,4328
7	44	10,5	Hindistan cevizi yağı (3)	4,7327
8	44	6,75	Polietilen film (1)	5,4627
9	44	3	Motor yağı (2)	4,9977



Resim 5.32. Farklı yağlayıcılar ile yapılan çekme deneyleri sonuçları

Çekme derinliği sonuçları Minitab programına girilerek Taguchi analizi “daha büyük daha iyi” (larger is better) seçeneği işaretlenerek yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen sinyal-gürültü oranları Şekil 5.33’te verilmiştir. Taguchi analizleri sonrasında %95 güven aralığında varyans analizi gerçekleştirilerek parametrelerin çekme derinliğine etkisi istatiksel olarak tespit edilmiştir (Çizelge 5.19).



Şekil 5.33. Yağlayıcı türünün çekme derinliğine etkisinin Taguchi analizi ile incelenmesi

Çizelge 5.19. Deney parametrelerinin çekme derinliğine etkisininin ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F-değeri	P-değeri	Katkı
İlkel parça çapı (mm)	2	2,6166	1,30828	24,7	0,039	23,76%
Baskı plakası kuvveti (kN)	2	2,0459	1,02294	19,31	0,049	18,58%
Yağlayıcı	2	6,2443	3,12214	58,95	0,017	56,70%
Hata	2	0,1059	0,05297			0,96%
Toplam	8	11,0127				100,00%

Şekil 5.33 dikkate alındığında sac numunelerin ilkel parça çapı arttıkça çekme derinliğinin azaldığı görülmektedir. Çekme işleminde limit çekme oranından daha büyük çekme oranı kullanıldığında artan çekme oranıyla bir başka ifade sabit zımba çapı için artan ilkel parça çapı ile çekme derinliğinin azaldığı literatürde belirtilmiştir [103]. Sac numune çapının büyümesiyle zımba kuvveti artmaktadır [104] ve bu nedenle sac daha hızlı incelmekte ve

yırtılma anında daha düşük çekme derinliğine ulaşabilmektedir.

Taguchi analizi sonucunda, incelenen üç yağlayıcı arasından çekme işlemi için en uygun yağlayıcının polietilen film olduğu görülmektedir. Ayrıca Hindistan cevizi yağının motor yağına göre sürtünmeyi daha çok azalttığı tespit edilmiştir. Bu sonucun yağların farklı viskozitelere sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde viskozite değerinin artmasıyla sürtünme katsayısının azaldığı belirtilmiştir [105]. Natürel Hindistan cevizi yağının kinematik viskozitesi 40 ºC sıcaklıkta 105,2 mm^2/s [106] değerinde iken aynı sıcaklıkta Castrol Edge 5W-30 LL motor yağının kinematik viskozitesi 66 mm^2/s değerindedir. Çizelge 5.19 dikkate alındığında belirlenen parametreler arasında çekme derinliğine en çok etki eden parametrenin yağlayıcı türü (%56,7) ve sonrasında ise ilkel parça çapı (%23,76) olduğu görülmektedir.

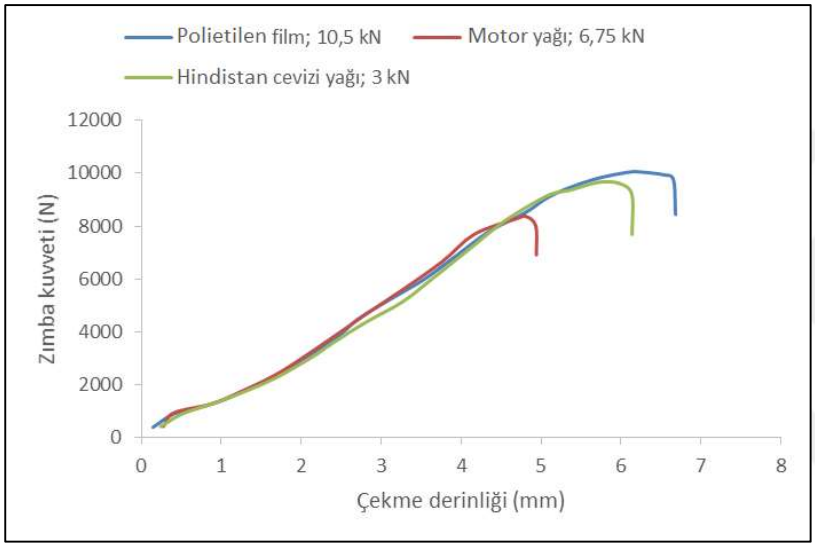
Artan baskı plakası kuvveti ile sürtünme kuvvetinin artması ve çekme derinliğini azaltması beklenir fakat Şekil 5.33 incelendiğinde Taguchi analizine göre 10,5 kN baskı plakası kuvvetinin 6,75 kN baskı kuvvetine nazaran çekme derinliğini daha az azalttığı görülmektedir. Bunun nedeni artan baskı plakası kuvveti ile sürtünme katsayısının azalması olabilir. Literatürde artan baskı plakası kuvveti veya sac numune üzerine uygulanan temas basıncı ile sürtünme katsayısının azaldığını öne süren çalışmalar [107, 108] mevcuttur.

Taguchi analizi sonucu belirlenen en uygun parametreler ile (numune çapı 40 mm, baskı plakası kuvveti 3 kN ve polietilen film) deneyler yapılmıştır ve sac malzemenin bu parametrelerde yırtılmadan çekilebileceği görülmüştür (Resim 5.33).

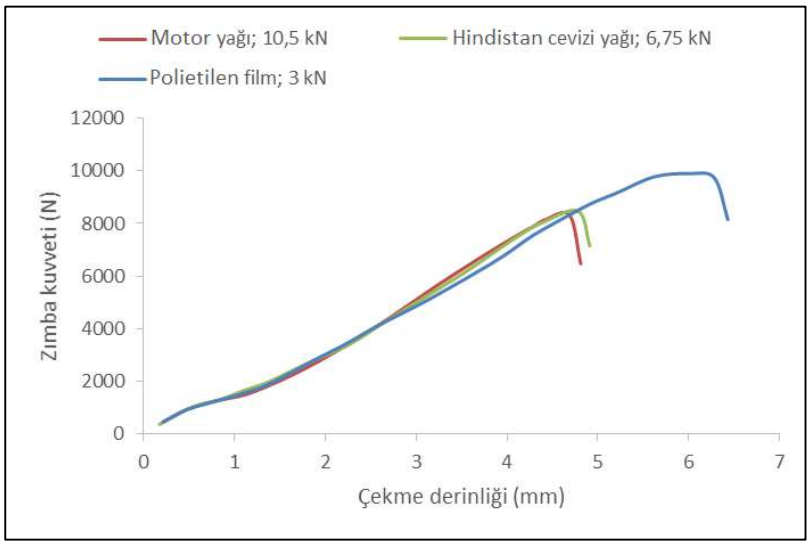


Resim 5.33. Al3105 sac numunenin 3 kN baskı plakası kuvveti altında polietilen film yağlayıcı ile çekme işlemi sonucu (Çekme oranı: 2,0)

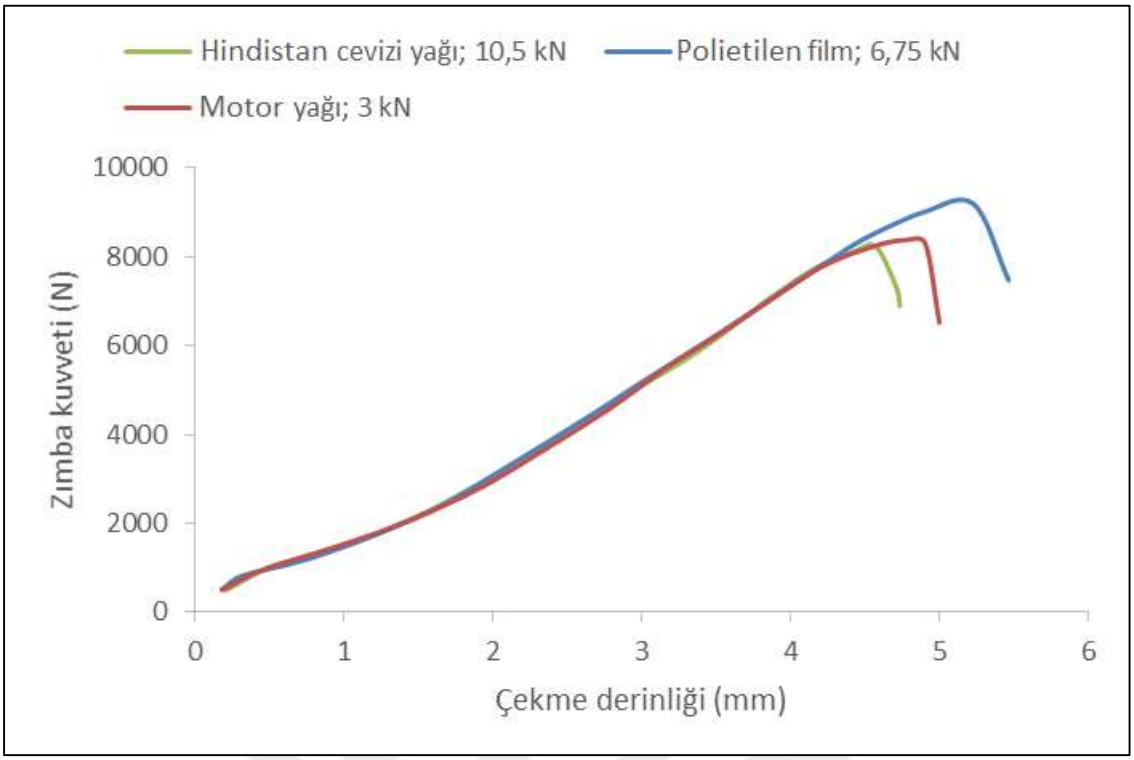
Şekil 5.34, Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da çekme deneyleri sonucunda elde edilen çekme derinliği-zımba kuvveti eğrileri verilmiştir. Zımba kuvvetinin başlangıçta çekme derinliği ile lineer olarak arttığı sonrasında kalıp ile baskı plakası arasında bulunan flaş bölgesinin alanının azalması nedeniyle kuvvetteki artışın azaldığı ve en son sacda çatlak oluşumu nedeniyle zımba kuvvetinin ani olarak düştüğü görülmektedir. İlkel parça çapının aynı olduğu deneyler dikkate alındığında uygulanan baskı plakası kuvveti fark etmeksizin en büyük çekme derinliğine her zaman polietilen film yağlayıcı ile ulaşılmıştır.



Şekil 5.34. Farklı yağlayıcı ve baskı plakası kuvveti ile çekme derinliği-zımba kuvveti eğrilerinin değişimi (İlkel parça çapı:40 mm)



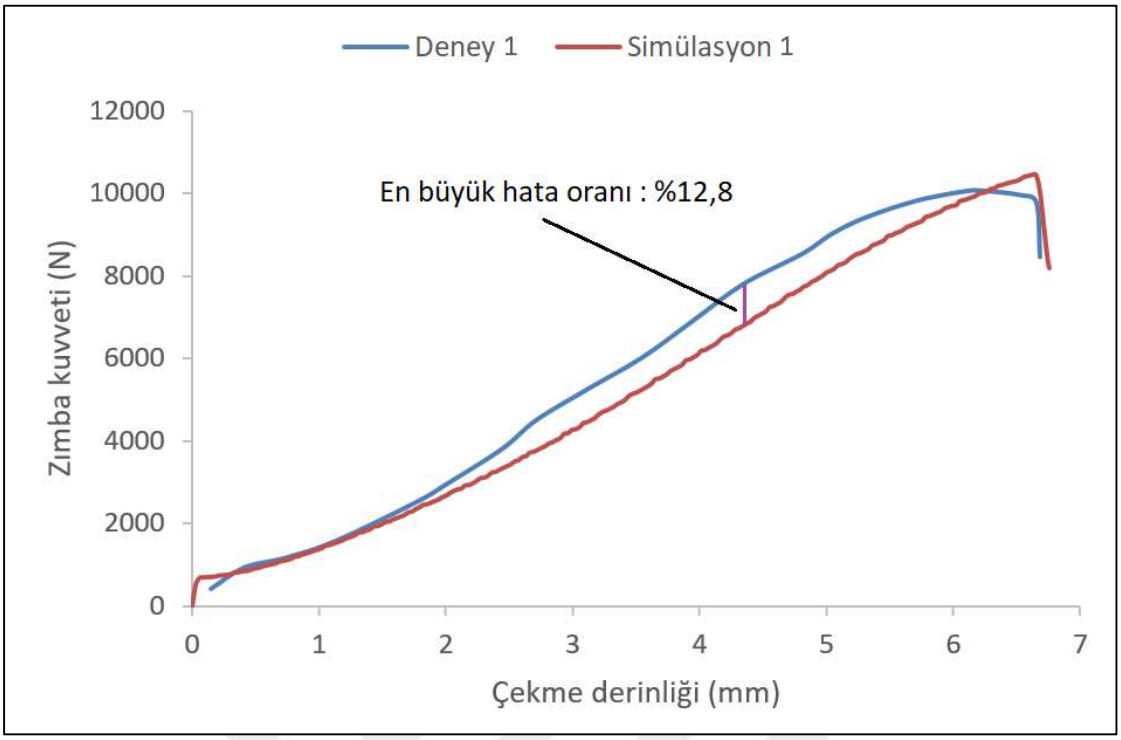
Şekil 5.35. Farklı yağlayıcı ve baskı plakası kuvveti ile çekme derinliği-zımba kuvveti eğrilerinin değişimi (İlkel parça çapı:42 mm)



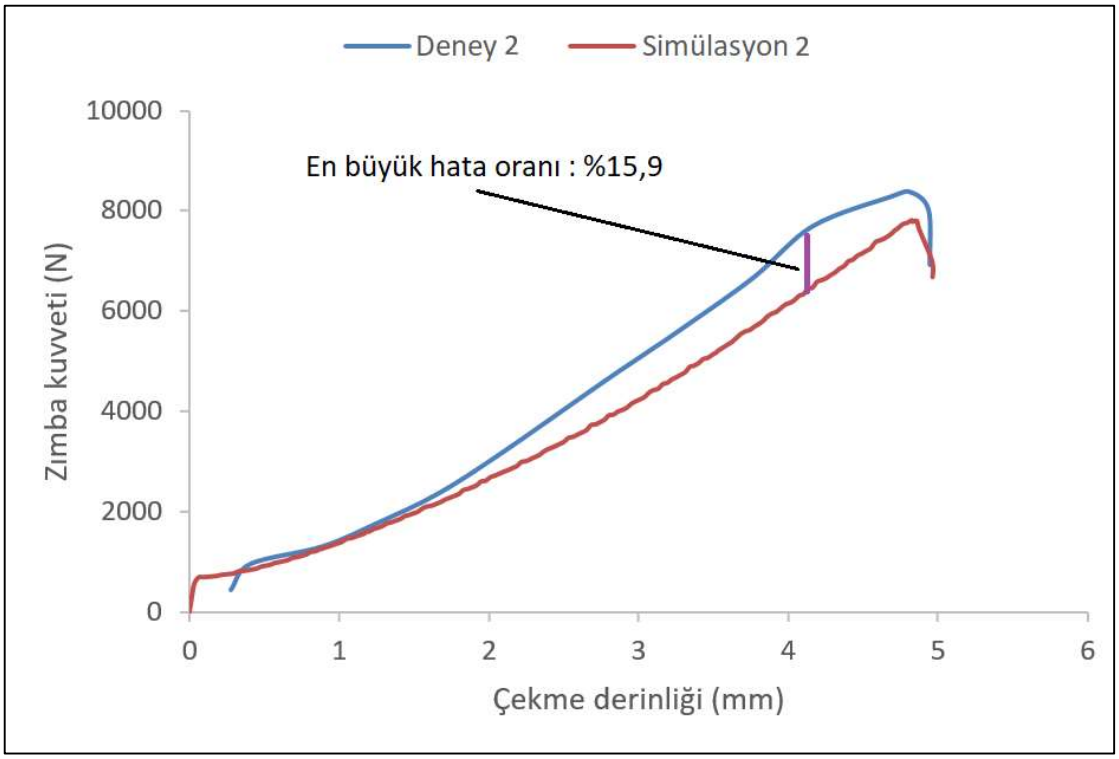
Şekil 5.36. Farklı yağlayıcı ve baskı plakası kuvveti ile çekme derinliği-zımba kuvveti eğrilerinin değişimi (İlkel parça çapı:44 mm)

Kalıp ile sac ara yüzeyine uygulanan yağlayıcı türünün sürtünme katsayısına etkisini belirlemek için simülasyonlar yapılmıştır. Literatüre uygun olarak [78] ve Erichsen simülasyonlarında iyi sonuçlar vermesi nedeniyle kuru yüzey temasları (zımba-sac ve baskı plakası-sac) için sürtünme katsayısı 0,3 değerinde seçilmiştir.

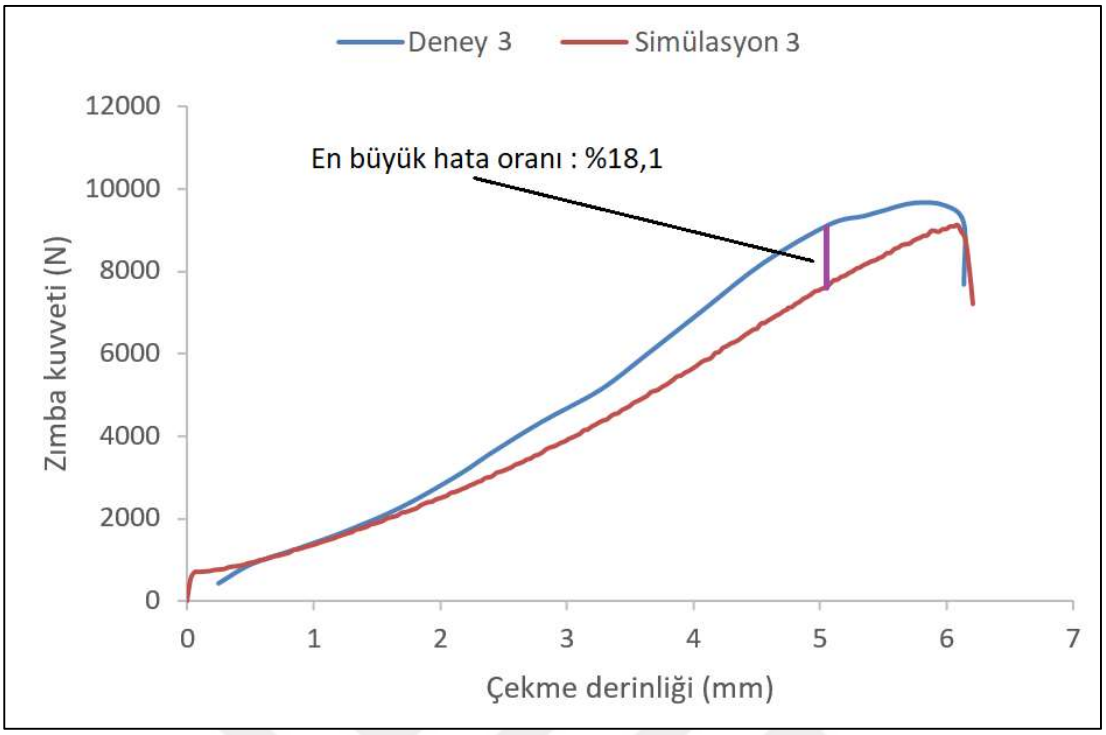
Kalıp ile sac arasındaki sürtünme katsayısını belirlemek için ise deneme yanılma yöntemi kullanılmıştır. Girilen sürtünme katsayısı sonucunda elde edilen çekme derinliği deneysel olarak ulaşılan çekme derinliğinden küçük ise sürtünme katsayısı azaltılmış; büyük ise arttırılmıştır. Simülasyonlar ve deneyler sonucunda elde edilen çekme derinliği-zımba kuvveti eğrileri Şekil 5.37, Şekil 5.38 ve Şekil 5.39'da sunulmuştur.



Şekil 5.37. Polietilen film ile elde edilen çekme derinliği-zımba kuvveti eğrileri (İlkel parça çapı:40 mm)



Şekil 5.38. Motor yağı ile elde edilen çekme derinliği-zımba kuvveti eğrileri (İlkel parça çapı:40 mm)



Şekil 5.39. Hindistan cevizi yağı ile elde edilen çekme derinliği-zımba kuvveti eğrileri (İlkel parça çapı:40 mm)

Simülasyonlar sonucunda polietilen film, motor yağı ve Hindistan cevizi yağı ile elde edilen sürtünme katsayıları sırasıyla 0,1; 0,2 ve 0,17 değerlerinde tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçları deneysel veriler ile uyuşmaktadır. Deneysel veriler ile yapılan Taguchi analizi sonucunda en iyi yağlayıcı polietilen, sonrasında Hindistan cevizi yağı ve en son motor yağı olarak tespit edilmiştir, bulunan sürtünme katsayıları Taguchi analizi sonuçlarını desteklemektedir.

Son yıllarda petrol bazlı yağlayıcıların çevreyi kirletmesi nedeniyle bu yağlara alternatif olarak bitkisel yağların endüstriyel alanlarda kullanılabilirliği üzerine ilgi giderek artmaktadır. Bitkisel yağların çevreyi daha az kirletmesi ve doğada daha hızlı çözülmesi gibi avantajları olmasına karşın düşük ısıl kararlılığa sahip olmaları, donma noktası sıcaklıklarının yüksek olması gibi dezavantajları da vardır [109]. Bitkisel yağlayıcılar her ne kadar çevreyi daha az kirletse de endüstriyel alanda yağlayıcı olarak faydalanmak için büyük miktarlarda bitkisel yağ üretimi; gıda üretiminde yararlanılan tarım arazilerinin ve su kaynaklarının yetersiz kalmasına neden olabilir [110] .

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sac metal malzemeler otomotiv, beyaz eşya ve ambalaj endüstrisi gibi birçok alandaki ürünlerin mekanik yapılarında yer almaktadır. Sac malzemelerin şekillenebilirlik özelliklerinin bilinmesi ürün tasarımı ve üretim verimliliği acısından son derece önemlidir. Derin çekme işlemi seri imalata uygun ve hızlı bir üretim metodu olması nedeniyle sac metal ürünlerin imalatında sıklıkla tercih edilir. Derin çekme işleminde malzeme özelliklerinin yanı sıra kalıp tasarımının ve işlem parametrelerinin ürün kalitesine ve verimliliğine etkisi oldukça fazladır. Uygun parametre değerleri ve kalıp tasarımı ile çekme işlemi sırasında ortaya çıkabilecek yırtılma ve kırışma gibi kusurlar giderilebilir ve limit çekme oranı artırılabilir. Bu sayede işlem daha verimli hale getirilebilir ve ekonomik fayda sağlanabilir. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmanın amacı Erichsen şişirme deneyleri ile sacların gererek şekillenebilme davranışlarını daha iyi anlamak ve derin çekme deneyleriyle kalıp tasarımının, baskı plakası kuvvetinin, yağlayıcı türünün ve sac kalınlığının limit çekme oranına, kırışıklı oluşumuna ve ürünün sac kalınlığı dağılımına etkisini araştırmaktır.

DC04 çelik saclar düşük karbon oranları nedeniyle yüksek sünekliğe sahip ve derin çekme işlemi için son derece uygun malzemelerdendir. Özellikle otomotiv endüstrisi olmak üzere pek çok alanda bu sac malzemeler endüstriyel ürünlerde tercih edilmektedir. Alüminyum saclar ise özellikle düşük yoğunluğu sayesinde parça ağırlığını azaltmak isteyen imalatçılar tarafından sıklıkla faydalanılmaktadır. Bu sebeplerden dolayı çalışmada DC04 çelik ve Al3105 alüminyum sac malzemelerin şekillenebilirliği incelenmiştir.

Deneylerde, 1 mm kalınlığındaki Al3105 alüminyum ve 0,5 mm, 0,8 mm ve 1 mm kalınlığındaki DC04 çelik saclar kullanılmıştır. Sacların iki eksenli gerilme altındaki (çekme-çekme) deformasyon davranışlarını araştırmak için Erichsen şişirme deneyleri yapılmıştır. Zımba hızı, zımba çapı ve sac kalınlığı parametrelerinin Erichsen sabitine ve zımba kuvvetine olan etkileri deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılmıştır.

Erichsen testleri sonrasında sacların derin çekilebilirlikleri standart (geleneksel) kalıp seti ve içbükey kavisli kalıp ve dışbükey kavisli yüzeye sahip baskı plakasından oluşan çekme seti ile yapılan deneyler yardımıyla incelenmiştir. Sonrasında, standart kalıp seti ve özgün olarak tasarlanan kavisli kalıp setinin çekme işlemi esnasında kırışıklık oluşumunu nasıl

etkilediğini analiz etmek için ilkel parça çapı, sac kalınlığı ve baskı plakası kuvveti parametrelerinin her biri için üç seviye belirlenerek Taguchi L9 ortogonal dizisi ile deney tasarımları yapılmıştır.

Önceki derin çekme deneylerinde işlem süresince sabit tutulan baskı plakası kuvveti yerine, değişken baskı plakası kuvvetinin limit çekme oranına etkisini incelemek için 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sac numuneler ile deneyler yapılmıştır. Deneylerde çekme işlemi üç adıma bölünmüş ve baskı plakası kuvveti ilk adımda en büyük seviyesinde iken bir sonraki adımlarda kademeli olarak azaltılmıştır. Ayrıca, her adımın sonunda sacın zımba ve kalıp ile teması kesilmiş (attach-detach yöntemi) ve sacın geri yaylanması sağlanmıştır.

Son olarak yağlayıcı türünün, baskı plakası kuvvetinin ve de ilkel parça çapının çekme derinliğine etkisini araştırmak için Al3105 alüminyum sac numuneler ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Polietilen film, motor yağı ve Hindistan cevizi yağı olmak üzere 3 yağlayıcı, 3 farklı baskı plakası kuvveti ve ilkel parça çapı değerleri ile Taguchi L9 dizisi kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Deneyler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Tek eksenli çekme testleri sonucunda DC04 çelik sacın Al3105 alüminyum alaşımı sacdan daha sünek olduğu görülmüştür. DC04 çelik malzeme için hadde yönünde toplam uzama yaklaşık %40 iken Al3105 alüminyum malzeme için toplam uzamanın yalnızca % 7,56 değerinde olduğu görülmüştür.

Erichsen deneyleri ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Zımba kuvveti, zımba çapı ve sac kalınlığının artmasıyla lineer olarak yükselmektedir. Zımba hızının artması zımba kuvvetini çok az yükseltmiştir. Erichsen sabitinin zımba çapı ile doğrusal olarak arttığı ve ayrıca ES değerinin kalıp deliği yarıçapı ile zımba yarıçapı oranının (R_D/R_P) büyümesiyle de yükseldiği gözlemlenmiştir. Efektif gerinimin yalnızca temas açısı ve R_D/R_P oranından etkilendiği ve gerinim değerlerinin artan R_D/R_P oranıyla birlikte arttığı tespit edilmiştir.

Erichsen sabiti ve limit gerinim değerlerinin artan sac kalınlığıyla birlikte büyüdüğü gözlemlenmiştir. Ek olarak, zımba çapının azalmasıyla sac kalınlığının ES ve limit gerinimi değerleri üzerindeki etkisinin daha önemli hale geldiği tespit edilmiştir. Örneğin, DC04 çelik sac numuneler ile yapılan deneylerde, zımba çapı 8 mm olduğunda ve sac kalınlığı 0,5 mm'den 1 mm'ye çıkarıldığında, Erichsen sabiti %32,8 artmıştır. Ancak, zımba çapı 20 mm olduğunda, sac kalınlığının 0,5 mm'den 1 mm'ye çıkarılması ES değerinde sadece %12,5'lik bir artışa neden olmuştur.

Al3105 alüminyum sac ile yapılan deneyler sonucunda baskı plakası kuvveti değişiminin Erichsen sabitine anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Zımba hızının artmasıyla ise ES değerinin çok az miktarda olsa da arttığı (20 mm çaplı zımba kullanıldığında zımba hızının 0,1 mm/s den 1 mm/s'ye çıkartılmasıyla ES değerinin yaklaşık % 6,8 yükseldiği) gözlemlenmiştir.

Simülasyonlardan sonucunda bulunan zımba ilerlemesi-zımba kuvvetti eğrilerinin ve çatlak konumlarının deneylerden elde edilenler ile örtüştüğü ve MAPE'nin %4,97'i aşmadığı görülmüştür.

Derin çekme deneyleri sonucunda ulaşılan bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

Standart kalıplar ile yapılan çekme deneyleri sonucunda 1,0 mm kalınlığındaki Al3105 alüminyum için limit çekme oranı 1,9 değerinde; 0,5 mm, 0,8 mm ve 1,0 mm kalınlıklardaki DC04 çelik saclar için ise limit çekme oranı sırasıyla 1,85; 2,0 ve 2,1 değerlerinde bulunmuştur. Erichsen sonuçlarına benzer olarak artan sac kalınlığıyla limit çekme oranının yükseldiği görülmektedir.

Kavisli kalıplar ile yapılan derin çekme deneyleri sonucunda 1,0 mm kalınlığındaki Al3105 alüminyum ve DC04 çelik sacların limit çekme oranlarının standart kalıplar ile elde edilenler ile aynı değerde olduğu görülmüştür. 0,5 mm kalınlığındaki DC04 sac için ise limit çekme oranı 1,85'ten 1,9 değerine yükselmiştir. Kavisli kalıplar en çok 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın limit çekme oranında artış sağlamış ve limit çekme oranı 2,0'dan 2,3'e yükselmiştir. Kavisli kalıp ile 0,8 mm çelik saclardan üretilen silindirik kaplarda kulaklanma oluşmamış ve ıskartayı artıracak bir sonuç ile karşılaşılmamıştır.

Endüstriyel açıdan değerlendirildiğinde kavisli kalıp seti sayesinde nihai ürüne ulaşmak için gerekli olan çekme operasyonu sayısı azaltılarak üretim hızı arttırılabilir.

Kırışma analizi için yapılan deneyler sonucunda, baskı plakası kuvvetinin büyümesiyle kırışıklık oluşumunun engellenebildiği fakat baskı plakası kuvveti kırışıklık oluşumunu engelleyecek kadar büyük değilse artan baskı kuvveti ile oluşan kırışıklık sayısının arttığı ve kırışıklık yüksekliğinin azaldığı görülmüştür. Kırışıklık oluşma riskinin artan sac kalınlığı ve azalan ilkel parça çapı ile düştüğü tespit edilmiştir. Kavisli kalıp kullanımı ile kırışıklık oluşumunun azaldığı gözlemlenmiştir. Kavisli kalıp derin çekme işlemi sırasında sacın alan atalet momentini artırmakta ve böylelikle kırışıklık oluşumuna karşı sacın direncini yükseltmektedir.

Değişken baskı plakası kuvveti kullanımı ile limit çekme oranının artırılabileceği görülmüştür. 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik sacın sabit baskı plakası kuvveti ile 1,85 değerinde elde edilen limit çekme oranı değişken baskı plakası kuvvetleri sayesinde 2,05 değerine ulaşmıştır. Çekme işleminin başlangıcında büyük baskı plakası kuvveti uygulamak kırışıklık oluşumunu engellemiştir, sonrasında kademeli olarak baskı plakası kuvvetini düşürmek sacın yırtılma ihtimalini azaltmıştır ve böylece limit çekme oranında artış sağlanmıştır.

Yağlayıcı, baskı plakası kuvveti ve ilkel parça çapının çekme derinliğine etkisinin incelemek için yapılan deneyler sonucunda, ilkel parça çapının artmasıyla çekme derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Sac numune çapının artmasıyla zımba yükü artar ve bu nedenle sac daha hızlı incelir ve yırtılma anında ulaşılan çekme derinliği değeri daha az olur. Taguchi analizi sonucunda, incelenen üç yağlayıcı arasından çekme işlemi için en uygun yağlayıcının polietilen film olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Hindistan cevizi yağının motor yağına göre sürtünmeyi daha çok azalttığı görülmüştür. Belirlenen parametreler arasında çekme derinliğine en çok etki eden parametrenin yağlayıcı türü (%56,7), sonrasında ise ilkel parça çapı (%23,76) olduğu tespit edilmiştir. Simülasyonlar yardımıyla polietilen film, motor yağı ve Hindistan cevizi yağı için sürtünme katsayıları sırasıyla 0,1; 0,2 ve 0,17 değerlerinde bulunmuştur.

Baskı plakası kuvveti, zımba hızı, yağlayıcı türü ve kalıp geometrisi gibi parametreler göz önüne alınmadığında, sac malzemelerin şekillenebilirliği büyük oranda malzemenin

sünekliğine bağlıdır. DC04 çelik sac malzemenin Al3105 sac malzemeden daha sünek olması sebebiyle Erichsen sabiti değerinde yaklaşık %59'a kadar artış görülmüştür. Bir diğer önemli parametre ise sac kalınlığıdır. DC04 çelik sacın kalınlığı 0,5 mm değerinden 1,0 mm'ye yükseltildiğinde Erihsen sabitinde meydana gelen en büyük artış yaklaşık %32 olmuştur. Ayrıca sac kalınlığının artması DC04 çelik sacın limit çekme oranının 1,85'ten 2,1 değerine kadar yükselmesini sağlamıştır.

Kavisli kalıp ve baskı plakası, kırışıklık oluşumunun engellenmesine yardımcı olmasına karşın sacın kritik bölgesinde meydana gelen incelme miktarını artırmaktadır. Kavis yarıçapının azalmasıyla sacın kırışık oluşumuna karşı direnci artarken pekleşme etkisi ile kritik bölgedeki (zımba radyüsü ile kap duvarının birleştiği bölge) incelme miktarı artmaktadır. Bu nedenle kavisli tasarımın başarısı sac malzemenin kalınlığı, sünekliği ve pekleşme kabiliyeti ile doğrudan ilişkilidir. 0,8 mm kalınlığındaki DC04 sac malzemenin kırışma direnci diğer saclara kıyasla arada bir değerde olduğu için kavisli kalıp tasarımı başarılı olmuştur. 0,5 mm kalınlığındaki DC04 çelik için tasarlanan kalıp seti ile kırışma direnci daha yüksek sac malzemenin daha başarılı sonuçlar verebileceği düşünülmektedir ve gelecek çalışmalar için farklı malzemeler ile kavisli kalıpların limit çekme oranına etkisinin araştırılabileceği öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Oh, K. S., Oh, K. H., Jang, J. H., Kim, D. J., and Han, K. S. (2011). Design and analysis of New Test Method for evaluation of Sheet Metal formability. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(4), 695-707.

2. Kahraman, F., Külekci, M. K., and Küçük, M. (2019). Experimental investigation of stretchability and Bendability Characterization of AISI 1020 Steel. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 135-140.

3. Kocańda, A., and Jasiński, C. (2016). Extended evaluation of Erichsen cupping test results by means of laser speckle. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(2), 211-216.

4. Anket, O., Koruvatan, T., ve Ay, İ. (2011). Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinde Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Kullanımı. *Politeknik Dergisi*, 14(1), 39-47.

5. Yıldız, B. (2017). *Derin Çekme İşleminde Kalıp Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

6. Ballıkaya, H. (2017). *Matris Açılı Derin Çekme Kalıplama Yönteminin Hidro-mekanik Derin Çekme Yöntemine Uygulanması*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

7. İnternet: Deep drawing.URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_drawing, Son Erişim Tarihi: 06.03.2022.

8. Singh, C. P., and Agnihotri, G. (2015). Study of deep drawing process parameters: a review. *International Journal of Scientific and Research Publications*, *5*(2), 1-15.

9. Engler, O. (2012). Control of texture and earing in aluminium alloy AA 3105 sheet for packaging applications. *Materials Science and Engineering: A*, 538, 69-80.

10. Houshyar, M., Nourouzi, S., and Jamshidi Aval, H. (2021). Friction stir processing of AA3105/SiC composites constructed through the sandwich method: the effects of FSP variables. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(2), 429-438.

11. Engler, O. (2023). Microchemistry evolution during industrial DC casting and subsequent homogenization of aluminum alloy AlMn0. 5Mg0. 5 (AA 3105). *Materials Today Communications*, 36, 106724.

12. Mulay, A., Ben, B. S., Ismail, S., Kocanda, A., and Jasiński, C. (2018). Performance evaluation of high-speed incremental sheet forming technology for AA5754 H22 aluminum and DC04 steel sheets. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18, 1275-1287.

13. Trzepieciński, T., Szewczyk, M., and Szwajka, K. (2022). The use of non-edible green oils to lubricate DC04 steel sheets in sheet metal forming process. *Lubricants*, 10(9), 210.

14. Zhang, M., Li, L., Fu, R. Y., Krizan, D., and De Cooman, B. C. (2006). Continuous cooling transformation diagrams and properties of micro-alloyed TRIP steels. *Materials Science and Engineering: A*, 438, 296-299.

15. Huan, P. C., Wang, X. N., Yang, L., Zheng, Z., Hu, Z. R., Zhang, M., and Chen, C. J. (2019). Effect of martensite content on failure behavior of laser welded dual-phase steel joints during deformation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28, 1801-1809.

16. Wang, X. N., Sun, Q., Zheng, Z., and Di, H. S. (2017). Microstructure and fracture behavior of laser welded joints of DP steels with different heat inputs. *Materials Science and Engineering: A*, 699, 18-25.

17. Bandyopadhyay, K., Lee, M. G., Panda, S. K., Saha, P., and J. Lee J. (2017). Formability assessment and failure prediction of laser welded dual phase steel blanks using anisotropic plastic properties. *International Journal of Mechanical Sciences*, 126, 203-221.

18. Li, J., Nayak, S. S., Biro, E., Panda, S. K., Goodwin, F., and Zhou, Y. (2013). Effects of weld line position and geometry on the formability of laser welded high strength low alloy and dual-phase steel blanks. *Materials & Design*, 52, 757-766.

19. Xia, M. S., Kuntz, M. L., Tian, Z. L., and Zhou, Y. (2008). Failure study on laser welds of dual phase steel in formability testing. *Science and Technology of Welding and Joining*, 13(4), 378-387.

20. Bandyopadhyay, K., Panda, S. K., Saha, P., Baltazar-Hernandez, V. H., and Zhou, Y. N. (2016). Microstructures and failure analyses of DP980 laser welded blanks in formability context. *Materials Science and Engineering: A*, 652, 250-263.

21. Karaağaç, I., Kaçal, A., Aydın, K., and Kabakçı, M. O. (2022, 14-16 Mayıs). *Modeling springback in dual-phase steel material with fuzzy logic*. 9. Uluslararası Mühendislik Mimarlık Ve Tasarım Kongresinde sunuldu, İstanbul, 1173-1177.

22. Karaağaç, I., Kaçal, A., Aydın, K., and Kabakçı, M. O. (2022, 14-16 Mayıs). *Effect of temperature on springback in Docol 1400 sheet material.* 9. Uluslararası Mühendislik Mimarlık Ve Tasarım Kongresinde sunuldu*,* İstanbul, 1178-1182.

23. Küçüktürk, G., Tahta, M., Gürün, H., and Karaağaç, I. (2022). Evaluation of the effects of local heating on springback behaviour for AHSS Docol 1400 sheet metal. *Transactions of FAMENA,* 46(3), 51-62.

24. Aydın, K., Karaağaç, İ., and Uluer, O. (2019). The formability and springback characterization of laser-welded DP–HSLA sheets. *Applied Physics A,* 125(8), 525.

25. Tajally, M., and Emadoddin, E. (2011). Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets. *Materials & Design*, 32(3), 1594-1599.

26. Sekhar, R. A. (2019). Determining the formability of AA5052 sheets in annealed and H32 condition. *Journal of Physics: Conference Series*, 1355, 012044.

27. Fan, W. X., Yu, B. A. I., Li, G. Y., Chang, X. Y., and Hai, H. A. O. (2022). Enhanced mechanical properties and formability of hot-rolled Mg–Zn–Mn alloy by Ca and Sm alloying. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(4), 1119-1132.

28. Chino, Y., Sassa, K., Kamiya, A., and Mabuchi, M. (2006). Enhanced formability at elevated temperature of a cross-rolled magnesium alloy sheet. *Materials Science and Engineering: A*, 441(1-2), 349-356.

29. Sekban, D. M., Akterer, S. M., Saray, O., Ma, Z. Y., and Purcek, G. (2018). Formability of friction stir processed low carbon steels used in shipbuilding. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(1), 237-244.

30. Yoda, R., Shibata, K., Morimitsu, T., Terada, D., and Tsuji, N. (2011). Formability of ultrafine-grained interstitial-free steel fabricated by accumulative roll-bonding and subsequent annealing. *Scripta Materialia*, 65(3), 175-178.

31. Zheng, B., Gao, X., Li, M., Deng, T., Huang, Z., Zhou, H., and Li, D. (2019). Formability and failure mechanisms of woven CF/PEEK composite sheet in solid-state thermoforming. *Polymers*, 11(6), 966.

32. Luo, X., Liu, H., Kang, L., Lin, J., Liu, Y., Zhang, Li, D., and Chen, D. (2021). Stretch formability of an AZ61 alloy plate prepared by multi-pass friction stir processing. *Materials*, 14(12), 3168.

33. Huang, K., Huang, S., Yi, Y., Dong, F., and He, H. (2022). Flow behavior and forming characteristics of 2A14 aluminum alloy at cryogenic temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 902, 163821.

34. Yuan, S., Cheng, W., Liu, W., and Xu, Y. (2020). A novel deep drawing process for aluminum alloy sheets at cryogenic temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*, 284, 116743.

35. Schneider, R., Grant, R. J., Schlosser, J. M., Rimkus, W., Radlmayr, K., Grabner, F., and Maier, C. (2020). An investigation of the deep drawing behavior of automotive aluminum alloys at very low temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51, 1123-1133.

36. Liu, W., Cheng, W., and Yuan, S. (2021). Analyses on formability and flow stress of an Al-Cu-Mn alloy sheet under biaxial stress at cryogenic temperatures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 195, 106266.

37. Dong, F., Huang, S., Yi, Y., Huang, K., Jia, Y., Yu, W., and Zhao, Z. (2023). Comparative study on the formability and microstructure evolution of different tempered Al-Cu-Li alloy sheets during room and cryogenic temperature forming process. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 3137-3150.

38. Yuan, S., Cheng, W., and Liu, W. (2021). Cryogenic formability of a solution-treated aluminum alloy sheet at low temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*, 298, 117295.

39. Kumar, M., Sotirov, N., Grabner, F., Schneider, R., and Mozdzen, G. (2017). Cryogenic forming behaviour of AW-6016-T4 sheet. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(6), 1257-1263.

40. Hamada, A. S., Kisko, A., Khosravifard, A., Hassan, M. A., Karjalainen, L. P., and Porter, D. (2018). Ductility and formability of three high-Mn TWIP steels in quasi-static and high-speed tensile and Erichsen tests. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 255-265.

41. Çakış, Y., Özdemir, A., Şeker, U., ve Çiftçi, İ. (2023). Al 1050 Sac Metal Malzemenin Çekilebilirliğinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 1001-1010.

42. Parida, A. K., Soren, S., Jha, R. N., and Sadhukhan, S. (2016). Formability of Al-killed AISI 1040 Medium Carbon Steel for Cylindrical Cup Formation. *ISIJ International*, 56(4), 610-618.

43. Kamikawa, N., and Morino, H. (2019). Quantitative Analysis of Load–Displacement Curves in Erichsen Cupping Test for Low Carbon Steel Sheet. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(11), 5023-5037.

44. Timurkutluk, B., Toros, S., Onbilgin, S., and Korkmaz, H. G. (2018). Determination of formability characteristics of Crofer 22 APU sheets as interconnector for solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14638-14647.

45. Reddy, M. R. N., Theja, M. S., and Tilak, M. G. (2013). Modified Erichsen Cupping Test for Copper, Brass, Aluminium and Stainless Steel. *The SIJ Transactions on Industrial, Financial & Business Management*, 01(02), 52-57.

46. Sener, B., and Kayali, E. S. (2013). Effectiveness of Stamping Lubricants in Erichsen Test. *Key Engineering Materials*, 549, 325-332.

47. Yoshimura, H., Torikai, S., Nishihara, T., Nonishi, T., and Inouchi, N. (2002). Application of wheat flour lubricants to the press-forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 125, 375-378.

48. Savaş, V., and Seçgin, Ö. (2010). An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die. *International journal of material forming*, 3, 209-213.

49. Wang, Y. G., Huang, G. S., Liu, D. K., Chen, L., Han, T. Z., Peng, J., and Pan, F. S. (2016). Influence of blank holder type on drawability of 5182-O aluminum sheet at room temperature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(5), 1251-1258.

50. Hassan, M. A., Suenaga, R., Takakura, N., and Yamaguchi, K. (2005). A novel process on friction aided deep drawing using tapered blank holder divided into four segments. *Journal of Materials Processing Technology*, 159(3), 418-425.

51. Peixinho, N., Costa, S., and Blanco, V. (2019). Development of forming tool concept validator with variable stiffness blank-holder for high strength steel applications. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(2), 116-122.

52. Phanitwong, W., and Thipprakmas, S. (2020). Multi draw radius die design for increases in limiting drawing ratio. *Metals*, 10(7), 870.

53. Mousavi, A., Kunze, T., Roch, T., Lasagni, A., and Brosius, A. (2017). Deep drawing process without lubrication–an adapted tool for a stable, economic and environmentally friendly process. *Procedia Engineering*, 207, 48-53.

54. Zhang, H., Qin, S., and Cao, L. (2021). Investigation of the effect of blank holder force distribution on deep drawing using developed blank holder divided into double rings. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(6), 284.

55. Zheng, K., Politis, D. J., Lin, J., and Dean, T. A. (2016). A study on the buckling behaviour of aluminium alloy sheet in deep drawing with macro-textured blankholder. *International Journal of Mechanical Sciences*, 110, 138-150.

56. Hassan, M., Hezam, L., El-Sebaie, M., and Purbolaksono, J. (2014). Deep drawing characteristics of square cups through conical dies. *Procedia Engineering*, 81, 873-880.

57. Dhaiban, A. A., Soliman, M. E. S., and El-Sebaie, M. G. (2014). Finite element modeling and experimental results of brass elliptic cups using a new deep drawing process through conical dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4), 828-838.

58. Xue, Y. H., Chen, K., Fan, C. J., and Luo, J. T. (2017). Deep drawing of cup shell by powder cavity flexible forming technology. *Journal of Central South University*, 24(4), 766-772.

59. Shen, G., Zhao, C., Shi, H., and Liu, Z. (2025). Investigation into the sheet metal forming process using solid granules medium with graphite powder addition. *Materials and Manufacturing Processes*, 40(3), 365-375.

60. Modanloo, V., Gorji, A., and Bakhshi-Jooybari, M. (2016). Effects of forming media on hydrodynamic deep drawing. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30, 2237-2242.

61. Wang, H., and Shen, X. (2021). A novel hydrodynamic deep drawing utilizing a combined floating and static die cavity. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 829-839.

62. Ballikaya, H., Savas, V., and Ozay, C. (2020). The limit drawing ratio in die angled hydromechanical deep drawing method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(1), 791-801.

63. Halkaci, H. S., Turkoz, M., and Dilmec, M. (2014). Enhancing formability in hydromechanical deep drawing process adding a shallow drawbead to the blank holder. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(8), 1638-1646.

64. Karaağaç, İ., and Özdemir, A. (2013). Kare Geometrinin Hidromekanik Derin Çekme Yöntemi İle Şekillendirilebilirliğinin Deneysel İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1), 33-41.

65. Hashemi, S. J., and Roohi, A. H. (2022). Minimizing spring-back and thinning in deep drawing process of St14 steel sheets. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 16(1), 381-388.

66. Gürün, H., and Karaağaç, I. (2015). The experimental investigation of effects of multiple parameters on the formability of the DC01 sheet metal. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 61, 651-662.

67. Çavuşoğlu, O., and Gürün, H. (2014). Deformasyon hızının DP600 ve DP780 sac malzemelerin mekanik özelliklerine ve derin çekme işlemine etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4), 777-784.

68. Kardan, M., Parvizi, A., and Askari, A. (2018). Experimental and finite element results for optimization of punch force and thickness distribution in deep drawing process. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43, 1165-1175.

69. Lazarescu, L., and Banabic, D. (2017). Evaluation of deep drawing force under different friction conditions. *Modern Technologies in Manufacturing* (MTEM 2017-AMATUC), MATEC Web of Conferences.

70. Şen, N., Kurgan, N., Karaağaç, İ., and Uluer, O. (2016). Ilık derin çekme prosesinde yağlayıcı etkisinin şekillendirilebilirlik açısından deneysel araştırılması. *Politeknik Dergisi,* 19(2), 185-193.

71. Marciniak, Z., Duncan, J. L., and Hu, J. (2002). *Mechanics of sheet metal forming* (İkinci Baskı). London: Butterworth-Heinemann, 1-42.

72. Altan, T., and Tekkaya, A. E. (Editörler.). (2012). *Sheet metal forming: fundamentals*. (İlk Baskı). Ohio: Asm International, 27-127.

73. Gürün, H. (2008). *Derin çekme kalıplarındaki parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

74. Erhuy, C. G., Yurci, M. E., and Altan, T. (2008). Determining the effective stress–effective strain curve of a high-strength low-alloy steel sheet from the viscous pressure bulge test. *Sigma*, 26(4), 281-300.

75. Wu, D., Chen, R. S., and Han, E. H. (2011). Excellent room-temperature ductility and formability of rolled Mg–Gd–Zn Alloy Sheets. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(6), 2856-2863.

76. Lee, W. B., and To, S. (1995). Computer modelling of the effect of rolling schedule on the plastic anisotropy of cold-rolled aluminium sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 48(1-4), 173-178.

77. Karaağaç, İ. (2011). *Sıvı basıncıyla sac metal şekillendirme (hydroforming) işlem parametrelerinin deneysel olarak araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

78. Narooei, K., and Karimi Taheri, A. (2009). A study on sheet formability by a stretch-forming process using assumed strain FEM. *Journal of Engineering Mathematics*, 65, 311-324.

79. Chakrabarty, J. (1970). A theory of stretch forming over hemispherical punch heads. *International Journal of Mechanical Sciences*, 12(4), 315-325.

80. Reis, L. C., Oliveira, M. C., Santos, A. D., and Fernandes, J. V. (2016). On the determination of the work hardening curve using the bulge test. *International Journal of Mechanical Sciences*, 105, 158-181.

81. Chandini, K., and Reddy, A. C. (2015). Parametric Importance of Warm Deep Drawing Process for 1070A Aluminium Alloy: Validation through FEA. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(4), 399-407.

82. Ramesh, G., and Reddy, G. C. M. (2013). Analysis of optimization of blank holding force in deep drawing by using LS DYNA. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(4), 1975-1995.

83. Regueras, J. M. G., and López, A. M. C. (2014). Investigations on the influence of blank thickness (t) and length/wide punch ratio (LD) in rectangular deep drawing of dual-phase steels. *Computational Materials Science*, 91, 134-145.

84. İnternet: Deep Drawing - The Complete Guide. URL: https://www.tsinfa.com/deep-drawing/, Son Erişim Tarihi: 26.11.2024.

85. İnternet: Deep Drawing 101. URL: https://macrodynepress.com/deep-drawing-101/, Son Erişim Tarihi: 26.11.2024.

86. Coër, J., Manach, P. Y., Laurent, H., Oliveira, M. C., and Menezes, L. F. (2013). Piobert–Lüders plateau and Portevin–Le Chatelier effect in an Al–Mg alloy in simple shear. *Mechanics Research Communications*, 48, 1-7.

87. Jasiński, C., Kocańda, A., Morawiński, Ł., and Świłło, S. (2019). A new approach to experimental testing of sheet metal formability for automotive industry. *Archives of Metallurgy and Materials*, 64(4), 1231-1238.

88. Pernia-Espinoza, A., Diegelmann, V., Escribano-Garcia, R., Fernandez-Ceniceros, J., and Martinez-de-Pison, F. J. (2019). A novel hybrid strip finishing process to improve mechanical properties and reduce energy consumption. *International Journal of Material Forming*, 12, 27-43.

89. Burdek, M. (2016). Physical modeling of the steel sheet topography in skin pass rolling and its influence on susceptibility of sheets to deep drawing. *Steel Research International*, 87(4), 456-464.

90. Smith, A. J., Maxwell, H. L., Mirmohammad, H., Kingstedt, O. T., and Berke, R. B. (2022). A Novel Variable Extensometer Method for Measuring Ductility Scaling Parameters From Single Specimens. *Journal of Applied Mechanics*, 89(3), 031006.

91. Fictorie, E., Van den Boogaard, A. H., and Atzema, E. H. (2010). Influence of punch radius in a Nakazima test for mild steel and aluminium. *International Journal of Material Forming*, 3, 1179-1182.

92. Tharrett, M. R., and Stoughton, T. B. (2003). Stretch-bend forming limits of 1008 AK steel. *SAE Technical Paper*, 2003-01-1157.

93. Fereshteh-Saniee, F., and Montazeran, M. H. (2003). A comparative estimation of the forming load in the deep drawing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 555-561.

94. Sönmez, Ç. (2005). *Investigation of the deep drawability of steel and aluminum sheets by finite element simulation.* Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

95. Bi, G., Guan, Y., Chen, X., Tan, W., Huang, W., Gao, Y., and Wang, M. (2020). Evaluation of uncertainty in determining average grain size by ASTM E112 standard. *In IOP conference series: Materials Science and Engineering,* 733, 012045.

96. Lim, H., Lee, M. G., Kim, J. H., Adams, B. L., and Wagoner, R. H. (2011). Simulation of polycrystal deformation with grain and grain boundary effects. *International Journal of Plasticity, 27(9),* 1328-1354.

97. Atrian, A., and Panahi, H. (2018). Experimental and finite element investigation on wrinkling behaviour in deep drawing process of Al3105/Polypropylene/Steel304 sandwich sheets. *Procedia Manufacturing*, 15, 984-991.

98. Kadkhodayan, M., and Moayyedian, F. (2011). Analytical elastic–plastic study on flange wrinkling in deep drawing process. *Scientia Iranica*, 18(2), 250-260.

99. Leng, Y., Sanjon, C. W., Tan, Q., Groche, P., Hauptmann, M., and Majschak, J. P. (2024). Study of Parameters Influencing Wrinkles in the Deep Drawing of Fiber-Based Materials Using Automatic Image Detection. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(6), 237.

100. Mousavi, A. (2020). *A novel approach towards a lubricant-free deep drawing process via macro-structured tools*. Doktora Tezi, Technische Universität Dresden, Dresden.

101. Tamai, Y., Yamasaki, Y., Yoshitake, A., and Imura, T. (2010). Improvement of formability in stamping of steel sheets by motion control of servo press. *Steel Research International*, 81(9), 686-689.

102. Majidi, O., Barlat, F., Lee, M. G., and Kim, D. J. (2015). Formability of AHSS under an attach–detach forming mode. *Steel Research International*, 86(2), 98-109.

103. Kaftanoğlu, B. (1974). A method for estimating the limiting drawing ratio in deep-drawing. *International Journal of Production Research*, 12(1), 89-98.

104. Brathikan, V. M., Sangeetha, N., Sangeethkumar, B., and Scidarth, K. (2022). Influence of various blank diameter in deep drawing. *Materials Today: Proceedings*, 68, 1995-1999.

105. Lee, B. H., Keum, Y. T., and Wagoner, R. H. (2002). Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 130, 60-63.

106. Deepak, S. N., and Ram, C. N. (2021). Physio-chemical study of traditional lubricant SAE 20 W40 and virgin coconut oil using TiO2 nano-additives. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1024-1029.

107. Trzepiecinski, T. (2019). A Study of the Coefficient of Friction in Steel Sheets Forming. *Metals,* 9, 988.

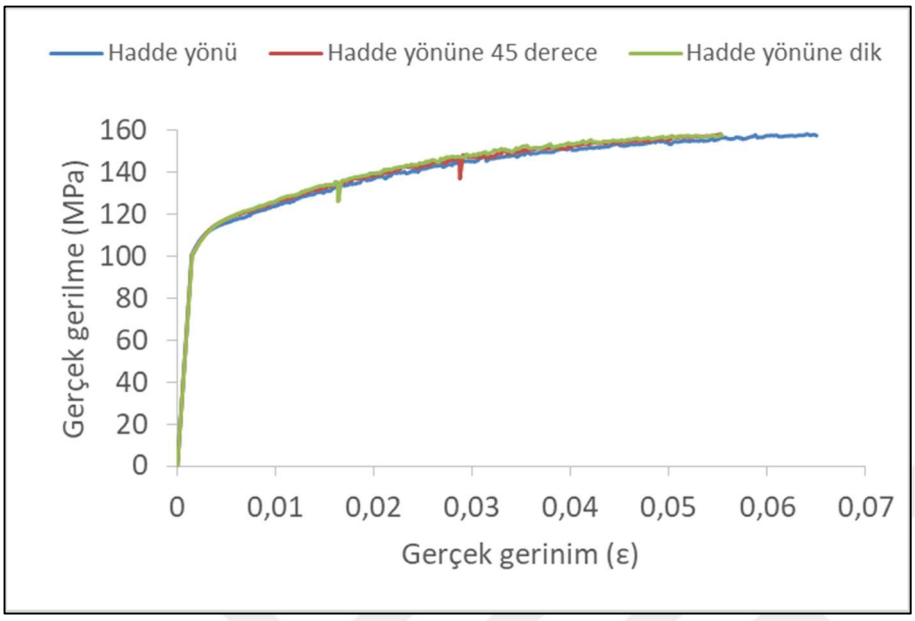
108. Shim, J. W., and Keum, Y. T. (2007). Effects of blank holding force on the friction behavior in sheet metal forming. *Transactions of Materials Processing*, 16(5), 381-385.

109. Shashidhara, Y. M., and Jayaram, S. R. (2010). Vegetable oils as a potential cutting fluid—an evolution. *Tribology International,* 43, 1073-1081.

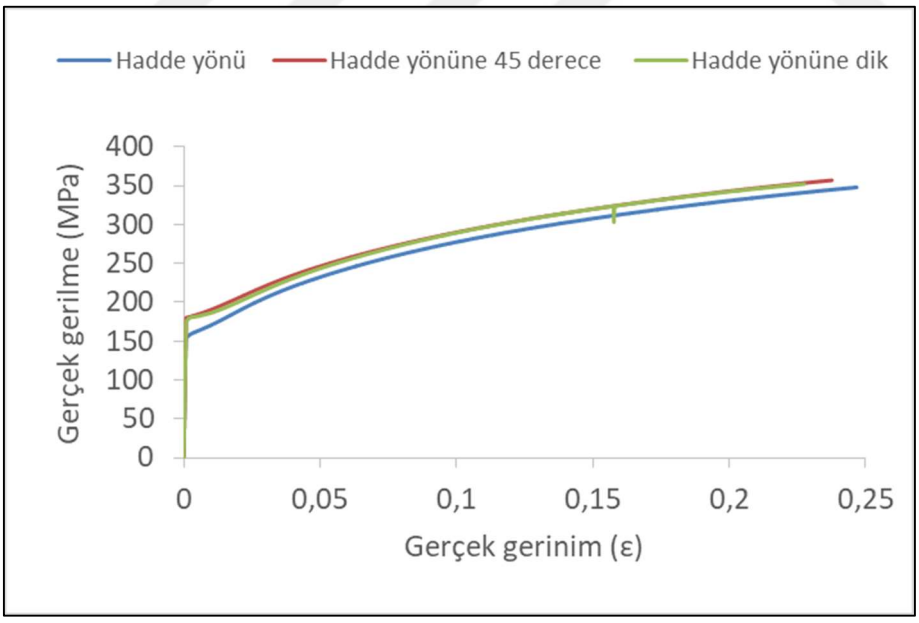
110. Luo, X., Wu, S., Wang, D., Yun, Y., An, Q., and Li, C. (2024). Sustainable development of cutting fluids: the comprehensive review of vegetable oil. *Journal of Cleaner Production,* 473, 143544.

EKLER

EK-1. Sac malzemelerin gerçek gerilme-gerçek gerinim grafikleri.

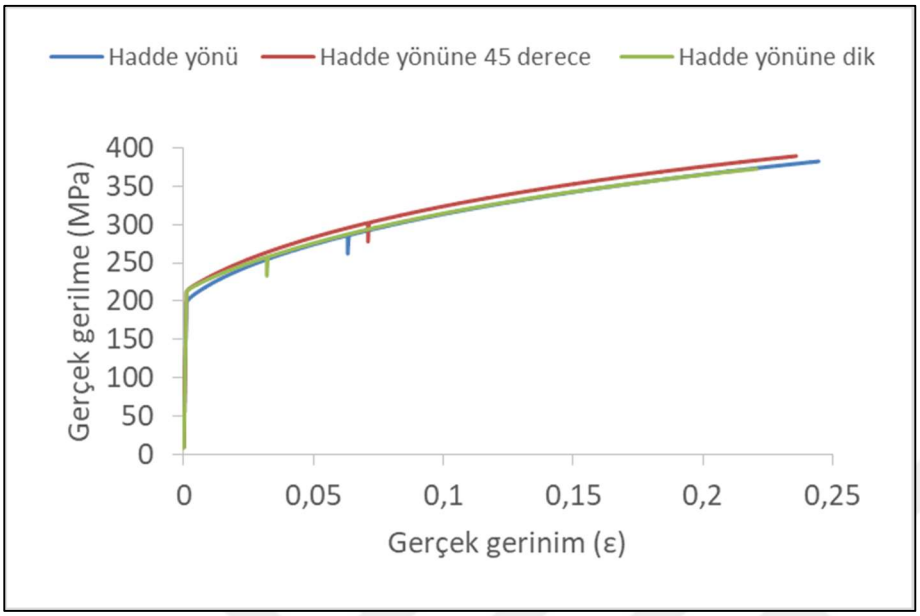


Şekil 1.1. Al3105 alüminyum sacın gerçek gerilme- gerçek gerinim eğrileri

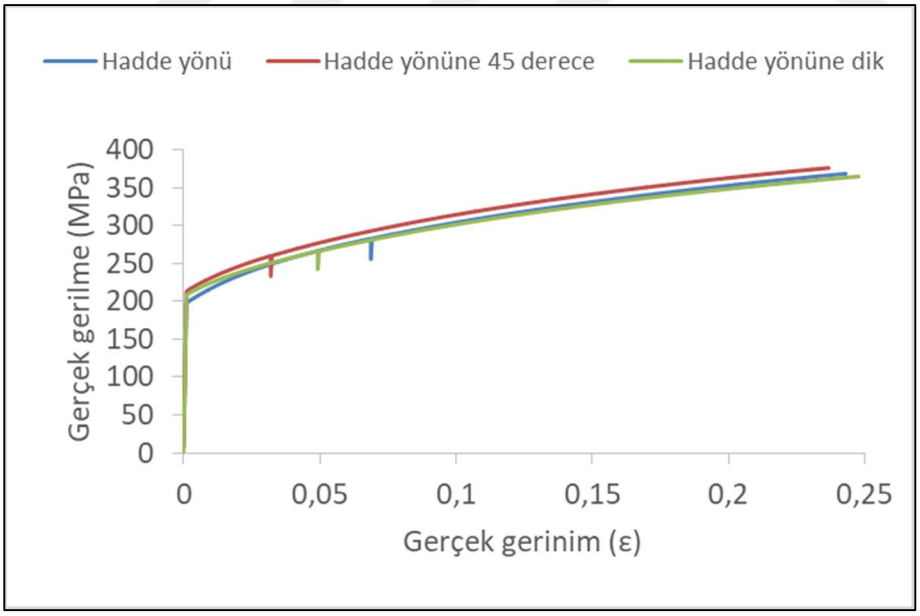


Şekil 1.2. DC04 çelik sacın gerçek gerilme- gerçek gerinim eğrileri (kalınlık 0,5 mm)

EK-1. (devam) Sac malzemelerin gerçek gerilme-gerçek gerinim grafikleri.



Şekil 1.3. DC04 çelik sacın gerçek gerilme- gerçek gerinim eğrileri (kalınlık 0,8 mm)



Şekil 1.4. DC04 çelik sacın gerçek gerilme- gerçek gerinim eğrileri (kalınlık 1,0 mm)



Gazili olmak ayrıcalıktır