

**METAL SACLARIN ŐEKILLENDİRİLMESİNİN
BİLGİSAYAR YARDIMIYLA ANALİZİ**

2012

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

Abdullah UĞUR

**METAL SACLARIN ŐEKILLENDİRİLMESİNİN BİLGİSAYAR
YARDIMIYLA ANALİZİ**

Abdullah UŐUR

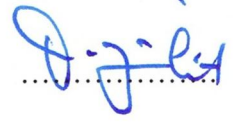
**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır.**

**KARABÜK
Ocak 2012**

Abdullah UĞUR tarafından hazırlanan "METAL SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN BİLGİSAYAR YARDIMIYLA ANALİZİ" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Osman YİĞİT

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/ 01/ 2012

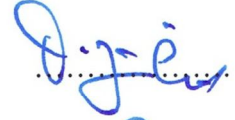
Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

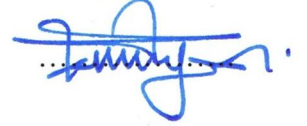
Başkan : Doç. Dr. Rahmi ÜNAL (DPÜ)



Üye : Prof. Dr. Osman YİĞİT (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Naci KURGAN (KBÜ)



...../...../2012

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Abdullah UĞUR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

METAL SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN BİLGİSAYAR YARDIMIYLA ANALİZİ

Abdullah UĞUR

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Osman YİĞİT

Ocak 2012, 51 Sayfa

Bu tez çalışmasında metal sacları şekillendirmek için kullanılan yöntemler araştırılmış, bu yöntemlerde teorik analizlerin gerekliliği irdelenmiştir. Derin çekme, hidro mekanik derin çekme, V-kalıpla bükme, kare kalıpla derin çekme işlemleri için simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlarda sonlu eleman tabanlı bir paket programının öğrenci versiyonu kullanılmıştır. Derin çekme işlemindeki simülasyonlar aksisimetrik üç boyutlu elemanlarla, kare kalıpla derin çekme işlemi ve V-kalıpla şekillendirme işlemlerindeki simülasyonlar ise üç boyutlu sürekli elemanlarla yürütülmüştür. Simülasyon sonuçlarının bir kısmı literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılırken, bir kısmı da yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır. Bazı iş parçası analizlerinde literatürdeki değerlere çok yakın sonuçlar alınırken bazı parçalarda elde edilen sonuçlar literatürdeki ve deneylerdeki sonuçlardan yüzde otuz iki civarında sapmaktadır. Bu sapmaların nedeninin, elemanlar arasındaki sürtünme davranışının tam olarak bilinmemesi, iş parçalarının yeteri kadar sonlu elemanlara

ayrılmamış olması ve zamanın kısıtlı olması nedeniyle araştırmada sadece iki farklı tip eleman kullanılmış olması olarak düşünölmektedir. Sonuç olarak, yapılan simölasyonların yırtılma olmadan iş parçasına istenen şeklin verilip verilemeyeceği hakkında güvenilir bir ön fikir verdiği söylenebilir.

Anahtar sözcükler : Sac Şekillendirme, Derin Çekme, Hidro Mekanik Şekillendirme, V-Kalıpta Bükme, Kare Kalıpta Derin Çekme, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

Bilim Kodu : 914.1.140

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

COMPUTER AIDED ANALYSIS OF SHEET METAL FORMING

Abdullah UĞUR

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor

Prof. Dr. Osman YİĞİT

January 2012, 51 Pages

In this thesis, methods used for sheet metal forming have been investigated, and the necessity of theoretical analysis has been discussed in these methods. Simulations have been executed for deep drawing, hydro mechanical deep drawing and V-die bending. During simulations, a student package program based on finite element method has been used. Simulations for deep drawing process have been done by axisymmetrical 3D elements, for V-die bending and deep drawing of square blank have been done by 3D continuum elements. While some parts of simulation has been compared to studies in the literature, other parts have been compared to experimental studies. While during analysis of some work pieces, very similar results have been obtained with respect to the literature studies; 32% of variation has been obtained for other part of work pieces. Insufficient data about friction behaviors among elements, not meshing work pieces into more finite elements and lack of time have been

thought to be the reason of these variations. Consequently, it may be said that executed simulations prefigure whether work piece can be shaped without rupture.

Keywords : Sheet Metal Forming, Deep Drawing, Hydro Mechanical Forming, V-Die Bending, Deep Drawing with Square Blank, Finite Element Method.

Science Code: 914.1.140

TEŞEKKÜR

Tez alıŐmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen danıŐmanım Prof. Dr. Osman YİŐİT'e, deneysel alıŐmalarımda bana sistemlerini kullanma fırsatını sağlayan Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Selçuk HALKACI'ya, deneyler sırasında bana yardımcı olan ArŐ. Gör. Mevlüt TÜRKÖZ ve ArŐ. Gör. Murat DİLMEÇ'e ve bu dönemde bana her konuda maddi ve manevi destek sağlayan aileme, çalışma arkadaşlarıma ve Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	4
SAC ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİ.....	4
2.1. KESME.....	4
2.2. BÜKME.....	4
2.3. DERİN ÇEKME.....	6
2.4. HİDRO MEKANİK SAC ŞEKİLLENDİRME.....	6
2.5. PATLAYICI İLE SAC ŞEKİLLENDİRME.....	7
2.6. ELEKTRO MANYETİK SAC ŞEKİLLENDİRME.....	7
2.7. FARKLI SAC ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİ ÜZERİNE BİR ÖRNEK.....	8
BÖLÜM 3.....	10
SAC ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNİN TEORİSİ VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	10
3.1. ÇEKME İŞLEMİNİN MEKANİĞİ.....	10

	<u>Sayfa</u>
3.2. GERİ YAYLANMANIN MEKANİĞİ.....	12
3.3. KOMPLEKS PARÇALARIN ANALİZİNDE PAKET PROGRAM KULLANMA GEREKLİLİĞİ.....	14
3.4. SONLU ELEMEN KAVRAMI.....	14
3.4.1. Eleman Aileleri.....	14
3.4.2. Serbestlik Dereceleri.....	15
3.4.3. Elemanın Düğüm Sayıları.....	15
3.4.4. Matematik Model.....	16
3.4.5. İntegrasyon.....	16
3.4.6. İmplicit ve Expilisit Yöntemler.....	16
BÖLÜM 4.....	18
BİLGİSAYARDA MODELLEME, DENEYSEL VERİLER VE DEĞERLENDİRME.....	18
4.1. SAC ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİNİN BİLGİSAYARLA MODELLENMESİ.....	18
4.1.1. Konvansiyonel Derin Çekme İşleminin Simülasyonu.....	18
4.1.2. V Kalıpla Şekillendirme İşleminin Simülasyonu.....	27
4.1.3. Kare Kalıpla Şekillendirme İşlemi Simülasyonu.....	29
4.1.4. Hidro Mekanik Derin Çekme İşleminin Simülasyonu.....	31
4.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
4.2.1. Yürütülen Deneyler.....	33
4.2.2. Hidro Mekanik Pres.....	34
4.2.3. Numunelerin Hazırlanması.....	35
4.2.4. Deney Ürünlerinin Ölçülmesi.....	36
4.3. DEĞERLENDİRMELER.....	36
4.3.1. Konvansiyonel Derin Çekme İşlemine Ait Sonuç ve Değerlendirmeler.....	36
4.3.2. V-Kalıpla Şekillendirme İşlemine Ait Sonuç ve Değerlendirmeler.....	39
4.3.3. Kare Kalıpla Derin Çekme İşlemine Ait Sonuç ve Değerlendirmeler.....	40
4.3.4. Hidro Mekanik Derin Çekme İşlemine Ait Sonuç ve Değerlendirmeler.....	41
BÖLÜM 5.....	43
SONUÇLAR.....	43

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR.....	45
EK AÇIKLAMALAR A. MALZEME GİRDİLERİ.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Kesme işlemine ait şematik çizim	4
Şekil 2.2. Bükme işlemi uygulanmış bir sac malzemenin şematik görünümü	5
Şekil 2.3. Bükme örnekleri	5
Şekil 2.4. Hidro mekanik sistemin şematiği	7
Şekil 2.5. Meşrubat kutusu üretimi işlem sırası	9
Şekil 3.1. İş parçasının şematik çizimi	10
Şekil 3.2. r yarıçapına sahip bir dilimde herhangi bir nokta üzerindeki gerilmelerin şematik gösterimi	11
Şekil 3.3. Bükmeye maruz kalan sacdaki gerilme dağılımı	12
Şekil 3.4. Sık kullanılan sonlu eleman aileleri	15
Şekil 4.1. Kalıp sistemi kesit görünüşü	18
Şekil 4.2. Derin çekme işleminde parçaların gerçek ve modellenmiş durumu	20
Şekil 4.3. Al5754 alaşımına ait gerçek çekme eğrisi	22
Şekil 4.4. Derin çekme işlemi montaj resmi	24
Şekil 4.5. İş parçası için kullanılan sonlu eleman ağ örgüsü	26
Şekil 4.6. V kalıpta çekme işlemine ait şematiği	27
Şekil 4.7. V kalıpla şekillendirme işleminde parçaların gerçek ve modellenmiş durum	27
Şekil 4.8. V kalıba ait montaj resmi	28
Şekil 4.9. Kare derin çekme işlemine ait şematik çizim	29
Şekil 4.10. Kare derin çekme işlemi için montaj resmi	30
Şekil 4.11. Stampa yoluna bağlı olarak basınç eğrisi	32
Şekil 4.12. Stampa yoluna bağlı olarak basınç değişim grafiği	32
Şekil 4.13. Hidrolik prese ait şematik çizim	34
Şekil 4.14. Dairesel sac kesme makinesi	35

Sayfa

Şekil 4.17. Yağlayıcıli konvansiyonel derin çekme işlemleri için ölçüm noktaları	38
Şekil 4.18. V kalıpta bükme işlemleri	40
Şekil 4.19. Kare kalıpla derin çekme işlemleri	41
Şekil 4.20. Hidro mekanik derin çekme sonucu kalınlık okunacak olan noktalar ...	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Konvansiyonel derin çekme işlemine ait parça özellikleri çizelgesi	20
Çizelge 4.2. Al 5754'ün karakteristik özellikleri	21
Çizelge 4.3. Al 5754'e ait gerçek gerilme plastik şekil değiştirme değerleri	23
Çizelge 4.4. Konvansiyonel derin çekme işlemine ait işlem sırası çizelgesi	24
Çizelge 4.5. Konvansiyonel derin çekme işlemine ait yüzey isimleri ve açıklamalar	25
Çizelge 4.6. Konvansiyonel derin çekme işlemine ait sınır şartları	26
Çizelge 4.7. AISI1006 için malzeme özellikleri	28
Çizelge 4.8. St14 için malzeme özellikleri	30
Çizelge 4.9. Deney planı çizelgesi	33
Çizelge 4.10. Kullanılan hidro mekanik prese ait teknik özellikler	35
Çizelge 4.11. Yağlayıcısız konvansiyonel derin çekme işlemi deneylerinde yırtılma olduğu andaki stampa konumları	37
Çizelge 4.12. Yağlayıcılı konvansiyonel derin çekme işleminde kalınlık değişimleri	38
Çizelge 4.13. Hidro mekanik derin çekme işleminde kalınlık değişimleri	42
Çizelge Ek A. 1. V kalıba ait malzeme girdisi	49
Çizelge Ek A. 2. Kare kalıba ait malzeme girdisi	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

σ_r : Radyal yöndeki gerilme

σ_θ : Açısal yöndeki gerilme

KISALTMALAR

SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi.

U : Radyal yön doğrultusu

v : Açısal yön doğrultusu

F : Kuvvet

μ : Sürtünme kuvveti

t : Et kalınlığı

M : Moment

w : Uzunluk

y : Akma gerilmesi

E : Elastiklik katsayısı

ϵ : Birim şekil değiştirme

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Sac şekillendirme işlemleri derin çekme, bükme, şişirme, hidro mekanik şekillendirme gibi gruplara ayrılabilir. Derin çekme, sac metal taslaklardan, bir kalıp ve stampa sistemi yardımıyla istenilen geometrik biçimde derin kaplar elde etmeye yarayan şekillendirme işlemidir. Bu işlem eskiden beri bilinen bir üretim yöntemi olmakla birlikte yaygın olarak kullanılması motorlu taşıtların icadıyla başlamıştır. Günümüzde otomotiv sektörünün yanında havacılık sanayi, beyaz eşya ve mutfak eşyası sektörlerinde de yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Motorlu taşıtların yaygınlaşması sonucu 1930 ve 1940'lı yıllarda metal sacların plastisite teorisi üzerine birçok araştırma yapılmıştır [1]. Sac malzemelerden elde edilebilecek farklı boyut ve karmaşıklıkta çok sayıda ürün mevcuttur ve bu ürünlerin büyük bir kısmı mekanik presler vasıtasıyla üretilmektedir. Mekanik gerdirme ve derin çekme gibi bir erkek ve dişi kalıp kullanan geleneksel sac şekillendirme yöntemleri hakkında çok sayıda çalışma mevcuttur. Sac şekillendirme işlemlerinde boyunlaşma, kopma (kırılma), buruşma ve aşırı miktarda geri yaylanma gibi kusurlar gözlenmektedir.

Dairesel iş parçalarının derin çekilme işleminde ortaya çıkan kopma konusundaki araştırmalara Woo'nun çalışması, marullaşma konusundaki araştırmalara Yu ve Johnson ve Senior'un çalışmaları, geri yaylanma konusunda da Pourboghrat ve Chu'nun iki boyutlu kanal çekme işleminde yük kalktıktan sonra iş parçasında oluşacak geri yaylanmayı teorik ve deneysel olarak incelediği çalışmalar örnek olarak verilebilir [2, 3, 4, 5].

Son yıllarda sac şekillendirme tekniği olarak sıklıkla kullanılmaya başlayan ve kalıp-stampa ikilisinden sadece birini kullanan bir teknikte hidro mekanik derin çekme işlemdir. Larsen'in, anizotropik bir malzemedен hidro mekanik yöntemle elde edilmiş bir elektrik motoru gövdesinde oluşan deformasyonları incelediği araştırması, Yossifon ve Tirosh'un hidrolik şekillendirmede çekilen iş parçasında kopma ve buruşma oluşmayacak şekilde uygun sıvı basıncı eğrilerini inceledikleri araştırmalar önemli çalışmalarındandır [6, 7, 8,].

Bir sac çekme işleminin başarısı malzeme özelliklerinin yanında, baskı levhası kuvveti, stampa ve kalıp profil radyusları, stampa ve kalıp arası boşluğu ve iş parçası kalınlığı gibi birçok faktörden etkilenmektedir [9].

Sac şekillendirmenin araştırılmasında temel olarak iki yöntem vardır; deneysel yöntem ve sayısal yöntem. Deneysel yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar gerçek değerler olmasının yanı sıra bu yöntem pahalı ve zaman alıcıdır. Diğer taraftan sayısal yöntemler daha ekonomiktir ve daha kısa zamanda sonuç alınmaktadır. Sac şekillendirmede ortaya çıkan diferansiyel denklemin bir fonksiyonla ifade edilen bir çözümünün bulunması çoğu durum için imkânsızdır. Bu imkânsızlık bu denklemlerin çözümlerinde bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Bu alandaki bilgisayar simülasyonları genellikle sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla yapılır. Sonlu elemanlar yönteminin detaylı işlendiği kaynaklar piyasada mevcuttur. Bunlardan giriş kitabı olarak lineer olayların incelendiği Logan'ın eseri verilebilir. Diğer taraftan Zienkiewicz'in eserinde lineer olmayan problemlerin çözümü detaylı olarak işlenmiştir [10, 11, 12]. Ayrıca Zampaloni ve arkadaşlarının çalışması ve Lang ve arkadaşlarının sabit ve değişken basınçla 3003-H14 alüminyum malzemenin hidro şekillendirmesini LS-Dyna3D sonlu elemanlar paket programını kullanarak sayısal ve deneysel yöntemleri ile değerlendirdikleri çalışması örnek olarak verilebilir [13, 14].

1970'li yılların sonlarından itibaren büyük otomotiv firmaları sonlu eleman analizlerini sac metal şekillendirmede denemeye başladılar. Başlangıçta temel araştırma konusu yırtılma ve marullaşmanın ortaya çıkıp çıkmadığının

incelenmesiydi. Günümüzde ise simülasyonlarla yapılan araştırmaların temel hedefi sacı Őekillendirecek kalıpların tasarlanmasıdır. Ancak bu konuda başarılı olabilmek için, sonlu elemanlar ağının iyi oluşturulmasına, sınır Şartlarının iyi belirlenmesine, iş parçası malzemesinin doğru modellenmesine ve Şekillendirme sınır eğrilerinin tam olarak bilinmesine ihtiyaç vardır [15].

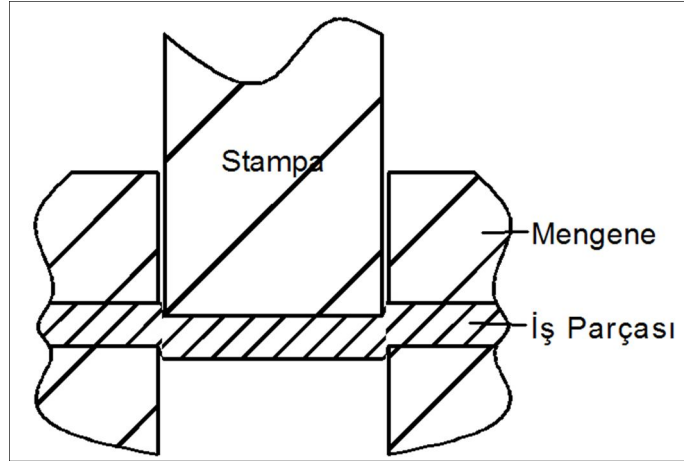
Bu çalışmada sac Şekillendirmede ortaya çıkan problemlerden yırtılma ve kalınlık değişiminin hangi doğrulukla önceden tahmin edilebileceği bazı sac Şekillendirme işlemleri için araştırılmıştır. Çalışmanın amacı sonlu elemanlar yönteminin uygulanması konusunda ortaya çıkan problemleri görmek ve başarılı bir analiz için eksiklikleri tespit etmektir. Bu amaçla yapılan simlasyonların bir kısmı deney sonuçlarıyla bir kısmı da literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 2

SAÇ ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİ

2.1. KESME

Genellikle rulolar halinde temin edilen sac metalleri şekillendirmede uygulanan ilk işlem kesme işlemidir. Daha sonra fazla malzeme tekrar kesilerek ve delinerek taslak ya da ürün elde edilebilir. Kesme işlemi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Kesme işlemi yakından incelendiğinde çatlaklar, kenarlarda bölgesel olarak pekleşmeler ve yırtılmalar gibi karmaşık mekanik olaylar meydana gelmektedir. Bu etkiler sonraki işlemleri zorlaştıracığından problemleri azaltmak amacıyla uygun işleme tasarımı yapılmalıdır [16].

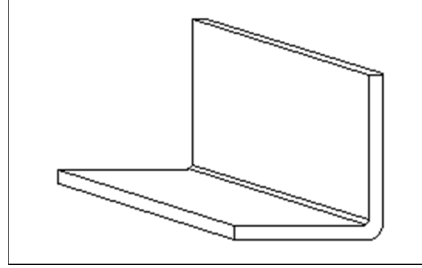


Şekil 2.1. Kesme işlemine ait şematik çizim.

2.2. BÜKME

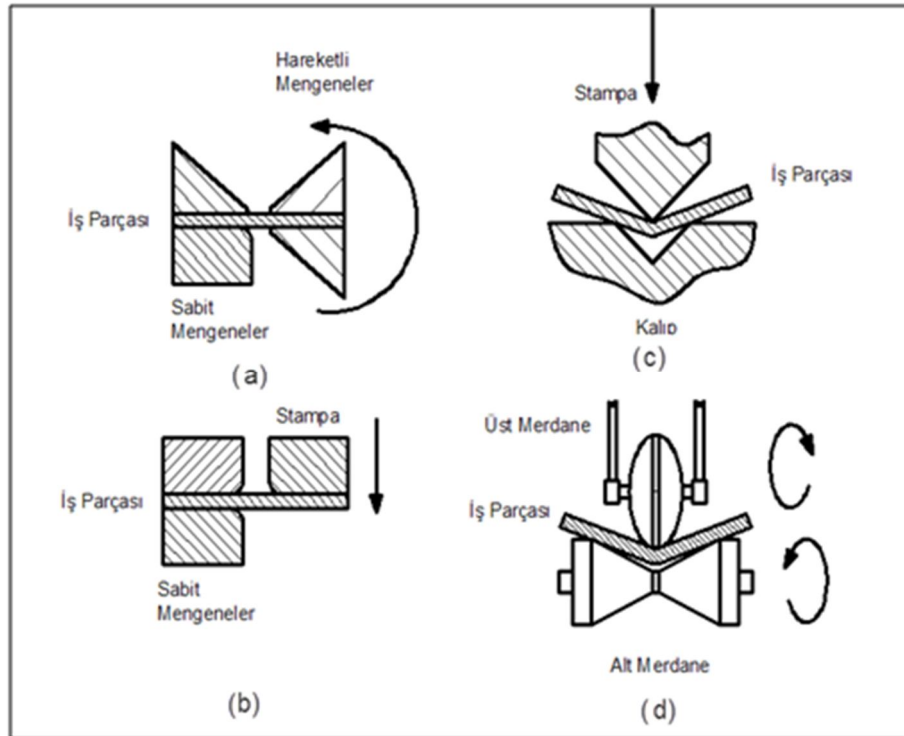
Basit şekillendirme işlemlerinden biri olan bükme işlemi Şekil 2.2’de gösterilmiş olup sacın bir çizgi boyunca eğilmesidir. İşlem sırasında sadece malzemenin eğilen

bölgesi plastik deformasyona uğrarken eğilme bölgesinin dışında deformasyon gerçekleşmez. Sünek olmayan malzemelerde bükülmenin gerçekleştiği dış yüzeylerde çatlama gerçekleşebilir. Fakat işlemin asıl zorluğu geri yaylanmadan dolayı istenilen eğme açısına ulaşmaktır, elastik geri yaylanma tahmin edilebilir bir olaydır.



Şekil 2.2. Bükme işlemi uygulanmış bir sac malzemenin şematik görünümü.

Bir sacı düz olarak bükmenin birçok yolu vardır ve bunlardan bir kısmı Şekil 2.3’de verilmiştir; a) Katlama; bir tarafından kaymaz biçimde sabitlenmiş sacın diğer yarısının katlanmasıyla elde edilen bükme tarzı, b) Sıyırtarak bükme; bir tarafından



Şekil 2.3. Bükme örnekleri a) Katlama, b) Sıyırtarak bükme, c) V kalıbı ile bükme, d) Rulo ile bükme.

sabitlenmiş olan sacın sabit olmayan ucundan bir presle ittirilmesi ve sac presin altından sıyrılarak eğilmesi şeklinde meydana gelen bükme tarzıdır, c) V kalıbı ile bükme; bu işlemde v kalıbının üzerine konulan sacın v şeklinde olan stampa kullanılarak bükülmesi işlemidir, d) Rulo ile bükme; şerit halinde ilerleyen sacın erkekli dişili çalışan rulolar vasıtasıyla genellikle kademeli olarak eğme işlemidir.

Bazen bükme işlemi düz bir çizgi boyunca olmayabilir veya eğilecek sac düz bir sac olmayabilir. Bu durumda plastik deformasyon sadece eğilme bölgesiyle sınırlı kalmayıp bükülmenin gerçekleştiği bölgenin çevresine de yayılabilir [16].

2.3. DERİN ÇEKME

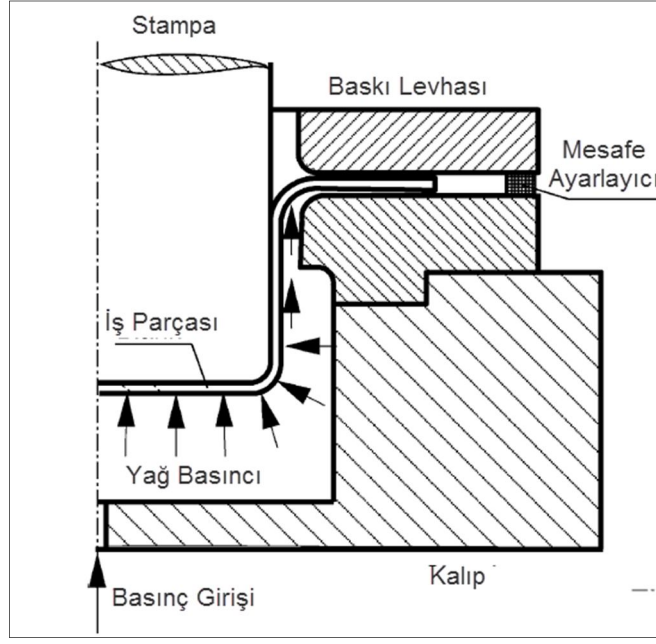
Metal saclardan, bir kalıp ve stampa sistemi yardımıyla derin kaplar elde etmeye yarayan, plastik şekil verme işlemidir. Derin çekme işlemlerinde daha derin ve küçük çaplı ürün elde etmek amacıyla kademeli olarak da uygulanabilmektedir. Derin çekme işleminin mekaniği hakkında daha ayrıntılı bilgi Bölüm 4’de mevcuttur.

2.4. HİDRO MEKANİK SAC ŞEKİLLENDİRME

Rijit bir kalıp ve stampa sisteminden meydana gelen klasik sac metal kalıplılığından geliştirilmiş bir sistem olup, stampanın ya da kalıbın yerine basınçlı bir akışkanın kullanılması temeline dayanan sac şekillendirme işlemidir. Bazen kauçuk bir diyafram kullanarak bazen de direk olarak sacın üzerine uygulanan basınçlı akışkan vasıtasıyla sacın şekillendirilmesi sağlanır.

Hidro mekanik sistem üretim esnekliği, kalıp maliyeti, kalıp depolama, sac üzerinde homojen kuvvet dağılımı, yüzey kalitesi ve ince saclara da uygulanabilirliği bakımından klasik sac şekillendirme işleminden üstündür. Şekil 2.4’de hidro mekanik şekil vermeye ait şema mevcuttur.

Tüm üstünlükleriyle beraber hidro mekanik sac şekillendirme işleminde kullanılan basınçlı akışkan sebebiyle sızdırmazlık problemi yaşanmaktadır ve akışkan basıncının kontrolü için karmaşık sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2.4. Hidro mekanik sistemin şematiği [17].

2.5. PATLAYICI İLE SAC ŞEKİLLENDİRME

Patlayıcı ile sac şekil verme işlemi genellikle büyük ve mukavemetli parçaların şekillendirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Kullanılan malzemenin ve üretimi arzu edilen ürünün geometrik özelliklerine göre kalıp içinde yapılabileceği gibi açık ortamda ve suyun içinde de gerçekleştirilebilir.

Patlama sonucunda gerçekleşen işlem çok kısa süreli ve yüksek basınçlı bir işlem olduğu için özellikle patlamanın kontrolü önemli bir sorundur. Bu yöntemle sac şekillendirme işleminde tamamen küresel parçaların üretilmesi mümkündür. Ayrıca, iyi planlanmış tasarım yöntemleriyle küreden farklı parçalar da üretilebilir. Patlayıcılarla şekillendirme yöntemi genellikle askeri uygulamalarda kullanılan bir yöntemdir [18].

2.6. ELEKTRO MANYETİK SAC ŞEKİLLENDİRME

Elektro manyetik şekillendirme işlemi kuvvetlerin elektro manyetik alan vasıtasıyla aktarılmalarıyla saca şekil verme yöntemidir. Bu tür yöntemler temassız üretim yöntemleri olarak adlandırılırlar. İşlem, manyetizmayı sağlayan bobin ve iş

parçasının şekillerine ve etkileşimlerine bağlıdır. Bobin ve iş parçalarının durumlarına göre basma ve çekme yönlerinde manyetik kuvvetler iş parçasına etki ettirilebilir. Ayrıca; işlemden kararlılığı sağlamak amacıyla kalıbın ve yardımcı şekillendiricilerin kullanıldığı örnekler mevcuttur [19].

2.7. FARKLI SAC ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİ ÜZERİNE BİR ÖRNEK

Sac şekillendirmede karşılaşılan birçok farklı işleme bir meşrubat kutusunun imalatında karşılaşılabılır. Uygulanan çeşitli işlem basamakları Şekil 2.5’de gösterilmiş olup, şekilde gözüken işlemler sırasıyla; taslak hazırlama, derin çekme, yeniden derin çekme, ütüleme, kubbe oluşturma, boyun oluşturma ve bükerek birleştirmedir.

İşlem	İşlem Şematığı	Sonuç
Taslak Kesme		
Derin Çekme		
Kademeli Derin Çekme		
Ütüleme		
Kubbe Yapma		
Boyun Yapma		
Birleştirme		

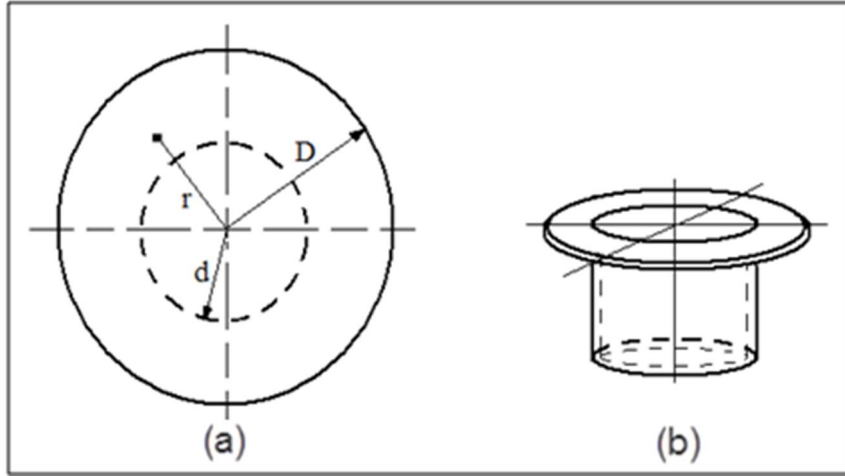
Şekil 2.5. Meşrubat kutusu üretimi işlem sırası [20].

BÖLÜM 3

SAC ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNİN TEORİSİ VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

3.1. ÇEKME İŞLEMİNİN MEKANİĞİ

Taslak ve çekilmiş parça Şekil 3.1’de gösterilen malzemede, çekme esnasında stampanın herhangi bir konumunda iş parçasından çıkarılan radyal ve teğetsel doğrultularla sınırlanmış sonsuz küçük bir dilimde oluşan gerilme durumu Şekil 3.2’de verilmiştir.

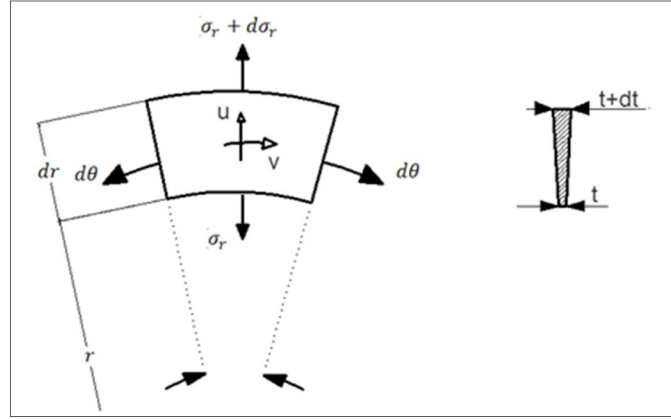


Şekil 3.1. İş parçası a) Taslak parçanın şematik çizimi, b) Çekilmiş parçanın şematik çizimi.

Bu dilime ait u radyal doğrultudaki $\sum F_u = 0$ denge denklemi yazılırsa,

$$\begin{aligned} & (\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr) \cdot d\theta \cdot (t + dt) - \sigma_r \cdot r \cdot d\theta \cdot t - 2 \cdot dr \cdot \left(t + \frac{dt}{2}\right) \cdot \sigma_\theta \cdot \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) + \\ & 2 \cdot \mu \left(\frac{(r \cdot d\theta + (r + dr) \cdot d\theta)}{2} \cdot dr \right) \cdot \sigma_t = 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

elde edilir.



Şekil 3.2. r yarıçapına sahip bir dilimde herhangi bir nokta üzerindeki gerilmelerin şematik gösterimi.

Açı çok küçük olduğu için $\sin(d\theta/2) = d\theta/2$ şeklinde yazılabilir. (4.1) ifadesi

$$(\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r \cdot dr) \cdot (t + dt) - \sigma_r \cdot r \cdot t - 2 \cdot dr \cdot \left(t + \frac{dt}{2}\right) \cdot \frac{\sigma_\theta}{2} + \mu(2r + dr) \cdot dr \cdot \sigma_t = 0 \quad (4.2)$$

şeklini alır. Bu ifade açılıp gerekli sadeleştirmeler yapılırsa, ifade

$$\sigma_r \cdot r \cdot dt + \sigma_t \cdot t \cdot dr + r \cdot t \cdot d\sigma_r - t \cdot \sigma_\theta dr + 2 \cdot \mu \cdot r \cdot \sigma_t \cdot dr = 0 \quad (4.3)$$

şeklini alır. (4.3) bağıntısı r.dr ile bölünürse,

$$\sigma_r \cdot \frac{dt}{dr} + \sigma_r \cdot \frac{t}{r} + t \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{t\sigma_\theta}{dr} - 2 \cdot \mu \cdot \sigma_t = 0 \quad (4.4)$$

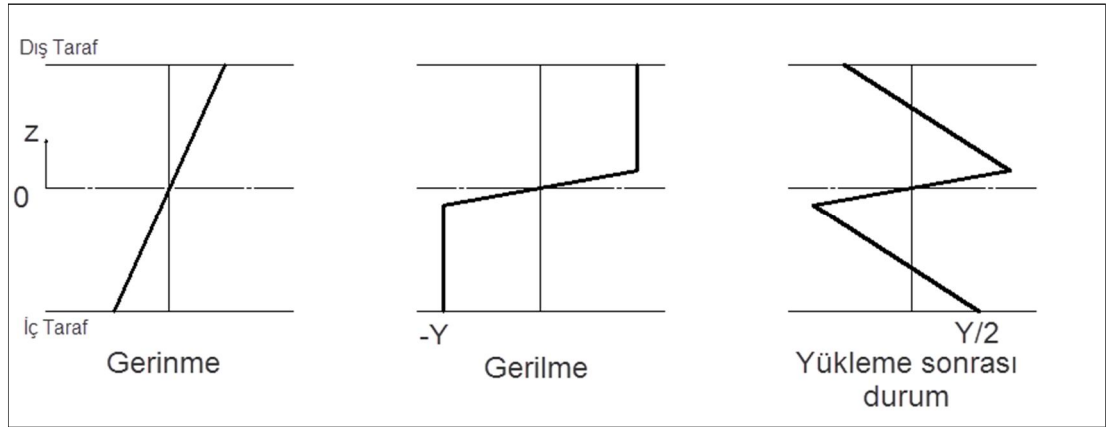
diferansiyel denklemi elde edilir. Bu diferansiyel denklemde $d(a \cdot b) = a \cdot db + b \cdot da$ olduğundan

$$\frac{d(t \cdot \sigma_r)}{dr} + \frac{t \cdot (\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} - 2 \cdot \mu \cdot \sigma_t = 0 \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir. Bu diferansiyel denklem silindirik derin çekmenin temel denklemidir. Gelişi güzel parça şekillendirmede (4.5) denkleminde karşılık gelen başka denklemler vardır.

3.2. GERİ YAYLANMANIN MEKANİĞİ

Saçların çekilmesinin akabinde, sacı şekillendiren kuvvetlerin kaldırılmasıyla, işlem görmüş olan malzemede oluşan elastik şekil değiştirmelerin sonucu geri yaylanma oluşur.



Şekil 3.3. Bükmeye maruz kalan sacdaki gerilme dağılımı [21].

Parçanın bükülmesi sırasında herhangi bir net dış kuvvetin olmadığı kabul edilir, bununla birlikte kesitte sonsuz küçük şerit elemanlarda $dF_x = \sigma_x w dz$ şeklinde iç kuvvetler vardır. Bu iç kuvvetlerin momenti

$$M = \int_{-t/2}^{+t/2} w \sigma_x z dz = 2 \int_0^{+t/2} w \sigma_x z dz \quad (4.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklem ideal plastik malzeme için

$$M = 2wY \int_0^{t/2} z dz = wYt^2/4 \quad (4.7)$$

şeklini alır.

Takımlar tarafından uygulanan eğilme momenti (4.7) de hesaplanan momente eşit olmalıdır. Malzeme elastik olarak boşalırken bükme işlemini yapan M momenti M=0 olacaktır. Bu durumdan sonraki işlem elastik olarak

$$\Delta\sigma_x = E' \Delta\varepsilon_x \quad (4.8)$$

şeklinde gerçekleşecektir. Burada $E' = E/(1 + \nu^2)$ şeklindedir. Diğer taraftan $\Delta\varepsilon_x$ ise

$$\Delta\varepsilon_x = z/r - z/r' \quad (4.9)$$

şeklinde verilir. Burada r' , geri yaylanma sonrası eğrilik yarıçapıdır.

Geri yaylanma sonrası eğilme momentindeki değişme ΔM ,

$$\Delta M = 2w \int_0^{t/2} \Delta\sigma_x z dz = 2w \int_0^{t/2} E(1/r - 1/r') z^2 dz = (wE't^3/12)(1/r - 1/r') \quad (4.10)$$

şeklindedir. Geri yaylanmadan sonra $M - \Delta M = 0$ olması gerektiği düşünülerek (4.7) ve (4.10) dan geri yaylanmadan sonraki r' yarıçapını hesaplamaya yarayan

$$1/r - 1/r' = 3Y/(tE') \quad (4.11)$$

ifadesi bulunur. Benzer şekilde kalıntı gerilmeler

$$\sigma_{x,res} = Y[1 - (3z/t)] \quad (4.12)$$

olarak hesaplanabilir [25].

3.3. KOMPLEKS PARÇALARIN ANALİZİNDE PAKET PROGRAM KULLANMA GEREKLİLİĞİ

(4.5) denklemini incelendiğinde, bu denklemin üç adet gerilme bileşeni içerdiği görülebilir. Analizin seyrini takip edebilmek için bu bileşenlerin her an bilinmesi gerekmektedir. Bir denklemlerle üç bilinmeyen hesaplanamayacağından iş parçasının o andaki geometrisinin de bilinmesi gerekir. Gerilmelerle iş parçasının geometrisi arasında bağıntı kurabilmek için malzemenin gerilme birim şekil değiştirme bağıntısına ihtiyaç vardır. Bu durumda bilgisayar desteği olmadan sayısal analizi yürütmenin imkansız olduğu anlaşılır.

Ayrıca sac şekillendirmede işlem kademelerinin sayısının birden fazla olması da bilgisayar programlarının kullanımını gerekli kılmaktadır. Bilgisayar programlarının sac şekillendirme mekaniğini çok iyi bilen kişiler tarafından hazırlanmış olması gerekir. Zira güvenilir sonuçlar elde edilmesi ve elde edilen sonuçların hem sayısal hem de görsel olarak takip edilebilmesi ancak çok iyi hazırlanmış paket programlarla mümkündür.

3.4. SONLU ELEMAN KAVRAMI

Sonlu elemanlarda eleman aileleri, serbestlik derecesine, elemanın düğüm sayılarına, elemanın matematik modellenmesine, çeşitli büyüklüklerin eleman hacmi içinde hangi sayısal integrasyon kullanıldığına göre sınıflandırılmaktadır.

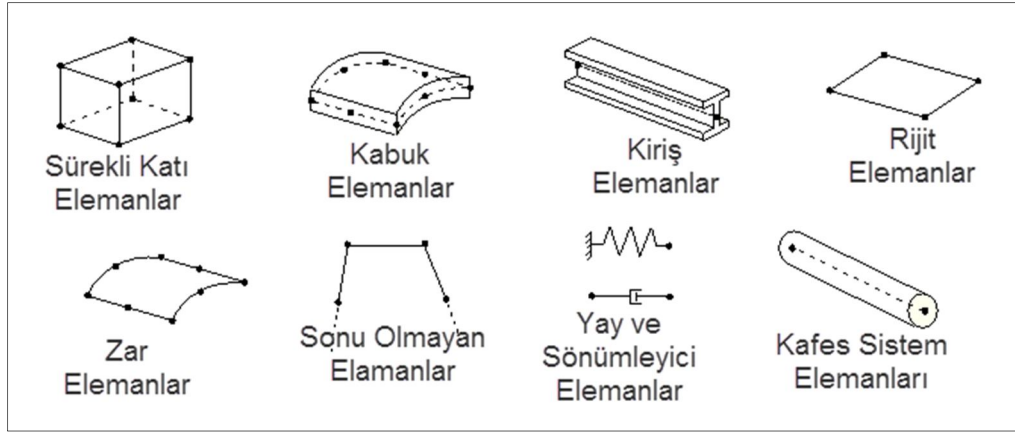
3.4.1. Eleman Aileleri

Genel olarak kullanılan sonlu eleman aileleri,

- Sürekli katı elemanlar,
- Kabuk elemanlar,
- Kiriş elemanlar,
- Rijit elemanlar,
- Zar elemanlar,

- Sonu olmayan elemanlar,
- Yay ve sönümleyici elemanlar,
- Kafes sistem elemanları

olarak sınıflandırılmaktadır. Bu eleman ailelerinin içinde de farklı özelliklere sahip çok sayıda farklı eleman tipleri vardır. Sık kullanılan eleman aileleri Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Sık kullanılan sonlu eleman aileleri [22].

3.4.2. Serbestlik Dereceleri

Yapı analizinde serbestlik derecesi denilince bir düğüm noktasının yaptığı öteleme ve dönme hareketlerinin bileşenlerinin toplam sayısı anlaşılır. Genel halde bu serbestlik dereceleri x , y , z eksenleri doğrultusunda öteleme ve x , y , z eksenleri etrafında dönme hareketleri olarak 6 adettir. Simetrik eksenli elemanlarda serbestlik dereceleri, r radyal doğrultuyu, z simetri eksenini göstermek üzere, r ve z yönünde öteleme ve r - z düzleminde dönme şeklindedir.

3.4.3. Elemanın Düğüm Sayıları

Bir elemandaki yer değiştirmeler başlangıçta sadece eleman düğüm noktalarında hesaplanır diğer noktadaki yer değiştirmeler düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerin interpolasyonu ile bulunur. Düğüm noktaları malzeme üzerinde ağ

örgüsü şeklinde yerleşmektedir. Ağ örgüsünün dizilim biçimi ve içereceği düğüm noktaları sayısı problemin çözüm süresi ve simülasyonun doğruluğu açısından dikkat edilmesi gereken bir faktördür.

3.4.4. Matematik Model

Matematik modellemede elemanın davranışı seçilen yer değiştirme fonksiyonu yardımıyla belirlenir. Bu fonksiyon düğüm noktalarının yer değiştirme değerleri yardımıyla tanımlanır. Lineer, ikinci ve üçüncü dereceden polinomlar çok sık kullanılan yer değiştirme fonksiyon tipleridir. Her bir fonksiyon belirli bir eleman içinde geçerli olmakla birlikte elemanlar içindeki noktaların yer değiştirmeleri sürekli dir.

3.4.5. İntegrasyon

Elemanın rijitlik matrislerinin elde edilmesinde minimum potansiyel enerji yöntemi ve virtüel iş prensibi gibi yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerin uygulanmasında integrasyon işlemlerine ihtiyaç duyulur. Bu integrasyonlar Gauss yöntemiyle yapılır integrasyonu yapmak için gerekli Gauss noktalarının tamamı kullanılmışsa bu elemana tam integrasyonlu eleman denir, eğer bütün Gauss noktaları kullanılmamışsa buna kısıtlı (reduced) integrasyon denir.

3.4.6. İmplit ve Expilisit Yöntemler

Problemlerin çözümünde explicit ve implit yöntemler kullanılmaktadır. Explicit yöntemler sac şekillendirme simülasyonlarında daha çabuk çözüme ulaşmayı mümkün kılmaktadır. Bu yöntem merkezi farklar kuralını uygulayarak çözüme gittiğinden aynı anda çözülmesi gereken denklem takımları ortaya çıkmaz. Bu durum explicit yöntemin implit yöntemine göre büyük avantajdır. Bu yöntem dinamik problemlerin çözümü için geliştirilmiş olmasına rağmen işlem zamanlarının iyi tespit edilebilmesiyle sac şekillendirme gibi işlem zamanının küçük olduğu “statik olarak değerlendirilebilir” (quasi-static) problemlerin çözümünde de çok etkindir.

İmplicit yöntemlerde çözüme giderken her adımda çözülmesi gereken büyük denklem sistemlerinin oluşturulması gerekir. Bu denklem sistemlerinin çözümü uzun zaman alır. Çoğu kere de parçaların temas problemlerinden dolayı simülasyon işlemi başarısızlıkla sonuçlanabilir.

BÖLÜM 4

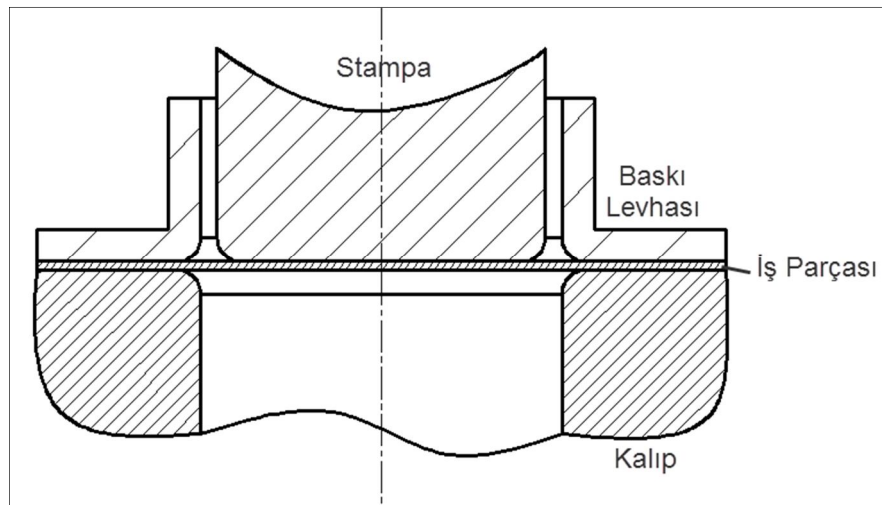
BİLGİSAYARDA MODELLEME, DENEYSEL VERİLER VE DEĞERLENDİRME

4.1. SAC ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİNİN BİLGİSAYARLA MODELLENMESİ

Bu çalışmada konvansiyonel derin çekme, V-kalıbıyla bükme, kare kalıpla derin çekme ve hidro mekanik derin çekme işlemlerine ait simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. Konvansiyonel Derin Çekme İşleminin Simülasyonu

Şematik olarak Şekil 4.1’de verilen konvansiyonel derin çekme işlemi Sonlu eleman tabanlı program kullanılarak modellenmek istendiğinde aşağıda verilen adımların izlenmesi gerekir:



Şekil 4.1. Kalıp sistemi kesit görünüşü.

- Parça oluşturma,
- Malzeme özelliklerini tanımlama,
- Montaj ve işlem sırasının belirlenmesi,
- Birbiriyle temas eden parçaların belirlenmesi,
- Kuvvet ve sınır şartlarının verilmesi,
- Sonlu eleman ağ örgüsünün oluşturulması,
- Programın işletilmesi.

4.1.1.1.Parça Oluşturma

Parçaların üç boyutlu, iki boyutlu veya aksisimetrik seçeneklerinden hangisiyle modelleneceği, deforme olabilen bir parça mı yoksa rijit bir parça olarak mı tanımlanacağı başlangıçta belirlenmelidir.

Parçanın oluşturulmasında kullanılacak temel Şekiller;

üç boyutlu modellemede,

- Hacimsel Şekil
- Kabuk Şekil
- Çizgi Şekil

iki boyutlu modellemede,

- Kabuk Şekil
- Çizgi Şekil

Aksisimetrik modellemede,

- Düzlemsel Şekil
- Çizgi Şekil

biçimindedir.

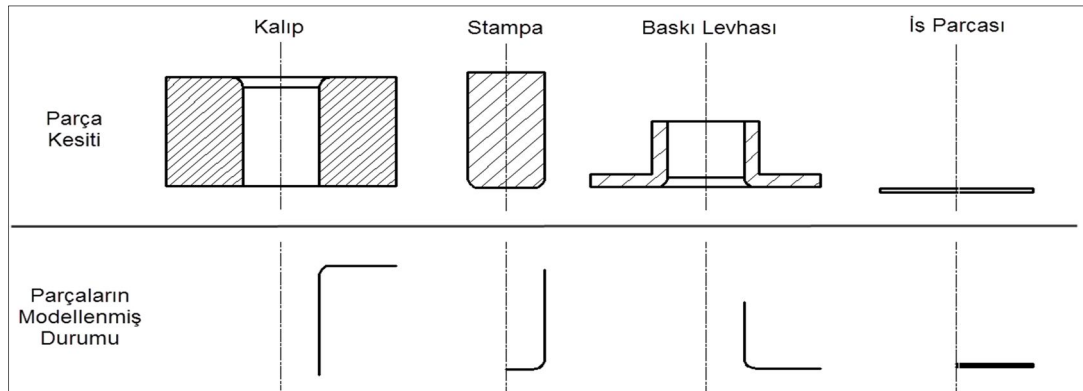
Şekil 4.1’deki modellenecek sistemde dört adet parça bulunmaktadır bu parçalar; iş parçası, kalıp, baskı levhası ve stampa. Sistemin simetrik eksenli olması nedeniyle parçaların tamamı aksisimetrik olarak modellenmiştir. Parçalardan kalıp, baskı levhası ve stampa rijit davranan parçalar olarak kabul edilirler, zira iş parçasında oluşacak deformasyonların yanında bu parçalarda meydana gelen deformasyonlar çok küçük kalmaktadır. İş parçası ise deformasyona uğrayan parça olarak kabul edilmiştir.

Paket programında karışıklığa meydan vermemek için parçalara anlamlı isimler vermek uygun olacaktır. Çizelge 4.1’de bütün parçaların modelleme özellikleri toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. Konvansiyonel derin çekme işlemine ait parça özellikleri çizelgesi.

Parçanın Adı	Model Biçim	Davranış Biçimi	Modelleme Elemanı
Is_parcasi	Simetrik eksenli	Deforme olabilir	Düzlemsel şekil
Kalip	Simetrik eksenli	Rijit	Çizgi şekil
Baski_levhasi	Simetrik eksenli	Rijit	Çizgi şekil
Stampa	Simetrik eksenli	Rijit	Çizgi şekil

Şekil 4.1’de verilen parçaların yapılan simülasyon işleminde nasıl görüneceği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Derin çekme işlemine ait parçaların gerçek ve modellenmiş durumu.

Bu esnada rijit parçaların her biri için bir referans noktası belirlenmesi gerekir. Rijit parçalara ait sınır şartları bu referans noktaları üzerinden verilecektir. Katı cisimlerin mekaniğinden bilindiği üzere bir katı cismin bir noktasının ötelenme ve dönmesi bilirse cisim üzerindeki bütün noktaların hareketleri bilinebilir.

4.1.1.2. Malzeme Özelliklerinin Atanması

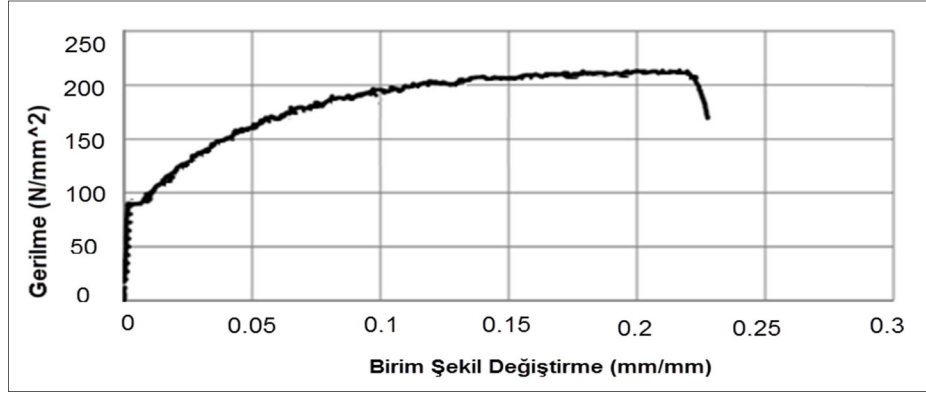
Modelleme işleminde malzeme özelliklerinin ilgili parçaya atanması gerekir. Parçaların oluşturulma safhasında rijit malzeme olarak tanımlanan “Kalip”, “Baski_levhası” ve “Stampa” adlarındaki parçalar için herhangi bir malzeme atamasına gerek yoktur. Malzeme özellikleri, şekil değiştirebilen parça olarak tanımlanan “Is_parcasi” için bir anlam taşır. Birden fazla malzemeyle çalışılıyorsa her malzemeye uygun bir ad verilmelidir.

Yürütülen simülasyonlarda elde edilen sonuçların deneylerle karşılaştırılmasının yapılabilmesi amacıyla Al5754 malzemesi kullanılmıştır. Genellikle otomotiv, inşaat ve denizcilik sektöründe kullanılan bu malzemenin esas alaşım elementleri alüminyum ve magnezyum olup orta mukavemetli, iyi kaynak edilebilirliğe, yüksek tokluğa ve yüksek korozyon direncine sahiptir. Bu malzemeye ait özellikler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Al5754’ün karakteristik özellikleri.

Yoğunluk	2300 kg/m ³
Elastiklik Modülü	68.GPa
Poisson Oranı	0.3
Akma gerilmesi	93 N/mm ²

Al5754’e ait çekme deneyi eğrisi Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Al5754 malzemesine ait gerçek çekme eğrisi [24].

Çekme deneyinden deney numunesinin başlangıç uzunluğu ve başlangıç alanıyla elde edilen mühendislik eğrisi programa bire bir aktarılacak bir veri değildir. Zira kullanılan sonlu eleman programı mühendislik çekme eğrisi verileri ile değil, gerçek gerilme eğrisi değerleriyle çalışmaktadır.

Çekme deneyinden elde edilen veriler bilgisayar programına aktarılmadan önce bu eğriden gerçek çekme eğrisinin elde edilmesi gerekir. Gerçek çekme gerilmesi σ ve gerçek birim şekil değiştirme değeri ϵ ile mühendislik eğrisi üzerindeki bir noktaya ait S çekme gerilmesi ve e birim şekil değiştirme değerleri arasında $\sigma = S \cdot (1+e)$ ve $\epsilon = \ln(1+e)$ bağıntıları vardır [21].

Bu bağıntılar yardımıyla bulunan gerçek şekil değiştirme eğrisinden elastik şekil değiştirme miktarının çıkarılmasıyla bulunan gerçek gerilme-plastik şekil değiştirme eğrisi programa malzeme özelliği olarak girilir. Ayrıca malzemenin elastiklik modülü, Poisson oranı ve yoğunluğunun da girilmesi gerekir. Programa girilmesi gerçek gerilme-plastik şekil değiştirme değerleri Şekil 4.3'den elde edilerek Çizelge 4.3'de verilmiştir.

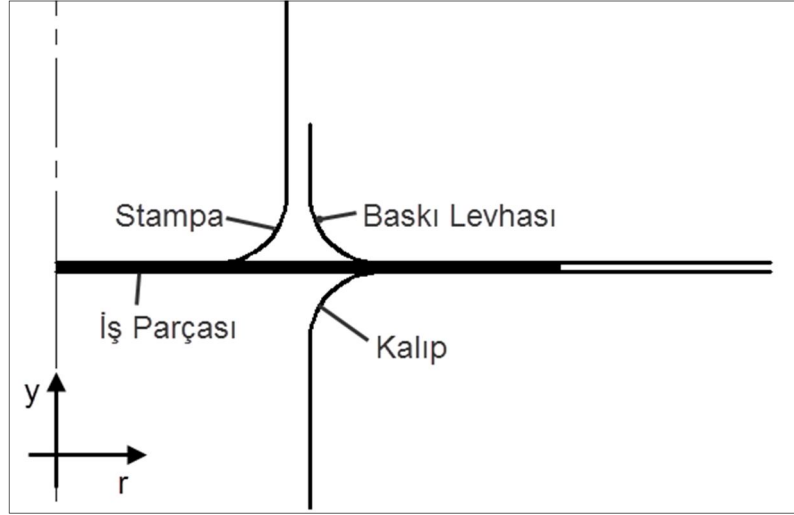
Çizelge 4.3. Al5754'e ait gerçek gerilme plastik şekil değıştirme değeri.

Gerilme	Plastik Şekil Değıştirme
0	0
74150000	0
89420000	0.001119
90400000	0.007398
120300000	0.018855
150300000	0.035941
175800000	0.055643
200200000	0.081503
225000000	0.116357
250700000	0.175377
253400000	0.194139
232200000	0.198787

Analiz dinamik olarak çözülecekse rijit parçalara kütle atanması gerekir. Bu işlem hareketli bütün rijit parçalara uygulanmalıdır.

4.1.1.3. Montaj

Daha önceden oluşturulan parçaların montajının yapılması aşamasıdır. Bu aşamada sistemi oluşturan parçalar anlamlı bir bütünü oluşturacak şekilde ölçülere uygun olarak montaj edilmelidir. Yapılan simülasyona ait montaj resmi Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Konvansiyonel derin çekme işlemine ait montaj resmi.

4.1.1.4. İşlem Sırasının Belirlenmesi

İşlem sırası denilince, yükleme ve sınır şartlarındaki değişikliklerin, parçaların birbiriyle teması durumundaki değişikliklerin, işlemde bir parçanın devre dışı bırakılmasının, işleme yeni bir parçanın eklenmesinin veya işlem esnasında oluşacak diğer değişikliklerin sırası anlaşılır. İşlem sırası belirlenirken her bir işlem sonunda hangi çıktıların alınacağı da çıktı talebiyle belirlenir. Ayrıca bu aşamada problemin dinamik mi yoksa statik mi çözüleceği hakkında karar verilmelidir. Yapılan simülasyona ait işlem sırası ve özellikleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. İşlem sırası ve özellikleri.

İşlem sırası	Açıklamalar
Başlangıç işlemi	Modeli programa tanıtmaya
Stampa ilerlemesi	Stampanın 45 mm’yi 0.001 s’de ilerleyeceğinin belirtilmesi

Bu işlemde baskı levhasının iş parçasına bir kuvvet uygulaması isteniyorsa Başlangıç ve Stampa İlerlemesi işlem sıralarının arasına Baskı Kuvveti İşlemi uygulanmalıdır. Bu kuvvetin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği de verilmelidir.

4.1.1.5. Etkileşim

Analiz sırasında işlemdeki parçaların temas yüzeylerinin hangisinin diğer parçaların temas yüzeyleriyle temas edeceğinin önceden programa tanıtılmış olması gerekmektedir. Zira program temas durumunu buna göre araştırarak, sonlu elemanlar denklem takımlarını buna göre oluşturacak ve çözecektir. Etkileşim esnasında ortaya çıkacak sürtünme katsayısının da önceden belirlenerek, bilgisayara girdi olarak verilmesi gereklidir. Yapılan simülasyona ait yüzey isimleri ve ait oldukları bölgeler Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Konvansiyonel derin çekme işlemine ait yüzey isimleri ve açıklamalar.

Yüzey Adı	Bulunduğu Parça	Açıklama
Is_parcasi_alt_yuzey	Is_parcasi	İş Parçası’nın kalıp ve stampa ile temas ettiği yüzey
Is_parcasi_ust_yuzey	Is_parcasi	İş Parçası’nın baskı levhasıyla temas ettiği yüzey
Stampa_yuzey	Stampa	Stampa’nın is parçasıyla temas ettiği yüzey
Baski_levhasi_yuzey	Baski_levhasi	Baskı levhasının iş parçasıyla temas ettiği yüzey
Kalip_yuzey	Kalip	Kalıp’ın iş parçasıyla temas ettiği yüzey

4.1.1.6. Kuvvet ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Analiz sırasında rijit olan ve olmayan parçaların durumları değişmektedir. Bu değişim esnasında kuvvetlerin ve sınır şartlarının paket programa tanıtılmış olması gerekir. Kuvvetlerin tanıtılması kuvvetlerin yayılı olarak mı yoksa noktasal olarak mı uygulanacağı ve hangi noktaya veya hangi yüzeye etkiyeceğinin açık olarak belirtilmesi gerekir.

Diğer taraftan sınır şartları kavramından da sistemdeki belirli bir noktanın veya noktalar grubunun hangi yönlerdeki hareketinin kısıtlanacağı anlaşılır. Kuvvet ve sınır şartları konusu işlem sırasıyla yakından bağlantılıdır.

Çizelge 4.6’da sistemde kullanılan parçalara ait sınır şartları, kuvvetler ve işlem sıraları verilmiştir.

Çizelge 4.6. Konvansiyonel derin çekme işlemine ait sınır şartları.

Parça Adı	Sınır Şartı	İşlem Sırası
Stampa	Tüm yönlerde engelli	Başlangıç İşlemi
Baski_levhası	Tüm yönlerde engelli	Bütün İşlemlerde
Kalip	Tüm yönlerde engelli	Bütün işlemlerde
İş_parçası orta düzlemi	Y doğrultusunda hareket edebilir	Stampa_ilerlemesi
Stampa	Y düzleminde 45mm ilerleyebilir	Stampa_ilerlemesi

4.1.1.7. Sonlu Eleman Ağ Örgüsünün Oluşturulması

Parçada oluşturulacak olan ağ örgüsü, kullanılacak olan sonlu eleman modeli için gerekli olan bir düzenleme olup, analizin işletimi sırasında problemin çözümü bu noktalar vasıtasıyla yapılacaktır. Ayrıca oluşturulan modele atanacak eleman tipi de bu aşamada seçilmelidir. Simülasyonda kullanılan sonlu eleman ağ örgüsü Şekil 4.5’de verilmiştir.



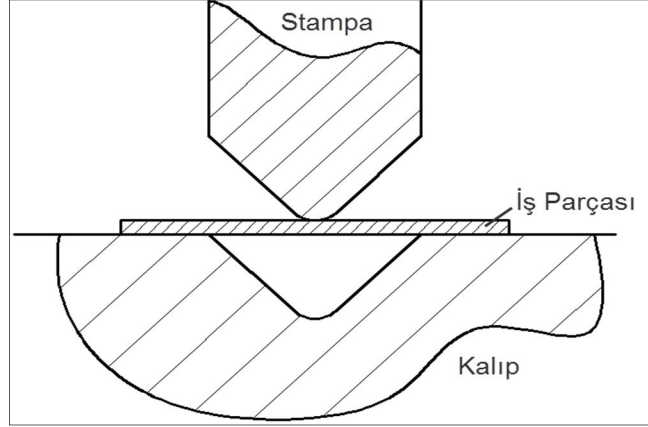
Şekil 4.5. İş parçası için kullanılan sonlu eleman ağ örgüsü.

4.1.1.8. Programın İşletilmesi

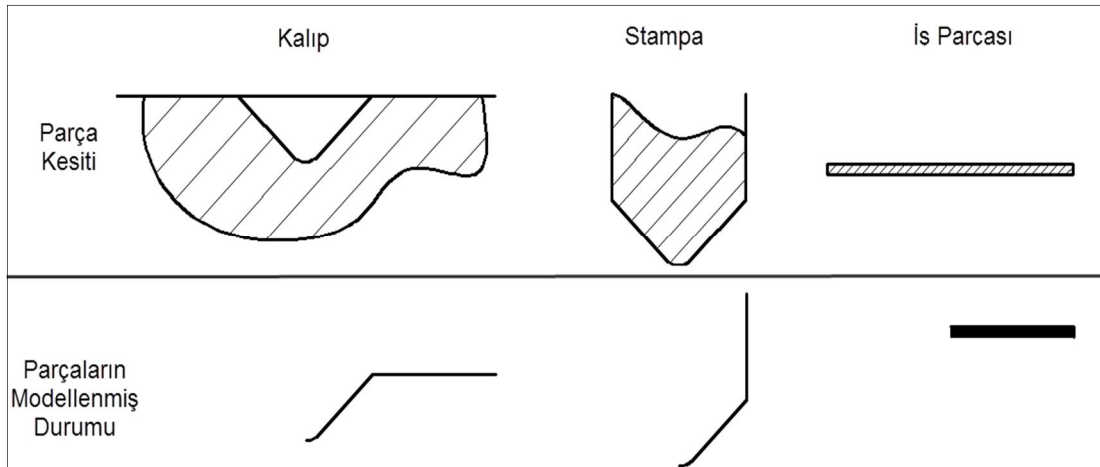
Bu safhada oluşturulan simülasyonu çalıştırma ve sonuç alma safhasıdır. Bu safhadan önceki safhalarda gerçekleştirilen işlemlerde bir sorun olmaması halinde problemsiz olarak çözüm gerçekleştirilebilir. Modelleme sırasında çok fazla mesh örgüsü ve elemanın bulunması bu safhanın süresinin uzamasına neden olacaktır.

4.1.2. V Kalıpla Şekillendirme İşleminin Simülasyonu

Şematik olarak Şekil 4.6’da gösterilen V-kalıpla bükme işlemi, Şekil 4.7’deki gibi modellenmiştir.



Şekil 4.6. V-kalıpla şekillendirme işlemi şematığı.



Şekil 4.7. V kalıpta şekil verme işleminde parçaların gerçek ve modellenmiş durumu.

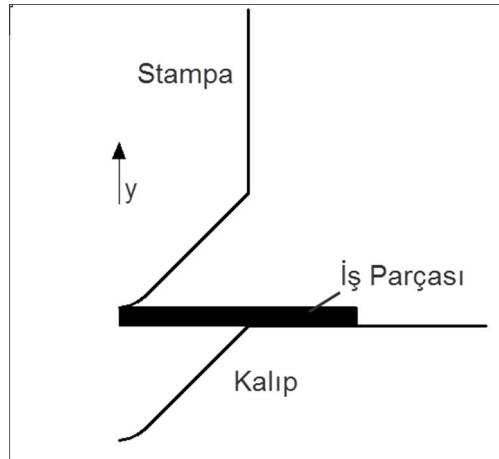
Modellenecek sistemde üç adet parça bulunmaktadır. Bu parçalar; iş parçası, V-kalıp ve stampadır. Burada iş parçası deforme olabilen parça olarak modellenecektir.

Yapılan simülasyonlarda AISI1006 malzemesi ile işlem yapılmıştır. Malzeme özellikleri Çizelge 4.7’dedir. Girdilerin tam değerleri ekler bölümündeki Ek 1’de bulunabilir.

Yapılan simülasyonda daha fazla sayıda sonlu elemanla çalışabilmek için sistem yarım parça olarak modellenmiştir. Bu modellemeye ait montaj resmi Şekil 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. AISI1006’ya ait malzeme özellikleri [23].

Yoğunluk	7872 kg/m ³
Elastiklik Modülü	21.10 ¹⁰ Pa
Poisson Oranı	0.3
Akma gerilmesi	210 N/mm ²
Pekleşme eğrisi formülü	704ε ^{-0.24}



Şekil 4.8. V-kalıba ait montaj resmi.

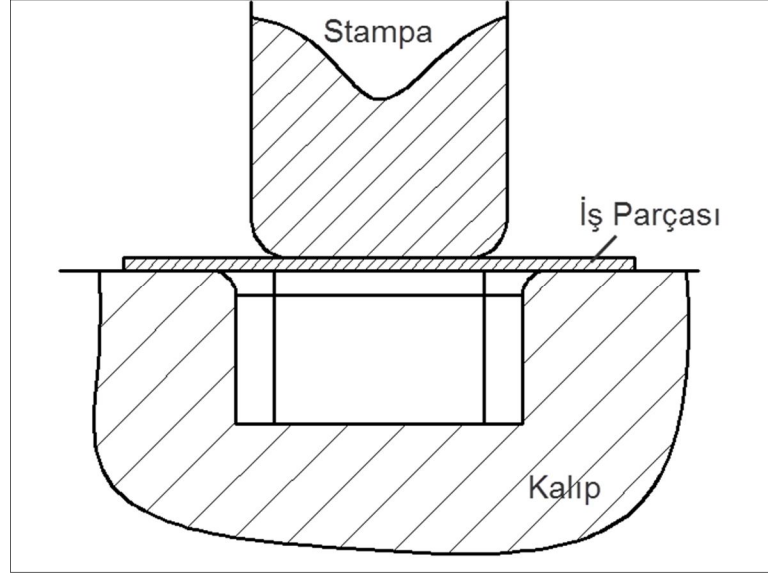
Bu modelleme başlangıç ve stampa ilerlemesi olmak üzere iki adımda gerçekleştirilmiştir. Stampa ilerlemesi –y yönünde 18 mm alınmıştır.

Sistemde kullanılan parçalarda; iş parçası alt yüzeyi ile kalıp, iş parçası üst yüzeyi ile stampa arasında temas söz konusudur. Bu durum, etkileşimin modellenmesi aşamasında dikkate alınmıştır.

Sistemde kalıbın tüm yönlerdeki hareketi engellenmiş ve yarım iş parçasının sol ucu sadece y doğrultusunda hareket edebilir olarak tanımlanmıştır.

4.1.3. Kare Kalıpla Şekillendirme İşlemi Simülasyonu

Şematik olarak Şekil 4.9’da verilen kare kalıpla çekme işlemi sonlu eleman tabanlı program kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 4.9. Kare kalıpta çekme işlemine ait şematik çizim.

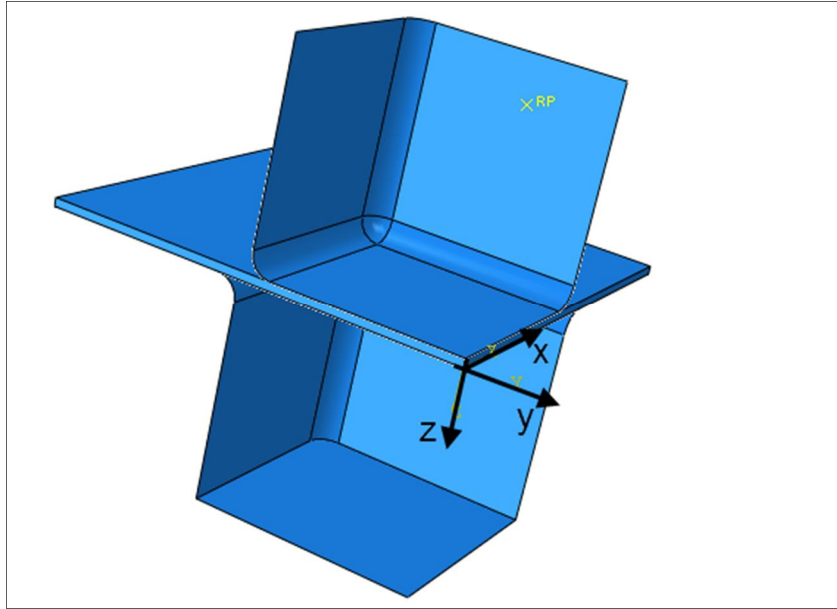
Modellenen sistemde üç adet parça bulunmaktadır. Bu parçalar; iş parçası, kalıp ve stampadır. Parçalardan kalıp ve stampa rijit davranan, iş parçası ise deforme olabilen parçalardır. Yapılan simülasyonda daha fazla sayıda sonlu elemanla çalışabilmek için sistemin dörtte biri modellenmiştir. Bu modellemeye ait üç boyutlu montaj resmi Şekil 4.10’da verilmiştir. Burada klasik derin çekme işlemi ve V-kalıpla bükme işleminden farklı olarak üç boyutlu hacimsel sonlu elemanlarla çalışılmıştır.

Rijit parçalara ait sınır şartları referans noktaları üzerinden verileceğinden rijit parçaların her biri için bir referans noktasının belirlenmesi gerekir.

Literatürdeki sonuçlarla karşılaştırma yapabilmek için simülasyonlarda St14 malzemesi kullanılmıştır. Bu malzeme ile ilgili bilgiler Çizelge 4.8’de verilmiştir. Malzeme girdilerinin tam değerleri Ekler bölümündeki Ek 2’de bulunabilir.

Simülasyonda başlangıç ve stampa ilerlemesi olmak üzere iki adım vardır. Sistemde kullanılan parçalarda; iş parçası alt yüzeyi ile kalıp, iş parçası üst yüzeyi ile stampa arasında temas söz konusudur. Bu durum, etkileşimin modellenmesi aşamasında dikkate alınmıştır.

Sistemde kalıp tüm yönlerde hareketsiz, stampa ikinci adımda z yönünde 21,5 mm hareketli olarak tanımlanmalıdır. Çeyrek modellemeden ötürü, iş parçasının A yüzeyi x doğrultusunda hareket edemez, y ve z etrafında dönemez olarak, B yüzeyi ise y doğrultusunda hareket edemez, x ve z etrafında dönemez olarak tanımlanması gerekir.



Şekil 4.10. Kare derin çekme işlemine ait montaj resmi.

Çizelge 4.8. St14'e ait malzeme özellikleri [25].

Yoğunluk	7872 kg/m ³
Elastiklik Modülü	21.10 ¹⁰ Pa
Poisson Oranı	0.3
Akma gerilmesi	260 N/mm ²
Pekleşme eğrisi formülü	260ε ^{-0.24}

4.1.4. Hidro Mekanik Derin Çekme İşleminin Simülasyonu

Hidro mekanik derin çekme işleminin sonlu elemanlarla analiz edilmiştir. Modellenen sistemde 4 adet parça bulunmaktadır. Bu parçalar; iş parçası, kalıp, stampa ve baskı levhasıdır. Parçalardan kalıp, baskı levhası ve stampa rijit davranan parçalar, iş parçası ise deforme olabilen parçadır.

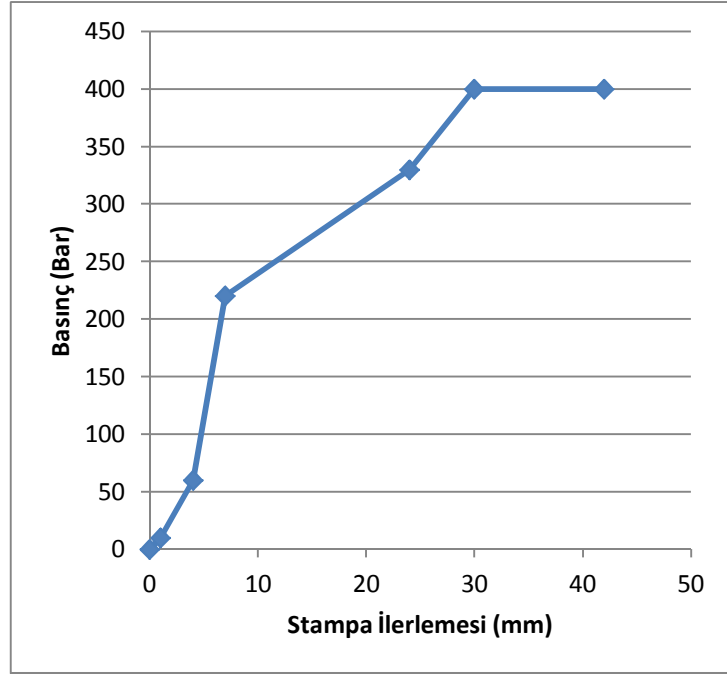
Yapılan simülasyonlar Al5754 malzemesi için yürütülmüştür. Bu malzemenin özellikleri daha önce Çizelge 4.2’de verilmiştir. Sistemin montaj resmi Şekil 4.4’de verilen konvansiyonel derin çekmeye ait şekil ile benzerdir. Simülasyona ait işlem sırası Çizelge 4.2’de ve etkileşimler Çizelge 4.3’de verildiği gibidir. Simülasyona ait kuvvet ve sınır şartları, konvansiyonel derin çekme işlemine ait kuvvet ve sınır şartlarıyla benzerdir. Hidro mekanik derin çekme işleminin farkı sacın alt yüzeyine yağ basıncının da etkiyor olmasıdır.

Derin çekme işlemi sırasında, parçanın kusursuz bir şekilde akması için stampa çevresiyle temasta olması gerekmektedir, bu teması hidro mekanik sistemde sağlayan etken basınçlı akışkandır.

Hidro mekanik derin çekme işleminin simülasyonu sırasında malzemeye etki eden akışkan basıncının işlem süresince ilgili yüzeye etkidiğinin garanti edilmesi önemli bir husustur. Yapılan simülasyonda bu durumu sağlamak amacıyla iş parçasının akışkanla temas eden yüzeyi farklı bölgelere ayrılmıştır.

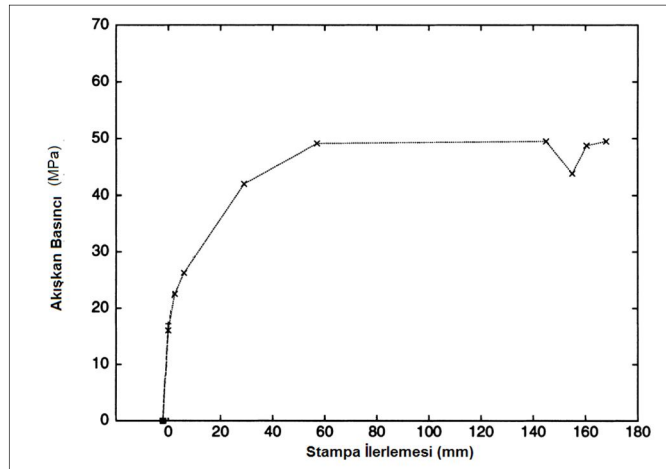
Hidrolik işlemin başlangıcından sonuna kadar, iş parçası farklı iç gerilmelerle yüklenir, farklı geometrik nitelikler kazanır ve pekleşmeye uğrar. İş parçasında meydana gelen bu değişimlere karşılık akışkan basıncı eğrisinin stampa yoluna bağlı olarak seyri önemli bir problemdir. Bu problemin başarılı bir biçimde çözümü için, dolayısıyla kusursuz ürün elde etmek için gerekli uygun akışkan basıncı eğrileri bilgisayar yardımıyla bir kaç denemeden sonra bulunabilir.

Simülasyon oluşturulması sırasında yağ basıncının stampa yoluna bağlı olarak nasıl değiştiği bilgisayara tanıtılmalıdır. Şekil 4.12’de bu çalışmada Al5754’ün hidro mekanik derin çekilmesinde kullanılan bir basınç eğrisi verilmiştir.



Şekil 4.11. Stampa yoluna bağlı olarak basınç eğrisi.

Bir fikir vermesi açısından çelik bir iş parçasının hidro mekanik yöntemle derin çekilmesi sırasında kullanılan uygun bir basınç yolu eğrisi Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Stampa ilerlemesine bağlı olarak basınç değişim grafiği [17].

4.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.2.1. Yürütülen Deneyler

Konvansiyonel ve hidro mekanik derin çekme işlemlerindeki simülasyonlarda elde edilen değerlerin doğruluk derecelerini görebilmek için Çizelge 4.9'daki deneyler yürütülmüştür. Deneyler, konvansiyonel yağlayıcısız derin çekme, konvansiyonel yağlayıcılı derin çekme ve hidro mekanik derin çekme olarak üç kategoride yapılmıştır. Her kategorideki deney aynı şartlarda üçer kez tekrarlanmıştır. Bu deneylerde kullanılan Al5754 malzemesinin özellikleri, simülasyon için gerekli olan malzeme verileri ve nasıl elde edileceği bölüm 4.1.1.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.9. Deney planı çizelgesi.

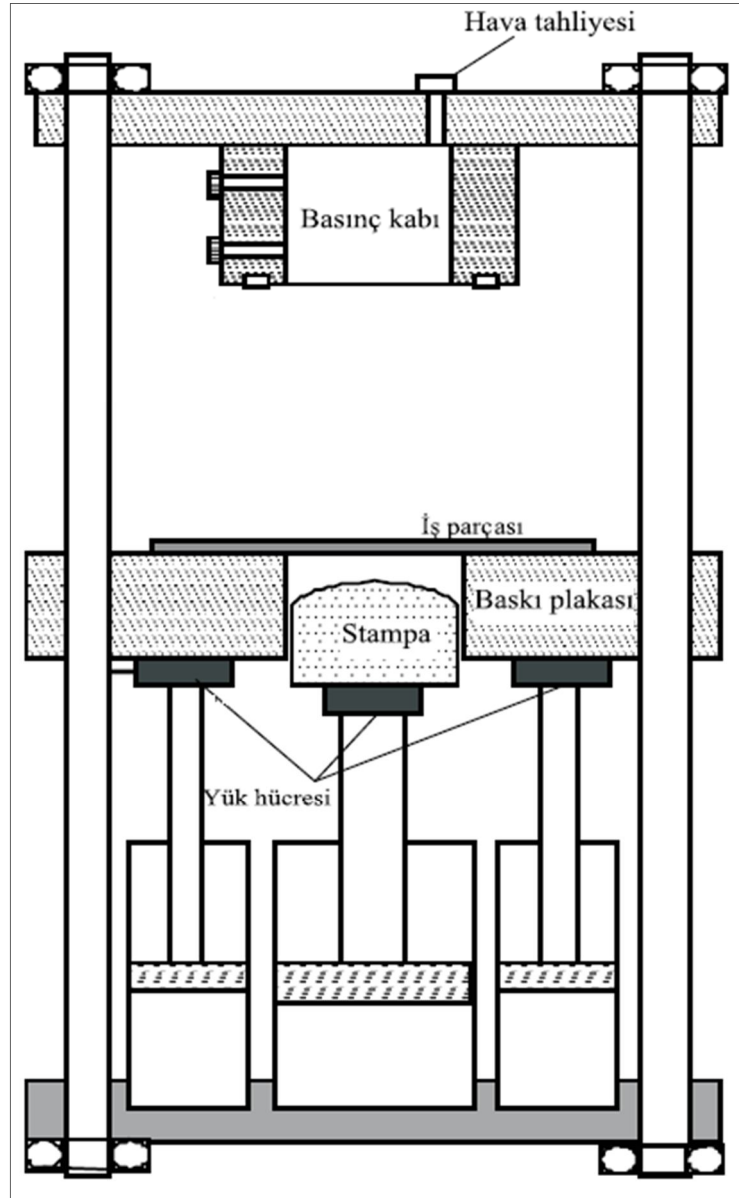
Numune Adı	Stampa Çapı	İş Parçası Çapı	Yağlayıcı Tipi	Çekme Tipi
1. Parça	40.8mm	85mm	Yağlayıcısız	Konvansiyonel
2. Parça	40.8mm	85mm	Yağlayıcısız	Konvansiyonel
3. Parça	40.8mm	85mm	Yağlayıcısız	Konvansiyonel
4. Parça	40.8mm	85mm	Polietilen + Parafin	Konvansiyonel
5. Parça	40.8mm	85mm	Polietilen + Parafin	Konvansiyonel
6. Parça	40.8mm	85mm	Polietilen + Parafin	Konvansiyonel
7. Parça	40mm	100mm	Polietilen + Parafin	Hidro mekanik
8. Parça	40mm	100mm	Polietilen + Parafin	Hidro mekanik
9. Parça	40mm	100mm	Polietilen + Parafin	Hidro mekanik

Deneyler Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Hidro Şekillendirme Ünitesi'nde bulunan teçhizatlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu teçhizatlar aşağıda tanıtılmıştır.

Çekme işlemi sırasında makineye verilen stampa yoluna bağlı basınç değişimi Şekil 4.11'de olduğu gibidir.

4.2.2. Hidro Mekanik Pres

Deneylerde 60 ton kapasiteli ve otomatik kontrollü hidro mekanik pres kullanılmış olup makinenin şematik resmi Şekil 4.13’de ve bazı teknik özellikleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.13. Hidro mekanik prese ait şematik çizim [24].

İş parçası taslaklarının hazırlanması için dairesel saç kesme makinesi kullanılmıştır, (Şekil 4.14). El tahrikli olan makine 87 mm - 300 mm çap aralığında parça kesimi gerçekleştirebilmektedir.

Çizelge 4.10. Kullanılan hidro mekanik prese ait teknik özellikler.

Baskı plakası kuvveti	60 ton
Stampa kuvveti	60 ton
Stampa stroğu	300 mm, 0,01 mm hassasiyetle kontrol edilebilir
Baskı plakası stroğu	300 mm
Stampa hızı	0-250 mm/dk, ± 6 mm/dk hassasiyetle ayarlanabilir
Tabla boyutu	760 mm x 1040 mm
Pres için gerekli güç	11 kW



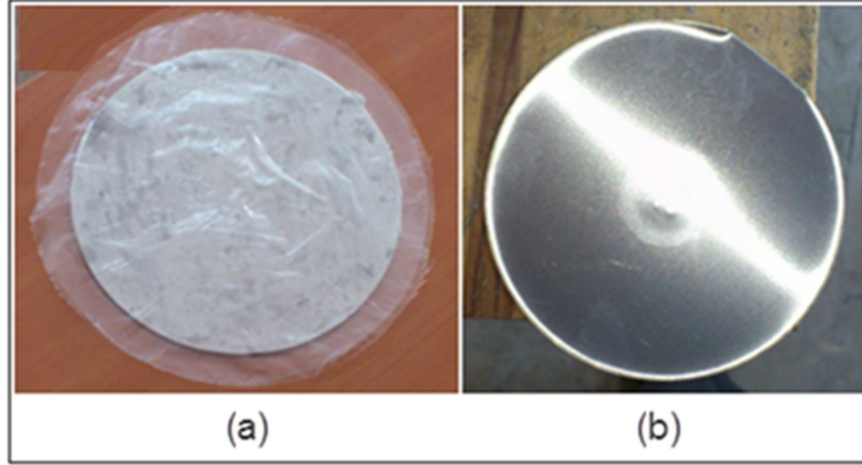
Şekil 4.14. Dairesel saç kesme makinesi.

4.2.3. Numunelerin Hazırlanması

Yapılan deneylerde 1 mm kalınlığında, 2 m x 1 m ebatlarındaki Al5754 sacdan kesilen malzemeler kullanılmıştır. Deneylerdeki parçaların altısının çapı 85 mm ve üçünün çapı ise 100 mm'dir. Parçalar dairesel saç kesme makinesinde kesildikten sonra, çevrelerinde var olan çapaklar eğe yardımıyla temizlenmiştir.

Hazırlanan dokuz adet parçanın altı adedinde malzeme yüzeyleri önce parafinle sıvanmış ardından polietilen malzeme ile kapatılmıştır. Hazırlanan parçaların son

hali Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Yağlayıcı kullanılmadan çekilen 3 adet parça çapak alma işleminden sonra herhangi bir ilave işleme tabii tutulmadan deneyler yapılmıştır.



Şekil 4.15. Numuneler a) Polietilen + parafin kaplanmış b) Yağlayıcısız.

4.2.4. Deney Ürünlerinin Ölçülmesi

Yağlayıcısız konvansiyonel derin çekme, yağlayıcılı konvansiyonel derin çekme işlemi ve hidro mekanik derin çekme işlemleri sonucunda ürünler elde edilmiştir. Bu ürünlerden yağlayıcısız konvansiyonel derin çekme işlemi ile elde edilenlerde yırtılma gözlemlenmiştir. Bu ürünlerde yırtılmanın gerçekleştiği stampa ilerleme miktarları kumpas yardımıyla ölçülmüştür. Yağlayıcılı konvansiyonel derin çekmede ve hidro mekanik derin çekme işlemleriyle elde edilen ürünler sorunsuzca çekilebilmiştir. Bu parçalarda gerçekleşen sac kalınlığı değişimlerinin tespit edilmesi amacıyla parçalar testere vasıtasıyla kesilmiştir. Kesitlerde belirlenen noktalardan mikrometre vasıtasıyla kalınlıklar okunmuştur.

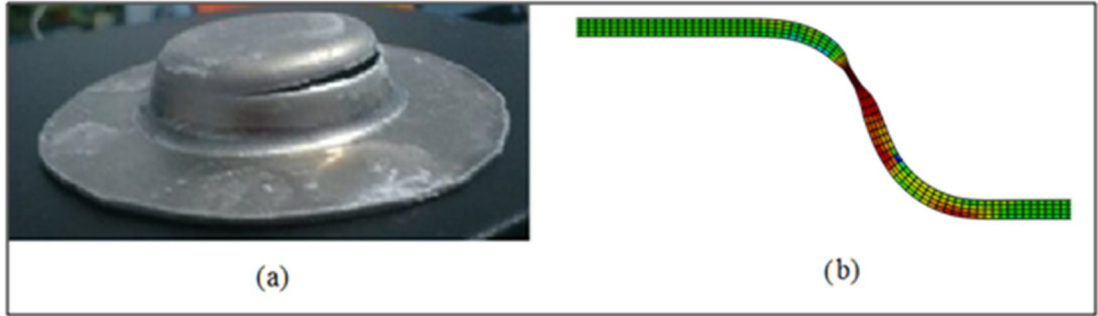
4.3. DEĞERLENDİRMELER

4.3.1. Konvansiyonel Derin Çekme İşlemine Ait Sonuç ve Değerlendirmeler

Konvansiyonel derin çekme işleminin simülasyonlarında elde edilen veriler deney verileri ile karşılaştırılacaktır.

Konvansiyonel derin çekme işlemi için gerçekleştirilen deneylerde yağlayıcı kullanılan parçalar sorunsuzca çekilirken yağlayıcı kullanılmayan parçalarda yırtılma gözlenmiştir.

Yağlayıcı kullanılmayan parçalarda ortaya çıkan bir yırtılma durumu Şekil 4.16'da ve yırtılmanın ortaya çıktığı andaki stampa konumları Çizelge 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.16. Yağlayıcısız konvansiyonel derin çekme durumu a) deney; b) simülasyon.

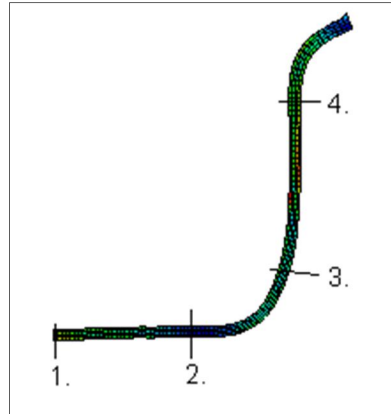
Çizelge 4.11. Yağlayıcısız konvansiyonel derin çekme işlemi deneylerinde yırtılma olduğu andaki stampa konumları.

Parça No	Yırtılma Oluştığı Andaki Stampa Konumu (mm)
1. Parça	12,8
2. Parça	11,4
3. Parça	11,1
Ortalama değer	11,8
Simülasyonlarda 9,78 mm stampa ilerlemesinde yırtılma oluştu.	

Yağlayıcı kullanılan parçalarda yırtılma olayı gözlenmemiştir. Ortaya çıkan kalınlık değişimleri deney parçalarında ölçülmüş ve simülasyonlarda elde edilen kalınlık değişimleriyle karşılaştırılmıştır. Kalınlık değişimlerinin ölçüldüğü noktalar Şekil 4.17'de verilmiştir. Ortaya çıkan kalınlık değişimleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Yağlayıcısız konvansiyonel derin çekme analizinde hasarın ortaya çıktığı anda simülasyonlarda elde edilen stampa derinliği deneylerde elde edilen stampa derinliklerinden daha küçük kalmaktadır. Simülasyondaki ortalama değerle hesaplanan hata oranı %17'ler civarındadır.

Yağlayıcılı konvansiyonel derin çekme analizinde hem deneyler hem de simülasyon hasar ortaya çıkmadan çekme işleminin sorunsuzca yapılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.17. Yağlayıcılı konvansiyonel derin çekme için kalınlık ölçüm noktaları.

Çizelge 4.12. Yağlayıcılı konvansiyonel derin çekme işleminde kalınlık değişimleri.

Numune Adı	1. Noktadaki Kalınlık	2. Noktadaki Kalınlık	3. Noktadaki Kalınlık	4. Noktadaki Kalınlık
4. Parça	1	1,04	0,87	1,12
5. Parça	1	1,03	0,94	1,23
6. Parça	0,98	0,99	1,03	1,33
Ortalama Değerler	0,99	1,02	0,95	1,23
Simülasyon	0,98	0,97	1,26	1,40

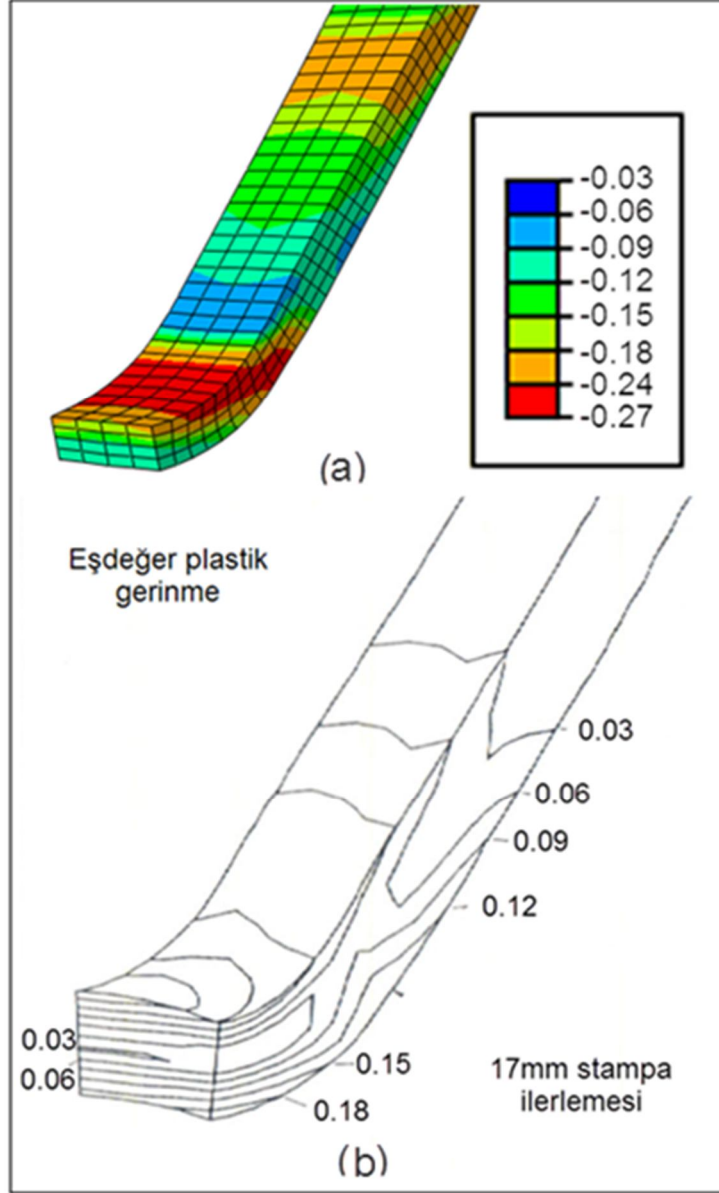
Ancak işlem sonunda iş parçasının çeşitli noktadaki kalınlıkları karşılaştırıldığında tabandaki kalınlık değişimlerinin uyduğu ancak yanda simülasyonla elde edilen kalınlıkların hata oranının %32'ler civarında olduğu gözlenmiştir. Bu analiz kalınlık değişimlerinin simülasyonla önceden tahminin zor olduğunu göstermektedir.

Bu hataların kullanılan sürtünme katsayısının tam bilinemesinden, analizde kullanılan sonlu elemanın cinsinden ağ örgüsünün yeterince yoğun olmamasından ve ölçü aletlerinin yetersizliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.3.2. V-Kalıpla Şekillendirme İşlemine Ait Sonuç ve Değerlendirmeler

V kalıpla şekillendirme işlemi için yapılan simülasyonlar K.Lange ve arkadaşlarının 1991 yılında yapmış oldukları çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır [25]. K.Lange ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sac şekillendirme işlemlerini sonlu eleman metodu kullanarak, bilgisayarla analiz etmişlerdir. Makalede bulunan sistemin aynısı modellenmiştir. Simülasyon ve literatürdeki eşdeğer plastik şekil değiştirmeleri incelenmiştir. Şekil 4.18’de simülasyondan elde edilen sonuç görüntüsü ve literatür çalışmasının sonuçları verilmiştir.

Literatür ve simülasyon değerleri karşılaştırıldığında simülasyondaki alansal dağılım olarak yakın olduğu fakat miktar olarak daha fazla eşdeğer plastik değişim meydana geldiği gözlemlenmektedir. Bu farklılıkların sistemin analizinde kullanılan işlem zamanının iyi tespit edilememesinden oluşabileceği düşünülmektedir.

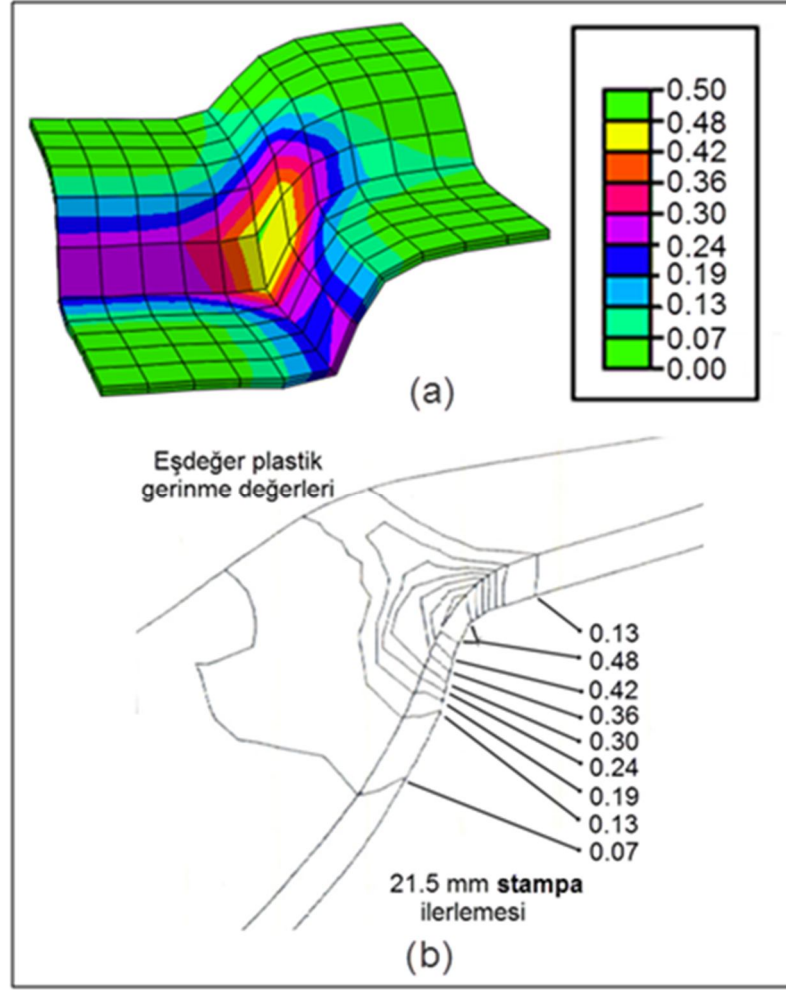


Şekil 4.18. V-kalıpla şekillendirme işlemi a) simülasyon, b) literatür [25].

4.3.3. Kare Kalıpla Derin Çekme İşlemine Ait Sonuç ve Değerlendirmeler

Kare kalıpla derin çekme işleminin simülasyonlarından elde edilen veriler literatürdeki veriler ile karşılaştırılacaktır. Faydalanılan literatür çalışmasında parça sekizde bir olarak modellenmiştir [26].

Kare kalıpla derin çekme işlemine ait simülasyon ve literatürdeki eşdeğer birim şekil değiştirme durumu Şekil 4.19’da verilmiştir.



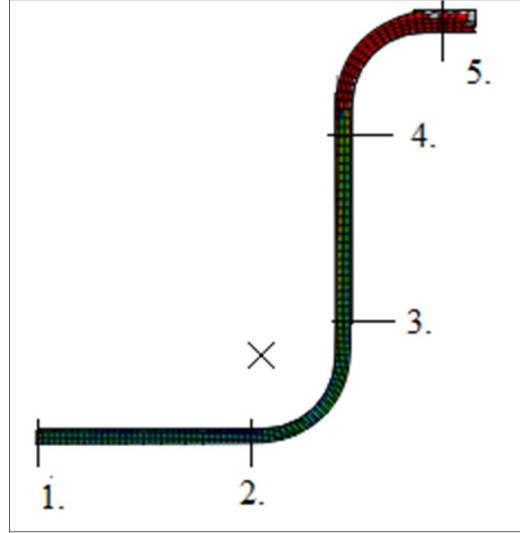
Şekil 4.19. Kare kalıpta derin çekme işlemi a) Simülasyon, b) Literatür [25].

Simülasyon ve literatür değerleri karşılaştırıldığında değerlerin biriyle uyduğu görülmektedir. Fakat gerinme alanlarında farklılık mevcuttur. Bu farklılığın simülasyonda kullanılan ağ örgüsünün yeterince yoğun olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.3.4. Hidro Mekanik Derin Çekme İşlemine Ait Sonuç ve Değerlendirmeler

Hidro mekanik derin çekme işlemine ait deneyler uygun stampa yolu-basınç eğrilerinin önceden simülasyonlarla elde edilmesi sonucu herhangi bir yırtılmaya maruz kalmadan başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Bu parçalarda da kalınlık değişimlerini karşılaştırabilmek için tespit edilen noktalar Şekil 4.20’de ve elde edilen kalınlık değişimleri de Çizelge 4.13’de verilmiştir. Burada da simülasyonlarda

elde edilen kalınlıklardaki hata oranları ölçmenin yapıldığı noktaya bağlı olarak %5 ile %32 arasında değişmektedir.



Şekil 4.20. Hidro mekanik derin çekme sonucu kalınlık okunacak olan noktalar.

Çizelge 4.13. Hidro mekanik derin çekme işleminde kalınlık değişimleri.

Numune Adı	1. Noktadaki Kalınlık	2. Noktadaki Kalınlık	3. Noktadaki Kalınlık	4. Noktadaki Kalınlık	5. Noktadaki Kalınlık
7. Parça	1,00	1,06	0,90	1,03	1,20
8. Parça	0,99	1,02	1,07	1,03	1,20
9. Parça	1,01	0,95	0,96	1,06	1,15
Ortalama Değerler	1,00	1,01	0,98	1,04	1,18
Simülasyon	0,95	0,91	1,25	1,38	1,31

Buradaki hataların da kullanılan sürtünme katsayısının tam bilinmemesinden, analizde kullanılan sonlu elemanın cinsinden ağ örgüsünün yeterince yoğun olmamasından ve kullanılan ölçü aletlerinin yetersizliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Bu çalışmanın sonunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Yapılan simülasyonlar bir sac şekillendirme işleminin başarılı ya da başarısız olacağını göstermektedir. Bu durum kalıp tasarımı açısından önemli bir sonuçtur, zira kalıp tasarımına hangi ölçülerden başlanması gerektiği hakkında bir ön fikir vermektedir.
- Deneyle ve simülasyonlarda elde edilen kalınlık dağılımı konusunda yüzde yüzlük bir uyum yoktur. Özellikle yan duvarlardaki kalınlık değişimlerinde %32 ye varan farklılıklar mevcuttur. Bu durum, simülasyonların deneylerin yerini tam olarak tutamayacağını göstermektedir.
- Simülasyonlarda elde edilen gerilme dağılımı kalitatif olarak literatürde verilen değerlerle benzerlik göstermesine rağmen sayısal olarak tam uyduğu söylenemez.

Deney sonuçlarına yakın simülasyonlar elde edebilmek için aşağıdaki hususların sağlanması gerektiği söylenebilir:

- Sonlu elemanlar ve malzeme mekaniği konusunda kapsamlı bir bilgi birikimi gereklidir. Bu konuda bilgi birikimi arttıkça başarı seviyesi artacaktır.
- Simülasyondan önce malzeme modellerinin ve sürtünme katsayılarının doğru olarak tespit edilmiş olması gerekmektedir.

- Elde edilen sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırırken deneylerde ölçülen değerlerin doğruluğundan emin olmak için donanımlı bir ölçme laboratuvarına sahip olunması gerekmektedir. Aksi takdirde hatalı ölçülen deney sonuçları yanlış kıyaslamalara sebep olacaktır.
- Sınırlı sayıda sonlu elemanla çalışabilen bir paket program yerine ticari bir paket programla çalışılmasının başarı oranını artıracaktır.

KAYNAKLAR

1. Pearce R, "Sheet Metal Forming", *The Adam Hilger Series on New Manufacturing Processes and Materials*, Bristol, Philadelphia and New York, USA, 1-6 (1990).
2. Woo, D.M. "Analysis of the cup drawing process", *Journal Mechanical Engineering Science*, 2 (6): 116-131 (1964).
3. Yu, T.X. and Johnson, W. "The buckling of annular plates in relation to the deep drawing process", *International Journal of Mechanical Science*, 3 (24): 175-188 (1982).
4. Senior, B.W., "Flange wrinkling in deep drawing operations", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 4: 235- 246 (1956).
5. Pourboghrat, F. and Chu, E., "Springback in plane strain stretch/draw sheet forming", *International Journal of Mechanical Science*, 3 (36): 327-341 (1995).
6. Larsen, B., "Hydro mechanic Forming of Sheet Metal, 1st Edition", *Sheet Metal Industries*, 162-166 (1977).
7. Yossifon, S. and Tirosh, J., "Rupture instability in hydroforming deep-drawing process", *International Journal of Mechanical Science*, 9 (27): 559-570 (1985).
8. Yossifon, S. and Tirosh, J., "Buckling prevention by lateral fluid pressure in deep-drawing", *International Journal of Mechanical Science*, 3 (27): 177-185 (1985).
9. Yossifon, S., Tirosh, J. and Kochavi, E., "On suppression of plastic buckling in hydroforming processes", *International Journal of Mechanical Science*, 6 (26): 389-402 (1984).
10. Chung, S.Y. and Swift, H.W. "Cup drawing from a flat blank: Part I. Experimental investigation", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 165: 199-228 (1951).

11. Logan, D. L., “A First Course in the Finite Element Method, 2nd Edition”, **PWS-KENT Publishing Company**, Boston, USA, 1-25 (1992).
12. Zienkiewicz, O.C., “The Finite Element Method, 3rd Edition”, **McGraw-Hill**, London, 78-105 (1977).
13. Zampaloni, M., Abedrobbo, N. and Pourboghraat, F., “Experimental and numerical study of stamp hydroforming of sheet metals”, **International Journal of Mechanical Science**, 45: 1815-1848 (2003).
14. Lang, L., Danckert, J. and Nielsen, K.B., “Investigation into the effect of pre-bulging during hydro mechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank”, **International Journal of Materials Processing Technology**, 44: 649-657 (2004).
15. Trevor Dutton, “Review of sheet metal forming simulation – progress to date, future developments”, **8th International LS-DYNA Users Conference**, Detroit, USA, 9: 1-10 (2004).
16. Z. Marciniyak, J. L. Ducan and S. J. Hu, “Mechanics of Sheet Metal Forming, 2nd Edition”, **Butterworth Heinemann**, London, England, 1-15 (2002).
17. S. H. Zhang, M. R. Jensen, K. B. Nielsen, J. Danckert, L. H. Lang and D. C. Kang, “Effect of anisotropy and prebulging on hydro mechanical deep drawing of mild steel cups”, **Journal of Materials Processing Technology**, 142: 544-550 (2003).
18. S. A. A. Akbari Mousavi, M. Riahi and A. Hagh Parast, “Experimental and numerical analyses of explosive free forming”, **Journal of Materials Processing Technology**, 187–188: 512–516 (2007).
19. V. Psyka, D. Rischa, B. L. Kinseyb, A. E. Tekkayaa and M. Kleinera, “Electromagnetic forming”, **Journal of Materials Processing Technology**, 211: 787–829 (2011).
20. Kalpakjian, S. and Schmid, S. R., “Manufacturing Engineering and Technology, 4th Edition”, **Prentice Hall**, NL, USA, 1-2 (2001).
21. W. Johnson and P. B. Mellor, “Engineering Plasticity”, **Ellis Horwood Limited**, London, England, 49-50 (1973).
22. İnternet: Abaqus, Inc., “Getting Started With Abaqus: Interactive Edition”, 3.1, **<http://abaqus.civil.uwa.edu.au/docs/abaqus/v6.7/books/gsa/default.htm>** (2012).

23. Turköz M. “Al2024 ve Al5754 Alaşımli alüminyum sacların şekillendirilebilme kabiliyetinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, 67-70 (2009).
24. Halkacı, H. S., ”Sac hidrolik şekillendirme deney ünitesi gerçekleştirildi” **Mühendis ve Makina**, 52 (615): 37-40 (2011).
25. Lange, K. Herrmann, M. Keck and P. Wilhelm, M. “Application of an elasto-plastic finite-element code to the simulation of metal forming processes” **Journal of Materials Processing Technology**, 27: 239-261 (1991).
26. Hosford, W. F. and Caddell, R. M., “Metal Forming Mechanics and Metallurgy, 3rd Edition”, **Cambridge**, UK, 211-215, 260-261 (2007).

EK AÇIKLAMALAR A.

MALZEME GİRDİLERİ

Çizelge Ek A.1. V kalıba ait malzeme girdisi.

Gerilme	Plastik Şekil Değişirme
210001260.3	0
213991335.3	0.005980994
233116309.5	0.008889922
275308650.8	0.018689006
290454601.6	0.023616883
314882837.1	0.033500558
325137496.2	0.038451726
334459597.2	0.043407335
343024752.9	0.048366549
350961683.5	0.053328754
358367782.4	0.058293487
365318667.4	0.063260387
371874319.8	0.06822917
378083184.6	0.073199604
383984997	0.0781715
389612786.5	0.083144701
394994329.9	0.088119075
400153227.8	0.093094508
405109715.9	0.098070906
478431601.5	0.197721754
527329127.1	0.297488909
565024210.4	0.397309409
596108699.9	0.497161387

Çizelge Ek A.2. Kare kalıba ait malzeme girdisi.

Gerilme	Plastik Şekil Değişirme
0	0
74150000	0
89420000	0.001119
90400000	0.007398
120300000	0.018855
150300000	0.035941
175800000	0.055643
200200000	0.081503
225000000	0.116357
250700000	0.175377
253400000	0.194139
232200000	0.198787

ÖZGEÇMİŞ

Abdullah UĞUR 1985 yılında Karabük'te doğdu; ilköğrenimini aynı şehirde tamamladı. Safranbolu Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2004 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2008 yılında mezun oldu. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Aynı yıl Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı ve halen bu göreve devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres :Emek Mah. Hilal Sit. F2/1 Safranbolu KARABÜK
Tel :0 505 3431175
E-posta :augur@karabuk.edu.tr