

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ZIMBA BOYUTLARININ, SABİT VE DEĞİŞKEN BASKI PLAKASI
KUVVETLERİNDE DERİN ÇEKİLEBİLİRLİĞE OLAN ETKİSİNİN
BELİRLENMESİ**

Çağatay ÇETİNKAYA

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİSAN 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ZIMBA BOYUTLARININ, SABİT VE DEĞİŞKEN BASKI
PLAKASI KUVVETLERİNDE DERİN ÇEKİLEBİLİRLİĞE OLAN ETKİSİNİN
BELİRLENMESİ**

Çağatay ÇETİNKAYA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİSAN 2023

ANTALYA

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

**ZIMBA EĞRİLİK YARIÇAPININ, SABİT VE DEĞİŞKEN BASKI PLAKASI
KUVVETLERİNDE DERİN ÇEKİLEBİLİRLİĞE OLAN ETKİSİNİN
BELİRLENMESİ**

**Çağatay ÇETİNKAYA
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**!!!! Bu tez
.....tarafından...
..... nolu proje ile desteklenmiştir!!!!**

NİSAN 2023

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZIMBA EĞRİLİK YARIÇAPININ, SABİT VE DEĞİŞKEN BASKI PLAKASI
KUVVETLERİNDE DERİN ÇEKİLEBİLİRLİĞE OLAN ETKİSİNİN
BELİRLENMESİ

Çağatay ÇETİNKAYA
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez/...../202..... tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr.Öğr.Üyesi Muhsin Gökhan GÜNAY (Danışman)

Prof. Dr.Hakan ERSOY

Doç. Dr.Ali Özhan AKYÜZ

ÖZET

ZIMBA EĞRİLİK YARIÇAPININ, SABİT VE DEĞİŞKEN BASKI PLAKASI KUVVETLERİNDE DERİN ÇEKİLEBİLİRLİĞE OLAN ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

Çağatay ÇETİNKAYA

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Muhsin Gökhan GÜNAY

HAZİRAN 2023; 105 sayfa

Zımbadaki mekanik hareket sayesinde sac metale kalıp şeklinin verilmesini sağlayan plastik deformasyon işlemi derin çekme olarak ifade edilmektedir. İşlem sayesinde düzlemsel geometriye sahip iki boyutlu iş parçasının çekme kalıbı olarak nitelendirilen elemanları ile preste çöktürme işleminin gerçekleşmesiyle birlikte derinliği ve profili olan üç boyutlu parçalar elde edilmektedir. Çekme işleminin rutin olarak yapılabilmesi çekme işlemini etkisi altına alan parametrelerin doğru ve uygun seçimi ile paralellik göstermektedir. Bu noktada önemli olan husus, malzemenin plastik şekil bozukluğu ardından kalıp şeklini alacak şekilde akmasının doğru bir şekilde kontrol edilmesinin sağlanması ile yakından ilişkilidir.

Bu çalışma kapsamında maliyeti oldukça yüksek olan derin çekme kalıplarının tasarımında, bilgisayarlar yardımıyla yapılan sayısal simülasyon işlemlerini kullanarak optimum zimba eğrilik yarıçapının elde edilmesi ve belirlenen yarıçapta, sabit ve değişken olarak uygulanan baskı plakası kuvvetinin etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda eksplisit sonlu elemanlar yaklaşımı ile bilgisayar ortamında simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlarının tutarlılığı teyit edilmiştir. Tasarıma girdi oluşturacak parametreler belirlenerek üretim aşamasında ortaya çıkabilecek problemlerin giderilmesi için bir öngörü oluşturulması amaçlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Zimba eğrilik yarıçapı, Değişken baskı plakası kuvveti, Derin çekme, Eksplisit sonlu elemanlar yöntemi, Kalıp tasarımı, Soğuk deformasyon.

JÜRİ: Dr. Öğr. Üyesi Muhsin Gökhan GÜNAY

Prof. Dr. Hakan ERSOY

Doç. Dr. Ali Özhan AKYÜZ

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE EFFECT OF STAPLE CURVE RADIUS ON DEEP DRAWNESS AT CONSTANT AND VARIABLE PRESSURE PLATE FORCES

Çağatay ÇETİNKAYA

MSc Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Assistant Professor Muhsin Gökhan GÜNAY

JUNE 2023; 105 pages

Deep drawing is a plastic deformation process that gives the shape of a sheet metal die with the mechanical action of the punch. By this process, three-dimensional parts with certain depth and profiles are obtained by collapsing the workpiece with two-dimensional, planar geometry into the press with elements called drawing dies. The quality of the deep drawing process depends on the correct and appropriate selection of the parameters affecting the drawing process. The important thing here is to accurately control the flow of the material to form into the die after plastic deformation.

In this study, it was investigated to obtain the optimum punch curvature radius by using numerical simulation processes with the aid of computers in the design of deep drawing dies, which are very costly, and also investigated fixed and variable blank holder force effect for same process. In this content, simulations were carried out in computer environment with the explicit finite element approach and the consistency of the results obtained was confirmed. It is aimed to create a prediction for solving problems that may arise during the production phase by determining the parameters that will create input to the design.

KEYWORDS: Deep drawing, Explicit finite element methods, Mold design, Plastic deformation, Punch radius, Variable blank holder force.

COMMITTEE: Dr. Öğr. Üyesi Muhsin Gökhan GÜNAY

Prof. Dr. Hakan ERSOY

Doç. Dr. Ali Özhan AKYÜZ

ÖNSÖZ

Bu tez çerçevesinde, sanayi odaklı sorunların bilimsel metodoloji ve teoremlerle nasıl sistematik bir çözüme ulaşılacağı üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca bu çalışmada günümüz üretim teknolojileriyle bir parça üretirken tasarım ve tasarım doğrulama çalışmalarının önemi ele alınmış, optimum ve doğru karar verme aşamasında günümüz mühendislik metotlarının büyük katkı sağladığı sonucu vurgulanmıştır. Tez çalışması boyunca yapılan bütün araştırmalar, matematiksel hesaplama yöntemleri ve sayısal doğrulama adımları büyük titizlikle ele alınmıştır. Çalışmanın önce kendim için sonrasında benzer problemlerin çalışılmasında ihtiyaç duyacak herkes için bir başucu kaynağı olması hedeflenmiştir. Özellikle mühendislik ve AR-GE çalışmalarında bilgisayar destekli sayısal analiz yöntemleri kritik önem taşımaktadır. Bu alanda ulusal bilgi birikiminin çok kısıtlı olduğunun görülmesi ve yapılacak benzer çalışmalara ilham yaratacağı temennisi faydalı bir çalışma yaptığımızın haklı gururunu yaşatacaktır.

Bu çalışma sürecinde değerli tecrübesi ve bilgi birikiminden yararlandığım danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Muhsin Gökhan GÜNAY tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Büyük destek gördüğüm ve her zaman yanımda olduklarını bildiğim aileme de sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Sac Metal Şekillendirme Üzerine Geleneksel Yaklaşım.....	1
1.2. Sac Metal Derin Çekme Üzerine Mühendislik Yaklaşımı	1
2. KAYNAK TARAMASI	5
2.1. Sac Malzemelerin Plastik Şekillendirme Teorisi	5
2.1.1. Metal Malzeme Testleri.....	6
2.1.1.1. Çekme Testi	6
2.1.1.2. Mühendislik ve Gerçek Gerilme-BŞD Eğrileri.....	8
2.1.1.3. Basma Testi.....	11
2.1.1.4. Bauschinger Etkisi	11
2.1.1.5. Histerezis Etkisi	12
2.1.1.6. Hidrostatik Basınç.....	13
2.1.2. Plastisite Teorisi Kabulleri	14
2.1.3. Tanjant ve Plastik Modülü.....	16
2.1.4. Sürtünme Blok Modeli	16
2.2. Derin Çekme ve Derin Çekmeyi Etkileyen Değişkenler.....	18
2.2.1. İşlem Değişkenleri	21
2.2.1.1. Çekme Hızı	22
2.2.1.2. Baskı Plakası Kuvveti	22
2.2.1.3. Kalıp Geometrisi	25
2.2.1.4. Yağlama	25
2.2.1.5. Çekme Boşluğu	27
2.2.2. Malzeme Değişkenleri	29
2.2.2.1. Pekleşme Üsteli.....	29
2.2.2.2. Birim Şekil Değiştirme Hızı Duyarlılığı Üsteli	31

2.2.2.3. Anizotropi Katsayısı	32
2.2.2.4. Akma Dayanımı	34
2.2.2.5. Sac Parça Geometrisi	35
2.2.2.6. Elastisite Modülü	36
2.2.2.7. Kalıntı Gerilmeler	37
2.2.2.8. Geri Yaylanma	37
2.2.2.9. Malzemenin Kimyasal Bileşeni	37
2.3. Sacların Derin Çekilmesinde Karşılaşılan Hatalar	38
2.3.1. Kulaklanma	39
2.3.2. Yüzey Pürüzlülüğü	40
2.3.3. Lüder Çizgileri	41
2.3.4. Buruşma	41
2.3.5. Çatlama	41
2.4. Şekillendirme Sınır Diyagramları (ŞSD)	41
3.1. Kalıp Tasarımı	47
3.1.1. Çekilecek Sacın Açınımının Hesaplanması	47
3.1.2. Çekme Yüksekliği	49
3.1.3. Zımba Yarıçapı	50
3.1.4. Matris Giriş Yarıçapı	51
3.1.5. Çekme Boşluğu	51
3.1.6. Çekme Hızı	52
3.1.7. Baskı Plakası Kuvveti	53
3.1.8. Çekme Kuvvetinin Hesaplanması	54
3.2. Çekme Sacının Teknik Özellikleri	55
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi	57
3.3.1. Kapalı (implisit) Yöntem	60
3.3.2. Açık (eksplisit) Yöntem	60
3.3.3. Kapalı (implisit) ve Açık (eksplisit) Yöntemin Karşılaştırılması	62
3.4. Derin Çekmenin Simülasyonu	63
3.4.1. Birim Sistemi	63
3.4.2. Adım1 Kalıp ve İş Parçacığı Mesh Modeli	64
3.4.3. Adım2 Kritik Zaman Adımının Belirlenmesi	66

3.4.4. Adım3 Eleman Tipinin Belirlenmesi.....	68
3.4.5. Adım4 Malzeme Modelinin Oluşturulması	71
3.4.6. Adım6 Parça Tanımlamalarının Yapılması	73
3.4.6. Adım7 Baskı Plakası Kuvveti Tanımlama	74
3.4.7. Adım8 Kalıp Hareketi Tanımlama	76
3.4.8. Adım9 Kontak Atamaları	77
3.4.9. Adım10 Çözüm ve Sonuç Değerlendirme.....	79
5. SONUÇLAR	98
6. KAYNAKLAR	100
7. EKLER.....	103
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Zımba Eğrilik Yarıçapının, Sabit Ve Değişken Baskı Plakası Kuvvetlerinde Derin Çekilebilirliğe Olan Etkisinin Belirlenmesi” isimli çalışmanın, akademik, ahlaki ve etik değerler çerçevesinde hazırlandığını belirtirken, bu tez çalışmasında şahsıma ait olmayan tüm bilgi ve verilerin kaynağının gösterildiğini beyan ederim.

27/03/2023

Çağatay ÇETİNKAYA

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

S	: Sac Malzeme Kalınlığı
B	: Çekme Oranı
σ_g	: Gerçek Gerilme
σ_y	: Akma Gerilmesi
σ_n	: Nominal (Mühendislik) Gerilmesi
ϵ^e	: Elastik Birim Şekil Değişimi
ϵ^p	: Plastik Birim Şekil Değişimi
E	: Elastisite Modülü
F	: Kuvvet
A	: Kesit Alanı
A_0	: Orijinal Kesit Alanı
l	: Mevcut Uzunluk
l_0	: Orijinal Uzunluk
e	: Mühendislik Birim Şekil Değişimi
H	: Plastik Modülü
K	: Tanjant Modülü
n	: Pekleşme Üsteli
m	: Deformasyon Hızı Duyarlılığı Üsteli
ϵ_w	: Genişlik Birim Şekil Değişimi
ϵ_t	: Kalınlık Birim Şekil Değişimi
r	: Unizotropi Katsayısı

Kısaltmalar

BPK : Baskı Plakası Kuvveti

SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi

ŞSD : Şekillendirme Sınır Diyagramları

BŞD : Birim Şekil Değişimi



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tek eksenli yükleme altında gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.....	8
Şekil 1.2. a) Mühendislik gerilme BŞD eğrisi; b) Gerçek gerilme BŞD eğrisi.....	10
Şekil 1.3. Bauschinger etkisi: (a) deneysel gözlem; (b) kinematik sertleşme modeli....	12
Şekil 1.4. Histerezis Etkisi.....	13
Şekil 1.5. Farklı maddesel davranışların reolojik modelleri (Jones 2009)	15
Şekil 1.6. Tanjant modülü (Kelly 2013)	16
Şekil 1.7. (a) Rijit mükemmel plastik sürtünme blok modeli; (b)Rijit mükemmel plastik model tepkisi (Kelly 2013).....	17
Şekil 1.8. Elastik mükemmel plastik malzeme için sürtünme blok modeli	17
Şekil 1.9. Doğrusal deformasyon şartleşmeli, doğrusal elasto plastik malzeme sürtünme modeli (a)Serbest gerilme; (b)Serbest BŞD; (c)Elastik ve plastik BŞD; (d)Boşaltma ..	18
Şekil 2.1. Derin çekme işlemi ve derin çekme elemanları (Behrens 2007).....	19
Şekil 2.2. Derin çekme işlem adımları (Özdilli 2018).....	20
Şekil 2.3. Çekme başlangıcında iş parçasının durumu, baskı plakası, zımba ve matris	21
Şekil 2.4. Çekme işlemi esnasında çekme sacına etki eden kuvvetler.....	21
Şekil 2.5. Baskı plakası kuvveti (T.C Milli Eğitim Bakanlığı 2006).....	24
Şekil 2.6. Baskı plakası kuvveti ve şekillenme derinliği ilişkisinin şematik gösterimi (Şen 2018).....	24
Şekil 2.7. Biçimlendirme sırasında deformasyon bölgesinin yağlamayla değişimi	26
Şekil 2.8. Çekme boşluğu (Esner 2006).....	28
Şekil 2.9. Pekleşme üsteli “n” değerinin hesaplanması (Özçelik 2008).....	30
Şekil 2.10. "n" değerinin kritik deformasyon miktarına etkisi (Esner 2006).....	30
Şekil 2.11. m'in belirlenmesinde kullanılan 2 metot (a) Farklı şekil değişim hızlarında elde edilen gerilme- birim şekil değişimi eğrileri; (b) Çekme testi sırasında şekil değişimi hızının değiştirilmesi (Şener 2012)	32
Şekil 2.12. Farklı birim şekil değiştirme hızı ile yapılan deneylerden m'nin tayini (Özçelik 2008).....	32
Şekil 2.13. Haddelenmeden çıkmış sac malzeme üzerindeki anizotropi yönlerinin gösterimi (Özer 2011)	33
Şekil 2.14.(a) Orta karbonlu çeliklerin gerilme BŞD eğrisi; (b)Düzgün akma gösteren bir malzemenin çekme diyagramında akma gerilmesinin bulunması (Esner 2006)	34
Şekil 2.15. Baskı plakası kuvveti ve şekillenme derinliği ilişkisinin şematik gösterimi (Özçelik 2008).....	35
Şekil 2.16. Farklı geometrilere sahip zımbalarla yapılan derin çekme işleminde iş parçasında meydana gelen kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması (Kara 2011)	36
Şekil 2.17. Derin çekme hataları (a)Flanş bölgesinde buruşma; (b)Flanşsız çekmede kenar buruşması; (c)Yırtılma; (d)Kulaklanma; (e)Lüder çizgileri oluşumu (T.C Milli Eğitim Bakanlığı 2006).....	38

Şekil 2.18. Saclarda dikey anizotropi parametresinin haddeleme doğrultusu ile değişimin kulak oluşumuna etkisi (Şener 2012)	40
Şekil 2.19. Şekillendirme sınır diyagramı (Emrah Uysal 2010).....	42
Şekil 2.20. Şekillendirme sınır diyagramı için kullanılan standart numuneler.....	43
Şekil 2.21. (a) Şekillendirme sınır diyagramı bölgeleri; (b) Şekillendirme sınır diyagramı için kullanılan test düzeneği (Aydoğan 2015)	43
Şekil 2.22. Şekillendirme öncesinde yüzeye uygulanan dairesel ağ görüntüsü ve deformasyon sonrasında bunların dönüştükleri elipslerin boyutları	45
Şekil 2.23. Şekillendirme sınır diyagramı deformasyon durum alanları	46
Şekil 3.1. Kalıp tasarımı ve parça boyutları.....	47
Şekil 3.2. Uzunluk ve ağırlık merkezi metodu ile ilkel çapın bulunması (Kara 2011)..	48
Şekil 3.3. Radyal simetrik parça için	49
Şekil 3.4. Taslak numune kesit resmi.	49
Şekil 3.5. Çekme boşluğu (T.C Milli Eğitim Bakanlığı 2006).....	52
Şekil 3.6. Çekme kuvveti faktör X_1 (Suchy 1998).....	54
Şekil 3.7. Çeşitli geometrik şekillerin elemanlara ayrılması (Aydoğan 2015).....	58
Şekil 3.8. Sonlu elemanlar analizindeki bazı eleman çeşitleri.....	59
Şekil 3.9. Eksplisit zaman integrasyon şeması (Gümrük 2006)	61
Şekil 3.10. Solidworks parametrik modelin hazırlanması.	64
Şekil 3.11. Ls-Dyna analiz modelinin sonlu elemanlara bölünmesi.....	65
Şekil 3.12. Sonlu ağ modeli kalite çizelgesi.	66
Şekil 3.13. Ls Dyna kütle ölçeklendirme.....	67
Şekil 3.14. Kabuk eleman kenar numaraları (Özçelik 2008).....	68
Şekil 3.15. Rijit parçalar için kabuk eleman kartı oluşturma.....	69
Şekil 3.16. İş parçası için kabuk eleman kartı oluşturma.	70
Şekil 3.17. İntegrasyon noktası gerilme durumu ilişkisi şematik gösterim (MÜLKOĞLU 2016).	70
Şekil 3.18. Shell eleman için kum saati oluşumu.	71
Şekil 3.19. Kalıp elemanların malzeme kartı tanımlanması.	71
Şekil 3.20. AISI 304 malzemeye ait gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	72
Şekil 3.21. İş parçası malzeme kartının tanımlanması.....	73
Şekil 3.22. Ls-Dyna Parça tanımlamalarının yapılması.	74
Şekil 3.23. Ls-PrePost kuvvet-zaman eğrisi tanımlama.	74
Şekil 3.24. Baskı plakası kuvveti için yük kartının tanımlanması.....	75
Şekil 3.25. Değişken baskı plakası kuvvet zaman eğrisi.	76
Şekil 3.26. Zimba hareket eğrisi tanımlama.	76
Şekil 3.27. Zimba hareket kartının tanımlanması.	77
Şekil 3.28. Parçalar arası kontak tanımlamalarının yapılması.....	78
Şekil 3.29. Şekillendirme sınır diagramı kartının tanımlanması.....	79
Şekil 3.30. Analiz çıktıları için veritabanı kartının tanımlanması.....	80

Şekil 3.31. Ls-Dyna analizin koşulması.	80
Şekil 3.32. Analiz Energy Ratio değerleri.	81
Şekil 4.1. Analizlerde kullanılan farklı zımba yarıçapları.	82
Şekil 4.2. Değişken zımba yarıçapı için efektif gerilim değerleri(a)R3; (b)R5; (c)R7; (d)R9; (e)R11; (f)R13; (g)R15.....	82
Şekil 4.3. Değişken zımba yarıçapı için yüzdesel kesit daralması(a)R3; (b)R5; (c)R7; (d)R9; (e)R11; (f)R13; (g)R15.....	83
Şekil 4.4. Farklı zımba yarıçapları için yüzde kesit daralması grafik.....	84
Şekil 4.5. Farklı zımba yarıçapları için birim şekil değişimi değerleri(a)R3; (b)R5; (c)R7; (d)R9; (e)R11; (f)R13; (g)R15.	85
Şekil 4.6. Farklı baskı plakası kuvvetleri altındaki birim şekil değişimi değeri.....	86
Şekil 4.7. Değişken baskı plakası kuvvetleri için maksimum düzlemsel gerilmeleri....	87
Şekil 4.8. Farklı Baskı plakası kuvvetleri için şekillendirme sınır diyagramları.....	88
Şekil 4.9. Değişken baskı plakası kuvveti.	89
Şekil 4.10. Değişken baskı plakası kuvvetlerinde Von-Mises yüzey gerilmeleri(a)Logaritmik artan; (b)Doğrusal artan; (c)Üstel artan.	90
Şekil 4.11. Değişken baskı plakası kuvvetleri için Von-Mises yüzey gerilmeleri.	91
Şekil 4.12. Logaritmik artan baskı plakası kuvveti için iş parçası kesit kalınlık değerleri.	92
Şekil 4.13. Doğrusal artan baskı plakası kuvveti için iş parçası kesit kalınlık değerleri.	92
Şekil 4.14. Üstel artan baskı plakası kuvveti için iş parçası kesit kalınlık değerleri.	93
Şekil 4.15. Kare ve silindir kesitli parçaların şekillendirilmesi.	94
Şekil 4.16. Kare ve silindir kesitli parçalara ait efektif gerilme değerleri.	94
Şekil 4.17. Kare kesit parça şekil değiştirme çizgileri ve BŞD.	95
Şekil 4.18. Kare ve silindir kesitli parçalar için % kesit incilmesi.....	96
Şekil 4.19. Parça kesitleri boyunca kalınlık değişimi grafik.	96
Şekil 4.20. Kare ve silindir kesitli parçalar için ŞSD.	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Ortalama çekme hızları (Esner 2006).	22
Çizelge 2.2. Çeşitli malzemeler için gerekli baskı plakası basınçları (Kemal 2006).	23
Çizelge 2.3. Derin çekme işleminde sıklıkla kullanılan yağlayıcılar.....	27
Çizelge 2.4. Çekme boşluğu değerleri (Gürün 2008).	28
Çizelge 2.5. Derin çekme işleminde karşılaşılan hatalar ve sebepleri.	38
Çizelge 3.1. Silindirik derin çekme parçası için gerekli olan "n" değeri	50
Çizelge 3.2. Analiz için zımba yarıçapı değerleri.....	51
Çizelge 3.3. Ortalama çekme hızının belirlenmesi (Esner 2006).	52
Çizelge 3.4. d/D oranına bağlı katsayı (Suchy 1998).	55
Çizelge 3.5. 304 Kalite paslanmaz çelik mekanik özellikleri.	56
Çizelge 3.6. Sıcaklıklara göre 304 Kalite paslanmaz çelik mekanik özelliklerinin değişimi.	56
Çizelge 3.7. 304 Kalite paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu.	57
Çizelge 3.8. İmpilisit ve ekspilisit yöntemler arasındaki farklar (Gümrük 2006).	63
Çizelge 3.9. Ls-Dyna'da kullanılan uyumlu birim sistemleri (MÜLKOĞLU 2016).	64

1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde kullanılan ürünler ele alındığında özellikle sac metal şekillendirme ve kalıpcılığın büyük önem teşkil eden üretim yöntemleri olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle otomotiv, beyaz eşya ve medikal sektörleri göz önüne alındığında sac metal kalıpcılığının üretim yöntemlerinde önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir. Konusu geçen sektörlerde Türkiye'nin de ihracat rakamlarına bakıldığında ciddi bir paya sahip olduğu yadsınmaz bir gerçektir. Bu açıdan değerlendirildiğinde bu alanda yapılacak her türlü teknik çalışmaların ülke ekonomisi için önemli girdiler yaratacağı aşikardır.

1.1. Sac Metal Şekillendirme Üzerine Geleneksel Yaklaşım

20. Yüzyılda artan ihtiyaçla beraber metalleri şekillendirme yöntemleri arasında en fazla gelişme kaydeden kol metalik sacları şekillendirme olarak göze çarpmaktadır. Çok eskiden el sanatları olarak icra edilen metallere şekil verme işlemi, gelişen teknolojinin de etkisiyle mekanik veya hidrolik presler yardımıyla yapılmaktadır.

Delme-kesme, çekme ve bükme işlemleri ardından saca arzu edilen şeklin verilmesi işlemi olarak ifade edilen sac metal kalıpcılığı, çekme, şekillendirme ve bükme gibi işlemler ile saca oluşturulan basma ve çekme gerilmeleri sonucunda sacın plastik olarak şekillendirmeye uğratılması ile meydana gelmektedir. Delme ve kesme işlemleri ise saca kopma dayanımı üzerinde uygulanan bir kuvvet ile istenilen profilde sacın ayrılmasını sağlamak olarak ifade edilmektedir (ÇAVUŞOĞLU 2013).

Düzlemsel sac metal malzemelerin soğuk şekil verme yöntemi ile yapılan şekillendirilme işlemlerinde hali hazırda iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi deneme yanılma ile ortaya çıkan tamamen tecrübeye dayalı tasarım yöntemidir. Bu yöntem sistematik tasarım yöntemlerinden uzak şahıs odaklı ve yüksek maliyetlidir. Bir diğer yöntem ise sonlu elemanlar yöntemine dayalı ticari yazılımlarla modellerin bilgisayar ortamında incelenmesine dayanmaktadır.

Sürekli gelişim gösteren teknoloji ile birlikte saca arzu edilen şeklin verilmesi amacıyla gerekli işlemler tespit edilerek çok sayıda benzetim programları içerisinde tasarım ve analizlerin gerçekleştirilmesi ile sacın plastik olarak şekillendirilmesine yönelik nasıl bir eğilim gösterdiğinin tahmin edilmeye çalışıldığı görülmektedir. Gerçekleştirilen analizler, sac üzerinde ortaya çıkacak inceme, kırılma, yırtılma ve geri esneme gibi bölgelerin belirlenebildiği sonucuna ulaşılmıştır. Böylelikle sacın davranışına ilişkin bilgilere kalıp tasarımı aşamasında ulaşılarak tasarım bölümünde gerekli değişimlerin yapılması sağlanmaktadır. Sac şekillendirme analizi yapan benzetim programları aracılığı ile tasarım değişikliklerinin kalıp imalatından önce yapılması mümkün hale getirilmektedir (ÇAVUŞOĞLU 2013).

1.2. Sac Metal Derin Çekme Üzerine Mühendislik Yaklaşımı

Günümüzde giderek yoğunlaşan rekabet ortamı ile birlikte sanayi imalatçıların da piyasada yer edinebilmesi için ürünlerini kaliteli hale getirmesi gerekirken uygun maliyetler ile çok daha kısa zamanda ürün üretmeleri oldukça önemlidir. Bir ürünü etkileyen tüm faktörlerin bilinmesi ve bu faktörlerin birbiri ile koordinasyonunun ürün

üzerindeki etkisinin kontrol edilmesi ile kalite elde edilmektedir. Kontrol sistemleri içerisinde en iyisinin üretim aşamasında parçayı etkileyen tüm unsurların ayrı ayrı ele alınması sonucunda ortaya çıktığı belirtilmektedir. Böylelikle sonuçların daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi mümkün hale gelmektedir. Ürünün kalitesini etkileyen tüm unsurların eş zamanlı olarak uygulanması zaman ve maliyet kaybını da beraberinde getirmektedir. Bu olumsuzlukları bertaraf edebilmek amacıyla deney tasarım yöntemlerinin uygulamaya dökülmesi oldukça önemlidir. Bu yöntem aracılığı ile ürün kalitesini etkileyen etkileşim unsurlarının optimizasyonu sağlanabilirken kontrol altına alınması mümkün olmayan unsurların da üretim yönteminin geliştirilmesi ile minimum seviyeye düşürülmesi mümkün hale gelmektedir (Yıldız 2017).

Metal şekillendirme işlemleri içerisinde en çok problem ile karşılaşılan işlemin derin çekme olduğu belirtilmektedir. Plastik şekillendir işlemlerine yönelik hazırlanan bazı tablolar, ampirik metotlar ile düzenlendiği için sadece deney malzemesinin kullanıldığı uygulamalarda yardımcı olmakta ve malzemenin iki boyutta aktığı kabul edilerek meydana getirilmektedir. Kompleks yapıda geometri içeren parçaların soğuk olarak şekillendirilmesinde bu verilerin yetersiz kaldığı dikkat çekerken bu yüzeylere sahip her parçaya yönelik deneme ve yanılmaların çok sayıda yapılarak sonuca ulaşılmaya çalışıldığı belirtilmektedir. Sac üzerinde ortaya çıkan buruşmaların, pot çemberlerine açılan kilit bölgeler ile önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Kilitlerin yerleri ve miktarları da denemeler ile belirlenirken aynı zamanda kalıplar üzerinde gerçekleştirilen kaynak işlemleri ile kalıp içerisinde kalıcı iç gerilmeler oluşturulmaktadır. Bu durum kalıpların ömrünü kısaltırken işlemlerin tamamı üretim maliyetlerini de yükseltmektedir (Yıldız & Kırılı 2004).

Düzlemsel sac plakalar üzerinde yapılan derin çekme yönteminde, iş parçasından istenilen nihai şeklin elde edilmesi için malzeme yüksek gerilim ve birim şekil değişimi değerlerine maruz kalır. Birçok durumda bu soğuk şekil verme prosesi esnasında malzemede lokal incelmeler ve yırtılma gibi deformasyonlar meydana gelebilir. Bu tarz istenilmeyen durumlarla karşılaşmamak için şekillendirilecek iş parçası ve derin çekme kalıplarındaki; malzeme kalınlığı, kalıp boşluğu, sıcaklık, poisson oranı, kalıp geometrisi yüzey kalitesi gibi pek çok girdinin iyi irdelenmesi gerekir.

Kalıp ve zımbaya dair geometriler, konfigürasyonlar, kalıp mamul boşlukları ve baskı plakası basıncı süzdürme uygulamaları gibi değişkenler sac şekillendirme işlemlerine etki eden önemli unsurlar arasında yer alırken bu faktörlerin zaman içerisinde şekillendirme işlemlerinin sınırlarını çizmede önemli rol oynadığı ifade edilmektedir. Bu parametreler arasında yer alan zımba geometrisinin köşe bölgesel şekil değişimlerinde aktif rol üstlenmeleri büyük önem teşkil etmektedir. Baskı plakası basıncının da şekillendirme esnasında germe ve derin çekme miktarlarına etki ettiği görülmektedir. Plaka basıncında meydana gelen artış, derin çekmeye kıyasla germe şekil değişimlerini artırmada önemli rol oynamaktadır. Plaka basıncında gözlemlenen düşüklük, flanş bölgesinde üretim hataların görülmesine yol açacaktır. Şekillendirme sürecinde metal akışı, metal ve zımba kalıp grubu arasında yer alan sürtünme kuvvetlerince kontrol altına alınmaktadır. Dolayısıyla mekanik preslerde kontrol mekanizmalarındaki bu tarz zayıflıklardan dolayı üretime olan etkilerinin tayini önemlidir. Çalışma kapsamında baskı plakasındaki kuvvetlerin sabit yada değişken olması durumlarının kendi içindeki etkileri araştırılacak. Ek olarak farklı zımba yarıçaplarında iş parçası bu değişkenlerden nasıl etkilenecek bunun üzerine bilimsel bir yorum getirilecektir.

Kalıpların simülasyon işlemlerinde yapılan tek basamaktan oluşan sac açınım yöntemlerinde, şekillendirilecek iş parçası için sonlu elemanlar yardımı ile geometri verileri işlenir. Bu geometriden her düğüm noktası için yer değiştirme verileri işlenir. Elde edilen yer değiştirme ve gerilim verilerine göre parça üzerinde kritik bölgeler gözden geçirilir. Bu yöntem hiçbir non-linear hesaplama içermediğinden hızlı sonuç vermesine rağmen kalıp sistemindeki diğer elemanlar kullanılmaz. Bu nedenle sonuncun güvenilirliği ve tutarlılığı eksplisit yöntemlere göre zayıf kalmaktadır. Bu tez çalışmasında şekillendirilecek iş parçası için eksplisit sonlu elemanlar yardımı ile incelenecektir.

Ekspilist analizler içerisinde çok sayıda farklı malzeme tiplerinden bahsetmek mümkündür. Hemen hemen doğada bulunan her uygulama içerisinde yer alan malzemeler sonlu eleman analizlerinde modellenmektedir. Bu çalışmanın araştırma aşamasında çok sayıda farklı sonlu elemanların yazılımlarına ilişkin malzeme tanımlamaları ele alınmıştır. Genel anlamda paket programların benzer malzeme kütüphanelerine sahip olduğunu söylemek mümkündür. Çalışma içerisinde ANSYS/LS-DYNA yazılımlarının içeriğinde yer alan malzeme modelleri incelenmiştir. Bu yazılımın malzeme tanımlarının çok değişken olduğunu söylemek mümkünken direkt olarak deney verilerinin kullanımı ile tanımlamaların yapılabildiği dikkat çekmektedir.

Malzeme modellerinin birçoğu yoğunluk, elastisite modülü, poisson oranı ile birlikte gerilme-birim deformasyon tabloları, yük eğrileri, akma limiti ve plastik deformasyona ilişkin tabloları barındırmaktadır. Bu veriler, malzeme tanımından önce vektör, matris veya eğri denklemi şeklinde yazılıma tanıtılmaktadır (Yıldız & Kırılı 2004).

Çalışmada, sonlu elemanlar yönteminin bir alt başlığı olarak kabul edilen ekspilist dinamik analiz yöntemi tercih edilmiştir. Çok sayıda sonlu elemanlar çözüm yöntemlerinden çok daha hızlı bir şekilde çözüme ulaşan ekspilist yöntem, bu sayede çok fazla eleman sayısına sahip ve zaman basamağı sık lineer olmayan problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır. Sonuçların tutarlı olması analize başlangıç aşamasındaki kabullerin doğru belirlenmesine bağlı olsa da gerilmeden ziyade yer değiştirme sonuçları istenen çarpışma dinamiği, plastik veya hiper elastik malzeme davranışlarını incelenmesi, soğuk şekillendirme, inşaat mühendisliğindeki yıkılma, yapısal temas veya kopma gibi birçok problemin simülasyonunda sıklıkla tercih edilir.

Yüksek enerjili dinamik olaylarda; otomobil çarpışması, uçak kanatlarına kuş çarpması, plastik şekil değiştirme, patlatma yüklerine maruz kalma gibi ekspilist dinamik simülasyonlar olası hasarları öngörmekte ve engellemekte kullanılmaktadır. Bu dinamik simülasyon yöntemlerinden faydalanarak; yüksek maliyetli ve zaman alan derin sıvama kalıp tasarımı için gereken işgücünü azaltıp, analitik olarak çözümü çok zor olan mühendislik hesaplamalarını da gerçekleştirerek tasarım iyileştirme, optimizasyon ve prototip sayısını minimize etmek gibi faydalar sağlanabilmektedir.

Tez çalışması kapsamında ulaşılmak istenen nihai sonuç; herhangi bir tasarım parçasının derin çekme işlemiyle elde edilmesi aşamasında, değişken baskı plakası kuvvetlerinin etkisi ve zimba yarı çapının tasarım parçası üzerinde yaratacağı etkiyi tahmin etmek olacaktır. Buradaki hedef doğru matematiksel yöntemlere dayalı yapılan bir kalıp tasarımıdaki, baskı plakası ve zimba yarıçapındaki değişkenliklerin yarattığı

etkinin önceden tahmin edilmesi olacaktır. Bilgisayar destekli sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılan hesaplamalarda yöntem ve aşamaların neler olacağı, doğru ve güvenilir sonuç elde etmek için neler yapılması gerektiği tezdin elde edilmek istenen diğer çıktılar arsındadır.



2. KAYNAK TARAMASI

Çalışmanın bu bölümünde sac metal şekillendirme üzerine literatür araştırmaları yapılmıştır. Plastisite teorisi , derin çekilebilirliği etkileyen değişkenler ve derin çekmede karşılaşılan hata türlerine değinilmiştir.

2.1. Sac Malzemelerin Plastik Şekillendirme Teorisi

Doğrusal elastikiyet teorisi, çok küçük deformasyonlara neden olan ve yükün kaldırılmasından sonra orijinal konfigürasyonlarına geri dönen materyalleri modellemek için kullanışlıdır. Neredeyse tüm malzemeler, yükün kaldırılmasından sonra kalan bazı kalıcı deformasyona uğrayacaktır. Metallerde kalıcı deformasyonlar genellikle gerilme, bir malzeme özelliği olan akma gerilimi denen kritik bir değere ulaştığında meydana gelir (Kelly 2013).

Elastik deformasyonlar tersinir olarak adlandırılır; deformasyonda harcanan enerji elastik gerilme enerjisi olarak depolanır ve yük kaldırıldığında tamamen geri kazanılır. Kalıcı deformasyonlar, enerjinin dağılmasını içerir; bu durum ancak daha fazla enerji harcanmasıyla elde edilebileceği için geri döndürülemez olarak adlandırılır (Kelly 2013).

Malzemelerin kırılma noktasına kadar olan deformasyon davranışları göz önüne alındığında sünek, gevrek ve plastik olmak üzere üç gruba ayrıldığı görülmektedir. Nesnelerin mekanik özelliklerine bakıldığında çoğu özelliğin teoride yer almadığı dikkat çekerken, bu nedenle, birçok özelliğin deneylerle belirlendiğini söylemek mümkündür. Testler statik ve dinamik olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Ek olarak, testler tek eksenli veya çok eksenli olarak gruplandırılabilir. Tek eksenli yük testi tekniği basittir ve elde edilen sonuçlar genelleştirilebilir. Bununla birlikte, çok eksenli yüklemenin sonuçlarını genelleştirmek zordur. Bu nedenle, çok eksenli gerilim durumunda birkaç test yapmak gerekir.

Kuvvet şekil değiştirme ilişkisine bakıldığında, gerilmeler ilk olarak elastik ve elastik olmayan deformasyon olarak ikiye ayrılmaktadır. Elastik deformasyonlarda; bir nesnenin atomlarını ve moleküllerini bir arada tutan kimyasal bağlar, kırılır kırılmaz uzamaktadır. Kuvvet kaldırıldığında hemen eski haline döner ve zamandan bağımsızdır. Elastik olmayan deformasyonlarda; kristal düzlemlerin veya zincir moleküllerin kayması sonucunda, vücudun atomları birbirine göre hareket etmektedir. Kalıcı deformasyonlar olan elastik olmayan deformasyonlarda zamandan bağımsız deformasyonlara plastik deformasyon denmektedir.

Gerilme şekil değiştirme ilişkisi ele alındığında ise bünye denklemleri ortaya çıkmaktadır. Bu ilişkiler cisimden cisme değişiklik gösterirken deney yolu ile elde edilen bu bağlantıların uygulama sürecinde idealleştirilerek kullanıldığı görülmektedir. İdealleştirme sonucunda çok sayıda ideal cisimlerin meydana geldiği dikkat çekerken sayısal yöntemler ve bilgisayar kullanımı ile gerilme şekil değiştirme diyagramı deney aracılığı ile elde edildiği biçimde kullanılabilmektedir.

Şekil değiştirmelere ilişkin çok daha faydalı analizler ve yorumlamalar yapabilmek için yay, amortisör gibi modelleme aletlerinin ve bu aletlere ait kombinezonların kullanılması oldukça mühimdir. Bu aletler ya da aletlerin kombinezonları ile birlikte gerçekleştirilen modellere reolojik model ismi verilmektedir.

2.1.1. Metal Malzeme Testleri

Bu bölüm bir başlangıç noktası olarak kabul edilmektedir. Plastik şekilde deformasyona uğrayan metaller üzerinde çeşitli temel deneysel gözlemlere değinirken, bu gözlemler doğrultusunda plastik olarak deforme olan malzemelerin temel davranışlarına ilişkin kavramların açıklandığı görülmektedir.

2.1.1.1. Çekme Testi

Malzemelere ilişkin mukavemet ile ilgili asıl olan tasarıma ilişkin bilgilerin belirlenmesi ve malzemelerin niteliklerine dair sınıflandırma yapılabilmesi amacıyla çekme testi yapılmaktadır. Önceden belirlenmiş standartlara yönelik hazırlanan çekme deneyleri, deneye ait numuneye ilişkin tek ekseninde belirli bir çekme hızında ve sabit sıcaklıkta koparılmasıyla birlikte çekilmesi sonucunda oluşmaktadır. Deney esnasında standartlara bağlı olarak hazırlanan çekme numunesi üzerinde gerçekleştirilen kuvvet veya gerilme ile ortaya çıkan uzama değerleri kaydedilirken çekme deneyi neticesinde numune tarafından temsil edilen malzemeye ilişkin aşağıda yer alan mekanik özelliklerin belirlenmesi mümkün hale gelmektedir.

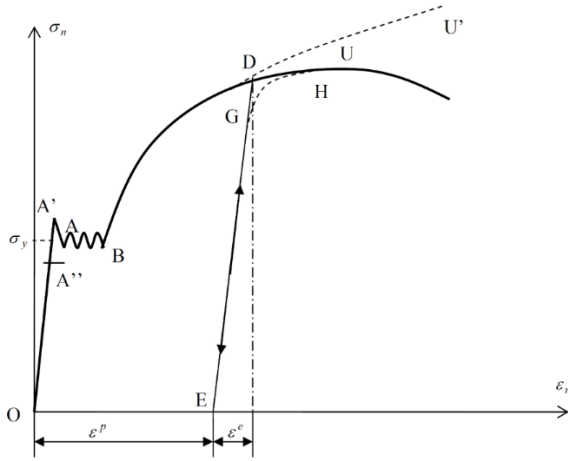
- Akış gerilmesi
- Çekme gerilmesi
- Kopuş uzaması
- Kesitte daralma
- Tokluk
- Elastisite modülü
- Rezilyans

Yumuşak çeliğe ilişkin tipik bir $\sigma-\epsilon$ eğrisi aşağıda yer alan Şekil 1.1 de sunulmuştur. Gerilme seviyesinin A'' ne ulaşmasına kadar geçen süre içerisindeki ilk evrede gerilim ve birim şekil değiştirme arasındaki ilişkinin lineer olduğu gözlemlenirken, A'' noktası orantı sınırı olarak adlandırılmaktadır. Diyagram üzerinde yer alan OA'' kısmı Hooke yasası ile temsil etme özelliği taşıırken elastisite teorisinin zeminini hazırlamaktadır. Bu doğrultuda, BŞD'de üzerinde gözlemlenen artış, gerilme üzerindeki artış ile lineer bir bağlantı içinde olmamakla birlikte deformasyon burada hala elastik bölge içerisinde yer almaktadır. Bu yöntem, malzemede üst akma noktası olarak ifade edilen A' noktasına ulaşınca kadar geçerli olmakla birlikte akabinde artış gösteren BŞD hızlarında ve gerilme seviyesinin birkaç osilasyonu tarafından takip edilen küçük lokal azalmalar meydana gelmektedir. Bu durum b noktasına kadar bir plato oluşumunu desteklerken AB bölgesi plastik davranışın muazzamlığı ile bilinmektedir. Gerilme

osilasyonlarının alt sınırı veya A noktası ile belirtilen ya da en küçük akma noktası olarak tanımlanan nokta çoğunlukla elastik sınır veya akma gerilmesi σ_Y olarak seçilmiştir. Gerilmenin B noktasında devam eden artışı sonucunda malzemelerin sertleştiği ve gerilmenin azami seviyede olduğu U noktasına ulaşıncaya kadar devam ettiği görülmektedir. Akabinde kararsız davranış olarak nitelendirilen BŞD'deki artış, gerilimin azalmasında rol oynamaktadır. BU bölgesi “work hardening”, “material hardening”, “şekil değiştirme sertleşmesi” veya “pekleşme” gibi isimlerle tanımlanmaktadır ve bütün ABU bölgesi içerisinde malzemelerin plastik şekilde deformasyona uğradığı görülmektedir. Bu bölgede örnek vermek gerekirse D noktasında bulunan malzeme üzerindeki yükün kaldırılması ile malzemenin başlangıç durumundaki elastik yükleme yörüngesi olarak nitelendirilen OA' ne paralel bir yol izleyerek DE yörüngesi boyunca geri dönmesi beklenmektedir. Böylelikle BŞD'nin yalnızca elastik BŞD ϵ^e olarak nitelendirilen bölümü geri dönecektir. Geri kalan BŞD kısımlarının ise kalıcı olarak BŞD veya plastik BŞD ϵ^p şekilde varlıklarını sürdürdükleri görülecektir. Plastik bölgeye geçilmesi ile birlikte toplam BŞD'nin iki bölümden meydana geldiğini söylemek mümkündür:

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (2.1)$$

E noktası itibariyle tekrar yapılan yüklemeler, malzemenin Hooke yasası ile tanımlanan elastik boşalma çizgisi olarak nitelendirilen EG boyunca olacağı bilinmektedir. G noktasında malzemenin yeniden bir akma noktası gösterdiği gözlemlenirken plastik şekil bozukluğunun tekrar başlaması beklenmektedir. H noktası ardından bir yükleme veya boşaltma eyleminin gerçekleşmemesi durumunda deformasyonun HU yörüngesi çerçevesinde devam etmesi kaçınılmazdır. Burada A noktasının akma başlangıcını gösterdiği ifade edilirken g noktasının ardışık akma noktası olarak nitelendirildiği belirtilmektedir. Gerçek malzemeler göz önünde bulundurulduğunda ikinci akma noktasının devamlı olarak D noktasının alt tarafında yer aldığı gözlemlenirken G den H noktasına doğru olan bir geçiş bölgesinin bulunduğu görülmektedir. H noktasının boşaltma eylemi gerçekleştirilmeksizin tek eksenli gerilme-birim deformasyon eğrisinin üzerinde bulunduğu bilinmektedir.



Şekil 1. 1. Tek eksenli yükleme altında gerilme-birim şekil değişimi eğrisi (Kelly 2013)

Alüminyum, bakır ve paslanmaz çelik gibi bazı metaller gösterildiği gibi keskin bir katılaşma noktası göstermemekle birlikte bu malzemelerin akışı, doğrusal elastik davranıştan doğrusal olmayan plastik davranışa yumuşak ve kademeli bir geçiştir. Bazen bu geçiş bölgesinde akışın nerede meydana geldiğini belirlemek gerçekten zordur. Bu tür durumlarda, genellikle boşaltmadan sonra bir miktar plastik deformasyonun kaldığı (örneğin, yaklaşık %2) nominal akma dayanımı kullanılır. Bu tür malzemenin performansını aşan plastik bölgedeki diğer yükleme ve boşaltma davranışları, Şekil 1.1'de gösterilen yumuşak çelik malzemelere benzer.

2.1.1.2. Mühendislik ve Gerçek Gerilme-BŞD Eğrileri

Bir gerilim testinde etki eden F kuvvetini tanımlamanın iki farklı yolu vardır. İlk olarak test numunesini orijinal kesit alanına göre normalize ederek nominal veya mühendislik gerilimini buluruz,

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \quad (2.2)$$

Alternatif olarak, F ve A 'nın her ikisinin de zamanla değiştiği, orijinal kesit alanına göre normalize ederek gerçek gerilim değerini elde ederiz.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

Elastik alan içerisinde kalan küçük uzamalar için, malzemenin kesit alanı çok küçük bir değişime uğrar buda ihmal edilebilir bir büyüklük olduğu için gerçek ve mühendislik gerilim değerleri yaklaşık eşdeğer olur. Benzer şekilde BŞD değerleri de iki alternatif yolla açıklanabilir. Orijinal numune uzunluğu l_0 ve mevcut uzunluk l ile tanımlanan mühendislik BŞD değeri,

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.4)$$

Alternatif olarak, gerçek BŞD orijinal uzunluğun sürekli değiştiği gerçeğine dayanır; uzunluktaki küçük değişiklikler dl BŞD’de artışa yol açar $d\varepsilon = dl / l$ ve toplam BŞD bu artışların birikimi olarak tanımlanır:

$$\varepsilon_t = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2.5)$$

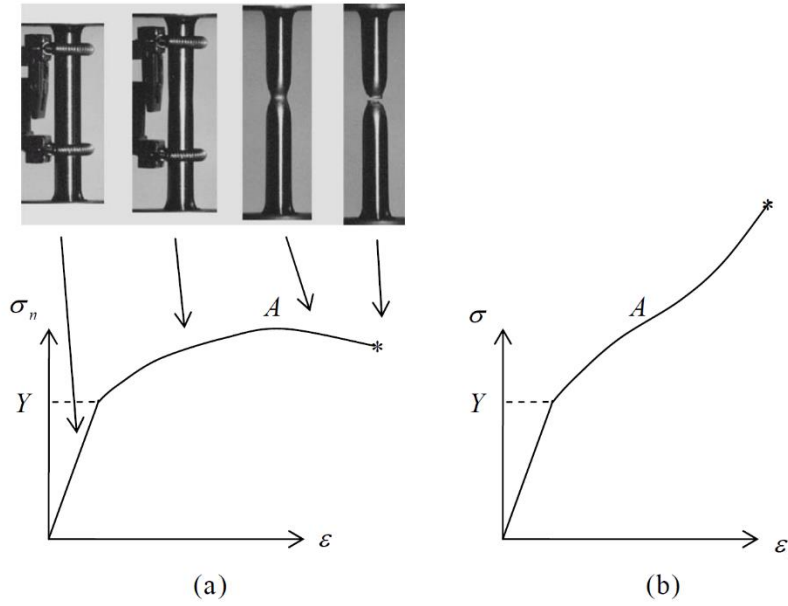
Gerçek BŞD aynı zamanda logaritmik BŞD yada Hencky BŞD olarak tanımlanır. Tekrar etmek gerekirse bu küçük deformasyonlarda gerçek ve mühendislik BŞD değerinin ihmal edilebilir olduğunu söyleyebiliriz. Gerçek BŞD ve mühendislik BŞD arasındaki ilişki şu şekilde açıklayabilir:

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.6)$$

Plastik deformasyon için sabit hacim varsayımını kullanarak ve çok küçük elastik hacim değişikliklerini göz ardı ederek gerçek gerilim ve mühendislik gerilimi arasındaki ilişkiyi de şu şekilde tanımlayabiliriz:

$$\sigma = \sigma_n \frac{l}{l_0} \quad (2.7)$$

Metallerin mühendislik ve gerçek eğrileri Şekil 1.2a ve şekil 1.2b’de de şematik olarak verilmiştir. Malzemelerin gerçek ve mühendislik BŞD değerleri karşılaştırılacak olursa, plastik dengesizliğin olduğu boyun verme noktasına kadar, artan şekil değişimi ile bunların arasındaki farkın açıldığı ve mühendislik değerlerinin çok büyüdüğü görülmektedir (Kelly 2013).



Şekil 1. 2. a) Mühendislik gerilme BŞD eğrisi; b) Gerçek gerilme BŞD eğrisi (Kelly 2013)

Ayrıca her iki değer arasındaki farkı vurgulayan aşağıdaki çarpıcı örneğe dikkat etmek yerinde olacaktır. Başlangıç boyu 100mm olan bir parçanın önce çekilerek 200mm'ye uzatıldığı, daha sonra bunun basılarak 100mm'ye indirildiği varsayılacak olursa, bu işlemlerin sonunda parçanın boyu değişmediği için toplam birim değişiminin sıfıra eşit olması gerekecektir. Ancak toplam şekilde değişimi için yapılan hesaplarda farklı kriterlerin esas alınması durumunda şu sonuçlar elde edilir:

Mühendislik değerleri kullanıldığında birim şekil değişimleri;

$$\text{Çekme sırasında, } e_1 = \frac{200 - 100}{100} = 1 \quad (2.8)$$

$$\text{Basma sırasında, } e_2 = \frac{100 - 200}{200} = -0,5 \quad (2.9)$$

Olacağından toplam mühendislik birim şekil değişimi $e_{top} = e_1 + e_2 = 1,0 - 0,5 = 0,5$ olarak bulunur.

Gerçek değerler kullanıldığında birim şekil değişimleri;

$$\text{Çekme sırasında, } \varepsilon_1 = \ln \frac{200}{100} = \ln 2 \quad (2.10)$$

$$\text{Basma sırasında, } \varepsilon_2 = \ln \frac{100}{200} = \ln 0,5 = -\ln 2 \quad (2.11)$$

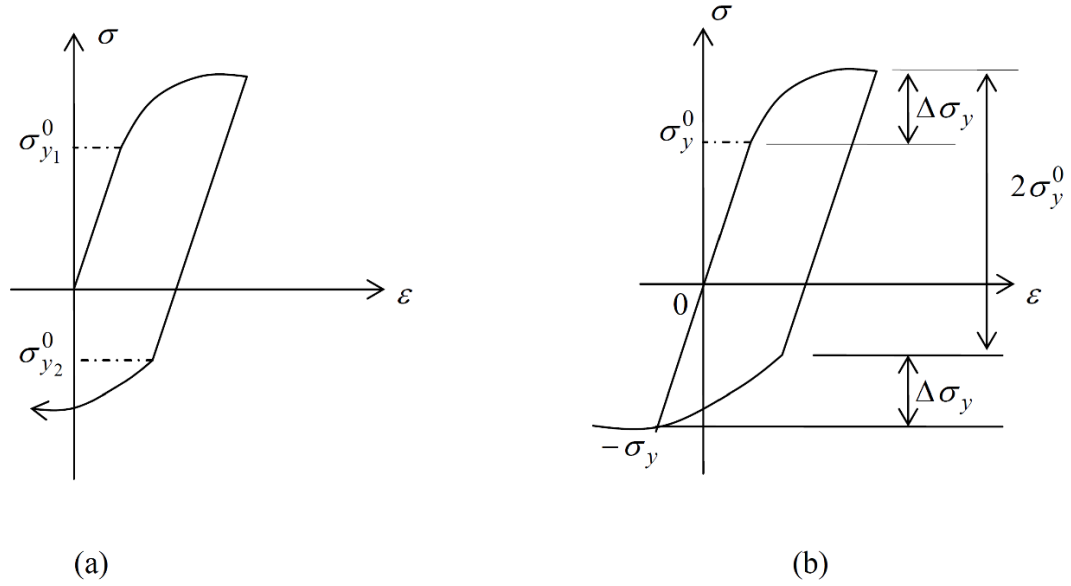
Olacağından toplam mühendislik birim şekil değişimi $\varepsilon_{\text{top}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \ln 2 - \ln 2 = 0$ olarak elde edilir. Buradan da görüldüğü gibi $\varepsilon_{\text{top}} = 0$ olurken, $e_{\text{top}} > 0$ çıkmaktadır. Bu ise, mühendislik değerlerinin sadece çekme deneylerinin değerlendirilmesinde kolaylık sağladığını, plastik şekil verme işlemlerinin analizinde ise kullanılmasının imkansız olduğunu göstermektedir (Kelly 2013).

2.1.1.3. Basma Testi

İşlem olarak çekme deneyinin tam aksi olarak tanımlanan basma deneyi, çekme deneyinin gerçekleştirildiği makineler aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Malzemelerin basma gerilmesine maruz kalması ile birlikte temel mekanik nitelik taşıyan basma deneyi belirlenmektedir. Genel anlamda bu tür malzemeler gevrek yapılı olarak ifade edilmektedir. Homojen olan bir malzemeye yönelik gerçek gerilme birim şekil değişimi açısından çekme ve basma durumlarının aynı seyrettiği görülmektedir. Basma deneyi esnasında kesit alanında gözlemlenen devamlı olan büyüme boyun oluşumuna izin vermemektedir. Özellikle basma deneyi gevrek ve yarı gevrek olarak malzemelerin sünekliliğine ilişkin hassas bir tespitin yapılmasında rol oynamaktadır.

2.1.1.4. Bauschinger Etkisi

Plastik bölge üzerinde oluşturulan çekme ya da sıkıştırma şeklinde yüklenen bir deney numunesi göz önünde bulundurulduğunda yükün kaldırılmasıyla birlikte numunenin ters yönde akımının gerçekleşmesine kadar geçen süre içerisinde yeniden yüklenmesi sonucunda meydana gelen akma gerilmesi, orijinal yönde gerçekleşene yüklemede meydana gelen akım gerilmesinden çok daha düşük seviyede gözlemlenecektir. İlgili olaya ilişkin şekil aşağıda yer alan Şekil 1.3’de sunulurken, bu etki **Bauschinger etkisi** olarak adlandırılmıştır.

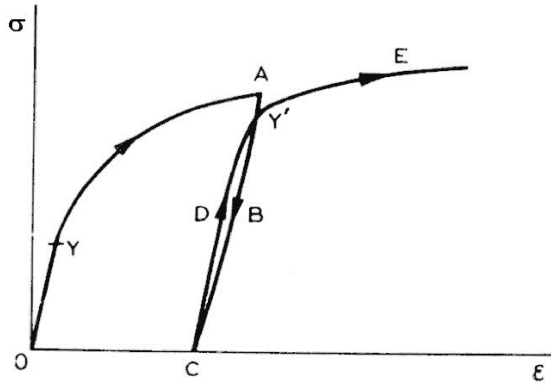


Şekil 1. 3. Bauschinger etkisi: **(a)** deneysel gözlem; **(b)** kinematik sertleşme modeli (Kelly 2013).

Çok kristalli malzemeler ile gözlemlenen Bauschinger etkisi, tek kristalli malzemeler üzerinde de gözlemlenebilen bir etki olarak dikkat çekmektedir. Önceki yüklemelerde meydana gelen dislokasyon alanlarının anizotropisi bu etki ile açıklanmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada, malzemeye ilişkin mikro yapı ve modellerini açıklama gayesi gütmemekle birlikte bu ayrıntılara fazla yer verilmeyecektir. Fakat bu etkinin varlığı plastik deformasyon modelinin çok daha kompleks bir yapı haline getirdiğinden çoğunlukla basitleştirilmiş bir model olarak kinematik sertleşme modelinin kullanıldığı görülmektedir. Bu modele ilişkin, ters yönde gerçekleştirilen yükleme aşamasında akma gerilmesinde meydana gelen azalma, orijinal yönde meydana gelen akma gerilmesi ile birlikte gerçekleştirilen yükleme esnasındaki gerilme artımına eşit görülmektedir. Bu modele ait detaylar, klasik plastisite kitaplarında mevcuttur.

2.1.1.5. Histerezis Etkisi

Basit bir çekme deneyinde gözlemlenen yük akma sınırının aşılması ardından kaldırılması ve yeniden yükleme yapılması ile birlikte histerezis etkisinin meydana geldiğini söylemek mümkündür. Aşağıda yer alan Şekil 1.4. üzerinde malzemeye ilişkin yeniden yüklemeli gerilme birim uzama eğrisi sunulmuştur. O noktasında malzemenin yüklenmeye başladığı dikkat çekerken ardından malzemenin akma limitini aşan A noktasına taşındığı görülmektedir. Gerilme – BŞD eğrisinin B noktasının olduğu yolu takip etmesiyle C noktasına vardığı gözlemlenmektedir. Tekrar yüklenmesi sonrasında geldiği yolu takip etmeden D noktasını aşarak Y’a akabinde de E noktasına varış sağlamaktadır. Gerçekleştirilen ideal analizlerde bu etkinin göz ardı edildiği dikkat çekerken Y’-B-C-D arasında meydana gelen gerilmenin BŞD eğrisiyle birlikte tespit edilen iç alan histerezis etkisini aşma amacıyla gerekli enerjiyi verdiğini söylemek mümkündür.



Şekil 1. 4. Histerezis Etkisi

2.1.1.6. Hidrostatik Basınç

Bridgman (1947-1952) tarafından gerçekleştirilen çok sayıda deney esnasında malzemelerin çok yüksek hidrostatik basınç altındaki davranışlarına yönelik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bridgman tarafından 24000 atm'lik hidrostatik basınç altında çekme deneyleri gerçekleştirilmiş, bu deneyler neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

1-Malzemelere ilişkin hacimlerin çok yüksek basınç altında bile kalıcı bir değişime uğramadığı görülürken bu durum malzemenin plastik olarak sıkıştırılamayacağı şeklinde kabul edilmiştir.

2-Küçük BŞD aralıklarında yaşanan gerilme-BŞD eğrisi hidrostatik basıncın etkisinde kalmamaktadır.

3-Hidrostatik basınç altında malzemenin sünekliği artmaktadır.

4-Herhangi bir malzemenin akması üzerinde hidrostatik basıncın etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

Yukarıda yer alan sonuçlardan birinci ve dördüncüsü, sıkıştırılamazlık ve akma olayının hidrostatik basınçtan ayrı bir şekilde gerçekleşmesi plastisite yaklaşımında kilit rol oynamaktadır. Matematik açıdan ele alındığında ise sıkıştırılmazlık, gerçek birim şekil değiştirmenin asal değerleri cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (2.12)$$

Nominal gerilmeler cinsinden ise aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

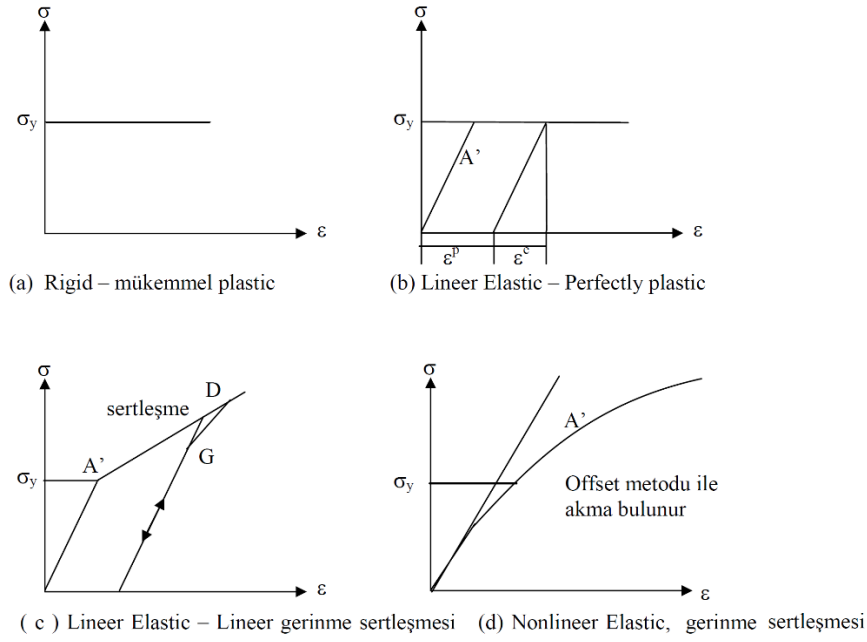
$$(\hat{\varepsilon}_1 + 1) + (\hat{\varepsilon}_2 + 1) + (\hat{\varepsilon}_3 + 1) = 1 \quad (2.13)$$

Sıkıştırılmazlık şartının ifade edilmesi amacıyla nominal BŞD yerine gerçek gerilmenin kullanılması çok daha kullanışlı olarak kabul edilmektedir. Sonsuz küçük BŞD'ler açısından yüksek seviyedeki terimlerin göz ardı edilmesi sonucunda sıkıştırılmazlık şartının aşağıdaki şekilde yazılması mümkündür.

$$(\hat{\epsilon}_1) + (\hat{\epsilon}_2) + (\hat{\epsilon}_3) = 0 \quad (2.14)$$

2.1.2. Plastisite Teorisi Kabulleri

Plastik bölgede yer alan gerçek malzemelerin davranışlarının oldukça kompleks bir yapıda olduğunu söylemek doğru olacaktır. Bazı durumlarda sınır değerlerin problem çözümünü basitleştirmede aktif rol oynayan plastik davranışların idealize edildiği ya da önceden de ifade edildiği gibi yaklaşık bir form çerçevesinde ele alındığı görülmektedir. İdealleştirmeler içerisinde sıklıkla kullanılanlar aşağıda sunulmuştur. İdealleştirmelerdeki doğruluk payının gerçek uygulamaya bağlı olarak şekillendiği belirtilmektedir. Toplam BSD'nin büyük olduğu durumlarda, rijit-plastik bir idealleştirmede elastik BŞD'nin göz ardı edilmesiyle birlikte değer probleminin çözüme kavuşturulmasında bir takım önemli olmayan hataların ortaya çıkmasına sebebiyet verebilmektedir. Yumuşak çelik malzemesinin kullanılarak gerçekleştirilen bir yapı incelemesinde, maksimum BŞD'lerin *B* noktasından daha alt değerlerde beklenmesi durumunda mükemmel plastik model kullanmak (BŞD sertleşmesinin olmadığı durum) kalıcı çözümler sağlamada önemli rol oynayabilmektedir. Aşağıda yer alan Şekil 1.1 de gerilme BŞD eğrisinin, *AU* ile gösterilen sertleşme bölgesini tanımlama amacıyla çok sayıda deneysel denklemin teklif edildiği belirtilirken, bu denklemlerin yine aşağıda yer alan şekilde belirtilen non lineer BŞD sertleşmesi davranışını temsil etme amacıyla kullanıldığını söylemek mümkündür.



Şekil 1. 5. Farklı maddesel davranışların reolojik modelleri (Jones 2009)

Aşağıda verilen bütün ifadelerde σ ve ε sırasıyla gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değiştirmeyi temsil etmektedir:

$$\sigma = \sigma_Y + H\varepsilon^n \text{ (Ludwick 1909)} \quad (2.15)$$

$$\sigma = H\varepsilon^n \text{ (Holloman 1944)} \quad (2.16)$$

$$\sigma = \sigma_Y + (\sigma_s - \sigma_Y)\{1 - \exp(-n\varepsilon)\} \text{ (Voce 1948)} \quad (2.17)$$

$$\sigma = H(\varepsilon_s + \varepsilon)^n \text{ (Swift 1947)} \quad (2.18)$$

$$\sigma = \sigma_Y \tanh\left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_Y}\right) \text{ (Prager 1938)} \quad (2.19)$$

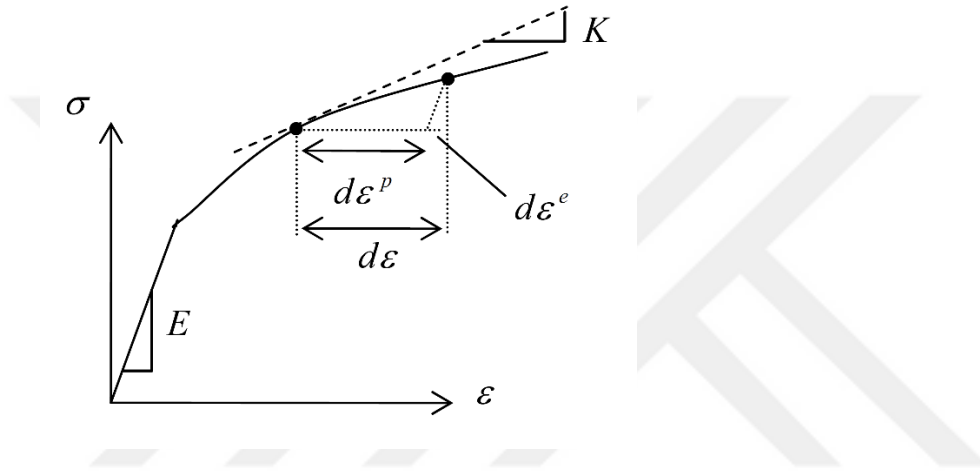
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + H\left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \text{ (Ramberg ve Osgood 1943)} \quad (2.20)$$

Burada E , σ_Y , σ_s , ε_s , H ve n malzeme sabitleri olup deneysel olarak belirlenmesi gereken değerlerdir.

2.1.3. Tanjant ve Plastik Modülü

Elastik bölgede kalan gerilme BŞD denklemindeki $\sigma = E\varepsilon$ E Young's modül olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1.6'da gösterildiği gibi elastik bölgedeki gerilme BŞD eğrisinin eğimi olarak tanımlanmaktadır ve sabittir. Tanjant modülü K ise şekil 1.6'da plastik bölgede kalan herhangi bir noktadaki gerilme BŞD eğrisinin eğimine eşittir ve artan BŞD değerine göre anlık değişmektedir. Bu bölgede herhangi bir andaki değişen BŞD değerine göre gerilmedeki değişimi veren bağıntı şu şekildedir:

$$d\sigma = Kd\varepsilon \quad (2.21)$$



Şekil 1. 6. Tanjant modülü (Kelly 2013)

Malzemenin akma noktasından sonraki BŞD değişimi elastik ve plastik olarak artmaktadır:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (2.22)$$

Gerilme ve plastik BŞD artışları Plastik modül “H” ile ilişkilidir:

$$d\sigma = Hd\varepsilon^p \quad (2.23)$$

Tanjant modülü veren bağıntı aşağıdaki gibidir:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{E} + \frac{1}{H} \quad (2.24)$$

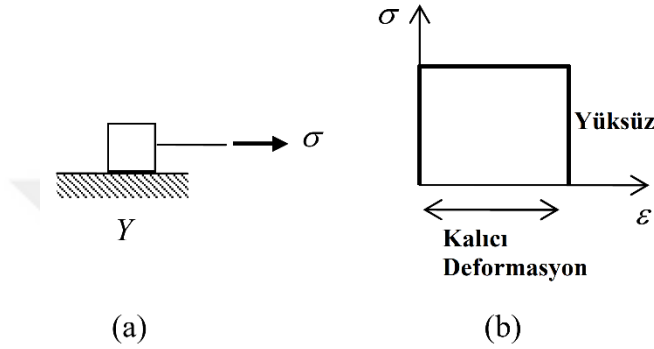
2.1.4. Sürtünme Blok Modeli

Sürtünme bloğu modellerinden plastik malzemelerin tepkisine ilişkin bazı ek bilgiler elde edilebilir. Rijit mükemmel plastik modeli Coulomb sürtünme bloğu olarak

Şekil 1.7’de gösterildiği gibi simüle edilebilir. Gerilme σ akma noktasına gelene kadar “Y” herhangi bir BŞD oluşmaz. Hareket miktarı veya plastik deformasyon daha fazla bilgi olmadan belirlenemese de bir hareket vardır. Gerilme bu modeldeki akma gerilmesini geçemez:

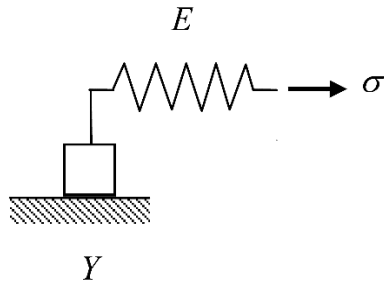
$$|\sigma| \leq Y \quad (2.25)$$

Blok üzerindeki yükleme kesilirse hareket durur ve Şekil 1.7b’de gösterildiği gibi kalıcı bir BŞD yaratarak, gerilim sıfırlanır (Kelly 2013).



Şekil 1. 7. (a) Rijit mükemmel plastik sürtünme blok modeli; (b)Rijit mükemmel plastik model tepkisi (Kelly 2013)

Doğrusal elastik mükemmel plastik model Şekil 1.8’de gösterildiği gibi bir seri E modülüne sahip serbest yay ve sürtünme bloğu içerir. Yay yüklendiğinde gerilir ve stres Y 'ye ulaştığında blok da hareket etmeye başlar, yay gerilmeyi bıraktığında, mümkün olan en yüksek stres tekrar Y olur. Boşaltma sırasında, blok hareket etmeyi durdurur ve yay büzülür (Kelly 2013).



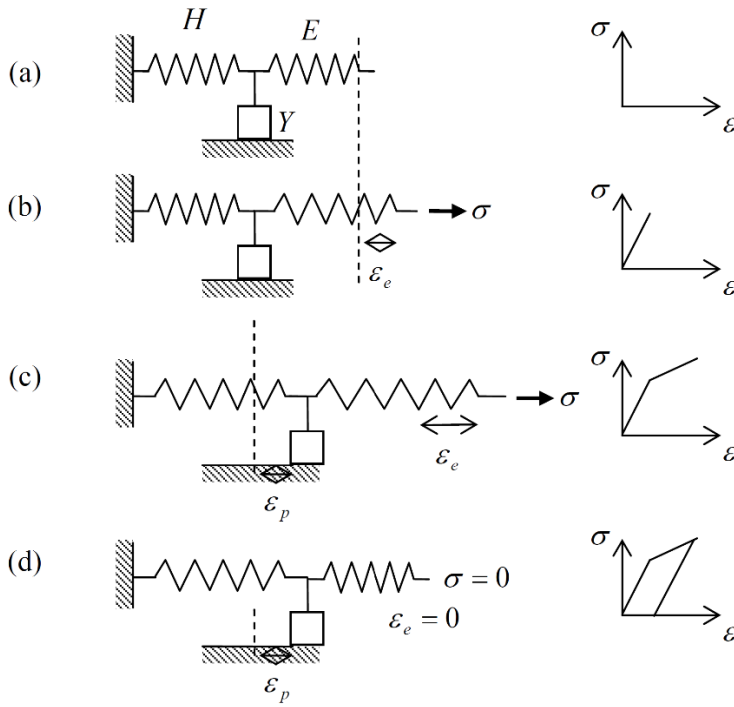
Şekil 1. 8. Elastik mükemmel plastik malzeme için sürtünme blok modeli (Kelly 2013)

Doğrusal deformasyon sertleşmesine sahip elasto plastik model, Şekil 1.9’da gösterildiği gibi sürtünme bloğuna paralel olarak H sertliğine sahip ikinci bir sertleştirme

yayı içerir. Akma gerilmesine ulaşıldığında, bloğun hareket etmesini sağlamak için sürekli artan bir gerilmenin uygulanmaya devam edilmesi gerekir ve serbest yayın daha da uzaması nedeniyle elastik BŞD oluşmaya devam eder. Stres daha sonra hareketli blok tarafından taşınan akma gerilimine ve sertleştirme yayı tarafından taşınan bir aşırı gerilime bölünür. Boşaltma işleminden sonra, blok “kilitlenir” sertleştirme yayındaki stres sabit kalırken, serbest yay daralır. Sıfır gerilimde, sertleşme yayındaki gerilime eşit ve zıt olan sürtünme bloğu tarafından alınan negatif bir stres vardır (Kelly 2013).

Elastik bölge için eğim E 'dir. Plastik bölge için H 'nin plastik modül olduğu görülebilir:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma - Y}{H} \rightarrow K = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{EH}{E + H} \quad (2.26)$$

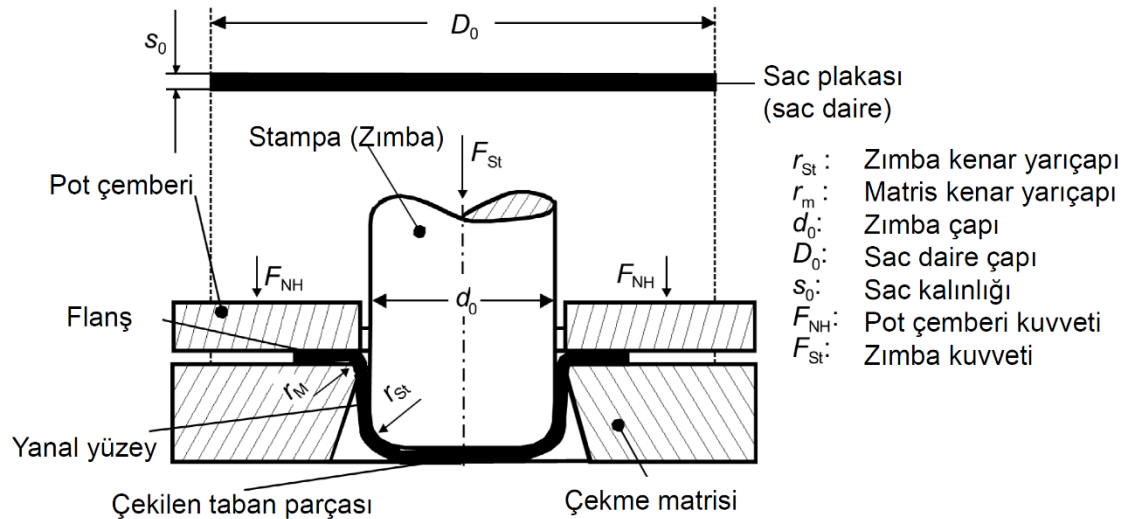


Şekil 1. 9. Doğrusal deformasyon şartleşmeli, doğrusal elasto plastik malzeme sürtünme modeli **(a)**Serbest gerilme; **(b)**Serbest BŞD; **(c)**Elastik ve plastik BŞD; **(d)**Boşaltma (Kelly 2013)

2.2. Derin Çekme ve Derin Çekmeyi Etkileyen Değişkenler

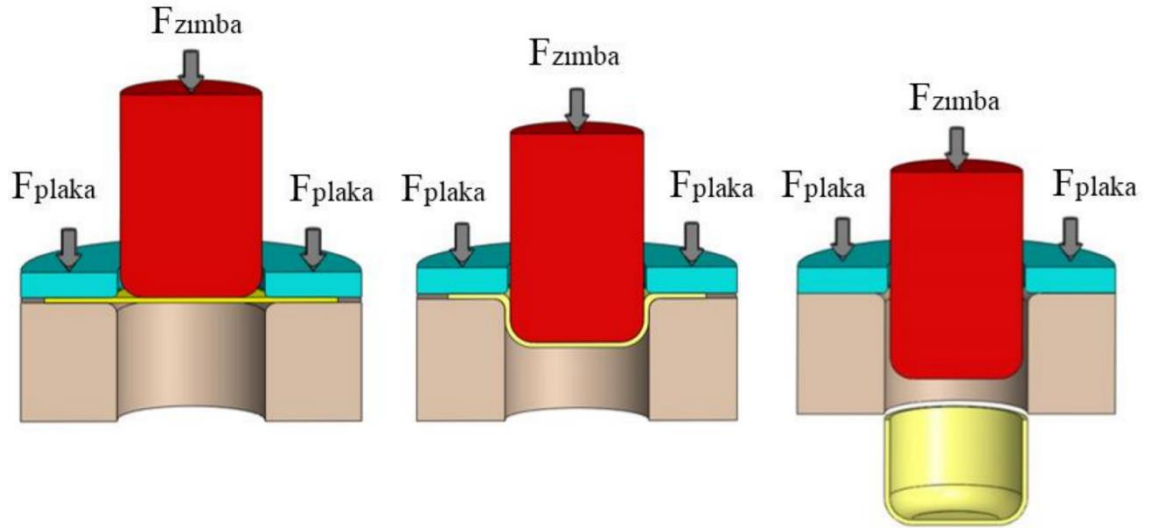
Çekme kalıpları adı verilen mekanizmalar kullanılarak düz metal pulların veya plakaların kalıp kuvveti ile birlikte preslenmesi ve bunların istenen derinliklerde ve profillerde bir kap haline getirilmesine çekme denmektedir (Güneş 2002).

Bir sac metal şekillendirme işlemi olarak kabul edilen derin çekme, çoğunlukla silindir, kare prizma ya da dikdörtgen prizma kap şekillerin ya da çok daha konkav parçaların imal edilmesinde kullanılan bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Aşağıda yer alan Şekil 2.1.'de derin çekmenin, zımba ile sac arasında meydana gelen matris boşluğuna doğru itilerek akmasının sağlanma işlemi olduğu görülmektedir. Çoğunlukla aşağıya yönelik bir baskı plakası tarafından basılarak sıkıştırılma işlemi gerçekleştirilen sac, yaygın olarak kullanılan parçalarının üretilmesi sağlanmaktadır (Groover 2016).



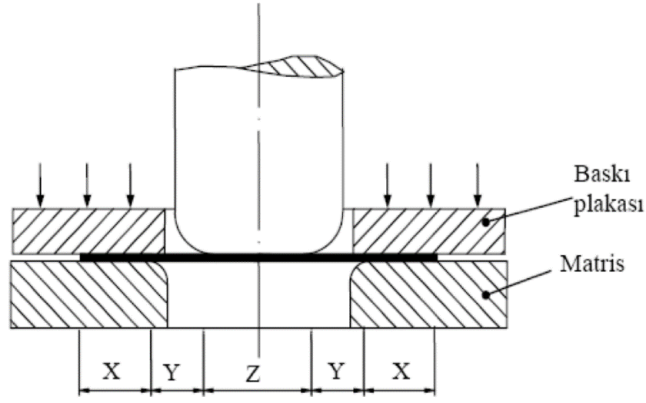
Şekil 2. 1. Derin çekme işlemi ve derin çekme elemanları (Behrens 2007)

İlkel bir levhanın kalıbın üzerine yerleştirilmesi, ardından levhanın belirli bir basınç altında gerilmesi ve levha ile kalıp arasında istenilen şekli verene kadar gerekli zımba kuvveti ile zımbalamaya devam edilmesi oyma işlemi derin çekme işlemi olarak ifade edilirken, derin çekme işleminin adımları aşağıda yer alan Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



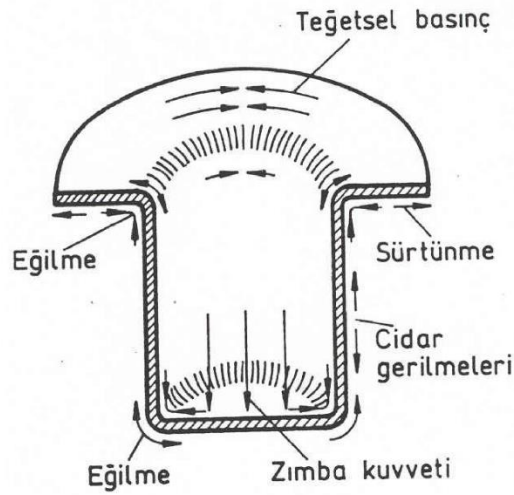
Şekil 2. 2. Derin çekme işlem adımları (Özdilli 2018)

Aşağıda yer alan Şekil 2.3'te, X ile işaretlenmiş halka alanı kalıpla temas halindedir ve Z alanı kalıbın alt yüzeyi ile temas halindedir. Y alanı, işlemin başında kalıba veya kalıba dokunmaz. Çekme sırasında, zımba kuvvetinin neden olduğu radyal çekme geriliminin bir sonucu olarak X bölgesi matris boşluğuna doğru iter. Malzemedeki baskı klişesi ile temas etmesi sonucunda yüzeyde basma gerilmesinin meydana geldiği görülürken, derin çekme işlemlerinde bu durumda malzeme şekillenmeye başlamaktadır. Yine bu durumda Y bölgesinde bir incelme fark edilmektedir. Malzeme tarafından zorlanan matris boşluğunun çapı ile halkanın ilk çapından çok daha küçük olması nedeniyle bu bölgede sıkıştırma gerilmelerinin ve gerekli malzeme topaklarının meydana geldiği gözlemlenmektedir. Levhanın ileriye yönelik hareketlerinin gerçekleşmesi ile birlikte levhanın dış kısmına doğru bir kalınlaşma söz konusu olmaktadır. Böylelikle X bölgesinin sonunda iş parçasının bir boynu ortaya çıkarken Z bölgesinde meydana gelen bir değişim bulunmamaktadır (Alparslan 2008).



Şekil 2. 3. Çekme başlangıcında iş parçasının durumu, baskı plakası, zımba ve matris (Kara 2011)

Silindirik kaplara yönelik derin çekmenin gerçekleşmesi esnasında sacı etkileyen kuvvetler aşağıda yer alan Şekil 2.4'te sunulmuştur.



Şekil 2. 4. Çekme işleminde çekme sacını etkileyen kuvvetler.

2.2.1. İşlem Değişkenleri

Malzemelerin derin çekme limitlerini belirleyen iki ana değişken türü bulunmakla birlikte usul ve malzeme değişkenleri olarak iki ana başlık altında toplanmaktadır. Kalıp, kalıp ve malzeme geometrisi, silindir segman presleme, yağlama gibi şekillendirme ve işlem adımı değişkenleri, derin çekmeyi etkileyen işlem değişkenleridir. Bu süreç değişkenlerinin süreç üzerindeki etkisi bilinmeli ve tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır.

2.2.1.1. Çekme Hızı

Derin çekme işleminde kalıbın plastik deformasyonun başlangıcındaki hızı çekme hızı olarak ifade edilirken çekme hızının malzemenin türüne, inceliğine ve kalıp yüzeyinin kalite durumu ile yağlama ivmesine göre farklılık gösterdiği bir gerçektir. Malzeme türüne göre test sonuçlarında bulunan ortalama çekme hızı değerleri aşağıda yer alan Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2. 1. Ortalama çekme hızları (Esner 2006).

Malzeme	Çekme Hızları mm/s	
	Tek Etkili Presler	Çift Etkili Presler
Alüminyum	900	500
Al Alaşımları	-	150-200
Prinç	1000	500
Bakır	750	430
Çelik	300	180-250
Paslanmaz Çelik	-	100-150

Çekilen kabın durumu ve fiziksel özellikleri çekme hızından etkilenmektedir. Bu nedenle çekme hızı büyük önem teşkil etmektedir. Çoğunlukla çekme hızı;

- 1- Sac malzemesinin türüne,
- 2- Sac malzemesinin kalınlığına,
- 3- Çekme halkası ve zımbasının ucundaki kavis yarıçapına,
- 4- Kalıbın yağlanma durumuna göre değişiklik göstermektedir.

Silindir ve simetrik olmayan parçaların çekme işlemlerine ilişkin çok daha düşük seviyede çekme hızları tercih edilmektedir. Tersî durumunda sacda şekil değişiklikleri ile yırtılmaların olması kaçınılmazdır (Mutlu 2012).

2.2.1.2. Baskı Plakası Kuvveti

Derin çekme işlemlerinin gerçekleştiği süreç içerisinde başlangıç çapını azaltan teğetsel gerilimlere ilişkin veriler aşağıda yer alan Şekil 2.4'te sunulmuştur. Bu kuvvetlerin, matris boşluğu dışında yer alan parçaları buruşmaya zorladıkları aşikardır.

Çekilecek malzeme kalınlığının çap değerine göre ince olması da özellikle bu gerilmelerin hızlı bir şekilde buruşmaya neden olmasında rol oynamaktadır. Bu durum çekme işleminin başarısız olmasına sebebiyet verirken, malzemenin buruşmaması için baskı plakası olarak ifade edilen ilave bir mekanizma yardımı ile kalıp yüzeyine baskı uygulanması gerekmektedir. Fakat bu baskının kuvveti malzemedeki ek basınç ile delik kuvvetinin artmasına neden olmaktadır. Kalıp içerisindeki gerilimin artış göstermesi sonucunda yırtılmaların meydana gelmesi muhtemeldir. Bu nedenle baskı plakasının kuvvetinin buruşmayı önlemesi amacıyla asgari değer çerçevesinde kullanılması oldukça önemlidir. Baskı yapılacak alan ile yüzeye uygulanan basınç çarpılarak klişenin mukavemeti belirlenir (Özdilli 2018). Baskı plakası için gerekli kuvvet denklem (2.27)'de gösterilmiştir.

$$P_s = \pi/4(D^2 - d^2)p \quad (2.27)$$

D : Malzeme çapı (mm),

d : Zımba çapı (mm),

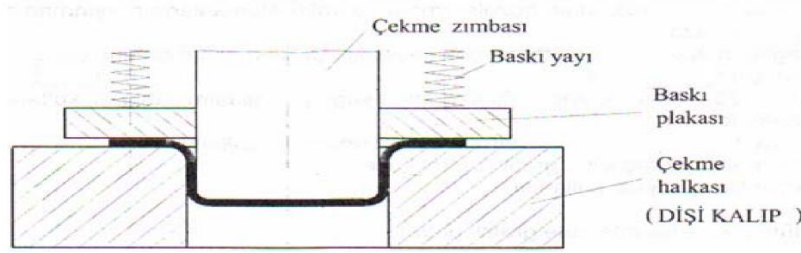
p : Baskı plakası basıncı, (N/mm).

Çekilecek malzemenin cinsine göre “ p ” değeri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2. 2. Farklı malzemeler açısından gerekli olan baskı plakasına ait basınç değerleri (Kemal 2006).

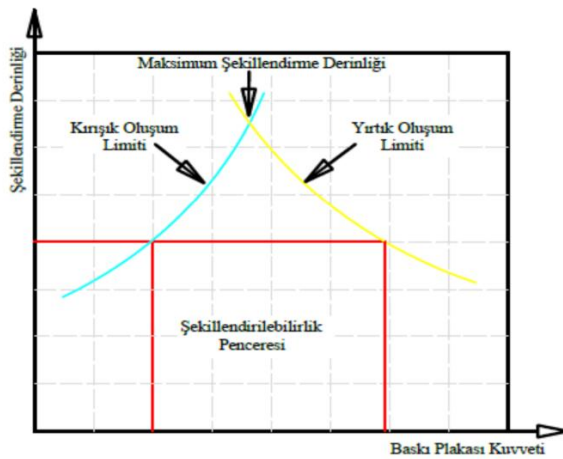
Malzeme	MPa
Alüminyum	0,98-1,17
Çinko	1,17-1,47
Çelik	2,45
Pirinç	1,96
Paslanmaz Çelik	1,96

Aşağıda yer alan Şekil 2.5’te yay, kauçuk, hidrolik ya da pnömatik baskı kuvvetlerinin sağlanma şekilleri verilmiştir. Burada üzerinde durulan husus kolay ayarlanabilme özelliği kapsamında hidrolik ve pnömatik sistemlerin tercih edilmesidir (T.C Milli Eğitim Bakanlığı 2006)



Şekil 2. 5. Baskı plakası kuvveti (T.C Milli Eğitim Bakanlığı 2006)

Aşağıda yer alan Şekil 2.6'da BPK'nin derin çekme işlemindeki etkisi vurgulanmaktadır. BPK'nın yükseldiği durumlarda çekme işlemi esnasında kabın yan duvarlarında kırılma yaşanmadan önce az miktarda gerilme mümkündür. Bu durum yırtılma limiti olarak ifade edilirken BPK'da yaşanan azalma flnas bölgesinde kırışmalara yol açmaktadır. Bu durum çekmeyi güç hale getirerek sacın kopmasına neden olmaktadır (Şen 2018).



Şekil 2. 6. Baskı plakası kuvveti ve şekillenme derinliği ilişkisinin şematik gösterimi (Şen 2018)

Yagami vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada baskı plakasına ilişkin kuvvet hareketlerinin kontrol edilebilirliği hususunda önerilen bir algoritma ile kırışıklık limiti ile birlikte kırışıklık davranışı bakış açısından ince bir sacın dairesel bir kabın derin çekilmesi işlemine ilişkin deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiş ve bu durum simülasyon programı aracılığı ile analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen sonlu elemanlar yöntemi (SEY) çalışmasının neticesinde, baskı plakası kuvvetlerinin kontrol edilmesinin bir sonucu olarak sünek hasar davranışlarının azalmasıyla birlikte derin çekilebilirliğin geliştirilmesi konusunda yol gösterici olmuştur.

2.2.1.3. Kalıp Geometrisi

Kalıp ve zimba yarıçapı, plaka oluşumundaki en önemli faktördür. Kalıpta küçük bir yarıçap, sac parçadaki keskin çizgilerin iyi bir şekilde yeniden üretilmesi için arzu edilen bir özelliktir. Ancak bu kadar keskin çizgiler BŞD'nin büyümesini bir yerde topladığı için üretimde zorluk yaratıyor. LSD'nin giriş üzerindeki yoğunluğu, levhaya bitişik düz alanlarda deformasyonun ilerlemesini engeller ve kırılma olasılığını azaltır. Bu tür yerlerde sac malzeme yarılar veya yırtılır. Çok büyük bir yarıçap, basınç profilinde kırışıklıklar oluşturmaktadır (Esner 2006).

Sac malzemenin kalıp girişindeki kalıp yarıçapı çok önemlidir. Kalıp giriş yarıçapı küçükse, metal akamaz, bu da gerilmelere ve sonunda plakanın yırtılmasına neden olur. Özellikle derin çekilmiş ince parçalarda kalıp yarıçapı geniş ise malzeme plaka ile döküm yüzeyi arasındaki kıştırma noktasından çıktıktan sonra buruşmaya başlayacaktır. Kırışıklık sertse, malzeme kalıp giriş yarıçapı arasında çekildiği için akışı kısıtlayabilir (Esner 2006).

Uygun kalıp yarıçapı:

$$R_K = (8 \div 10) t_0 (mm)$$

$$t_0 = \text{Sac Kalınlığı}(mm)$$
(2.28)

Zimba için en uygun yarıçap:

$$R_z = (6 \div 8) t_0 (mm)$$

$$t_0 = \text{Sac Kalınlığı}(mm)$$
(2.29)

2.2.1.4. Yağlama

Çekmede yağlamanın amacı, malzeme ile kalıp arasındaki sürtünmeyi azaltmaktır. Böylece malzemenin şekillendirilebilirliği azalır. İyi yağlama, kalıp ve iş parçası yüzeylerinin erken aşınmasını önler ve kalıbın ömrünü uzatır. İş parçasının kalıptan kolayca çıkarılabilmesi için de yağlamadan faydalanılmaktadır (Özçelik 2008).

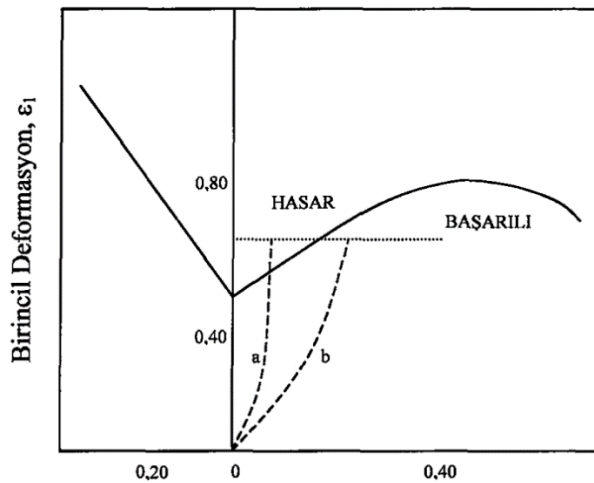
Yağlama için yararlanılacak maddelerde bulunması gereken özellikler aşağıdaki şekilde sıralanmıştır.

- a) Yağlama maddesinin oluşturduğu yağ filmi homojen olmalı ve yüksek basınç altında yırtılmamalı veya kuru sürtünmeye neden olmamalıdır.
- b) Yağlayıcı malzeme yüzeyini iyice ıslatmalı ve tüm yüzeylere eşit olarak dağılmalıdır.
- c) İşlemden sonra işlenen parçanın yağ tabakası kolayca temizlenebilir olmalıdır.
- d) Yağlayıcı, kalıp ve malzeme yüzeyinde kimyasal veya fiziksel reaksiyonlara neden olmamalıdır.

- e) Yağlayıcının bileşimi sabit olmalı ve sağlığa zararlı bir etkisi olmamalıdır.
- f) Yağlama maddesinin temini kolay ve ucuz olmalıdır.

Ekipman ile malzeme arasında meydana gelen sürtünme kuvveti ile sağlanan kontrol biçimlendirmede kullanılmaktadır. Hıza hassasiyeti olan bu kuvvetlerin uğradığı aşırı şekil bozukluklarının gerilme ve sürtünme kuvvetlerini aşarak hareket edecekken erken hasara uğramalarına yol açabildikleri ifade edilmektedir. Plakaların ve kabın sıcaklık derecesinin işlem esnasında yağın özelliğini kaybedecek seviyelere ulaştığı gözlemlenebilmektedir. Gerçekleşen bu durumlarda yağın görevini tam anlamıyla yerine getirememesi sonucunda sürtünme kuvvetlerinin artış göstermesi erken hasara sebebiyet verebilmektedir (Esner 2006).

Yağlayıcının viskozitesi ve yağ filmi mukavemeti uygun değilse veya aşındırıcı maddeler içeriyorsa diskte çatlaklara, çiziklere, çukurlara veya kötü yüzey görünümüne neden olabilir. Yağlama, kalıplama sırasında düzgün deformasyon eklenmesinde rol oynar. Ayrıca yağlama, gerinim hızındaki değişimi etkiler. Aşağıda yer alan Şekil 2.7'den görüldüğü gibi malzeme "a" ile işaretlenmiş deformasyon aralığında çalıştığında yağlama miktarı "b" aralığına çekilebilir ve hasar önlenir (Gündü 2000).



Şekil 2. 7. Biçimlendirme sırasında deformasyon bölgesinin yağlamayla değişimi (Gündü 2000)

Yağlayıcı seçimi, işlemin zorluğuna, derin çekme işlemine, çekme işleminin türüne ve malzemeye dayanır; Öneriler Çizelge 2.3'de verilmiştir. Bu tabloda düşük şiddetli operasyon tipik olarak düşük karbonlu çelik üzerinde sıg bir çekiştir, orta şiddetli operasyon düşük karbonlu çelik üzerinde derin bir çekiştir ve ağır şiddetli operasyon bir fişek kovani çekişi veya dikişsiz bir boru çekiştir (Boljanovic 2004).

Çizelge 2. 3. Derin çekme işleminde sıklıkla kullanılan yağlayıcılar (Boljanovic 2004).

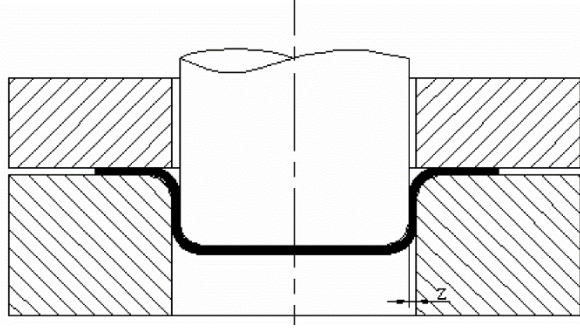
Çekme Sacı	Yağlayıcı
Çelik - Karbon ve Düşük Alaşımlı	Düşük Şiddetli Pres Operasyonları: Orta viskozite-yüksek viskozite arası mineral yağ, Sabun çözeltisi (% 0,03 ila 2,0 yüksek titreli sabun), Çok amaçlı yağ + mineral yağ, emülsiyonlar, lanolin Orta Şiddetli Pres Operasyonları: Sabun emülsiyonlu yağ, çok amaçlı yağ + mineral yağ, sabun + balmumu, kurutulmuş sabun filmi. Ağır Şiddetli Pres Operasyonları: Kurutulmuş sabun veya mum filmi, sülfür veya fosfat kaplamalar + ince bölünmüş dolgu maddeleri ve bazen sülfürize yağlar içeren emülsiyonlar.
Paslanmaz Çelik	Düşük Şiddetli Pres Operasyonları: Mısır yağı veya hint yağı, hint yağı + emülsiyonlaştırılmış sabun, mumlu veya yağlı kâğıt Orta Şiddetli Pres Operasyonları: İşlemden önce iş parçası üzerinde kurutulmuş toz grafit süspansiyon (tavlamadan önce çıkarılacaktır), katı mum filmi. Ağır Şiddetli Pres Operasyonları: Yoğun kıvamda lithopone ve haşlanmış keten tohumu yağı, beyaz kurşun ve keten tohumu yağı.
Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları	Düşük Şiddetli Pres Operasyonları: Mineral yağ, mineral yağda çok amaçlı yağ karışımları (%10 ila %20 çok amaçlı yağ). İçyağı ve parafin, sülfürize sabit yağ (% 10 ile 15 karışımlar) tercihen % 10 çok amaçlı yağ ile zenginleştirilmiştir. Ağır Şiddetli Pres Operasyonları: Kurutulmuş sabun filmi veya mum filmi, mineral yağ veya çok amaçlı yağ, sabunlu su içinde yağ emülsiyonları + ince bölünmüş dolgular.
Titanyum	Klorlu parafin, sabun, polimer ve balmumu.
Bakır	Çok amaçlı yağ + sabun emülsiyonları, çok amaçlı yağ + mineral yağ, mineral yağda domuz yağı karışımları (% 25 ila % 50), doğru şekilde uygulanmış kuru sabun.

2.2.1.5. Çekme Boşluğu

Çekme yaparken, kalıp ile süpürgelik arasında meydana gelen boşluğa "çekme boşluğu" denir. Büzülme aralığı belirlenirken levhanın kalınlığı ve malzemenin üst

kısımındaki kalınlaşma göz önünde bulundurulurken büzülme aralığının küçük olduğu durumlarda gerilme işlemi duvar inceltme işlemine aktarılacak ve inceltilecek parçanın duvarı gerilme kuvvetine dayanamayacağı için kırılacaktır. Büzülme aralığının gereksiz büyük olduğu durumlarda ince parçalarda kırışıklar oluşacak ve parça ölçüleri istenilen ölçülerde olmayacaktır (Gürün 2008).

Şekil 2.8’de “z” ile gösterilen çekme boşlukları için aşağıdaki formüller kullanılabilir (Esner 2006).



Şekil 2. 8. Çekme boşluğu (Esner 2006)

$$\text{Çelik saclar için:} \quad z = t + 0,07\sqrt{10.t} \quad (2.30)$$

$$\text{Alüminyumlar için:} \quad z = t + 0,02\sqrt{10.t} \quad (2.31)$$

$$\text{Demir olamayan metaller için:} \quad z = t + 0,04\sqrt{10.t} \quad (2.32)$$

Çekme boşluklarının bulunması için kullanılabilecek bir diğer eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$z = s \left(1 + 0,01\sigma_B (\beta - 1)^3 \right) \quad (2.33)$$

Çekme boşluğu değerlerinin tespit edilmesinde pratik olarak Çizelge 2.4 kullanılmaktadır (Gürün 2008).

Çizelge 2. 4. Çekme boşluğu değerleri (Gürün, 2008).

Malzeme Kalınlığı	İlk Çekme	Ara Çekmeler	Son Çekme
<0,4	(1,07-1,09)s	(1,08-1,10) s	(1,04-1,05) s
0,4-1,3	(1,08-1,10) s	(1,09-1,12) s	(1,05-1,06) s

Çizelge 2. 4'ün devamı

1,3-3,2	(1,10-1,12) s	(1,12-1,14)s	(1,07-1,09) s
>3,2	(1,12-1,14)s	(1,15-1,20)s	(1,08-1,10) s

2.2.2. Malzeme Değişkenleri

Bir malzemenin işlenebilirliğini etkileyen bir diğer önemli faktör malzeme değişkenleridir. Proses değişkenleri, proseste meydana gelen doğal dış gerilimi tanımlarken, malzeme değişkenleri, malzemenin yük kapasitesini tanımlar. Proses değişkenlerinin sabit kaldığı durumlarda malzeme özelliklerindeki değişim malzeme deformasyonunu etkiler. Bu durumlarda malzeme özelliklerindeki değişiklik malzemenin deformasyonunu etkiler. Aşağıda yer alan başlıklarda derin çekmeyi etkileyen en önemli malzeme ile ilgili parametreler aşağıda tartışılmaktadır.

2.2.2.1. Pekleşme Üsteli

Plastik deformasyon sırasında uygulanan gerilme arttıkça süneklik, malzemenin soğuk şekillendirilebilirliğini etkileyen en önemli özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Plastik deformasyonun lokal olarak olduğu bölgede burada meydana gelen sertleşmeden dolayı mukavemet artışı nedeniyle bu bölgede deformasyon durur ve parçanın diğer komşu kısımlarında plastik deformasyon başlar. Bu, sertleşme ve parçanın daha sonra hasar görmesi nedeniyle daha yumuşak deformasyona neden olur. Gerinim sertleşmesi (sertleşme), deformasyon sırasında dislokasyon yoğunluğunun artması ve büyüyen dislokasyonların birbirleriyle ve diğer engellerle etkileşimi ile çok kısaca açıklanmaktadır. Çekme testinde, malzeme maksimum yüke kadar düzgün bir şekilde şekil değiştirir. Düzgün deformasyon, plakanın sertliğinin bir ölçüsüdür. Diğer bir kriterde pekleşme üsteli (n) değeridir (Çetin M. S. 2007). Çekme deneyi ardından ulaşılan akma eğrisindeki plastik deformasyon ile gerilim arasındaki bağlantı, Hollaman bağlantısı olarak ifade edilen ve aşağıda sunulan denklemi gündeme getirmektedir.

$$\sigma_g = K \varepsilon^n \quad (2.34)$$

σ_g =Gerçek gerilme,

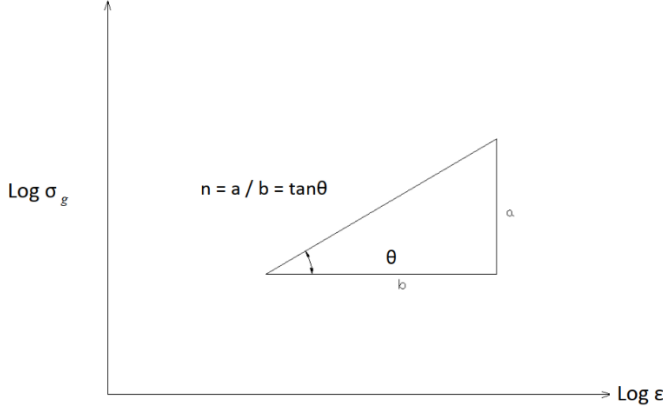
ε =Gerçek birim şekil değişimi,

K =Malzeme mukavemet katsayısı,

n =Pekleşme üsteli.

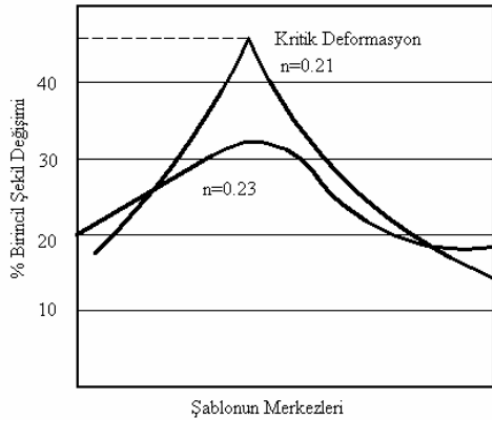
Pekleşme üssü " n " aşağıda yer alan Şekil 2.9'da gösterildiği gibi plastik şekil değişiminde başlanan akış gerilmesiyle birlikte boyun verme ile başlayan nokta arasında yer alan üniform şekil bozukluğu bölgesindeki gerçek gerilme ve deformasyon

değişiminin değerlerine göre çizildiği bilinen ($\text{Log} \sigma - \text{Log} \epsilon$) grafiğine eşit olduğu görülmektedir (Özçelik 2008).



Şekil 2. 9. Pekleşme üsteli “n” değerinin hesaplanması (Özçelik 2008)

Karmaşık olarak şekil verilen bir bölgenin şekil alması esnasında arada kalan kritik bir bölgede yaşanan şekil değişimi dağılımına farklı n etkisi aşağıda yer alan Şekil 2.10’da gösterilmiştir. “ n ” değerinin düşük seyrettiği bölgelerde plakalarda aşırı incelme ve kırılmaların görülmesi muhtemeldir. Aynı parça üzerinde n değerinin yüksek olarak gözlemlendiği bölgelerde aynı kritik bölgelerin çok daha dirençli olacağı beklenirken şekil bozulması yaşanan komşu bölgelerde yapılacak transferler ile hasara uğramadan şekillendirme şansı elde edilecektir (Esner 2006).



Şekil 2. 10. “n” değerinin kritik deformasyon miktarına etkisi (Esner 2006)

2.2.2.2. Birim Şekil Değiştirme Hızı Duyarlılığı Üsteli

Birim şekil değiştirme hızı, gerilim dağılımına yardımcı olan önemli özellikler arasında yer alırken birim şekil değiştirme hızına bağlı duyarlılık üsteli “ m ” pozitif olan malzemelerde boyun verme olayı ardından şekil değiştirme miktarında artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu tür malzemelerde özellikle plastik gerilimin boyun verme bölgesinde arttığı dikkat çekerken boyun verme olayının çevreye yayılımında önemli rol oynamaktadır. Böylelikle kalınlığa bağlı incelmelerin yalnızca bir bölgede değil tüm malzeme üzerinde gelişmesi sağlanmaktadır (Özçelik 2008).

Sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda birim şekil değiştirme hızının malzeme mukavemetini oldukça etkilediği gözlemlenirken sıcaklığın stabil olduğu durumlarda birim şekil değiştirme miktarına yönelik aşağıda yer alan bağıntının geçerli olduğu kabul edilmektedir.

$$\sigma = C\varepsilon^m \quad (2.35)$$

σ = Plastik gerilme (veya akma gerilmesi),

C = Malzeme Sabiti,

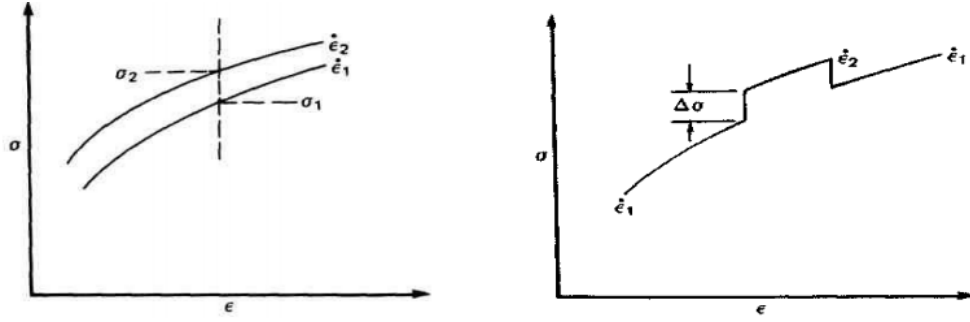
m = Şekil değiştirme hızı duyarlılığı üssü,

ε = Birim şekil değiştirme hızı.

Burada C malzeme sabiti olarak ifade edilirken m ise şekil değişimi hızına duyarlılık üsteli olarak belirtilmektedir. m 'nin belirlenmesinde iki tip yöntem kullanılırken bunlardan birisi farklı şekil değişim hızlarında gerilme-birim şekil değişimi eğrileri elde edilmektedir. Yukarıda yer alan denklem kullanılarak sabit bir şekil değişiminde gerilmelerin oranlarının kıyaslanması mümkündür (Şener 2012).

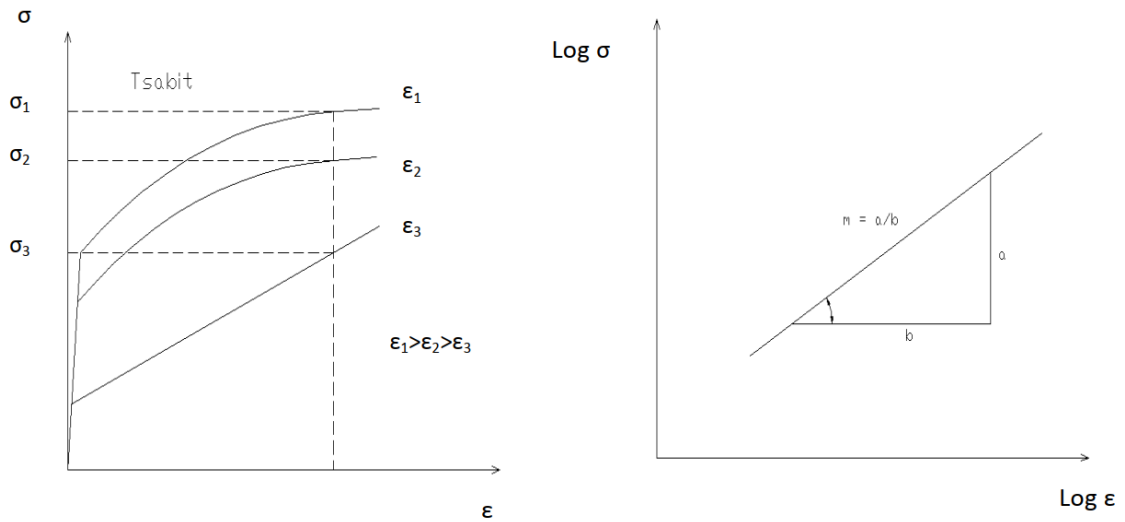
Diğer yöntemlerden birisi de çekme testinin gerçekleştirilmesi esnasında şekil değişim hızlarında farklılıklar gerçekleştirilerek gerilme değerleri arasındaki farkın tespiti ile elde edilmektedir. Denklem 2.36'da “ m ” değerinin nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir (Şener 2012).

$$m = \frac{\Delta \log \sigma}{\Delta \log \varepsilon} = \frac{\log \sigma_2 - \log \sigma_1}{\log \varepsilon_2 - \log \varepsilon_1} = \frac{\log \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)}{\log \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)} \quad (2.36)$$



Şekil 2. 11. m 'in belirlenmesinde kullanılan 2 metot (a) Farklı şekil değişim hızlarında elde edilen gerilme- birim şekil değişimi eğrileri; (b) Çekme testi sırasında şekil değişimi hızının değiştirilmesi (Şener 2012)

Birim şekil değiştirme hızı duyarlılığı üssü " m " $\text{Log}\sigma\text{-Log}\epsilon$ grafiğinin eğimine eşittir. Böyle bir grafik Şekil 2.12'de gösterildiği gibi sabit sıcaklıkta, farklı şekil değişimi hızlarında yapılan çekme deneyleri sonuçlarından yararlanılarak çizilebilir (Özçelik 2008).



Şekil 2. 12. Farklı birim şekil değiştirme hızı ile yapılan deneylerden m 'nin tayini (Özçelik 2008)

2.2.2.3. Anizotropi Katsayısı

Bir kabul olarak nitelendirilen izotropi, tüm sac metal malzemelerin haddeleme ile üretilmesini ve içerisinde yer alan bazı kusurları kapsamaktadır. Haddeleme ile birlikte tanelerin haddeleme paralelinde uzadığı gözlemlenirken neticesinde malzemenin farklı doğrultularında birbirinden ayrı mekanik özellikler gözlemlenmektedir. İzotropik

malzemeler mekanik özellikler açısından bağımsız olarak nitelendirilirken her doğrultuda aynı özelliklerin görüldüğü belirtilmektedir (Özer 2011).

Malzeme özelliklerinin yöne bağımlılığına anizotropi denmektedir. Metallerde iki tür anizotropi vardır. Bunlar; kristalografik ve mekaniktir. Mekanik anizotropi veya lif oluşumu, yırtılma ile ilişkilendirilirken, kristalografik anizotropi veya tercih edilen yönlenme, plastik deformasyon veya bükülme ile ilişkilidir. Kristalografik anizotropi, kalıplama nedeniyle kristal taneciklerinin tercih edilen yöneliminden kaynaklanır. Örneğin soğuk haddelemede taneler belirli bir yol boyunca döner ve böylece belirli düzlemler sac düzlemine paralel hale gelir (Şener 2012).

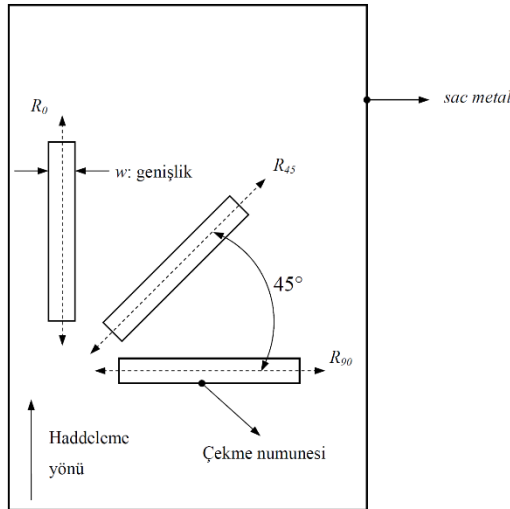
Bir sac kristalografik yönlenmeden dolayı farklı yönlerde (0° , 45° , 90°) farklı anizotropi değerlerine sahiptir. Anizotropi, genişlikteki şekil değişiminin kalınlıktaki şekil değişimine oranı olarak ifade edilir:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.37)$$

ε_w = Genişlikteki birim şekil değiştirme,

ε_t = Kalınlıktaki birim şekil değiştirme.

Sac malzemelerde “r” nin Şekil 2.15’de gösterilen sacın haddeleme yönüne göre (0° , 45° , 90°) farklı değerler verdiğini bilmekteyiz. Bu nedenle elde edilen farklı dikey anizotropi katsayılarının ortalaması alınır.



Şekil 2. 13. Haddelemeden çıkmış sac malzeme üzerindeki anizotropi yönlerinin gösterimi (Özer 2011)

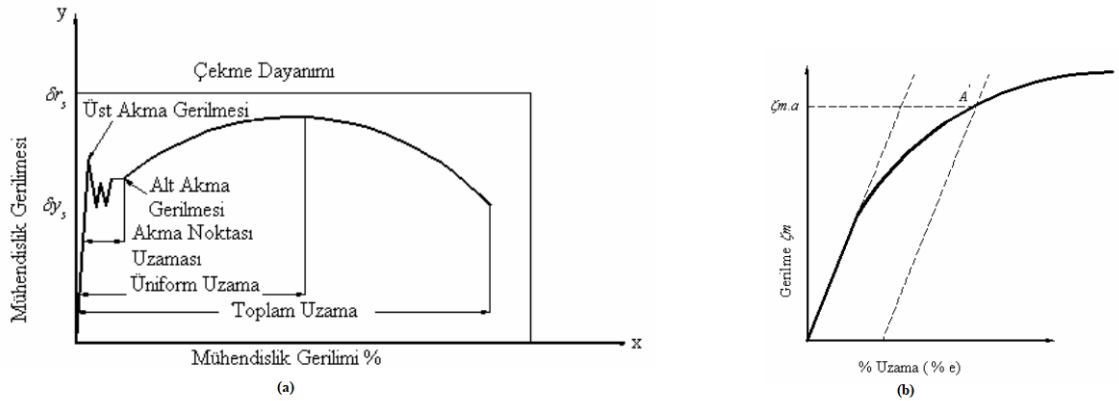
Bu durumda ortalama dikey anizotropi katsayısı şu şekilde tanımlanır:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (2.38)$$

Ortalama dikey anizotropi katsayısı olarak ifade edilen “ r ” sac malzemelerinde derin çekilmenin bir ölçüsü olarak kabul edilirken 1 sayısından büyük olması gereklidir. Diğer bir deyişle levhanın kalınlık yönündeki birim çekme dayanımının, genişlik yönündeki birim direncinden büyük olması istenir. Bu nedenle, malzeme kalınlığında büyük bir incelme olmadan, düzgün deformasyon esas olarak levhanın düzleminde meydana gelir ve kalıplama başarılı olur (Özçelik 2008).

2.2.2.4. Akma Dayanımı

Çekme limiti, çekmede elastik deformasyonun bittiği ve plastik deformasyonun başladığı nokta olarak ifade edilmektedir. Pek çok serbest hareket eden makası olmayan sertleştirilmiş çelik gibi malzemelerin bir miktar üst akma dayanımı vardır. Aşağıda yer alan Şekil 2.14a'da plastik deformasyonun oluşabilmesi için plakanın tüm bölgelerinde bu noktanın aşılması gerekmektedir. Tavlanmış alüminyumda akma düzgün bir şekilde gerçekleşir ve akma noktası (akma noktası), eğrinin paralelliğinin gerilme noktasındaki eğriyi %0,1 veya %0,2 aştığı nokta olarak alınır. Bununla birlikte, Şekil 2.14b'de, ince bir levha oluşturulurken pürüzsüz akış arzu edilen bir malzeme özelliğidir. Küçük miktarlarda ara eriyik atomları içeren malzemeler, %4-5 plastik gerinim ile kararsız gerilme NSA davranışı gösterir. Verim uzaması olarak adlandırılan bu davranış, alaşım atomlarında dislokasyonların sürekli olarak tutulması ve birikmesinden ve bunların sonraki sıralamasından kaynaklanmaktadır. Levha malzemesinde bu durum tahrik mili ile 55° eğimli olan Luder eğrisi ile açıklanabilir ve bu durum levha yüzeylerinde bozulmalara hatta çatlaklara neden olabilmektedir (Esner 2006).



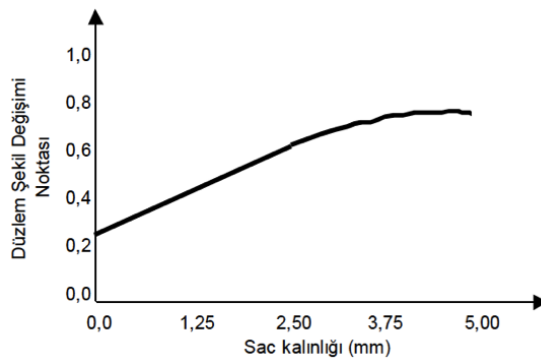
Şekil 2. 14.(a) Orta karbonlu çeliklerin gerilme BŞD eğrisi; **(b)**Düzgün akma gösteren bir malzemenin çekme diyagramında akma gerilmesinin bulunması (Esner 2006)

2.2.2.5. Sac Parça Geometrisi

Pres içerisinde malzemelerin şekillendirilebilmesi malzemenin prese koyulmadan öncesindeki kalınlık durumu ile direkt olarak ilişki içindedir. Malzemenin kalınlığının artması deformasyon miktarının da aynı paralelde artmasına yol açmaktadır. Plaka kalınlığına ilişkin kopma etkisinin gözlemlenebilmesi için 0,5 ve 2,0 mm kalınlıklarındaki alüminyum numuneleri bir çekme deneyine tabi tutularak çekme mukavemeti ve deformasyon pekleşmesi üssü (n) değerinde herhangi bir değişikliğin gözlemlenmediği fakat % kopma uzaması değerinde 0,5 mm'lik bir sac için daha az olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Plakada artan kalınlık, kusurların da etkisinin azalmasına yol açarken şekillenme sınırını artırmaktadır (Gündü 2000).

Normal zamanda presleme işleminde yararlanılması amaçlanan plakalar için iç yapı kusurları kadar yüzey pürüzlülüğü de deformasyon sınırını etkilemektedir. Yüzey pürüzlülüğünün etkisinin ise malzeme incelidikçe artış gösterdiğini söylemek mümkündür. Bunun için belirli kalınlık üzerindeki plakalar adına yüzey pürüzlülüğünün büyük etkisinden bahsetmek mümkün değildir. Tane boyutları ile paralellik gösteren yüzey pürüzlülüğü, deformasyon sınırının plaka kalınlığı yanında tane boyutunun da göz önünde bulundurulmasını gerekli kılmaktadır (Gündü 2000).

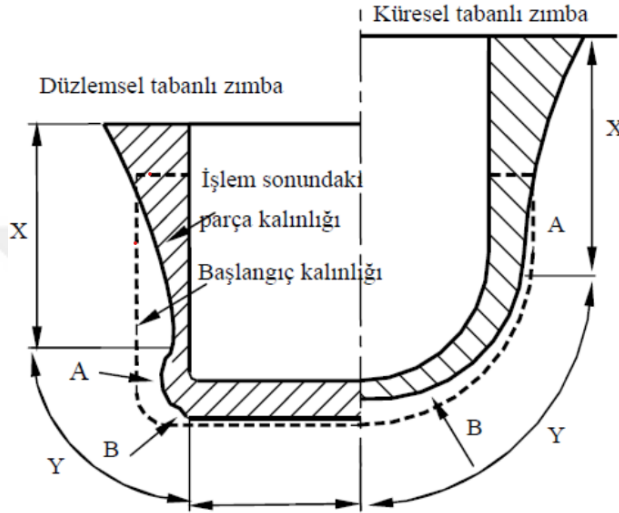
Aşağıda yer alan Şekil 2.15'de malzeme kalınlığı ile düzlem deformasyon şartını ifade eden bölge arasındaki ilişki sunulmuştur. Burada yer alan plaka kalınlığının etkisinin 3 mm kalınlık ardından sabit kalması beklenmektedir.



Şekil 2. 15. Baskı plakasının kuvveti ile şekillendirme derinliği arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Özçelik 2008)

Bölgeler kapsamında iş parçalarında ortaya çıkan kalınlık değişimlerine ilişkin veriler aşağıda yer alan Şekil 2.16'da sunulmuştur. İçinden geçmeye zorlanan malzemelerin kalıp boşluklarının çapı, halkanın başlangıç çapından küçük olması nedeniyle teğetsel basınç gerilmeleri malzeme yığılmasına neden olmaktadır. X bölgesinde gözlemlenen kalınlaşma iş parçasının ağız kısmında giderek artış gösterirken bölge bitiminde iş parçasında boyun oluşumu dikkat çekmektedir. Y bölgesinde yer alan

sac malzeme, zımba yarıçapı ve kalıbın ön kenarı boyunca kayabilir ve bükülebilir ve kalıp ile zımba arasında gerinebilmektedir. Bu, Şekil 2.16'daki B gibi, bükülmenin meydana geldiği noktada ikincil incelmeye neden olur. Z bölgesinde iş parçasının delik yüzeyinin yüzeyi ile temas halinde olan kısımları esneyip kaymaya çalışır yani giriş yönünde esnerler. Gerilme durumu diğer bölgelere göre daha homojen olduğu için iş parçasının alt kısmındaki et kalınlığı fazla değişmez (Kara 2011).



Şekil 2. 16. Farklı geometrik kalıplar için derin çekme işleminde kütük kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması (Kara 2011)

2.2.2.6. Elastisite Modülü

Gerilme BŞD eğrisinin “0” yer aldığı noktadaki konum ile üst akma noktası arasındaki malzemelerin elastik bölgesi olarak ifade edilmektedir. Bölge içerisinde Hook Kanunu geçerli olmakla birlikte bu doğruda meydana gelen eğim, malzemenin elastisite modülünü yönlendirmektedir (Esner 2006).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_e} \text{ (HookKanunu)} \quad (2.39)$$

Elastisite modülü birçok analizde stabil olarak ele alınırken gerçekleştirilen diğer çalışmalarda elastisite modülünde meydana gelen deformasyonun değişikliğe neden olduğu ve bu değişimin göz önünde bulundurulması sonucunda çok daha yüksek doğruluk ortaya koyan analiz sonuçlarına ulaşılabileceği gözlemlenmektedir. Malzemelerin atomik yapısına, kimyasal bileşimlerine, hadde yönüne ve ısı işlemi gibi faktörlerine bağlı olarak değişiklik gösteren elastisite konusunda gerçekleştirilen çalışmaların birçoğunda, elastisite modülünün yüksek olması sonucunda geri yaylanma miktarında düşüklük gözlemlenmiştir (Karagöz 2017).

2.2.2.7. Kalıntı Gerilmeler

Sac lar şekillendirilirken üniform olmayan deformasyonlar nedeniyle üründe kalıntı gerilmelerin doğduğu görülmektedir. Dengelerin bozulmasıyla birlikte oluşan kalıntı gerilmeler, parçaların çarpılmasında rol oynarken yüzeyde meydana gelen çekme kalıntı gerilmelerinin giderilmemesi durumunda gerilmeli korozyon çatlama sının yaşanması kaçınılmaz bir hal almıştır (Çapan 2003).

2.2.2.8. Geri Yaylanma

Yüksek çekme, germe ve bükme kuvvetleri ile birlikte alınan form, sac malzeme üzerinden bu kuvvetlerin kalkması ardından malzemenin elastik özellikleri nedeniyle parça geometrisinde ortaya çıkan büyük oranda elastik nadir olarak da olsa elastik-plastik değişimi olarak tanımlanan bir geometrik değişim yolu ile gerçekleşerek kaybetmektedir. Bu olay geri yaylanma olarak ifade edilmektedir (Kurt 1985).

Sac şekillendirme işlemlerinde parça toleranslarına ilişkin üretimin gerçekleştirilebilmesi amacıyla malzemede geri yaylanmaya yönelik davranışların dikkate alınması ve telafi yöntemiyle form değişikliğine gidilmesi önem taşımaktadır. Kalıp yüzeyleri tarafından üretimi gerçekleştirilen parçaların cad modeli kapsamında değil geri yaylanma davranışını tolere edecek şekilde formunda değişiklik yapılması gerekmektedir. Çoğunlukla büyük kütleler üzerinde gerçekleştirilen kalıp üretimlerinde meydana gelen bir hatanın telafisi büyük maliyetler gerektirirken aynı zamanda büyük problemleri de beraberinde getirebilmektedir. Bu nedenle simülasyon ile deneysel olarak elde edilen verilerin tutarlı olması oldukça önemlidir (Karagöz 2017).

Derin çekme operasyonları esnasında geri yaylanma miktarının azaltılmasındaki en etkili yöntemlerden birisi şüphesiz ki baskı plakası kuvvetinin değiştirilmesidir. Baskı plakası kuvveti, çıkıntılara neden olacak kadar düşük veya yırtılacak kadar yüksek olmamalıdır. Baskı plakasının kuvveti belirli bir değerde tutularak geri tepme miktarı azaltılabilir ve yırtılma, buruşma gibi istenmeyen sonuçların önüne geçilebilmektedir (Çapan 2003).

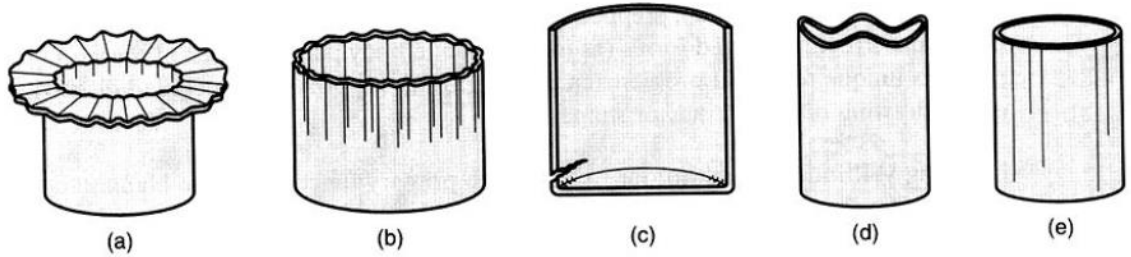
2.2.2.9. Malzemenin Kimyasal Bileşeni

Çok daha düşük karbonlu çeliklerin kullanılması uygun bulunan biçimlendirme işlemi için çeliklerin genel olarak % 0,15'ten az karbon ve kalıntı elementleriyle birlikte toplamda %1'in altında alaşım elementi içermesi gerekmektedir. Yüksek mukavemete sahip çeşitli düşük alaşımlı çeliklerin çok daha fazla karbon ve diğer alaşım elementleri içerdiği görülürken ana element olarak mangan miktarı %0,20 ile %0,60 arasında değişmektedir. Oksidasyonu kontrollü bir şekilde ortadan kaldırmak için veya özel amaçlarla silikon, niyobyum, titanyum veya alüminyum eklenebilir. Çelik üretimi sırasında çeliğin kalitesini belirleyen kükürt, krom, nikel, molibden, bakır, azot ve fosfor gibi artık elementler mümkün olduğunca azaltılmalıdır. Alaşımlı çelik içeriğinde bu elementlerden belirli miktarlarda bulunmaktadır (Özçelik 2008).

Karbon miktarının artırılmasıyla birlikte mukavemetin de artış gösterdiği gözlemlenirken süneklik düşmektedir. Ferrit yapısı içersinde yer alan karbür fazının oluşumu bunun temel nedeni olarak dikkat çekerken ince tane boyutunun oluşumunu da desteklemektedir. Çoğunlukla karbon miktarının %0,10 ile sınırlı olduğu bilinirken şekillendirme yeteneğinin artırılması amacıyla çok daha azaltılması gerekmektedir (Özçelik 2008).

2.3. Sacların Derin Çekilmesinde Karşılaşılan Hatalar

Geniş bir üretim alanı olan derin çekme işleminde malzeme, kalıp konstrüksiyonu veya tezgah kaynaklı bir çok hata meydana gelebilmektedir. Sorunsuz bir üretim aşaması için oluşabilecek bu hataların önceden tahmin edilip ona göre çözüm yollarının geliştirilmesi önem taşımaktadır. Kulaklanma, yüzey pürüzlülüğü, lüder çizgilerinin oluşumu, buruşma, çatlama, yırtılma gibi bazı derin çekme hataları şematik olarak Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 17. Derin çekme hataları (a)Flanş bölgesinde buruşma; (b)Flanşsız çekmede kenar buruşması; (c)Yırtılma; (d)Kulaklanma; (e)Lüder çizgileri oluşumu (T.C Milli Eğitim Bakanlığı 2006)

Derin çekme işleminde sıklıkla karşılaşılan hataları ve sebepleri Çizelge 2.5’de tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 2. 5. Derin çekme işleminde karşılaşılan hatalar ve sebepleri.

HATA	SEBEPLERİ
Buruşma	Uygunsuz baskı plakası kuvveti, Baskı plakası kuvvetinin tüm yüzeylerde eşit olmaması, Baskı plakası yüzeyinin düzgün olmaması, Sac malzeme kalitesinin düşük olması, Kalıp kavisinin çok büyük olması, Çekme boşluğunun çok büyük olması, Malzeme yüzeyinin kirli veya çapaklı olması,

Çizelge 2.5 'in devamı

Parçada Yırtılma veya Kırılma	Aşırı baskı plakası kuvveti, Kalıp kavisinin çok küçük olması, Zimba kavisinin çok küçük olması, Çekme boşluğunun çok küçük olması, Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması, Uygunsuz veya eksik yağlama, Sac malzeme kalitesinin düşük olması, Pres hızının çok yüksek olması, Çekme oranının çok yüksek olması, Kalıp, baskı plakası üzerinde oluşan çizik ve çentikler.
Düzensiz Çekme veya Kulaklanma	Çekme boşluğunun uygun olmaması, Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması, Sac malzemenin kalıp içerisine uygun yerleştirilmemesi, Uygunsuz yağlama.
Parça Kenarlarında Yırtılma veya Dalgalanma	Çekme boşluğunun uygun olmaması, Fazla yağlama, Kalıp kavisinin çok büyük olması, Eşit olmayan baskı kuvveti, Kalıp kenarlarının dışa esnemesi.
Parçanın Dip Kısımlarında Pürüzlenme	Sac malzeme kalitesi, Baskı plakasının yetersiz olması, Baskı plakası üzerinde yağ birikmesi, Hava çıkışının olmaması.

2.3.1. Kulaklanma

Derin çekilmiş kaplarda kulak oluşumu düzlemsel anizotropi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu kulakların sayısı 2, 4 ve 6 olarak değişmektedir. Derin çekme işlemi ardından kabın çevresi boyunca kesilen kulaklar, malzeme kaybına yol açması ile birlikte ek bir kesme işleminin maliyet yükseltmesi, kulak oluşumunu önemli bir hale getirmektedir (Çapan 2003).

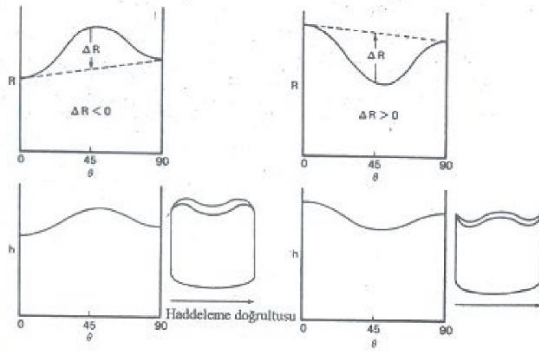
Kulaklanma, farklı yönlerdeki esneklik oranlarının farklı değerleri nedeniyle, deformasyonun en büyük olduğu yönlerde derin çekme işlemlerinde meydana gelir. Buradan kulak zarının malzemenin yapısında oluşturduğu doku nedeniyle anizotropik bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Doku oluşumu, malzeme üretiminin tüm aşamalarında meydana gelebilir ve üretim sürecinin aşamaları arasında birbirini etkileyerek doku yapısının yoğunluğunu etkileyebilir. Bu amaçla üretim aşamalarının doku oluşumunu en aza indirecek şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, malzemede oluşan dokunun yönü ve miktarı anizotropi derecesini ve dolayısıyla ikame oranını etkileyecektir (Çetin H. 2005).

Kulak oluşumuna yol açan düzlemsel anizotropi katsayısı denklem (2.40)'da olduğu gibi matematiksel olarak ifade edilebilir:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (2.40)$$

Düzlemsel anizotropiye sahip olan parçaların haddeleme yönüne doğru herhangi bir açıya sahip olan yönde farklı şekil değiştirme özelliği gösterirken saclarda Δr 'nin sıfır ile eşit olması beklenmektedir. Böylelikle kalıbın üst kısmında kulak olarak ifade edilen dalgalanmaların meydana gelmesinin önüne geçilmesi sağlanmaktadır. Eğer ($\Delta r < 0$) ise 45° 'lik yönlerde ($\Delta r > 0$) ise 0° ve 90° 'lik yönlerde kulak oluşumu görülür (Özçelik, 2008).

Şekil 2.18'de haddeleme doğrultusu ile yaptığı açığa göre dikey anizotropi oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 2. 18. Saclarda dikey anizotropi parametresinin haddeleme doğrultusu ile değişimin kulak oluşumuna etkisi (Şener 2012)

2.3.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Derin çekme işlemi kapsamında bir sacın özellikle derin çekme işleminden sonra aşırı deforme olan bölgelerindeki yüzey pürüzlülüğüne portakallanma denmektedir. Malzemenin derin çekilebilirliğini etkileyen ve portakal kabuğu görünümünden dolayı ticari değerini azaltan bu kusur, kullanılan yaprağın iri taneli olmasından kaynaklanmaktadır. Tane boyutu görünür yüzey pürüzlülüğüne neden olur; Deformasyon miktarı alaşımın yapısına ve ürünün cinsine göre değişir. Genelleme yapmak gerekirse, yüzey kalitesi açısından çok hassas olan parçaların imalatında maksimum 0,04mm tane boyutu tavsiye edilir. Yüzey kalitesinin kritik olmadığı durumlarda 0,06 ile 0,07 mm arasında tutulması esnekliği arttırmaktadır (Esner 2006).

Maruz kalınan bu hataların bertaraf edilmesi adına kalıp parçalarına ait yüzeylerin keçe ile parlatılması ya da yüzeyin kromlanması gerekmektedir. Bu işlemler imal edilen parçanın maliyetini arttırdığından iş parçaları bunun yerine tavlanarak sertleştirilir veya

normalize edilir. Ancak bu işlemlerde tasarlanan parçanın yırtılmamasına dikkat edilmelidir (T.C Milli Eğitim Bakanlığı 2006).

2.3.3. Lüder Çizgileri

Tavlanmış sacların akma uzamasının neden olduğu bir tür yüzey pürüzlendirmesi, derin çekme Al-Mg alaşımlı sacların ortak bir özelliğidir. Bazı bölgelerde çekme altında çok az deformasyon olmasına rağmen, kayma gerilmesinin maksimum değerine ulaştığı ve sonraki yükte 45 derecelik açı oluşturduğu yönlerde bölgesel genişlemeler meydana gelir ve yüzeyde oyuklaşma meydana gelir. Deformasyon devam ettikçe çöküntüler geniş bir alana yayılarak derin drene olmuş rezervuar yüzeyinde iskelet benzeri dağılım gösteren pürüzlü alanların oluşmasına neden olur. Uygulanan gerilim sıkıştırıcı olduğunda pürüzlü alanlar çıkıntılar olarak görünür. Farklı türdeki yükleme hatlarının ortak bir özelliği, istenmeyen pürüzlü ve pürüzlü yüzeylerin oluşmasıdır. Bunun nedeni, tasarlanan malzemenin saf olmaması ve yüksek kaliteli yüzey olabileceği gibi, yağlama maddesinin yetersizliği de olabilmektedir (Kara 2011).

2.3.4. Buruşma

Zımba ile kalıp arasında kalan mesafenin büyüklüğü, sıkıştırma kuvvetinin yetersizliği, kalıp ve zımba eğrilik yarıçapının büyüklüğü, taslak çapının fazla büyüklüğü ya da malzemelerin inceliği buruşmayı meydana getirebilmektedir. Yakalanan uygun kalıp geometrisi ve sıkıştırma basıncının yakalanması ile buruşmanın önüne geçilebilmektedir (Kara 2011).

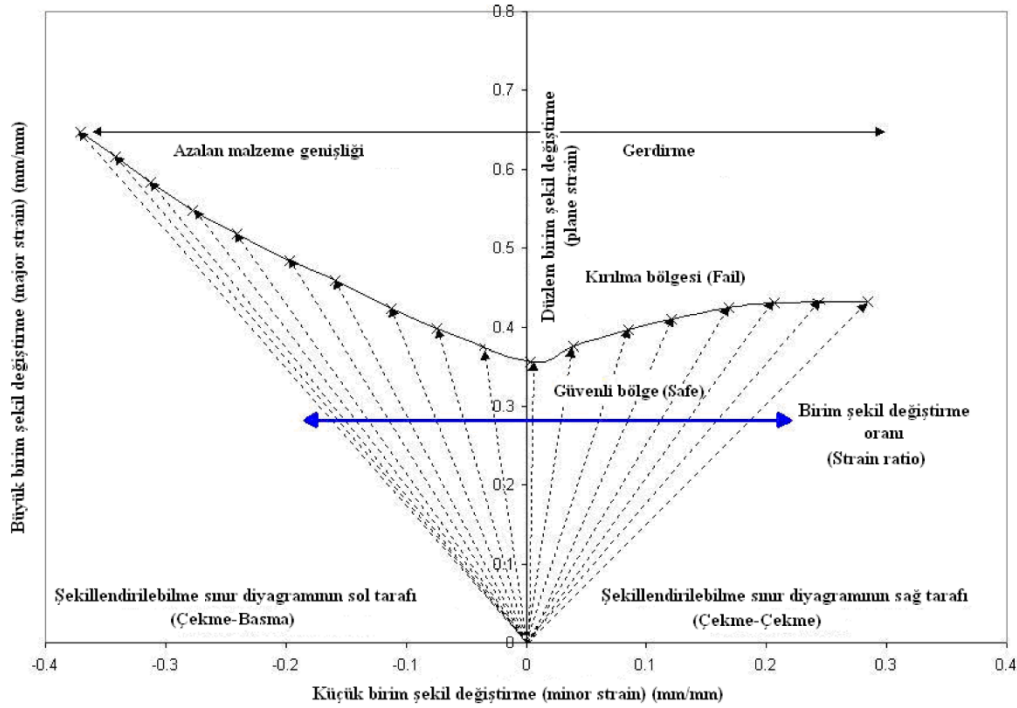
2.3.5. Çatlama

Derin çekmede, çatlama genellikle kalıbın eğrilik yarıçapının üzerinde meydana gelir. Zımba veya kalıbın eğrilik yarıçapı küçük, malzeme özellikleri yetersiz, derin çekme derecesi yüksek, sıkıştırma basıncı yüksek, zımba ile kalıp arasındaki mesafe küçük, yağlama yetersiz ise bu durum hatalara yol açabilmektedir. Bu faktörlerin yetersiz olması sonucunda kopma mukavemeti artmakta ve malzeme incelerek kritik bölgede kırılma görülmektedir. Bu hata, daha kaliteli malzemeler kullanılarak ve zımba kuvvetini azaltacak önlemler alınarak önlenmektedir. Bazı durumlarda parçanın üst kısmında veya iş parçasının dışında çatlaklar oluşmaktadır. Bunun nedeni, malzemenin dış çevre baskısına dayanamayacak kadar zayıf özelliklere sahip olmasıdır. Malzemedeki çukurlar gibi baskılar da çatlama neden olabilmektedir (Esner 2006).

2.4. Şekillendirme Sınır Diyagramları (SSD)

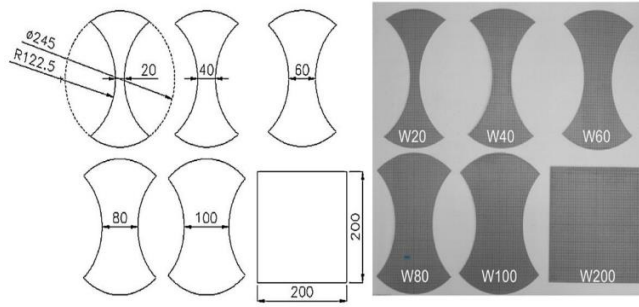
Sac malzemelerin şekillendirilebilirlik sınırları genellikle boynun başlangıç noktası tarafından belirlenmektedir. Malzeme boyundan hemen sonra kırılmasa bile konikliği belirlemek için kullanılan gerilme birim değerleri davranış tahmin edilemediğinden sınır değerler olarak kabul edilir. Bir malzemenin yüksek ve düşük gerilim hızlarında akma dayanımını gösteren bir diyagrama "akma sınırı diyagramı

(FLD)" denir. Bu tablo, basit bir çekme testinden başlayarak tüm düzlem ve çift eksenli gerinim modlarını kapsamaktadır. Şekillendirme limit diyagramları, metallerin şekillendirilebilirliğinin değerlendirilmesinde ve şekillendirme problemlerinin analiz edilmesinde ve çözülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı geometrilerle yapılmış metal numunelere özel ızgaralar uygulanarak ve bu ızgaraların deformasyon sonrası boyutları değerlendirilerek malzeme oluşum limit diyagramı elde edilir. Her geometri bir gerilim durumu içerir. Öztürk ve Lee'nin çalışması, ortaya çıkan sınır diyagramı hakkında ayrıntılı bilgi sağlar. Deneysel olarak bir performans limit diyagramı elde etmek çok zaman alıcıdır ve özel ölçüm sistemleri gerektirir. Yapısal limit diyagramı ilk olarak 1963'te Keeler ve Backofen ve 1968'de Goodwin tarafından önerildi. Keeler ve Backofen, Şekil 2.19'daki yüksek ve düşük gerinim hızlarının pozitif olduğu (formasyon sınır diyagramının sağ tarafı) bölümü geliştirirken, Goodwin yüksek ve düşük gerinim hızlarının negatif olduğu bölümü geliştirmiştir (Emrah Uysal 2010).



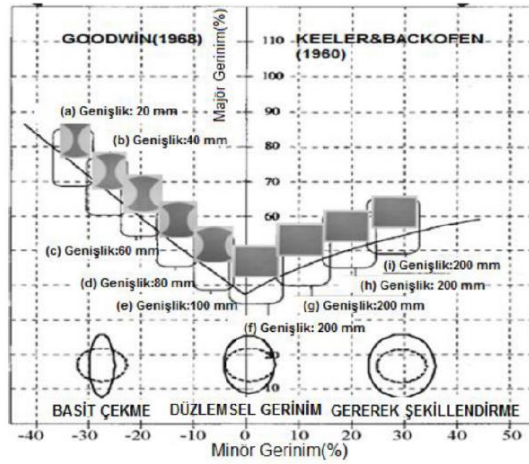
Şekil 2. 19. Şekillendirme sınır diyagramı (Emrah Uysal 2010)

Kim, Huha, Bok ve Moon çeşitli çelik malzemeler için oluşturdukları ve şekillendirme sınır diyagramı için kullandıkları numune ölçüleri Şekil 2.20'deki gibi gösterilmiştir.

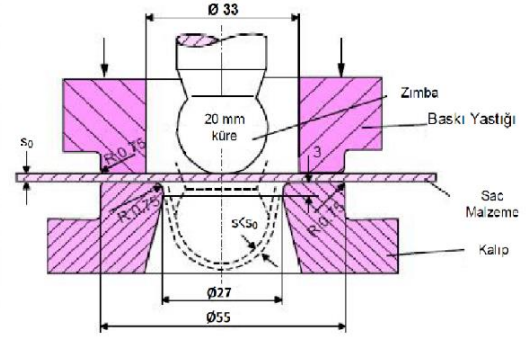


Şekil 2. 20. Şekillendirme sınır diyagramı için kullanılan standart numuneler (Aydoğan 2015)

Nakajima testinin bilinen en iyi metot olduğu yapılan çeşitli deneylerle ileri sürülmüş ve günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu test ile kırılma meydana gelene kadar başta Şekil 2.21b’de belirtildiği gibi küresel zimba kullanılarak numunenin şekil değiştirmesi prensibine dayanmaktadır. Bu grafik Şekil 2.21b’de gösterildiği gibi yedi adet test örneğinin kırılma bölgesindeki asal BŞD değerinin grafiğe işlenmesi ile elde edilir (Aydoğan 2015).



(a)



- a) Üretim aşamalarının tam anlamıyla modellendiği söylenemez,
- b) Malzeme kalitesinin yanı sıra kullanılan malzemenin boyutu, yağlama şartları, deney ekipman standardı da deneylerde elde edilen sonuçları çok fazla etkiler,
- c) Elde edilen kap yüksekliği veya sınır çekme oranı gibi bir bilgi malzemenin kalıplama performansı hakkında fazla bilgi veremez.

Benzetim deneyleri ancak farklı malzemelerin şekillendirilebilirliklerini karşılaştırmak amacıyla kullanılabilir. Mekanik deneyler de malzemenin şekillendirilebilirliği hakkında kaba bir bilgi verir. Buna karşın, şekillendirme sınır diyagramları (ŞSD) şekillendirilebilirliği belirlemede etkin bir araç olup, bu grafiklerde simülasyonlarda yararlanılmasıyla malzemenin kalıplama performansına ilişkin çok sayıda fikir elde edilmesi mümkündür (Türköz 2009).

ŞSD, disk malzemelerinin BŞD analizleri tarafından oluşturulan sınır eğrilerinin oluşturulmasından oluşur. Bu eğrileri deneysel olarak elde etmek için, kimyasal dağlama, elektro oyma veya fotoğraf baskı gibi özel teknikler aracılığıyla BŞD limit ölçümü için levhanın yüzeyini oluşturmada önce dairesel bir ağ tasarlanmalıdır. Test örneğinin RSD özelliklerini karşılaştırmak için dairelerin çapı mümkün olduğunca küçük olmalıdır (araştırmacılar en uygun daire çapı olarak 2,54 mm'yi önermektedir). Dairesel ızgaralar yüzeye uygulandıktan sonra sac bulaşmadan yırtılma görülene kadar şekillendirilir ve incelme ve yırtılma yerlerinde dairelerin şekli gözlenir (Değirmenci 2006).

Şekillendirme ardından dairelerin elipse dönüştüğü görülürken buna ilişkin görsel Şekil 2.22'de sunulmuştur. Bir elipsin büyük ekseni d_1 , küçük ekseni d_2 ve deformasyondan önceki daire çapı d_0 ise şekil değişiminden sonra oluşan büyük asal BŞD'leri (e_1 ve ε_1) ve küçük asal BŞD'leri (e_2 ve ε_2) Denklem (2.41-2.44) eşitlikleri ile hesaplanır (D. Banabic 2010).

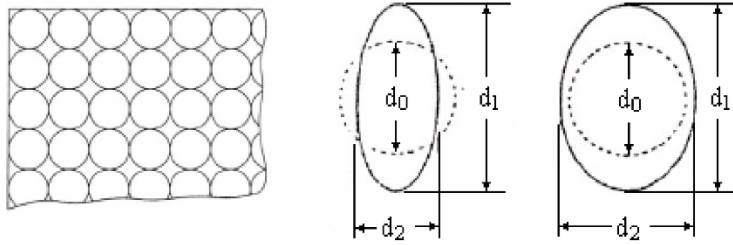
$$e_1 = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \quad (2.41)$$

$$\varepsilon_1 = \ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right) \quad (2.42)$$

$$e_2 = \frac{d_2 - d_0}{d_0} \quad (2.43)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right) \quad (2.44)$$

Bu BŞD'ler e_1 ve ε_1 daima artıdır; e_2 ve ε_2 ise artı veya eksi olabilmektedir. e_1 ve e_2 'nin yerine ε_1 ve ε_2 'nin kullanımı daha uygun sonuçlar vermesine rağmen, çoğu araştırmacı e_1 ve e_2 'yi kullanmaktadır.

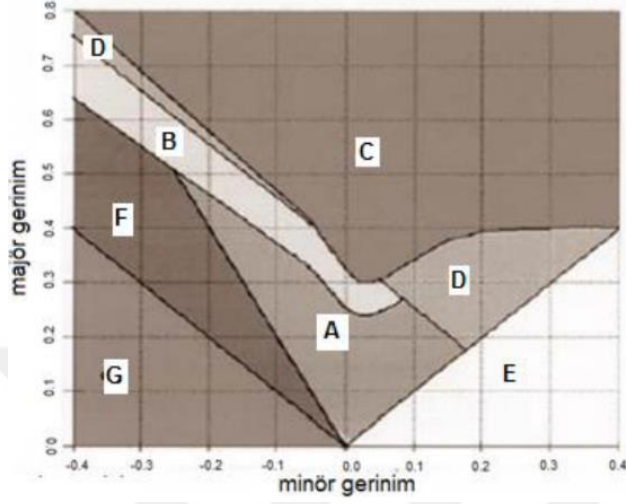


Şekil 2. 22. Şekillendirmeden önce yüzeye uygulanan dairesel mesh görüntüsü ve dönüşümden sonra değişen elipslerin boyutları (Değirmenci 2006).

Tek eksenli çekme yöntemine bağlı şekillendirme e_1 artı ve e_2 eksi değerlerde ifade edilirken sac üzerindeki yüzeyde meydana gelen BŞD durumu çekme-basma olarak nitelendirilmektedir. Malzemenin gerilmeyle birlikte şekillendirilmesi büyük ve küçük eksenlerin ilk daire çapından büyük olmak zorundadır. Böylelikle çekme-çekme BŞD'lerinden bahsetmek mümkündür. Büyük BŞD'nin artıda, küçük BŞD'nin sıfır olduğu durumlarda düzlemsel bir BŞD hali gündeme gelirken büyük BŞD'lerin bir eksen takımında ordinata, küçük BŞD'lerin de apsise işaretlenmesiyle birlikte BŞD durumlarının yerlerinin gösterilmesi mümkündür (Değirmenci 2006).

ŞSD'ler bir malzemenin şekillendirilebilirliğini göstermenin yanında endüstride parça üretiminde başarısız tasarımlardan sakınmak için de kullanılır. Bu yöntemle derin çekme için güvenli aralık, boyunlaşmanın ve yırtılmanın oluşacağı muhtemel bölgeler, BŞD'nin derecesi yani şekillendirme sınırına ne kadar yaklaşıldığı ve uygun çalışma şartları (baskı plakası, yağlama vs.) belirlenebilir. Bu yöntem pratikte uygulanırken, ilk olarak tasarımcı tarafından imal edilecek parça için şekil, ölçüler, malzeme, şekillendirme yöntemi ve kalıplar belirlenir. Bu aşamadan sonra parçada şekillendirme sırasında oluşacak maksimum BŞD'lerin belirlenmesi amacıyla sonlu elemanlar programı ile analizler yapılır ve parçada oluşacak BŞD değerleri hesaplanır. Sonra bu değerler daha önce sonlu elemanlar programına girilmiş olan malzemenin ŞSD ile karşılaştırılır. Sonuçta şekillendirme sırasında oluşacak boyunlaşma ve yırtılma bölgeleri tahmin edilir. Yapılan analiz sonucunda parçada hasar beklenmiyorsa şekillendirmenin derecesi yani BŞD'lerin şekillendirme sınırına uzaklığı belirlenir. Eğer parçada hasar oluşacağı tespit edilmiş ise çalışma şartları (baskı plakası kuvveti, yağlama), parçanın tasarımı (radyüsler, açılar) veya malzeme (kalite, kalınlık) değiştirilerek hasarsız bir üretim için modifikasyonlar yapılır. Sonlu elemanlar programına ŞSD'nin yanında buruşma sınır diyagramı da girilerek buruşma bölgeleri de tahmin edilebilir (Türköz 2009). Şekil 2.23'de gösterilen "C" bölgesinin altında kalan alanlar şekillendirmenin kopma oluşmadan oluştuğu durumları göstermektedir. A bölgesi tavsiye edilen güvenli bölgedir,

B'de kopma ve kırılma tehlikesi görülür, *C*'de kırılma görülür, *D*'de aşırı incelme meydana gelir, *E*'de yetersiz plastik deformasyondan dolayı geri esneme tehlikesi görülür, *F*'de kırıxıklık eğilimi vardır, *G*'de aşırı kırıxıklık gelişimi ve malzeme kalınlaşması oluşur.

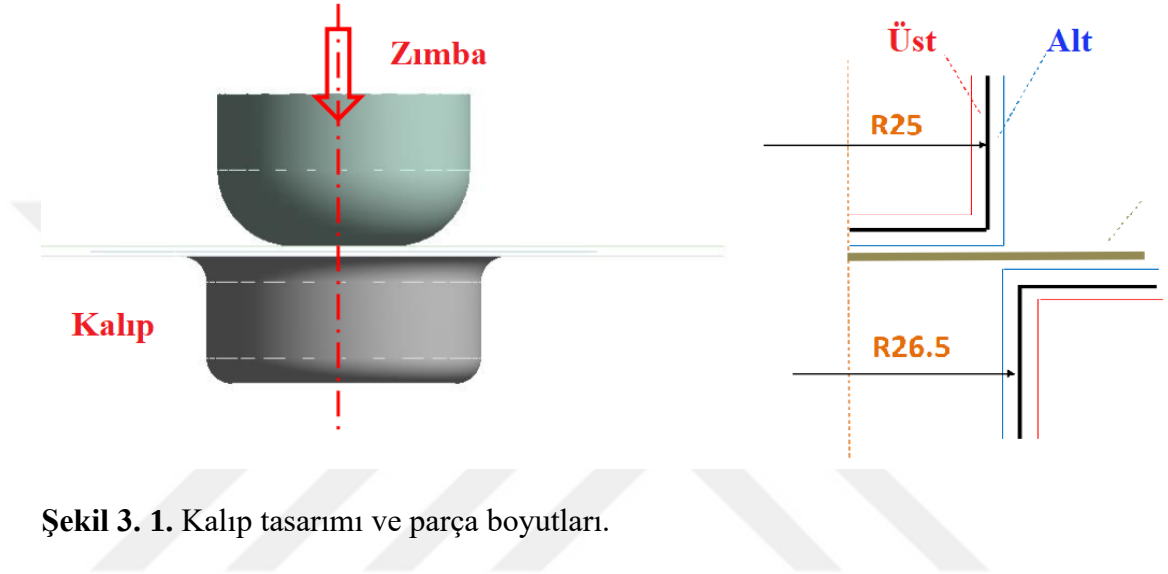


Şekil 2. 23. Şekillendirme sınır diyagramı deformasyon durum alanları (Türköz 2009)

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kalıp Tasarımı

Çekme işleminin tasarımına ilk önce parça boyutlarının ve özelliklerinin belirlenmesi ile başlanır. Bu çalışma kapsamında farklı zımba yarıçaplarında, sabit ve değişken baskı plakası kuvveti uygulanarak çekilen sacda meydana gelebilecek değişiklikler araştırılacaktır. Bunun için Şekil 3.1'deki parça örneklemesinden yola çıkarak kalıp tasarımı için gerekli hesaplamalar yapılacaktır.



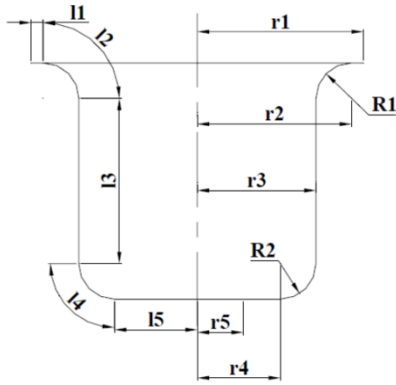
Şekil 3. 1. Kalıp tasarımı ve parça boyutları.

3.1.1. Çekilecek Sacın Açınımının Hesaplanması

Silindirik kapların çekilmeden önce açınımlarının hesaplanması gerekir. Açınımın hesaplanması kalıp tasarımı ve malzeme maliyeti açısından önem arz etmektedir. Hesaplanan açınımın üretimde öngörülemeyen değişkenleri yada üretim sonrası devam eden prosesler de hesaba katarak bir miktar tıraş payı eklenir.

Açınım çapının bulunmasında; alan yöntemi, çizim yöntemi, uzunluk ve ağırlık yöntemi gibi farklı metotlar kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin hepsi farklı metotlar olsa da aynı sonucu vermektedir.

Yöntemlerden bir tanesi olan uzunluk ve ağırlık merkezi metodunda çekmeye uğrayan kenarların uzunlukları ayrı ayrı hesaplanır ve ağırlık merkezlerinin çekme eksenine olan uzaklıklarının toplamı, çekilecek olan parçanın alanına eşit olur. Aşağıda bu metotla ilkel çap hesabı için gerekli olan denklem takımı verilmiştir.



Şekil 3. 2. Uzunluk ve ağırlık merkezi metodu ile ilkel çapın bulunması (Kara 2011)

$$L_2 = \alpha / 360 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \text{ (mm)} \quad (3.1)$$

$$S = \pi D^2 / 4 \text{ (mm)} \quad (3.2)$$

$$S_1 = 2\pi(r_1 \cdot L_1 + r_2 \cdot L_2 + r_3 \cdot L_3 + r_4 \cdot L_4 + r_5 \cdot L_5) \text{ (mm)} \quad (3.3)$$

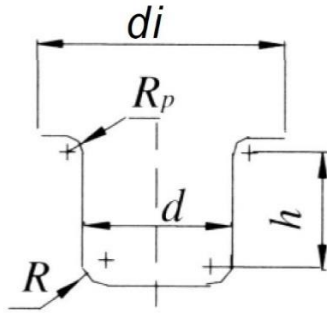
$$D = \sqrt{8 \cdot (r_1 \cdot L_1 + r_2 \cdot L_2 + r_3 \cdot L_3 + r_4 \cdot L_4 + r_5 \cdot L_5)} \text{ (mm)} \quad (3.4)$$

S : İlkel parça alanı,

S_1 : Kap Alanı,

D : İlkel(Taslak) çapı.

Çekilecek ilkel parça hesabındaki bir diğer yöntem de alan hesabı yöntemidir. İlkel parçanın ve çekilecek parçanın alanlarının eşit olması esasına dayanır. Şekil 3.3’de gösterilen örnek parçanın ilkel çapını hesaplamak için kullanılacak denklem basitleştirilmiş bir halde (3.5)’de verilmiştir.

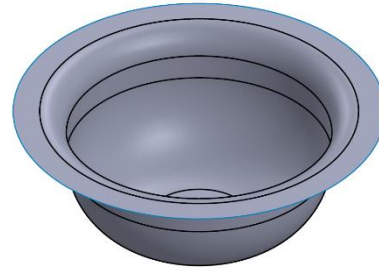
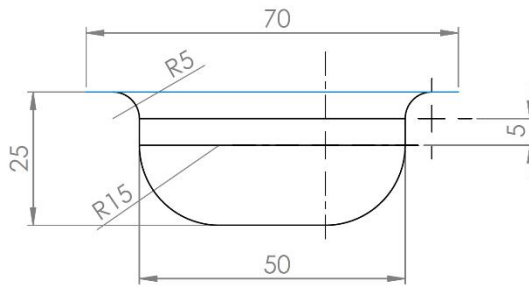


Şekil 3. 3. Radyal simetrik parça için

alan yöntemi ile ilkel parça hesabı.

$$D = \sqrt{d_1^2 + 4d \left[h + 0,57(R_p + R) \right]} \quad (3.5)$$

Şekil 3.4'deki taslak numune parçamız için ilkel çap hesabı aşağıdaki gibidir.



Şekil 3. 4. Taslak numune kesit resmi.

$$D = \sqrt{70^2 + (4.50) \left[25 + 0,57(5 + 15) \right]} = 110,36mm \quad (3.6)$$

3.1.2. Çekme Yüksekliği

Başarılı bir derin çekme işlemi için, çekme yüksekliğinin “ h ” parça çapına “ d ” olan oranının fonksiyonu aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$n = \frac{h}{d} \quad (3.7)$$

n : Çekme sayısı,

h : Parça yüksekliği,

d : Parça çapı.

Silindirik derin çekme için gerekli olan “ n ” değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir:

Çizelge 3. 1. Silindirik derin çekme parçası için gerekli olan “ n ” değeri (Boljanovic, 2004).

h/d	<0,6	0,6 - 1,4	1,4 - 2,5	2,5 - 4,0	4,0 - 7,0	7,0 - 12,0
n	1	2	3	4	5	6

Çalışma kapsamındaki iş parçasının sorunsuz olarak kaç kademe çekme işlemine tabi tutmamız gerektiğini veren denklem (3.7)’deki hesaplamaya göre:

$$n = \frac{h}{d} = \frac{25}{70} = 0,36 \quad (3.8)$$

Çizelge 3.1’e göre baktığımızda h/d oranı 0,6’dan küçük olduğu için $n=1$ çekme işlemi parçanın nihai şeklini elde etmek için yeterli olacaktır.

3.1.3. Zımba Yarıçapı

Zımba kenar yuvarlatma Denklem (3.9) yada Denklem (3.10) referans alınarak hesaplanabilir.

$$5T < R < 10T \quad (3.9)$$

Ya da;

$$R = (0,1 - 0,3)d \quad (3.10)$$

R : Zımba yarıçapı,

T : Sac kalınlığı,

D : Zımba çapı.

Çalışma kapsamında gerekli olan olan zımba yarıçapı Denklem (3.10)’a göre hesaplandığında:

$$R = (0,1 - 0,3)d = (0,1 - 0,3)50 = 5mm \Leftrightarrow 15mm \quad (3.11)$$

Zımba yarıçapı çalışmanın girdilerinden bir tanesini oluşturmaktadır. Malzemeye ve derin çekilebilirliğe olan etkilerini araştırmak için aşağıdaki çizelgede belirtilen değerler tasarım girdilerimizi oluşturmaktadır.

Çizelge 3. 2. Analiz için zımba yarıçapı değerleri.

$R(mm)$	3	5	7	9	11	13	15
---------	---	---	---	---	----	----	----

3.1.4. Matris Giriş Yarıçapı

Kalıp kenarının birinci kademe için yuvarlaklık miktarı Denklem (3.12)'ye göre hesaplanmıştır.

$$R_1 = 0,9\sqrt{(D-d).T} \quad (3.12)$$

D : İlkel (Taslak) parça çapı,

d : Çekme çapı,

T : Sac kalınlığı.

Çalışma kapsamındaki kalıp giriş yarıçapı Denklem (3.12)'ye göre hesaplandığında, tasarıma girdi oluşturacak yarıçap değeri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$R_1 = 0,9\sqrt{(D-d).T} = 0,9\sqrt{(110-50).1} = 7mm \quad (3.13)$$

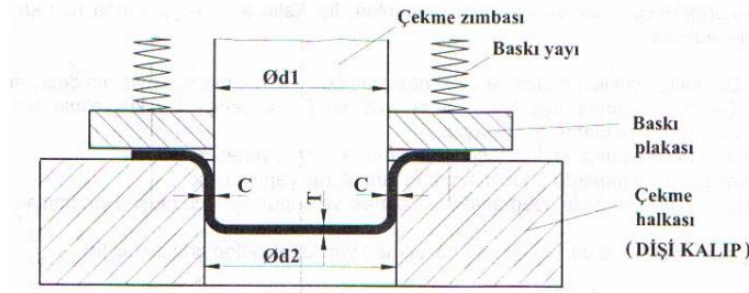
3.1.5. Çekme Boşluğu

Şekil 3.5'de gösterilen çekme boşluğu (C) için farklı malzemelerde uygulanması gereken çekme boşlukları aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$C = T + 0,07.\sqrt{10.T} \text{ (mm)} \quad (\text{Çelik için}) \quad (3.14)$$

$$C = T + 0,02.\sqrt{10.T} \text{ (mm)} \quad (\text{Alüminyum için}) \quad (3.15)$$

$$C = T + 0,04.\sqrt{10.T} \text{ (mm)} \quad (\text{Diğer malzemeler}) \quad (3.16)$$



Şekil 3. 5. Çekme boşluğu (T.C Milli Eğitim Bakanlığı 2006).

C : Çekme boşluğu,

T : Sac kalınlık.

Çalışma kapsamında çelik sac numunesi kullanılacağı için Denklem (3.15)'e göre hesaplandığında çekme boşluk değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$C = T + 0,07 \cdot \sqrt{10 \cdot T} = 1 + (0,07 \cdot \sqrt{10 \cdot 1}) = 1,22 \text{ mm} \quad (3.17)$$

3.1.6. Çekme Hızı

Çekme hızının, çekilen sac malzemenin fiziksel özellikleri ve deformasyonu üzerinde önemli bir etkisi vardır. Çekme hızı genellikle deneysel çalışmalar sonucunda belirlenir. Çizim sürecinde malzemenin oluşması için yeterli süre verilmelidir. Aksi takdirde sac malzemede deformasyonlar meydana gelecektir.

Çizelge 3. 3. Ortalama çekme hızının belirlenmesi (Esner 2006).

Malzeme	Çekme Hızları mm/s	
	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

Çizelge 3.3’de verilen tek tesirli preslerde çelik saclar için elverişli olan 300mm/sn çekme hızı uygun görülmüştür.

3.1.7. Baskı Plakası Kuvveti

Derin çekme esnasında düzgün homojen bir parça elde etmek, parça yüzeyindeki kırışıklıkların oluşmaması için baskı plakası kullanılır. Tek tesirli preslerde yay, hava yastığı, kauçuk damper gibi elemanlar kullanılarak sağlanan baskı; çift tesirli preslerde mekanik olarak baskı sağlayan hidrolik bir kontrol düzeneği yardımıyla sağlanır. Baskı plakası kuvveti aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilir:

Tek kademeli çekme işlemi için gerekli olan baskı plakası basıncı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$P_d = \left[\left(\frac{D}{d} - 1 \right)^2 + \frac{d}{200T} \right] \cdot \frac{(UTS)}{400} \quad (3.18)$$

D : İlkel (Taslak) parça çapı,

d : Çekme çapı,

T : Sac kalınlığı,

UTS : Maksimum çekme gerilmesi (ultimate tensile stress)

Hesaplanan çekme kuvveti basıncına göre çekme kuvvetini veren denklem aşağıda verilmiştir:

$$F_d = \frac{\pi}{4} [D^2 - d^2] \cdot P_d \quad (3.19)$$

Baskı plakası kuvveti çalışmaya girdi oluşturan iki değişkenden bir diğeridir. Bu çalışma kapsamında farklı zımba yarıçapları için sabit ve değişken baskı plakası kuvvetleri altında, iş parçasının derin çekilebilirliği ve iş parçası üzerindeki etkileri incelenecektir. Analizde kullanmak üzere gerekli olan baskı plakası kuvveti değeri aşağıdaki gibi bulunur:

$$P_d = \left[\left(\frac{110}{50} - 1 \right)^2 + \frac{50}{200 \cdot 1} \right] \cdot \frac{636}{400} = 2.7 \text{ N/mm}^2 \quad (3.20)$$

$$F_d = \frac{\pi}{4} [110^2 - 50^2] \cdot 2.7 \cong 20 \text{ kN} \quad (3.21)$$

3.1.8. Çekme Kuvvetinin Hesaplanması

Çekilmek istenen parçanın çekme esnasında gösterdiği direnç çekme kuvvetini belirlemektedir. Malzeme ve işlem kaynaklı birçok değişkenden etkilenen çekme kuvveti, uygun kapasiteli çekme preslerinin belirlenmesinde de önemlidir. Çekme işlemi için gerekli olan kuvvet aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

Baskı plakasız çekme kalıplarında:

$$P_{\zeta} = \pi \cdot d \cdot T \cdot \sigma_b \cdot m \text{ (kgf)} \quad (3.22)$$

Baskı plakalı çekme kalıplarında:

$$P_b = P_{\zeta} \cdot X_1 \text{ veya } P_t = P_{\zeta} + P_b \quad (3.23)$$

P_{ζ} : Çekme kuvveti (kgf),

P_b : Baskı plakası kuvveti (kgf),

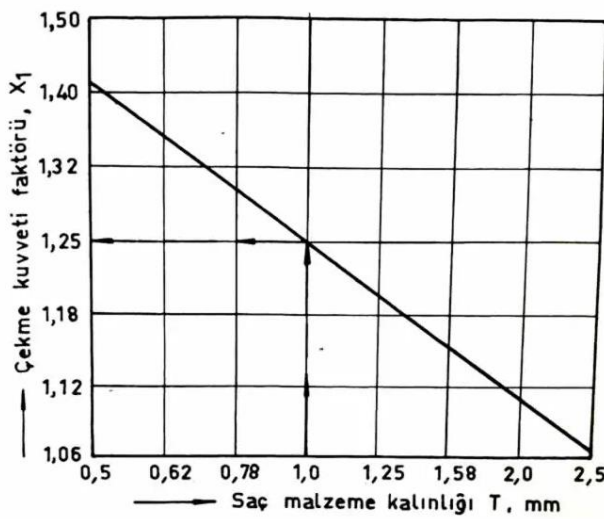
d : Çekme çapı,

σ_b : Sac malzeme eğilme gerilmesi (kg/mm^2),

T : Sac kalınlığı (mm),

m : d/D oranına bağlı katsayı (Çizelge 3.3’de verilmiştir),

X_1 : Çekme kuvveti faktörü (Şekil 3.5’de verilmiştir).



Şekil 3. 6. Çekme kuvveti faktör X_1 (Suchy 1998)

Çizelge 3. 4. d/D oranına bağlı katsayı (Suchy 1998).

d/D		d/D	
0,550	1,00	0,700	0,60
0,575	0,93	0,725	0,55
0,600	0,86	0,750	0,50
0,625	0,79	0,775	0,45
0,650	0,72	0,800	0,40
0,675	0,66		

Malzemenin maksimum çekme tonajını; malzemenin kalınlığına, çekme çapına, ve maksimum çekme gerilmesine göre hızlı bir şekilde hesaplayabileceğimiz denklem aşağıdaki gibidir (Suchy 1998):

$$P_{\zeta} = 0,00157.T.d.S \quad (3.24)$$

P_{ζ} : Maksimum çekme kuvveti,

T : Sac kalınlığı,

D : Çekme çapı,

P : Maksimum çekme gerilmesi.

Maksimum çekme tonajı hesabı, çekme işleminin yapılacağı presin seçiminde gerekecektir:

$$P_{\zeta} = 0,00157.T.d.S = 0,00157.1.50.636 = 50ton \quad (3.25)$$

3.2. Çekme Sacının Teknik Özellikleri

Derin çekme işlemindeki belirlediğimiz değişkenlerin analizi için, explicit sonlu elemanlar metodunu kullanan bir analiz programından faydalanılacaktır. Piyasadaki en iyi eksplisit sonlu elemanlar yazılımlarından biri olan Ls-Dyna da kullanmak üzere, malzeme kartlarının detaylı bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Derin çekmeyi etkileyen malzeme kaynaklı değişkenlerin analizi ve temel sonlu elemanlar analizi

adımlarından bir olan malzemenin doğru bir şekilde tanımlanması, analizin tutarlılığı ve deneysel sonuçlara yakınsaması için oldukça önemlidir.

Endüstride yaygın olarak kullanılması ve soğuk şekillendirme işlemleri için oldukça elverişli olması sebebiyle, malzeme benzeşiminde 304 Kalite paslanmaz çelik kullanılacaktır. Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.6’da malzemeye ait mekanik özellikler, Çizelge 3.7’de ise malzemenin kimyasal bileşenleri verilmiştir.

Çizelge 3. 5. 304 Kalite paslanmaz çelik mekanik özellikleri.

STM Standardı	304	%0,2 Akma Dayanımı (MPa)	247
EN Standardı	1.4301	%1 Akma Dayanımı (MPa)	282
Elastiklik Modülü (GPa)	200	Çekme Dayanımı (MPa)	636
Özgül Ağırlık (gr/cm³)	7,9	Kopma Uzaması (%)	57
Isıl Genleşme Katsayısı (1/K)	16,0	Sertlik (Brinell)	130-180

Çizelge 3. 6. Sıcaklıklara göre 304 Kalite paslanmaz çelik mekanik özelliklerinin değişimi.

SICAKLIK (°C)	100	200	300	400	500
Elastiklik Modülü (GPa)	194	186	180	172	165
%0,2 Akma Dayanımı (MPa)	157	127	110	98	92
%1 Akma Dayanımı (MPa)	191	157	135	125	120
Isıl Genleşme Katsayısı (1/K)	16	16	17	18	18

Üretim sırasında çeliğin bileşimine giren ve temizlenmesi zor olan bazı elementler levhaların kalitesini farklı şekillerde etkiler. C miktarı soğuk deformasyon nedeniyle %0,08'i geçmemeli ve özellikle sertleşmemiş çeliklerde kaba tanelenme riski nedeniyle %0,05'in altına düşürülmemelidir. Si çok düşük olmalıdır (maksimum %0,010) çünkü çeliğin şeklini olumsuz etkiler. Mn sertleşme eğiliminde olduğundan, metalurjik haddeleme teknolojisi için gerekli sınır olan %0,35'in üzerine çıkmamalıdır. P, sertleştirilmemiş çelikten yapılmış levhaların elastikiyetini arttırsa da soğuk şekillendirme için önemli olan mekanik özellik değerlerini düşürür ve levhayı kırılgan hale getirir (Arkun, 2006). Cr, çeliğin paslanmaz özelliklerini elde etmek için en önemli elementtir. Oksijen ile temas ettiğinde ek bir oksit tabakası oluşturan bu element çeliğin

oksijen ile temasını engeller. Böylece çelik paslanmaz hale gelir. Çeliğin içindeki krom miktarını arttırsak, çeliğin korozyon direnci de o oranda artar. Paslanmaz çelikte olması gereken bir elementiz ve paslanmaz çelik fiyatının neredeyse %1'ini temsil ediyor. Çeliğe eklenen nikel, bir krom-nikel bileşiği oluşturmak için kromla birleşir. Bu bileşik oksijen ile temas ettiğinde çok daha güçlü bir tabaka oluşur ve paslanmaz çeliği korozyona karşı oldukça dirençli hale getirir. Bunlara ek olarak; Nikel, çeliğin işlenmesini kolaylaştırdığı için sıklıkla tavsiye edilen ancak maliyetli bir elementtir.

Çizelge 3. 7. 304 Kalite paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	N(ppm)
0,0508	0,373	1,029	0,0312	0,0024	18,249	8,064	357

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Doğa içerisinde karşı karşıya kalınan tüm olaylar fizik kanunları ve matematik ile anlaşılma çabısı yapılırken olayların biyolojik mi, jeolojik mi veya mekanik mi olduğu durumda herhangi bir değişikliğe yol açmamaktadır. Maruz kalınan her olayın büyük matematiksel ya da integral denklemler kapsamında ifade edilmesi mümkündür (İspir, 2011).

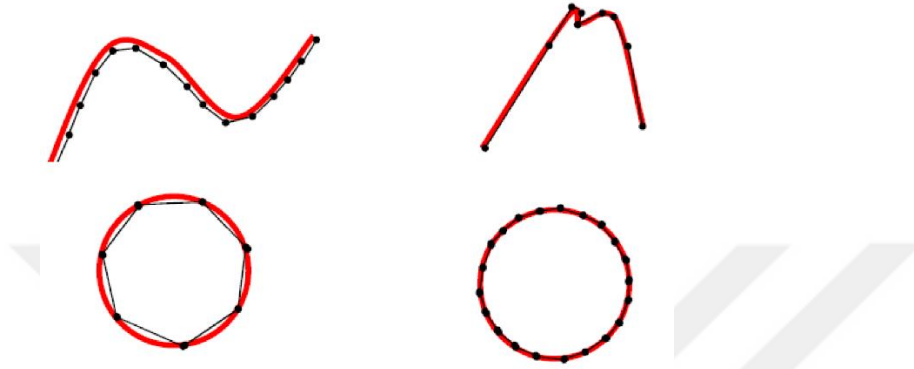
İnsanlar genellikle çevrelerindeki olayları veya karşılaştıkları sorunları kolayca anlayamaz ve doğrudan çözemezler. Bu nedenle, karmaşık bir problem, onu bilinen veya anlaşılması daha kolay alt problemlere bölerek daha anlaşılır hale gelir. Üretilen alt problemler çözülerek ve birleştirilerek asıl problem çözülebilir (İspir 2011).

Sonlu elemanlar yöntemi; Karmaşık problemleri daha basit alt problemlere ayırarak ve her birini ayrı ayrı çözerek tam bir çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Yöntemin üç ana özelliği vardır: Birincisi, geometrik olarak karmaşık bir çözüm alanını, sonlu elemanlar adı verilen geometrik olarak basit alt alanlara böler. İkinci olarak, her bir elemanın sürekli fonksiyonlarının cebirsel polinomların lineer bir kombinasyonu olarak tanımlanabileceğini varsayıyoruz. Üçüncü varsayım, problemi çözmek için tanımlayıcı denklemlerin her bir elemanda sürekli olan bazı noktalarının (düğümlerinin) değerlerini elde etmenin yeterli olduğudur (İspir 2011).

Örneğin, bir eğrinin uzunluğunu hesaplamak istiyorsak veya bir dairenin çevresini çevre formülü olmadan hesaplamak istiyorsak, eğrinin üzerine uzunluğunu hesaplayabileceğimiz düz çizgiler çizebilir ve bunları toplayabiliriz. Bu yöntemi kullanarak, eğrinin uzunluğunu belirli bir hesaplama sonucunda öğrenmek mümkündür (Aydoğan 2015).

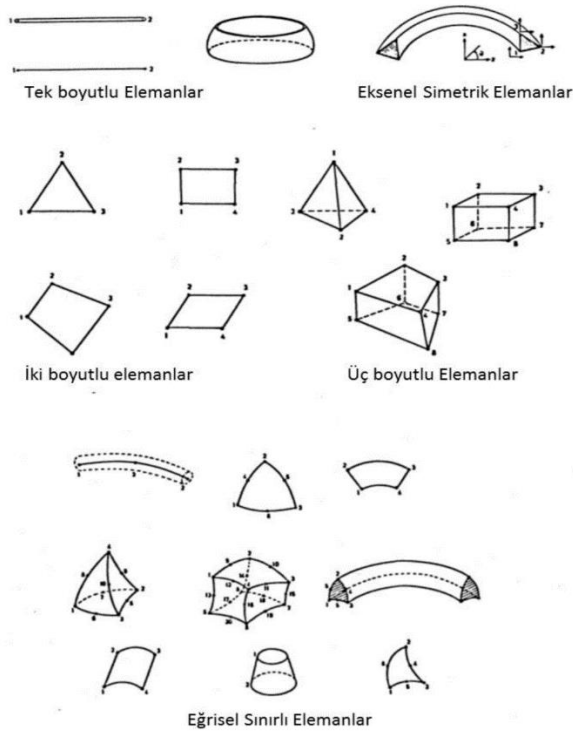
Kullanılacak düz çizgilerin boyu ne kadar küçük olursa sistem daha küçük parçalara ayrıştırılmış olur ve gerçeğe yakın sonuç elde edilir. Çizgi boylarının eşit

olması şart da değildir. Burada göz önünde bulundurulması gereken temel durum onların toplamı olmakla birlikte aynı zamanda dar köşelerde yer alan düz çizgilerin boylarının küçültülmesi hassas bir sonucun elde edilmesinde stratejik bir öneme sahiptir. Burada kurulan mantık ve metotların sonlu elemanlar için de geçerli olduğunu söylemek mümkündür. Daireye ilişkin reel çizim geometrik modeli temsil ederken geometrik modelin şekline en yakın olan çizgilerin oluşturulması elemanlara ayırma işlemi olarak ifade edilmektedir Şekil 3.7 (Aydoğan 2015).



Şekil 3. 7. Çeşitli geometrik şekillerin elemanlara ayrılması (Aydoğan 2015)

Analizi yapılacak parçanın şekline ve modelleme tipine göre seçilecek elemanlarda bazı farklılıklar olabilir. Bir eleman modeli tek boyutlu (doğrusal modelleme), iki boyutlu (düzlem modelleme) veya üç boyutlu (katı modelleme) yapılabilmektedir. Eleman tipleri model şekline göre belirlenmektedir (Aydoğan 2015). Çözüm bölgesini doğru temsil etmesi ve çözümün gerçeğe olabildiğince yakın olması için uygun eleman tipinin seçimi önemlidir. Aşağıdaki şekilde sonlu elemanlar analizinde kullanılan bazı elemanlar gösterilmiştir.



Şekil 3. 8. Sonlu elemanlar analizindeki bazı eleman çeşitleri.

SEY mühendisliğin birçok alanına uygulanmaktadır. Yapısal analiz, ısı transferi, akış analizleri, elektromanyetik analizler, multi-fizik analizler gibi geniş bir alanda uygulanmaktadır. Aşağıdaki listede özetle sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizleri avantajları listelenmiştir.

- Özellikle endüstri ve akademide pratik uygulamalar ve deneysel araştırmalardan önce işlem öncesi önlemlerin bilgisayar ortamında uygulanması önemli rol oynamaktadır.
- Uygulamada, deneme yanılma gibi ekonomik ve zaman kaybettiren işlemler yerine bilgi işlem ortamında daha hızlı ve ekonomik faaliyet yapılmasını sağlar.
- İçerdiği çeşitli mesh modelleri sayesinde karmaşık şekillere sahip görevleri çözmeyi çok daha kolaylaştırır.
- Daha sonra tanımlanacak malzeme özellikleri ve kütüphanesindeki farklı materyaller problem çeşitliliğini artırır.
- Problem sınır koşulları modele kolayca uygulanabilir.
- Problemler 3D veya 2D olarak tanımlanabilir.

Sayısal çözümleme yöntemini kullanan yazılımlar iki temel algoritmaya sahiptirler. Bu algoritmalar implisit ve eksplisit olarak adlandırılmaktadır.

3.3.1. Kapalı (implisit) Yöntem

Zamanın durağan olduğu sabit ortalama ivme kabulüne dayanan integrasyonda zaman basamağının miktarının keyfi olarak geniş tutulması mümkündür. Ancak istenen sonuçlara uygun olan değerlerin tercih edilmesi gerekmektedir. Non-lineerliğin söz konusu olması durumunda zaman basamağına ilişkin miktarın yakınsanmayı yakalayabilecek kadar küçük seçilmesi mümkündür (Şahin 2013).

İmplicit yöntemlerde izlenen yöntemler şu şekilde sıralanabilir;

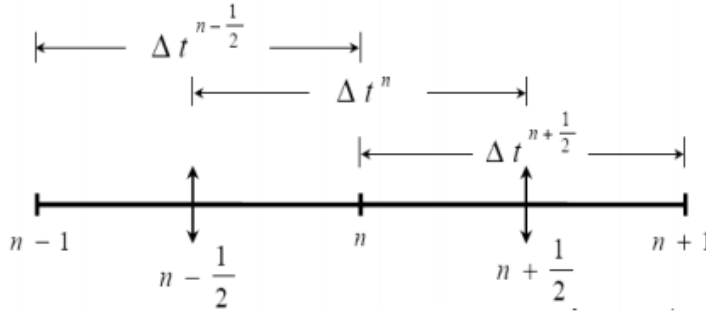
- Elemanların lokal katılık matrisi hesaplanır.
- Tam (Global) katılık matrisi oluşturulur.
- Katılık matrisinin (K') tersi alınarak katsayılar matrisi elde edilir.
- Sağ vektörü (eski yer değiştirmeler) hesaplanır.
- Yeni yer değiştirmeler tersi alınmış katılık matrisi (K') ile sağ vektörün çarpımı ile elde edilir.
- Birim şekil değiştirmeler, gerilmeler ve kuvvetler her eleman için yeni yer değiştirmelere göre hesaplanır.

Kapalı yöntem zamandan bağımsızdır. Durağan sorunların çözümünde kullanılan bu yöntemler özellikle çelik konstrüksiyonların yük analizlerinde, basınçlı kaplarda meydana gelen gerilme gibi sorunlarda önemli rol oynamaktadır (Yıldız 2017).

3.3.2. Açık (eksplisit) Yöntem

Açık yöntem, sistemin ileriki bir zaman adımındaki durumunu şu andaki durum göz önüne alınmasıyla hesaplanması temeline dayanır. Bu yöntemin avantajı her bir zaman basamağında diğer basamaklardan bağımsız olarak tekrarlama gereksinimi duymamasıdır. Böylece hesaplama zamanı hatırı sayılır derecede azalmaktadır. Bunun sayesinde hesaplama maliyeti daha düşüktür. Yakınsama problemi açık yöntemde söz konusu değildir. Şekil verme esnasında açık ve geri esneme durumunda ise kapalı yöntemin kullanılması karmaşık geometri sistemlerin çözümünü kolaylaştırıldığı ve iyi sonuçların elde edildiği gösterilmiştir (Aydoğan 2015).

Açık zaman yöntemi, merkezi farklar yöntemleri ile ele alınmaktadır. Eksplicit yöntem sistemin n anındaki dengesinden direk zaman integrasyonu ile çözüm yapar (Gümrük 2006).



Şekil 3. 9. Eksplisit zaman integrasyon şeması (Gümrük 2006)

Sistemin denge denklemi, t^n zamanındaki çözümü bilinen bir n anında kurulur ve t^{n+1} zamanında çözümü bilinmeyen $n+1$ anındaki sistemin çözümü bulunmaya çalışılır. Sistemin hareket eşitliği şu şekilde verilebilir;

$$M\ddot{u}^n = F_{ext}^n - F_{int}^n \quad (3.26)$$

Burada M kütle matrisi, $\ddot{u}^n$ ivme vektörü F_{ext}^n dış kuvvet vektörü ve F_{int}^n iç kuvvet vektörüdür. Buradan ivme;

$$\ddot{u}^n = M^{-1} (F_{ext}^n - F_{int}^n) \quad (3.27)$$

Şeklinde kolayca belirlenir. Hız güncellenirse;

$$\dot{u}^{n+\frac{1}{2}} = \dot{u}^{n-\frac{1}{2}} + \Delta t^n \ddot{u}^n \quad (3.28)$$

İfadesi elde edilmiş olur. Bilinmeyen $n+1$ anındaki yer değiştirme ise;

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t^{n+\frac{1}{2}} \dot{u}^{n+\frac{1}{2}} \quad (3.29)$$

Olarak elde edilir. Burada zaman adımı;

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta t^n + \Delta t^{n+1}}{2} \quad (3.30)$$

Eşitliği ile verilmektedir.

Merkezi farklar metodu koşullu kararlı bir yöntemdir. Yani zaman adımı belirli kritik değeri aşmamalıdır. Bu değer;

$$\Delta t_{kri} < \frac{2}{\omega_{max}} \quad (3.31)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada ω_{max} sistemin maksimum doğal frekansıdır.

3.3.3. Kapalı (implicit) ve Açık (eksplisit) Yöntemin Karşılaştırılması

Açık yöntemler, dolaylı yöntemlerden daha hızlı sonuç verir. Açık yöntemde problemin analizinden elde edilen kararsız sonuçların değerlendirilmesi, dolaylı yöntemle göre daha karardır. Kararsız sonuçlar, kısmi kırışma veya derin çekme işleminden kaynaklanan kırışma kusurlarından kaynaklanır. Kısacası ifade yöntemi ile kırışıklık sorunu daha sağlıklı bir şekilde görülebilmektedir. Açık yöntemin dolaylı yöntemle göre birçok avantajı olmasına rağmen bazı dezavantajları da vardır. Modeldeki eleman sayısı arttıkça sürecin çözüm süresi de artmaktadır. Hızlı sonuçlar için ağ yapısı kare elemanlardan oluşmalıdır. Ancak, sonuçların doğruluğu düşmektedir (Yıldız 2017).

Açık yöntem sayısal olarak çok karardır. Temas koşulları en küçük zaman adımıyla doğru bir şekilde tanımlanabilmektedir. Pot oluşumu gibi kararsızlık olguları kolayca tespit edilir ve yakınsama sorunları görülmemektedir. Dolaylı yöntemde bu durum çalışmayabilir veya after twist gibi ek hesaplamalar gerekebilmektedir (İspir 2011).

Kapalı yöntem, geri yaylanma ve iç gerilimler için daha iyi bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Takım parçalarının birbirinden uzaklaştırılmasının simüle edilmesi bu tür hesaplamalar için çok önemlidir. Bu yükleme ve boşaltma, yalnızca iş parçası hareket etmeyi durdurduğunda, yani hızlı yöntemle uygulanabilmektedir. Hesaplama süresinin azaltılmasıyla ilgili endişeler, elemanlarda kullanılan düşük dereceli entegrasyon voltajlarının doğru, hatta kesin olarak hesaplanmasını engeller. Ancak arka süspansiyonun temel şartı doğru gerilim hesabıdır. Bu nedenle ifade yöntemi ile elde edilen elastik gerilmeler sadece eğilim açısından doğru sonuçlar vermektedir. Bu, eleman entegrasyon derecesini artırarak karşılanabilir. Ancak hesaplama süresi oldukça artmakta ve indirekt yöntemle göre avantaj ortadan kalkmaktadır (İspir 2011). Aşağıdaki tablo, örtük ve ifade edici yöntemler arasındaki farkları birimler cinsinden göstermektedir.

Çizelge 3. 8. İmpilisit ve ekspilisit yöntemler arasındaki farklar (Gümrük 2006).

No	İmpilisit Yöntem	Eksplisit Yöntem
1	Büyük zaman adımlarına izin verir ve denge denklemleri her zaman adımının sonunda kesin şekilde sağlanır.	Sistemin kararlılığının sağlanması için zaman adımı çok küçük değerlerle sınırlandırılır.
2	Temas şartlarının ani değiştiği durumlarda yakınsama problemi verebilir.	Çözüm kararlıdır. Hemen hemen her problem için çözüm verebilir.
3	Her zaman adımı için pek çok iterasyon gerektirir ve her bir iterasyon için bir dizi linear denklem sistemi çözmek gerekir.	Zaman adımı başına daha az hesap gerekir. Büyük deformasyonlara maruz kalan karmaşık geometriler pek çok elemanla çözülebilir.
4	Rijit yüzeylerle çok sayıda düğümün etkileşimini çözmekte uygun değildir. Fakat geri yaylanma (springback) hesabını çok iyi ele almaktadır.	Eksplisit yöntem büyük sac şekil verme problemlerini çözmekte etkilidirler. Fakat geri yaylanmadan sonraki geometriyi hesaplamak zor olabilir.
5	Genellikle yükün yavaş uygulandığı ve statik problemlerde etkilidirler. Genellikle atalet etkileri hesaba katılmaz.	Çarpma ve patlama gibi yüksek hızlı problemler başarıyla analiz edilebilir.

3.4. Derin Çekmenin Simülasyonu

Bu bölümde derin çekme işleminin simülasyonu için ANSYS, LS-DYNA ve LS PrePost paket programı kullanılmıştır. Yapılan analizlerle alakalı birim sistemi, zaman adımı hesaplanması, iş parçacığının sonlu elemanlara bölünmesi, eleman ve kontak tiplerinin belirlenmesi, sınır şartlarının uygulanması gibi işlem adımlarına değinilecektir.

3.4.1. Birim Sistemi

Ls-Dyna'nın belirli bir birim sistemi olmamasına rağmen, kullanıcının cihazları uyumlu olacak şekilde yapılandırması gerekmektedir. Bu nedenle, Ls Dyna'da tanımlanan değişkenin birimi, tanımlanan diğer birimlerle uyumlu olmalıdır. Aşağıdaki tablo, Ls-Dynas'ta kullanılabilecek uyumlu donanım sistemini göstermektedir. Bu çalışmada uyumlu bir birim sistemi (b) kullanılmıştır.

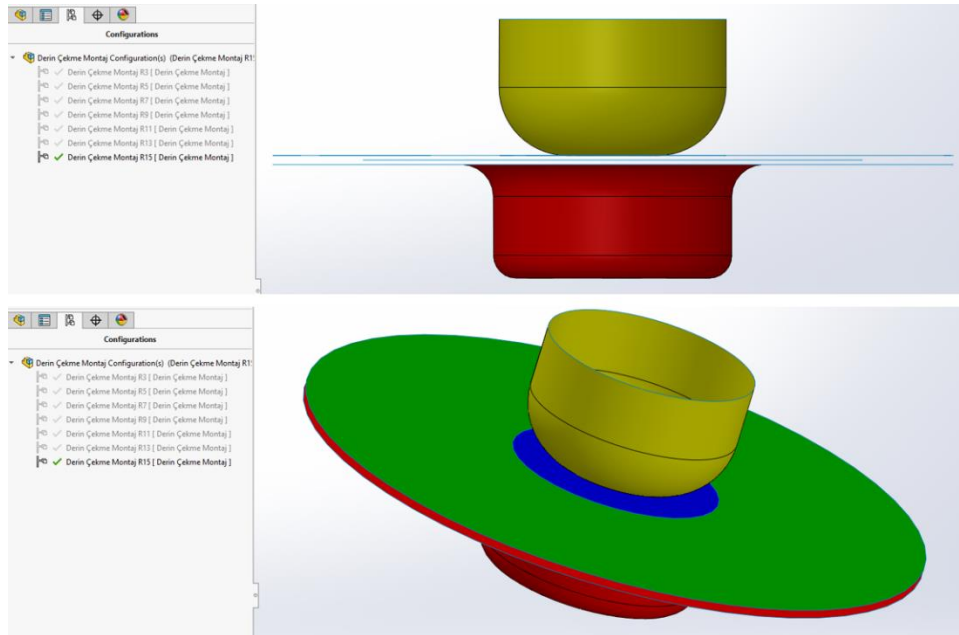
Çizelge 3. 9. Ls-Dyna'da kullanılan uyumlu birim sistemleri (MÜLKOĞLU 2016).

Nicelik	(a)	(b)	(c)	(d)
Uzunluk	m	mm	Mm	in
Zaman	s	ms	s	s
Kütle	kg	kg	ton	lb
Kuvvet	N	kN	N	lbf
Gerilme	Pa	GPa	MPa	psi
Enerji	J	KN.mm	N.mm	lbf.in

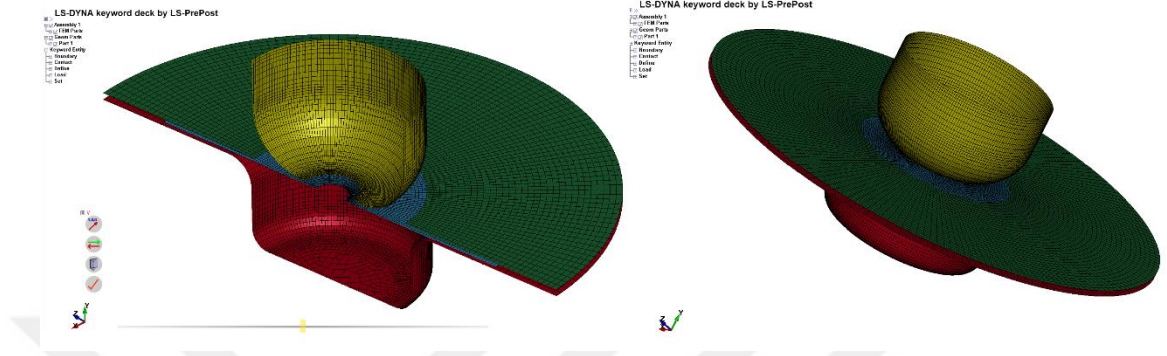
3.4.2. Adım1 Kalıp ve İş Parçacığı Mesh Modeli

Modelin, sonlu elemanlar metodu ile çözümünün gerçekleştirilebilmesi için uygun bir ağ yapısı (mesh) oluşturulmalıdır. Mesh oluşturmada modeller sonlu sayıda elemanlara bölünür, bunlar belli noktalarda birbirine bağlanır. Bu noktalara düğüm (node) denir. Yer değiştirme denklemleri bu node noktalarında çözülür.

Çalışma kapsamında farklı zımba yarıçapları için iş parçacığının derin çekilebilirliği inceleneceği için; Solidworks 3D modelleme programı kullanılarak aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi parametrik olarak farklı zımba yarıçapları için modeller oluşturulmuştur.

**Şekil 3. 10.** Solidworks parametrik modelin hazırlanması.

Analize kapsamında Shell eleman kullanılacağı için modelleme surface olarak gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan cad modelleri sonlu elemanlara bölünmek üzere, ortak bir cad formatı olan step olarak kaydedilmiştir. Ls PrePost ortamına import edilen cad dataları yüzey ağ örme komutu kullanılarak aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi sonlu elemanlara ayrılmıştır.



Şekil 3. 11. Ls-Dyna analiz modelinin sonlu elemanlara bölünmesi.

Yapılacak analizlerde sonuca yakınsamamız ve çözüm süresi ağ kalitesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle elemanlara bölme işlemi yapılırken surface divide komutu kullanılarak olabildiğince düzgüsel ağ yapısı elde edilmeye çalışılmıştır. Aşağıdaki şekilde oluşturulan ağ yapısının kalitesine ait bir çizelge verilmiştir. Farklı kriterlere göre oluşturulmuş ağ yapısı kalitesinin karşılaştırılmasında en geçerli kriterlerden olan aspect ratio, skewness ve jacobian değerlerine göre oldukça uygun bir sonlu eleman modelinin oluşturulduğu teyit edilmiştir.

SHELL ELEMENT QUALITY CHECK SUMMARY:

Quality Name #Violated(%)	Min. val	Max. val	Allowable	
Min side length	0	0	3	0 (0%)
Max side length	0	0	30	0 (0%)
Aspect Ratio	1	6.04	10	0 (0%)
Warpage	0	0	10	0 (0%)
Min Quad Angle	0	0	45	0 (0%)
Max Quad Angle	0	0	135	0 (0%)
Min Tria Angle	0	0	30	0 (0%)
Max Tria Angle	0	0	120	0 (0%)
Taper	0	0	0.7	0 (0%)
Skew	0	36.9	45	0 (0%)
Jacobian	0.452	1	0.6	409 (1.15%)
Char. length	0	0	1	0 (0%)
Area	0	0	5	0 (0%)
Feature angle	0	0	30	0 (0%)
TimeStep	0	0	1e-06	0 (0%)
#QUADS(%) : 35542 (99.8%), #TRIAS(%) : 80 (0.225%), #TOTAL OF FAILED(%) : 409 (1.15%)				

Şekil 3. 12. Sonlu ağ modeli kalite çizelgesi.

3.4.3. Adım2 Kritik Zaman Adımının Belirlenmesi

Zaman adımlarının seçimi, açık dinamik sonlu elemanlar analizi için kritik öneme sahiptir. Büyük bir zaman adımı kararsızlığa yol açarken, küçük bir zaman adımı hesaplama maliyetini büyük ölçüde artırır. Bu nedenle kritik zaman adımının doğru bulunması gerekmektedir. Doğrusal adi diferansiyel denklemler için analitik çözümler bulunmasına rağmen, doğrusal olmayan problemler için sayısal çözüm yöntemleri gereklidir.

LS-DYNA gerekli zaman adımını tüm elemanlar için adım adım hesaplar ve kabuk eleman, katı eleman, kiriş elemanı gibi farklı eleman türleri için farklı zaman adımı hesaplama yöntemleri vardır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda sadece Shell elemanları kullanılmıştır. Bu nedenle, bu bölümde sadece bu eleman tipi için kritik zaman adımı hesaplama yöntemi ele alınmaktadır.

Analiz edilecek modelin zaman adımı belirtilerek, çözüm süresini azaltmak için toplu ölçeklendirme etkinleştirilebilir. Kütle ölçeklendirme, modele fiziksel olmayan kütle ekleyerek çözüm süresini kısaltır. Analizlerde otomatik kütle ölçekleme yöntemi kullanılmış ve doğru sonuçlar elde etmek için zaman adımının olabildiğince küçük olması sağlanmıştır. Analiz girdilerinin doğruluğu kontrol etmek ve hızlı sonuç elde etmek için Ls Dyna'da *CONTROL_TIMESTEP* kartı altında *DT2MS* değeri ile malzeme yoğunluğu

yapay olarak artırılarak seçimli bir kütle ölçeklendirme yapılabilir. Bu işlem otomatik kütle ölçeklendirmeden bağımsız olarak yapılır. Tutarlı sonuçlar elde etmek için kütle ölçeklendirme oranının %8'i geçmemesi tavsiye edilir.

Keyword Input Form

Use *Parameter ☐ Comment ☐

(Subsys: 1 R15_SS304_BHF25_Analiz.k) Setting

*CONTROL_TIMESTEP (0)

1	DTINIT	TSSFAC	ISDO	ISLIMT	DT2MS	LCTM	ERODE	MS1ST
	0	0.9	0	0.0	2.87E-5	0	0	0
2	DT2MSF	DT2MSLC	IMSC	UNUSED	UNUSED	RMSCL	UNUSED	JHDO
						0.0		0

COMMENT:

DT2MS:= Time step size for mass scaled solutions (default set to 0.0).

Şekil 3. 13. Ls Dyna kütle ölçeklendirme.

Stabilite sebeplerinden dolayı 0.9 (varsayılan) oran faktörüyle zaman basamağı değeri çarpılır. Programda hesaplanan zaman adımı değeri Δt aşağıda bulunan kritik değerden küçük seçilmelidir.

$$\Delta t = 0,9 \frac{l}{c} \quad (3.32)$$

Karakteristik uzunluk l ve dalganın yayılma hızı c , eleman tipine bağlı olarak değişmektedir. Bu büyüklükler eleman için:

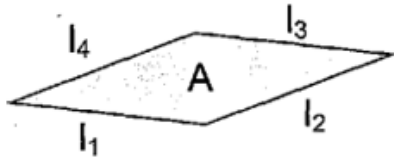
$$c = \sqrt{\frac{E}{p}} \quad (3.33)$$

l : Eleman uzunluğu,

E : Elastisite modülü,

p : Malzeme yoğunluğu.

Dörtgen kabuk (Shell) eleman için:



Şekil 3. 14. Kabuk eleman kenar numaraları (Özçelik 2008).

$$l = \frac{A}{\max(l_1, l_2, l_3, l_4)} = \frac{1,62}{1,7} = 0,95 \quad (3.34)$$

Burada l_1 , l_2 , l_3 , l_4 dörtgenin kenar uzunluklarıdır. A ise elemanın alanını belirtmektedir.

$$c = \sqrt{\frac{E}{p(1-\nu^2)}} = \sqrt{\frac{200}{7,85 \cdot 10^{-6} (1-0,33^2)}} = 5347 \quad (3.35)$$

$$\Delta t = 0,9 \frac{l}{c} = 0,9 \frac{0,95}{5347} = 1,6 \times 10^{-4} \quad (3.36)$$

3.4.4. Adım3 Eleman Tipinin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında sac parçanın kalınlığı, diğer boyutlarının yanında çok küçük kaldığı için kabuk (Shell) eleman kullanılması uygun görülmüştür. Sac parçada kalınlığın diğer ölçülere kıyasla çok küçük kalması nedeniyle düzlemsel gerilme kabulü yapılmıştır. Bu sayede kabuk eleman ile yapılan modelde hesaplama zamanı düşürülerek oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. İş parçası haricindeki rijit olan zımba, baskı plakası, kalıp modeli için de kabuk eleman modeli uygun görülmüştür.

Gerçekleştirilen alanyazın incelemesinde birçok kabuk eleman bileşimi kullanıldığı gözlemlenmiştir. Kullanılacak eleman tipini seçerken aşağıda belirtilen noktalara dikkat edilmelidir (Özer 2011):

1. Seçilen eleman her deformasyon modunda gerçek malzemenin rijitliğine yakın olmalıdır. Çok sert veya çok yumuşak olmamalıdır.
2. Kullanılan deformasyona göre davranabilmelidir. Tasarımda gözlemlenen gerinim sertleşmesi ile yakından entegre edilmelidir.
3. Metal şekil simülasyonu zaten zaman ve bellek yoğun olduğundan, seçilen eleman tipinin doğruluğunu tehlikeye atmadan uygulanabilir çözüm basitleştirilmelidir.

4. Temas ve sürtünme, sac şekillendirmede çok önemli bir rol oynar. Seçilen ağ yapısı ve eleman tipi, gerçek temas alanını yansıtmalıdır. Aksi takdirde istikrarsızlık meydana gelebilir.

Yukarıdaki maddeler göz önüne alındığında rijit malzemelerin modellenmesinde aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi 3 integrasyon noktalı *Belytschko-Tsay (BT)* kabuk eleman modeli tercih edilmiştir. *BT* kabuk eleman formülasyonu daha az matematiksel işlem gerektirdiği için hesaplamalarda kolaylık sağlamaktadır.

Keyword Input Form

Buttons: NewID, Draw, RefBy, Sort/T1, Add, Accept, Delete, Default, Done, Setting

Options: ☐ Use *Parameter, ☐ Comment (Subsys: 1 R3_SS304_BHF_10.k)

*SECTION_SHELL_(TITLE) (4)

TITLE

SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
1	2	0.8333330	3	1	0	0	1

T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

Data Pt. buttons: Replace, Insert, Delete, Help

ELFORM:=ELFORM Element formulation options:
EQ.1: Hughes-Liu,
EQ.2: Belytschko-Tsay (default),
EQ.3: BCIZ triangular shell,
EQ.4: C0 triangular shell,
EQ.5: Belytschko-Tsay membrane,

Şekil 3. 15. Rijit parçalar için kabuk eleman kartı oluşturma.

İş parçasının ağ yapısında aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi tam entegrasyonlu kabuk eleman formülasyonu tercih edilmiştir. Bu eleman formülasyonu *SECTION_SHELL* kartı içerisindeki *ELFORM* 16 numara ile ifade edilmektedir. Bu eleman için aynı kart içindeki, *NIP* ile tanımlanan 7 integrasyon noktası tanımlanmış ve sac kalınlığı (*T1*, *T2*, *T3*, *T4*) homojen olacak şekilde gerçek kalınlık olan 1mm olarak girilmiştir.

Keyword Input Form

Buttons: NewID, Draw, RefBy, Sort/T1, Add, Accept, Delete, Default, Done, Setting

Options: ☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 R3_SS304_BHF_10.k)

*SECTION_SHELL(TITLE) (4)

TITLE

SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	OR/IRID	ICOMP	SETYP
2	16	0.8333330	7	1	0	0	1

T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0

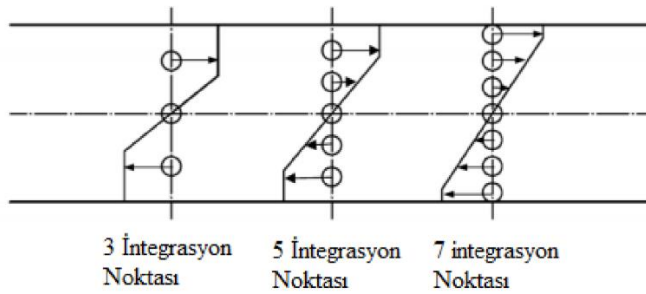
Repeated Data by Button and List

Data Pt. Buttons: Replace, Insert, Delete, Help

ELFORM:=ELFORM Element formulation options:
EQ.1: Hughes-Liu,
EQ.2: Belytschko-Tsay (default),
EQ.3: BCIZ triangular shell,
EQ.4: C0 triangular shell,
EQ.5: Belytschko-Tsay membrane,

Şekil 3. 16. İş parçası için kabuk eleman kartı oluşturma.

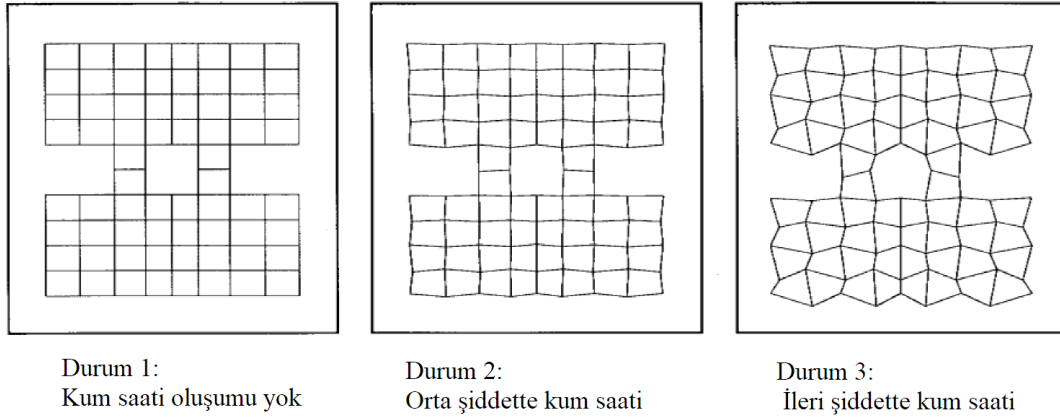
Kabuk elemanları tanımlanırken dikkate alınması gereken bir diğer önemli husus, kalınlığa göre gerilme durumunun hesaplanması ve entegrasyon noktalarının tanımlanmasıdır. *SECTION_SHELL* kartı içerisindeki *NIP* ile tanımlanan entegrasyon noktası sayısı arttıkça hesaplamaların hassasiyeti de artmaktadır. Aşağıdaki şekilde farklı entegrasyon noktaları için oluşan gerilme durumları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 17. Entegrasyon noktası gerilme durumu ilişkisi şematik gösterim (MÜLKOĞLU 2016).

İş parçasında tam entegre eleman formülasyonunun (Fully integrated shell elements type 16) kullanılmasının sağladığı diğer bir avantaj, tek entegrasyon noktası kullanıldığında ortaya çıkan kum saati (Hourglassing effect) etkisi olarak adlandırılan sıfır enerji modları problemlerinden kaçınmaktır. Bu deformasyonu kontrol altında tutmak analizin tutarlılığı açısından oldukça önemlidir. Ls Dyna programı kum saati durumunu otomatik olarak kontrol eder ve kum saati enerjisinin zamana bağlı değişimini

çıkı olarak kullanıcılara sunar. Bu çıkıların incelenmesi bize sonuçların tutarlılıını gözden geçirme imkânı verir. Aşağıdaki şekilde Shell eleman için kum saati oluşumu şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 18. Shell eleman için kum saati oluşumu.

3.4.5. Adım4 Malzeme Modelinin Oluşturulması

Ls-Dyna yazılımı içerisinde birçok ihtiyaca uygun geniş bir malzeme kütüphanesi bulunmaktadır. Malzeme tanımlaması **MAT* kartı içerisinde tanımlanmaktadır. Çalışma kapsamındaki teorik analizlerde iş parçası üzerinde meydana gelen deformasyon, kalıp elemanlarında kullanılan malzemelere göre çok daha ileri seviyede olduğundan dolayı bunlar rigid malzeme olarak kabul edilmiştir. Malzeme değeri olarak da aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi çelik malzeme modelinin değeri kullanılmıştır.

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 R15_SS304_BHF20_Analiz.k) Setting

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (2)

TITLE
Zimba/Baski Plakasi

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	1	7.500e-06	210.00000	0.3000000	0.0	0	0.0	
2	CMO	CON1	CON2					
	1.0	6	7					
3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

COMMENT:

Total Card: 2 Smallest ID: 1 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

Şekil 3. 19. Kalıp elemanların malzeme kartı tanımlanması.

Malzeme kartı içerisinde tanımlanan şu şekilde tanımlanabilir:

RO :Malzeme yoğunluğu,

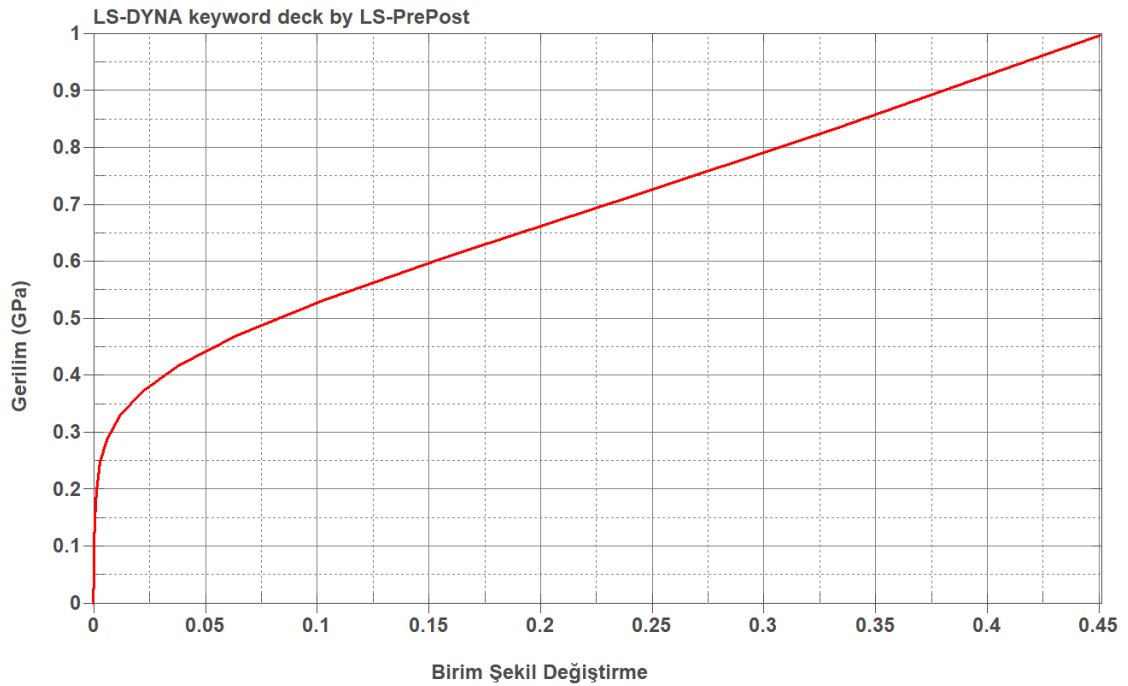
E :Elastisite modülü,

PR :Poisson oranı,

CON1 :Yerdeğiştirme serbestliği,

CON2 :Rotasyon serbestliği.

Çalışma kapsamındaki iş parçasının teorik analizlerinde AISI 304 kalite sac malzeme tercih edilmiştir. Plastik şekil değiştirme analizlerinde malzemeye ait gerçek gerilme- birim şekil değişimi değerlerine ihtiyaç duyulduğu için üretici firmadan tedarik edilen değerlere göre oluşturulmuş grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3. 20. AISI 304 malzemeye ait gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.

Analizde kullanılacak iş parçasının malzeme modelinin oluşturulmasında Ls-Dyna içerisindeki **MAT* kartı içerisinde bulunan **MAT 123 MODIFIED PIECEWISE LINEAR PLASTICITY (MAT123)* modeli tercih edilmiştir. Bu malzeme kartı *LCSS* değeri ile yukarıdaki grafikte verdiğimiz gibi gerçek gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin tanımlanmasına imkan vermektedir. Plastik şekil değiştirme analizlerinde stabil sonuç verdiği için sıklıkla kullanılan bu kartı ait tanımlanmış değerler aşağıdaki şekilde verilmiştir.

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 R15_SS304_BHF20_Analiz.k) Setting

*MAT_MODIFIED_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (123) (1)

TITLE
s Parçasi

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	3	7.850e-06	200.00000	0.3300000	0.2470000	0.5000000	1.000e+21	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP	EPSTHIN	EPSMAJ	NUMINT
	0.0	0.0	4	0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Plot Raise New Padd

Total Card: 1 Smallest ID: 3 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

Şekil 3. 21. İş parçası malzeme kartının tanımlanması.

Malzeme kartı üzerindeki *MID* değeri tekil bir değerdir ve her malzeme kartı için yeni bir değer atanmak zorundadır. Kart üzerindeki malzeme özelliklerini tanımlamaya yarayan parametrelerin açıklamaları şu şekildedir:

RO :Malzeme yoğunluğu,

E :Elastisite modülü,

PR :Poisson oranı,

SIGY :Akma gerilmesi,

ETAN :Tanjant modülü,

C :Şekil değişim hızı,

LCSS :Eğri kartı numarası.

3.4.6. Adım6 Parça Tanımlamalarının Yapılması

Ls-Dyna üzerinde parça tanımlama işlemi **PART* anahtar kelimeli kartın içerisinde yapılmaktadır. Aşağıdaki şekilde tanımlaması yapılan kart üzerindeki *TITLE* değeri parça ismini, *PID* ise parça için tanımlanan tekil bir değeri ifade etmektedir. Sonlu ağ modeli oluşturulmuş parçalar için daha önce gerekli tanımlamaları yaptığımız *SECID* (kesit numarası) ve *MID* (malzeme numarası) ile gerekli ilişkilendirmeler yapılarak parça tanımlaması yapılmış olur.

Keyword Input Form

☐ Use *Parameter
 ☐ Comment
 (Subsys: 1 R15_SS304_BHF20_Analiz.k)

*PART_(TITLE) (4)

1 TITLE

İkel Parca

2 PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID

2 2 3 0 0 0 0 0

COMMENT:

\$ partname

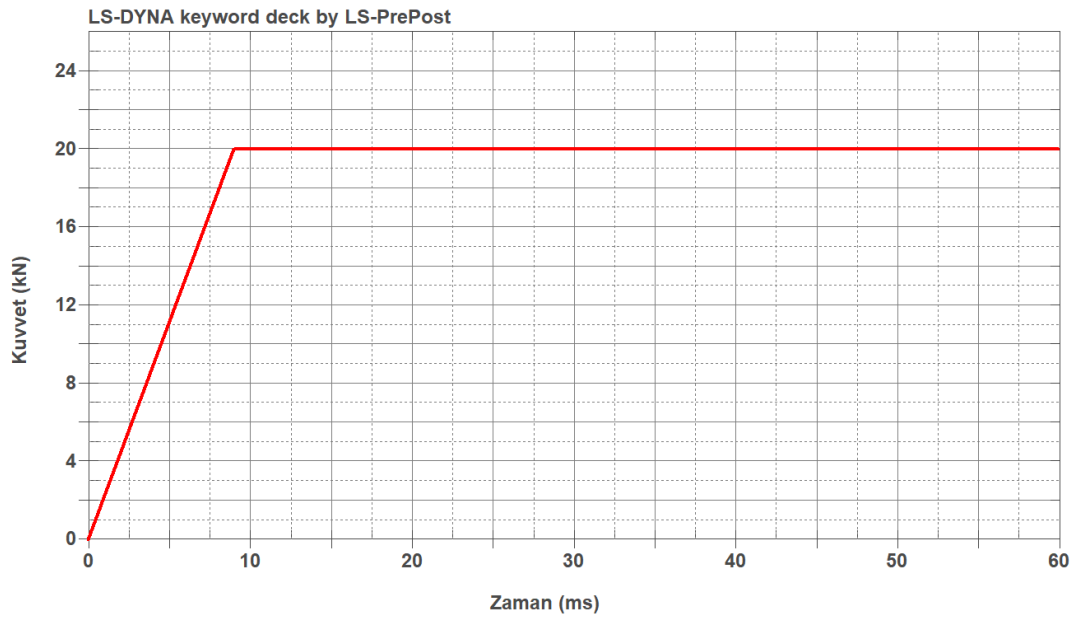
ADPOPT:=Indicate if this part is adapted or not. See also *CONTROL_ADAPTIVITY.
 LT,0: R-adaptive remeshing for 2-D solids, [ADPOPT] gives the load curve ID that defines the element size as a function of time.
 EQ,0: no adaptivity (default),
 EQ,1: H-adaptive for 3D shells,
 EQ,2: R-adaptive remeshing for 2-D solids, 3-D tetrahedrons and 3-D EFG.

1 Kalip
 2 İkel Parca
 3 Baskı Plakası
 4 Zimba

Şekil 3. 22. Ls-Dyna Parça tanımlamalarının yapılması.

3.4.6. Adım7 Baskı Plakası Kuvveti Tanımlama

Çalışma kapsamında öncelikle farklı zimba yarıçapları için teorik baskı plakası kuvveti altındaki iş parçasına ait derin çekilebilirlik özellikleri incelenmiştir. Ls-PrePost yazılımında kuvvet sınır şartının uygulanması için aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi öncelikli olarak kuvvet zaman eğrisi tanımlanır.



Şekil 3. 23. Ls-PrePost kuvvet-zaman eğrisi tanımlama.

Baskı plakası kuvvetinin tanımlanması için aşağıdaki şekilde gösterilen *LOAD* içerisindeki *RIGID_BODY* kartı kullanılır. Daha önce kuvvet zaman eğrisi olarak oluşturduğumuz sınır şartı ile kart içerisindeki *LCID* (Load Curve ID) ilişkilendirilir. *DOF* ile kuvvetin etki edeceği serbestlik derecesi tanımlanır ve *SF* (Scale Factor) ile modelin koordinat eksenini baz alınarak kuvvetin yönü tayin edilir.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 R3_SS304_BHF_20.k) Setting

*LOAD_RIGID_BODY (1)

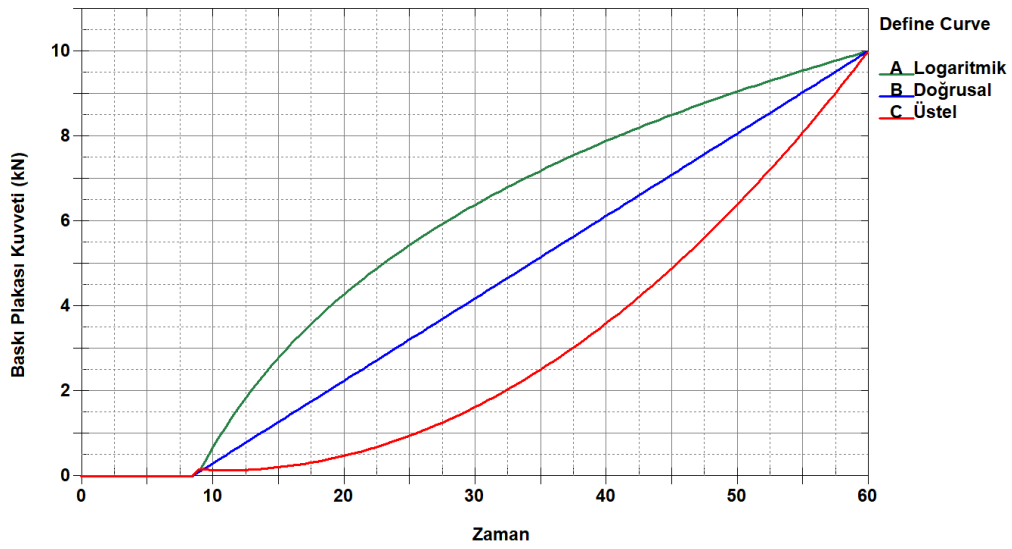
1	PID	DOF	LCID	SF	CID	M1	M2	M3
	3	2	3	-1.0000000	0	0	0	0

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Şekil 3. 24. Baskı plakası kuvveti için yük kartının tanımlanması.

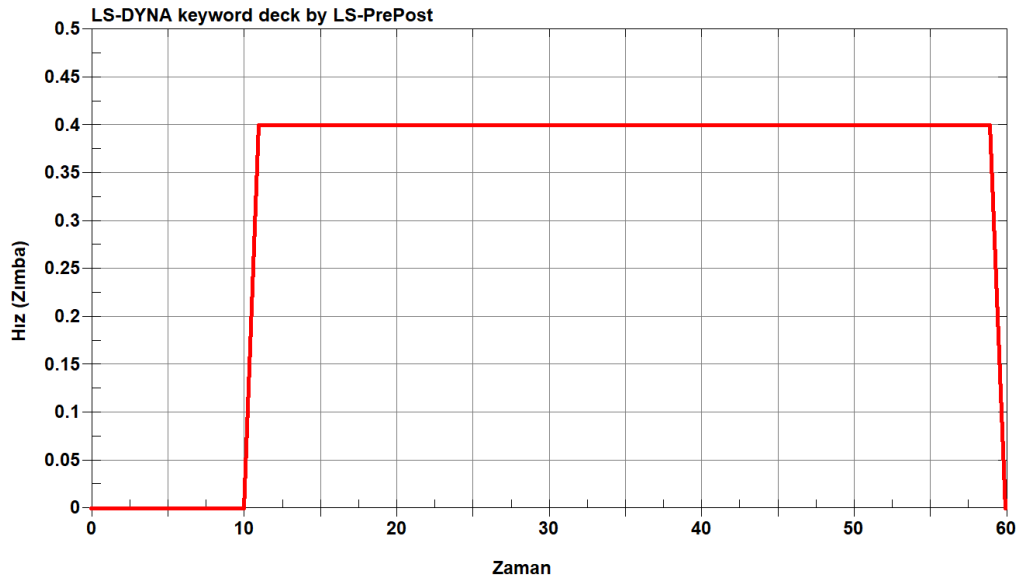
Kuvvet tanımlamalarında tez başlığına da konu olan bir diğer işlem, değişken baskı plakası kuvvetleri altındaki iş parçasına ait derin çekilebilirlik davranışının incelenmesidir. Bu kapsamda aynı iş parçası ve kalıp sistemi için aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi doğrusal, üstel ve logaritmik olarak artan baskı plakası kuvveti tanımlamaları yapılmıştır.



Şekil 3. 25. Değişken baskı plakası kuvvet zaman eğrisi.

3.4.7. Adım8 Kalıp Hareketi Tanımlama

Derin çekme simülasyonunda tanımlanması gereken bir diğer sınır koşulu, zımba hareketi vererek iş parçasının kalıp üzerinde şekillendirilmesi işlemidir. Zımbaya hareket vermek için öncelikli olarak aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi zamana bağlı bir hareket grafiği tanımlaması yapılır.



Şekil 3. 26. Zımba hareket eğrisi tanımlama.

Hareket tanımlama işlemi için aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi *BOUDARY* içerisindeki *PRESCRIBED_MOTION_RIGID* kartı kullanılır.

Keyword Input Form

Buttons: NewID, Draw, Pick, Add, Accept, Delete, Default, Done, Setting

Use *Parameter ☐ Comment ☐ (Subsys: 1 R3_SS304_BHF_20.k)

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID(ID) (1)

0 zimba hareket

1	PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
	4	2	0	1	-1.0000000	0	1.000e+28	0.0

2	OFFSET1	OFFSET2	MRB	NODE1	NODE2
	0.0	0.0	0	0	0

COMMENT:

DOF:=Applicable degrees-of-freedom:
EQ.1: x-translational DOF,
EQ.2: y-translational DOF,
EQ.3: z-translational DOF,
EQ.4: translational motion only in direction given by the VID. Movement on plane normal to the vector is permitted,
EQ.-4: Same as 4, except translation on the plane normal to the vector is NOT permitted,

Şekil 3. 27. Zimba hareket kartının tanımlanması.

Kart içerisindeki *DOF* (Degree of freedom) ile hareketin serbestlik derecesi tanımlanır. *VAD* (Velocity/Acceleration/Displacement flag) ile hareketin hız, yerdeğiştirme yada ivmelenme şekillerinden herhangi birine göre ilişkilendirmesi yapılır. *SF* (Scale Factor) ile hareket yönü verilerek, *LCID* ile daha önce tanımladığımız hız-zaman eğrisi atanır.

3.4.8. Adım9 Kontak Atamaları

Ls-Dyna yazılımında temas tanımlama işlemi **CONTACT* anahtar kelimesi içerisinde yapılır. Yüzeyler arasındaki temasın doğru tanımlanması analizin doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Yapılan çalışmada kontak algoritması olarak aşağıdaki şekilde gösterilen *FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE* temas algoritması kullanılmıştır.

Keyword Input Form

Buttons: NewID, Draw, Pick, Add, Accept, Delete, Default, Done

Options: ☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 R3_SS304_BHF_20.k) Setting

*CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE(ID/TITLE/MPP)(THERMAL) (3)

1	CID	TITLE						
	0							
			☐ MPP1		☐ MPP2			
2	IGNORE	BCKET	LCBCKT	NS2TRK	INITITR	PARMAX	UNUSED	CPARMB
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSG	GRPABLE				
	0		1.0	0				
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	3	1	0	0	0	0	0	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
	☐ Thermal ☐ T_Friction ☐ A ☐ AB ☐ ABC ☐ ABCD ☐ ABCDE ☐ ABCDEF							
7	CF	FRAD	HTC	LMIN	LMAX	FTOSLV	BC_FLG	ALGO
						0.5		
8	LCFST	LCFDT	FORMULA	a	b	c	d	LCH
9	SOFT	SOFSCL	LCIDAB	MAXPAR	SBOPT	DEPTH	BSORT	FRCFRQ
	0	0.1	0	1.025	2.0	2		1
10	PENMAX	THKOPT	SHLTHK	SNLOG	ISYM	I2D3D	SLDTHK	SLDSTF
	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
11	IGAP	IGNORE	DPRFAC	DTSTIF	UNUSED	UNUSED	FLANGL	CID_RCF
	1	0	0.0	0.0			0.0	
12	O2TRI	DTPCHK	SENBR	ENLSCL	DNLSCL	TCSO	TIEDID	SHLEDG
	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
13	SHAREC	CPARMB	IPBACK	SRNDE	ERICSE	ICOR	FTORQ	REGION
	0	0	0	0	1.	0	0	0
14	PSTIFF	IGNROFF	Beam-CS					
	0	0						

COMMENT:

Total Card: 3 Smallest ID: 1 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

Şekil 3. 28. Parçalar arası kontak tanımlamalarının yapılması.

Tanımlanan bu kontak algoritmasında kalıp elemanlarının ağ yapısı, iş parçasına oranla daha küçük örülse bile doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Ana ve yardımcı kontak tanımlamaları kart içerisindeki *SSID* ve *MSID* ile ilişkilendirilir. *ONE_WAY* temas tipleri ana (master) segmentler ve yardımcı (slave) düğümler arasında basma yüklerinin iletmeye imkan vermektedir. Temas sürtünmeleri aktif olduğunda eğer bağlı kayma söz konusu ise tanjant yükleri de iletir. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları kart içerisindeki *FS* (static friction) ve *FD* (dynamic friction) ile tanımlanır. *ONE_WAY* terimi ana segmentler ile sadece tanımlı yardımcı düğümler arasındaki iç içe geçme durumunun kontrol edildiğini gösterir.

3.4.9. Adım10 Çözüm ve Sonuç Değerlendirme

Sonlu elemanlara ayrılmış modelde gerekli sınır koşulları ve girdiler tanımlandıktan sonra, son aşama analizin koşullandırılmasıdır. Analiz işlemlerinin gerçekleştirilmesi için Dell marka bir mobil iş istasyonundan yararlanılmıştır. Mobil iş istasyonuna ait teknik özellikler aşağıda verilmiştir:

İşletim Sistemi: Windows 10 Pro 64

İşlemci Tipi: Intel Core i7-6820HQ 4 Çekirdekli 2,70 GHz, 8 MB 45 W

Bellek: 16 GB DDR4 2133 MHz

Ekran Kartı Modeli: 2 GB GDDR5 ayrılmış bellekli NVIDIA Quadro M1000M

Ls-Dyna yazılımı kullanılarak birçok analiz çıktı dosyası elde etmek mümkündür. Özellikle metal şekillendirme işlemleri için ilgi çekici olan, şekillendirme sınır diagramı oluşturmada kullanılan birim şekil değişimi verilerinin içeren binary plot veritabanıdır. Aşağıdaki şekilde gösterilen **DATABASE_EXTEND_BINARY* kartının içerisindeki *STRFLG* girdisinin tanımlanmasıyla oluşturulur.

Keyword Input Form

Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 R3_SS304_BHF_20.k) Setting

**DATABASE_EXTEND_BINARY (1)*

1	NEIPH	NEIPS	MAXINT	STRFLG	SIGFLG	EPSFLG	RLFLG	ENGLG
	0	0	3	1	1	1	1	1
2	CMPLG	IEVERP	BEAMIP	DCOMP	SHGE	STSSZ	N3THDT	IALEMAT
	0	0	0	1	1	1	2	1
3	NINTSLD	PKP_SEN	SCLP	HYDRO	MSSCL	THERM	INTOUT	NODOUT
	0	0	1.0000000	0	0	0		
4	DTDI	RESPLT	NEIPB	QUADR	CUBIC			
	0	0	0	0	0			

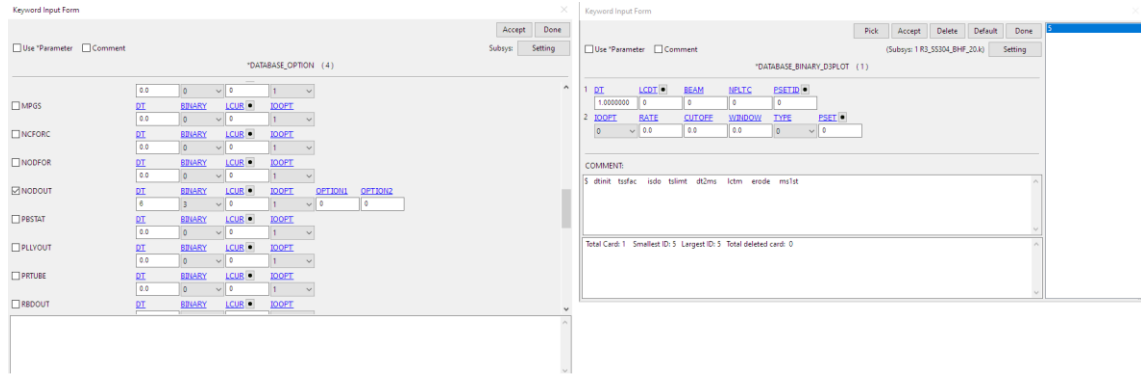
COMMENT:

\$ dtinit tssfacc isdo tslimt dt2ms lctm erode ms1st

STRFLG:=STRFLG is interpreted digit-wise STRFLG = [NML], STRFLG = 100*N + 10*M + L
 L.EQ.1: Write strain tensor data to d3plot and elout. For shell and thick shell elements two tensors are written, one at the innermost and one at the outermost integration point. For solid elements a single strain tensor is written.
 M.EQ.1: Write plastic strain data to d3plot.
 N.EQ.1: Write thermal strain data to d3plot.

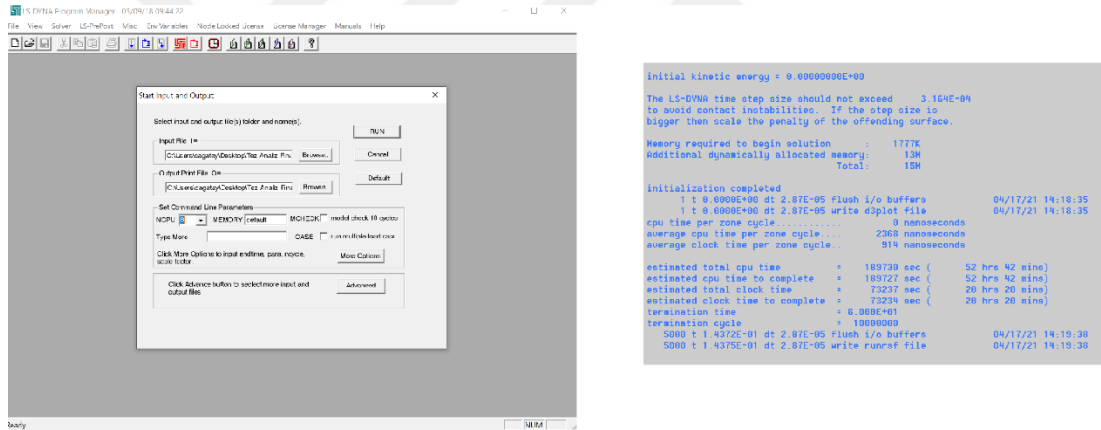
Şekil 3. 29. Şekillendirme sınır diagramı kartının tanımlanması.

Aşağıdaki şekilde gösterilen **DATABASE* içerisindeki *BINARY_D3PLOT* ve *ASCII_option* kartları kullanılarak *dt* frekans aralığına göre ihtiyacımız olan analiz çıktı değerleri için veritabanı oluşturulmaktadır.



Şekil 3. 30. Analiz çıktıları için veritabanı kartının tanımlanması.

Yapılan çalışma kapsamında 7 farklı yarıçap ve 13 değişken baskı plakası kuvveti için oluşturulan matematiksel model aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi çözümlenmiştir. Her bir çözüm için 8 çekirdek kullanılmış ve işlemci kapasitesinin elverdiği hesaplanan teorik değere göre 20 saat harcanmıştır.



Şekil 3. 31. Ls-Dyna analizini koşulması.

Çözümlenmesi tamamlanan analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde de Ls-PrePost yazılımından faydalanılmıştır. Metal Forming Post içerisindeki gerekli komutlar kullanılarak; çıktılarına ait animasyon, grafik oluşturma gibi hesaplanması isteğimiz bütün sonuçlara ait veri tabanını elde etmek mümkündür. Eksplisit analizler her ne kadar bir koşula bağlı olarak yakınsama sağlasada, pratikte yaptığımız sayısal analizlerin doğruluğunu enerji değerlerinden kontrol etmemiz gerekmektedir. Bu kontrol ettiğimiz değerler aslında analizlerin nümerik olarak doğru yada yanlış bir noktaya gittiğini kontrol etmemize imkan sağlamaktadır. Eksplisit simülasyonlarıdaki hata payı genelde enerji tabanlı çözümler olduğu için Energy Ratio parametresi ile gözlemlenebilir. Özet olarak aşağıdaki denklemin de bize gösterdiği gibi analiz sonunda enerjinin korunmuş olmasını beklenir.

$$\underbrace{E_{kin} + E_{int} + E_{si} + E_{rw} + E_{damp} + E_{hg}}_{E_{total}} = E_{kin}^0 + E_{int}^0 + W_{ext} \quad (3.37)$$

E_{kin} = current kinetic energy,

E_{int} = current internal energy,

E_{si} = current sliding interface energy (including friction),

E_{rw} = current rigid wall energy,

E_{damp} = current damping energy,

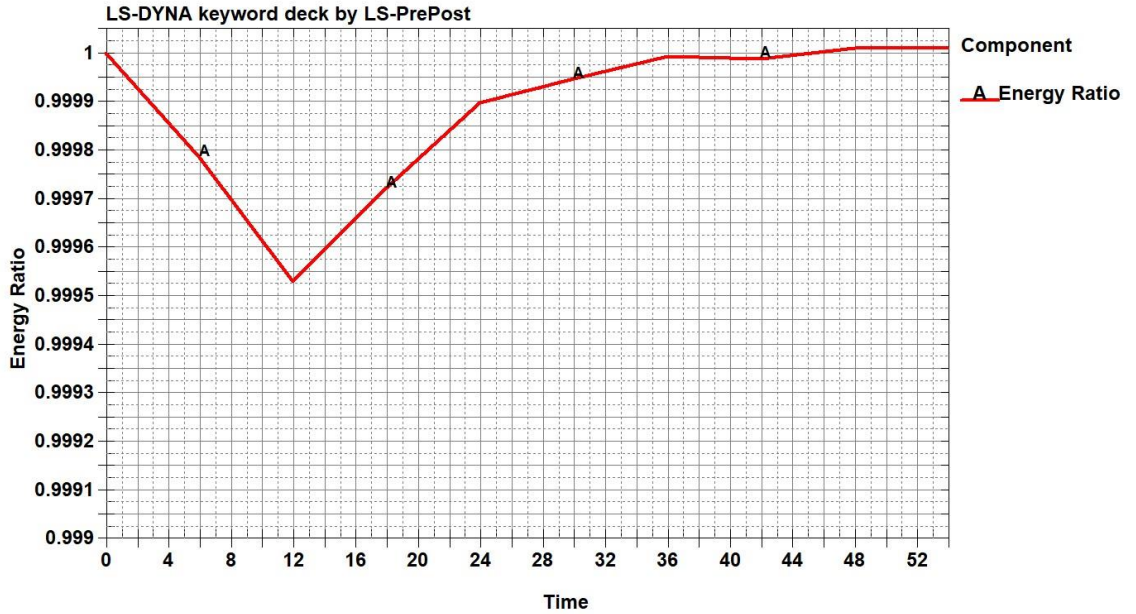
E_{hg} = current hourglass energy,

E_{kin}^0 = initial kinetic energy,

E_{int}^0 = initial internal energy,

W_{ext} = external work.

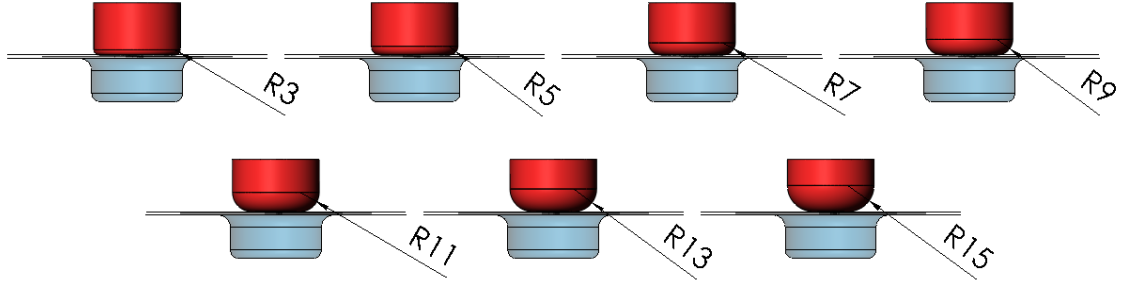
Anlık dalgalanmaları göz önünde bulundurmazsak yapılan analizlerde *Energy Ratio* değerinin “1” değerine yakınsaması çözümün tutarlı olduğunu göstermektedir. Aşağıdaki şekilde de gözüktüğü üzere yaptığımız analizlerin tümünde bulduğumuz *Energy Ratio* değerleri “1” değerine yakınsamaktadır.



Şekil 3. 32. Analiz Energy Ratio değerleri.

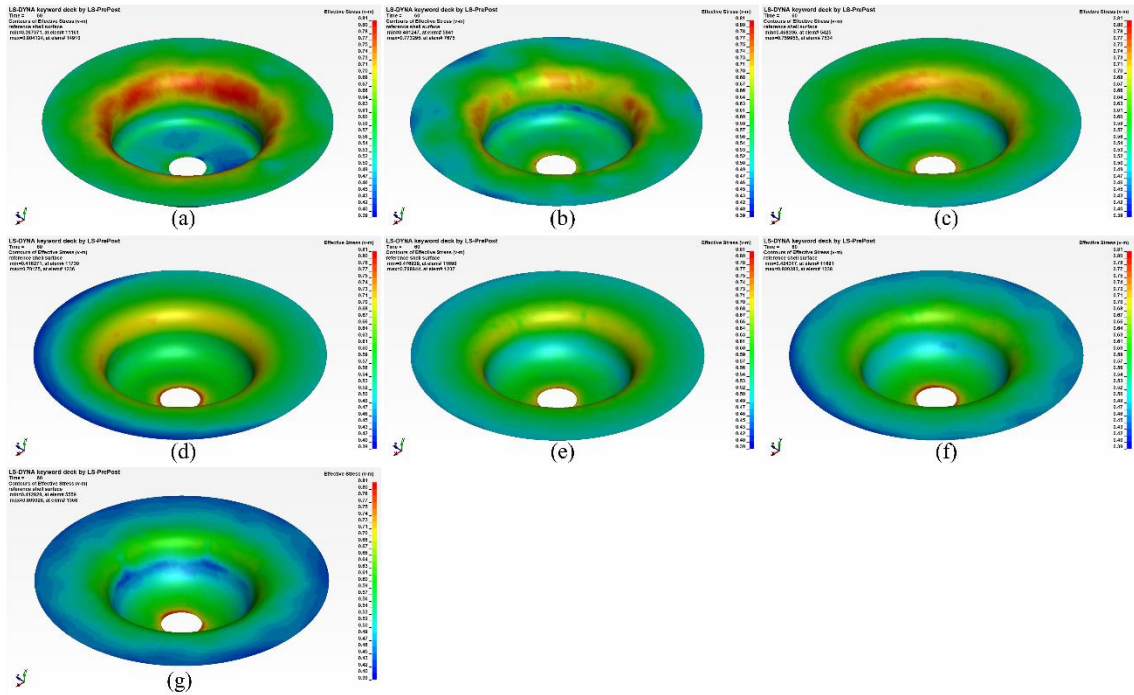
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerde öncelikli olarak kalıp elemanlarından zımba yarıçapındaki değişimin iş parçası üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Şekil 4.1’de analizlerde kullanılan zımba yarıçapları verilmiştir.



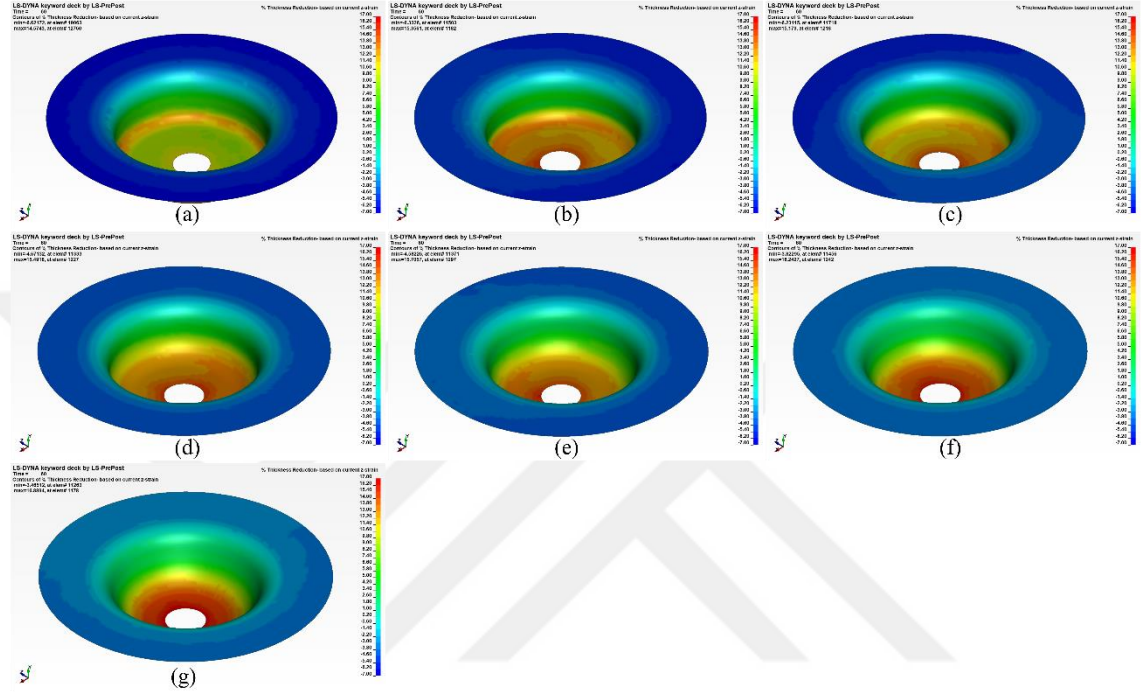
Şekil 4. 1. Analizlerde kullanılan farklı zımba yarıçapları.

Şekil 4.2 değişken zımba yarıçaplarına (“R”mm) göre efektif gerilim dağılımlarını göstermektedir. Teorik hesaplara göre sabit baskı plakası kuvveti uygulanan analizlerde, zımba yarıçapı küçüldükçe flanş kenarlarındaki yarıçaplarda artan gerilim değerleri okunmuştur. Yarıçap büyüdükçe flanş bölgesindeki yarıçaplarda ve flanş yüzeyindeki gerilim değerlerinin azaldığı görülmektedir.



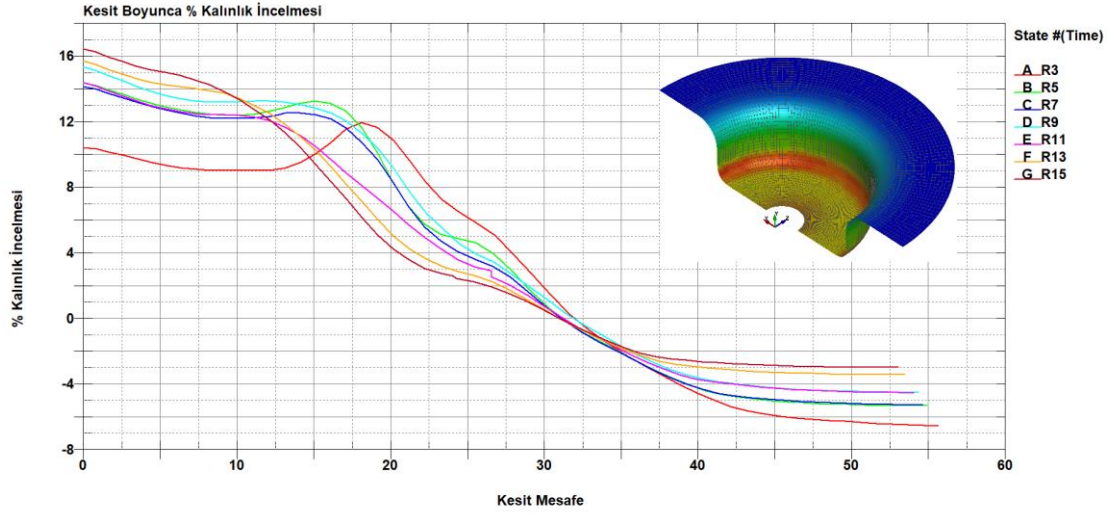
Şekil 4. 2. Değişken zımba yarıçapı için efektif gerilim değerleri(a)R3; (b)R5; (c)R7; (d)R9; (e)R11; (f)R13; (g)R15.

Zımba üzerinde küçük yarıçapın kullanılması gerilim artışını belli bölgede yoğunlaştırmıştır. İş malzemesi üzerinde keskin hatların oluşturulması kimi durumlarda arzu edilebilen bir özelliktir. Fakat bu keskin hatlar müsaade edilebilir gerilim artışı değerlerini aştığında, iş malzemesi üzerinde yırtılma gibi kalıcı deformasyonların oluşmasına yol açacaktır. Şekil 4.3 yüzdesel kesit daralmasına dair sonuçları göstermektedir.



Şekil 4. 3. Değişken zımba yarıçapı için yüzdesel kesit daralması(a)R3; (b)R5; (c)R7; (d)R9; (e)R11; (f)R13; (g)R15.

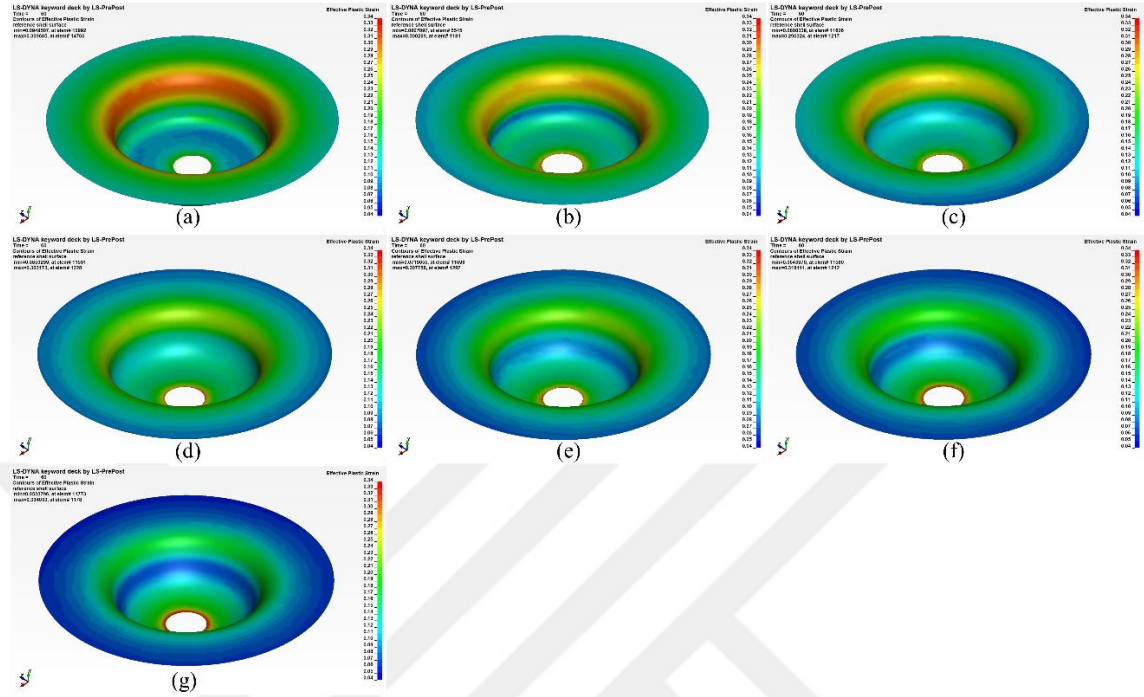
Artan yarıçap değerine karşın kesit daralmasının flanş bölgesinden tabana doğru arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Zımba yarıçapının artmasıyla flanş bölgesinde radyal çekme gerilmesine maruz kalan bölgenin yüzey alanı artmaktadır. Daha geniş bir alana yayılan bu bölgedeki yüzdesel kesit daralması da negatif olarak artmaktadır. Buda bu bölgedeki çevresel basma gerilmesinin artmasından kaynaklı malzeme yığılmasının arttığını göstermektedir. Tabana indiğimizde ise tam tersi bir durum söz konusudur. Artan yarıçapla beraber iş parçasının tabanına etki eden temas alanı azalmaktadır. Azalan temas alanı ile beraber kesit daralmasında da artış olduğu görülmektedir. Aşağıdaki Şekil 4.4’de grafik koordinat eksenini ile gösterilen merkezden kenara doğru olan yüzdesel kesit daralmasını göstermektedir.



Şekil 4. 4. Farklı zımba yarıçapları için yüzde kesit daralması grafik.

Zımba dişi kalıp içerisine doğru ilerlemeye başladığı anda zımba yarıçapına şeklini alacak şekilde malzeme eğilmeye başlar. Zımba hareketine devam edip ilerlemeye devam eder bu sırada ise çekilen kabın tabanında herhangi bir şekil değişimi olmaz. Çekilen kabın ağız kısımlarında buruşmadan dolayı kalınlık artışı meydana gelirken, taban kısmındaki zımba kenarlarına denk gelen yüzeylerde maksimum çekme gerilmelerine maruz kaldığı

için BŞD'leri burada maksimum olur. Aşağıda analize ait efektif BŞD değeri gösterimiştir.

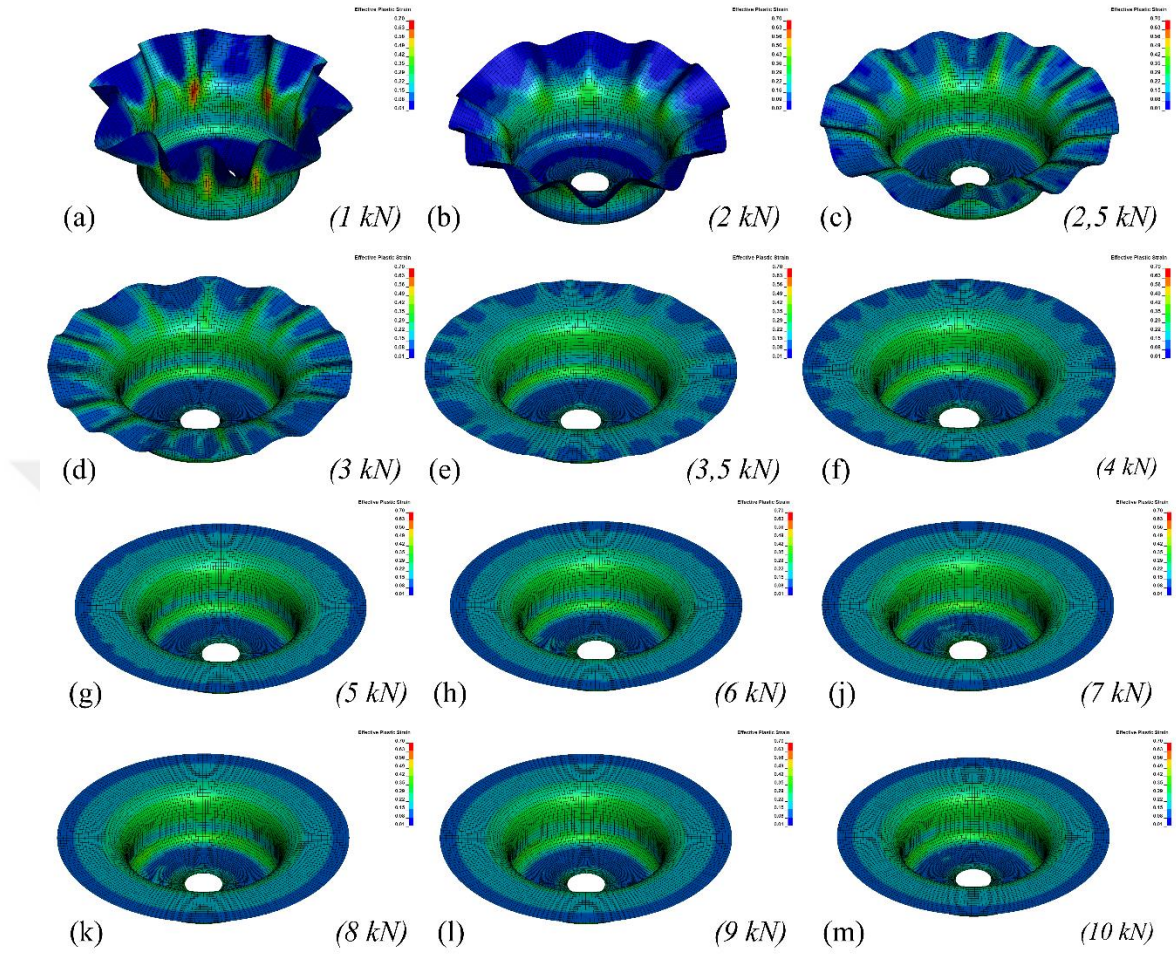


Şekil 4. 5. Farklı zımba yarıçapları için birim şekil değişimi değerleri**(a)**R3; **(b)**R5; **(c)**R7; **(d)**R9; **(e)**R11; **(f)**R13; **(g)**R15.

Şekil 4.5'deki efektif BŞD değerlerine ait sonuçların gösterdiği gibi, zımba yarıçapının artmasıyla beraber özellikle dışı kalıbın ağız kısımlarındaki ve taban rayuslarındaki BŞD değerinin azaldığı daha homojen bir şekil değişimi olduğu görülmüştür.

Çalışmaya konu olan bir diğer işlem değişkenimiz ise baskı plakası (pot çemberi) kuvvetidir. Özellikle flanşlı derin çekme işlemlerinde sacın düzgün bir şekilde kalıp içerisine itilmesini sağlayan en önemli kalıp elemanlarından biridir. Baskı plakası yardımıyla saca uygulanan kuvvet sacın geriye doğrusu akmasını sağlamaktadır. Uygulanan kuvvetin büyüklüğü ve şekli sorunsuz bir derin çekme işlemi için oldukça önemlidir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de baskı plakası kuvvetindeki artış ile birlikte efektif

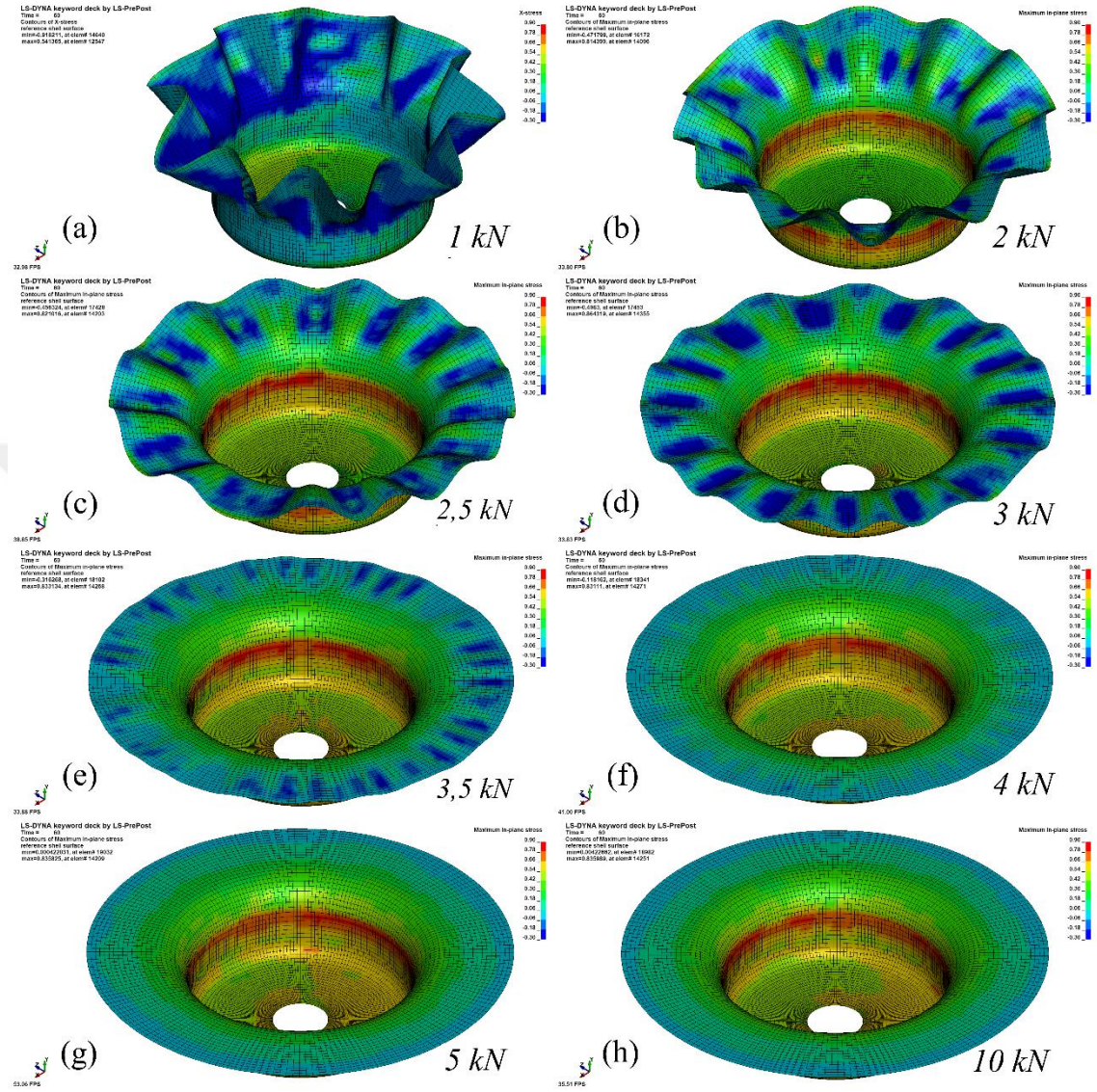
BŞD değerinin arttığı ve yüzeydeki BŞD değerinin homojen olarak iş parçasının kenarına doğru yayıldığı görülmektedir.



Şekil 4. 6. Farklı baskı plakası kuvvetleri altındaki birim şekil değişimi değeri.

Baskı plakası kuvveti yeterince uygulanmadığı takdirde sacda potluklar oluşacaktır. Bu potluklar uygun kalıp aralığı kullanıldığı takdirde sadece flanş bölgesinde aksi takdirde çekilen iş parçasının yan duvarlarında da oluşacaktır. Baskı plakası kuvvetindeki artış ile yüzeylerde meydana gelen çekme basma gerilmeleri yerini çekme-çekme gerilmesine bırakacaktır. Şekil 4.7’de uygun kalıp boşluğu için teorik baskı kuvvetinin çok daha altındaki kuvvetlerde flanş bölgesinde meydana gelen gerilme durumları paylaşılmıştır. Şekilden de anlaşılacağı gibi yetersiz uygulanan kuvvetin çekme-basma gerilmelerinin etkisiyle pot oluşturduğu, kuvvetin artırılması ile beraber

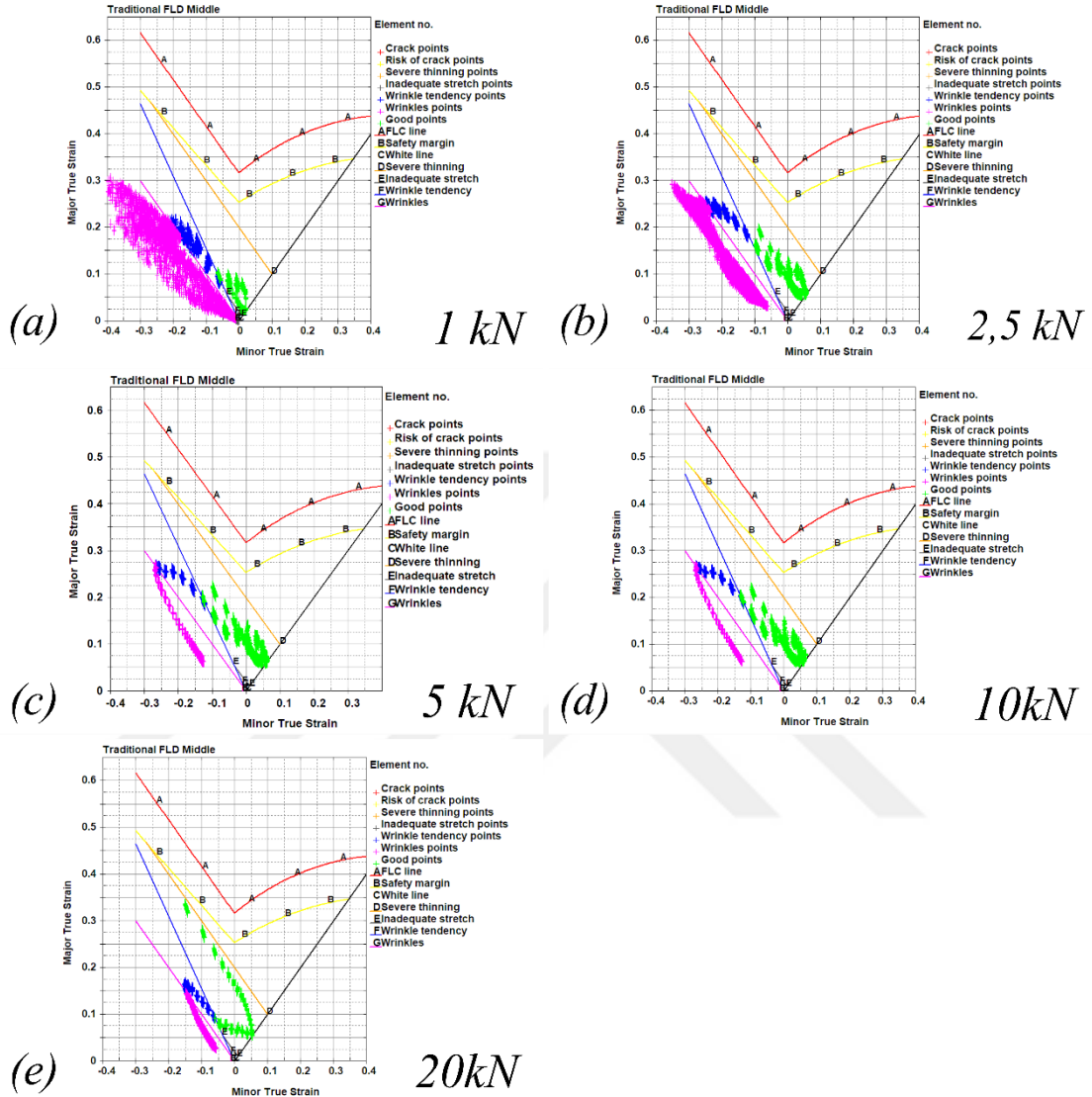
basma gerilmelerinin yerini çekme kuvvetine bıraktığı ve pot oluşumunu azalttığı görülmektedir.



Şekil 4. 7. Değişken baskı plakası kuvvetleri için maksimum düzlemsel gerilmeleri.

Şekillendirme sınır diagramları bir malzemenin şekillendirilebilirliğini belirlemede önemli bir referanstır. Bir iş parçasının derin çekilmesi esnasında, malzeme çekme, germe, basma, derin çekme gibi farklı deformasyon türlerine maruz kalır. Bu diagramlar iş parçasının derin çekilebilirliğini belirlemede önemli bir yöntemlerden birtanesidir. ŞSD küçük uzama miktarı arttığında şekillendirme ve kırılma arasındaki farkta azalmaktadır. Aradaki farkın büyük olması eğrinin sola kaymasına sebep olur. Şekil 4.8 farklı baskı plakası kuvvetleri için ŞSD'ları verilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere küçük mühendislik BŞD (minor engineering true strain) değeri kuvvet arttıkça çekme-basma gerilmelerinin olduğu bölgeden düzlemsel çekme bölgesine doğru

kaymaktadır. Yani pembe renk ile gösterilen kırışma yoğun bölgeden “0” BŞD değerine doğru bir eğilim olmuştur.

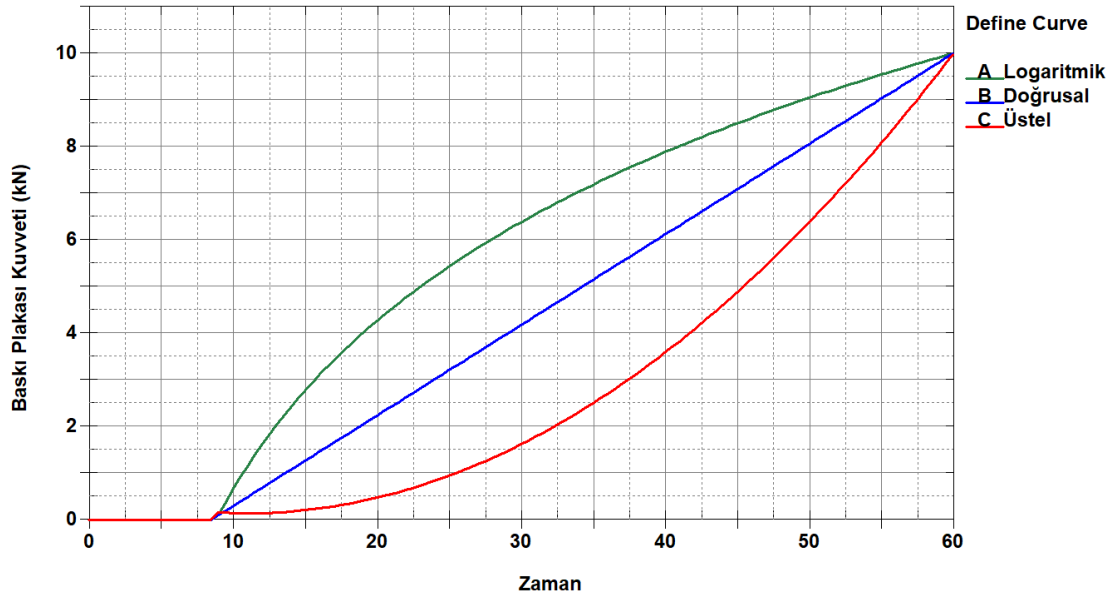


Şekil 4. 8. Farklı Baskı plakası kuvvetleri için şekillendirme sınır diyagramları.

ŞSD ile gösterilen baskı plakası kuvvetinin artmasıyla birlikte büyük mühendislik BŞD (major engineering true strain) değerinin arttığı ve kırmızı ile gösterilen şekillendirme limitine daha fazla yaklaşıldığı görülmüştür. Malzeme üzerindeki kesit daralmaları da azalmakla birlikte genele yayılan daha homojen bir şekilde değişimi sağlandığı sonucuna da ulaşılmıştır.

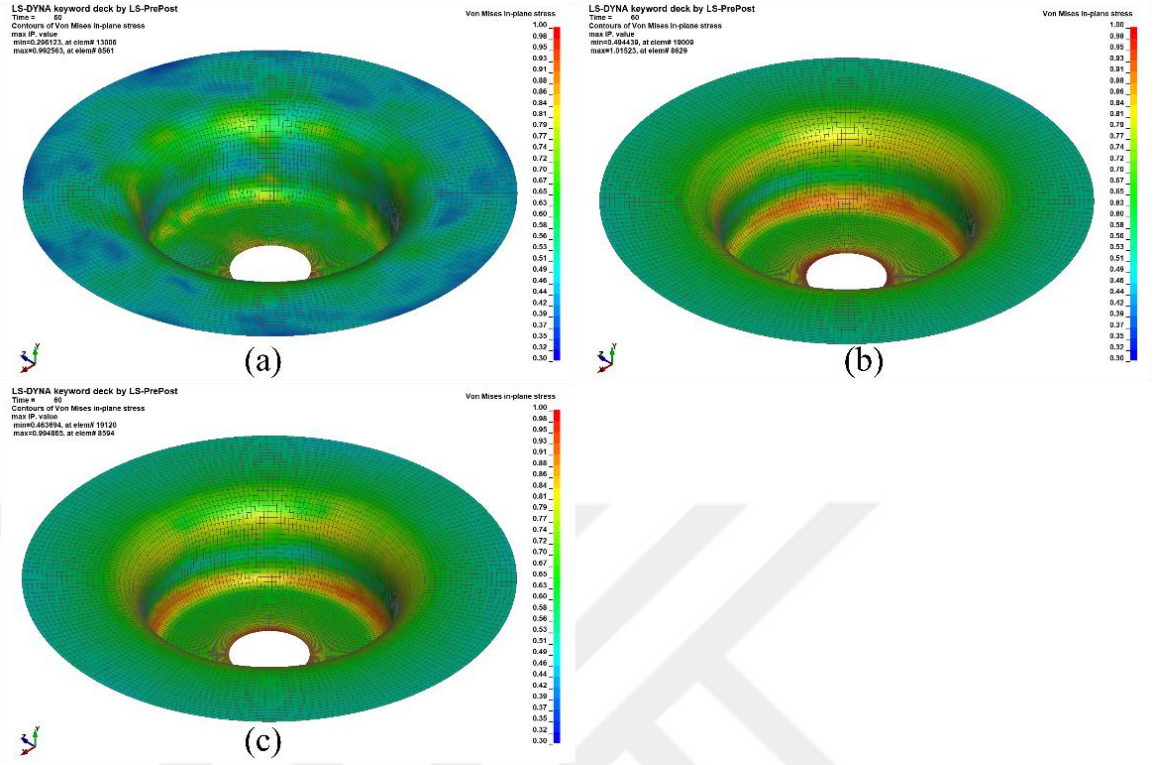
Sanayideki üretim uygulamalarında derin çekme işlemleri çok farklı tiplerdeki presler yardımıyla yapılmaktadır. Üretilcek nahai ürünün şekli, hassasiyeti, fayda-maaliyet ve özellikleri gibi birçok değişkenleri de göz önünde bulundurduğumuzda

kullanılan pres türleri farklılık göstermektedir. İki yada üç tesirli preslerde baskı plakasını kontrol etme imkanı varken, kimi tek tesirli preslerde baskı plakası kontrolü hassas bir şekilde yapılamamaktadır. Tek tesirli preslerde saca uygulanması gereken baskı kuvveti yay, kauçuk, gazlı piston gibi elemanlar yardımıyla yapılmaktadır. Bu yüzden özellikle bu tip presler kullanılarak yapılması gereken çekme uygulamalarında, kalıp tasarımı aşamasında bu elemanların iyi hesaplanarak seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca işin fiziği gereği bu elemanlar yardımıyla uygulanan baskı kuvvetleri sabit olamamaktadır. Kontrol yöntemine ve yapılan hesaplamalara bağlı olarak doğrusal, belirli bir fonksiyona bağlı üstel yada logaritmik artma eğilimli davranış gösterebilmektedir. Dengeli bir kuvvet büyüklüğünü yakalamak kap cidarlarında başarılı bir incelemeye izin verecektir. Çalışma kapsamında kuvvetin değişken olması durumunda iş parçasının derin çekilebilirliğine etkisinin ne olacağı da incelenmiştir. Aşağıdaki Şekil 4.9’da analiz için uygulanan farklı değişlen türlerindeki baskı plakası kuvvetlerine ait grafik verilmiştir.



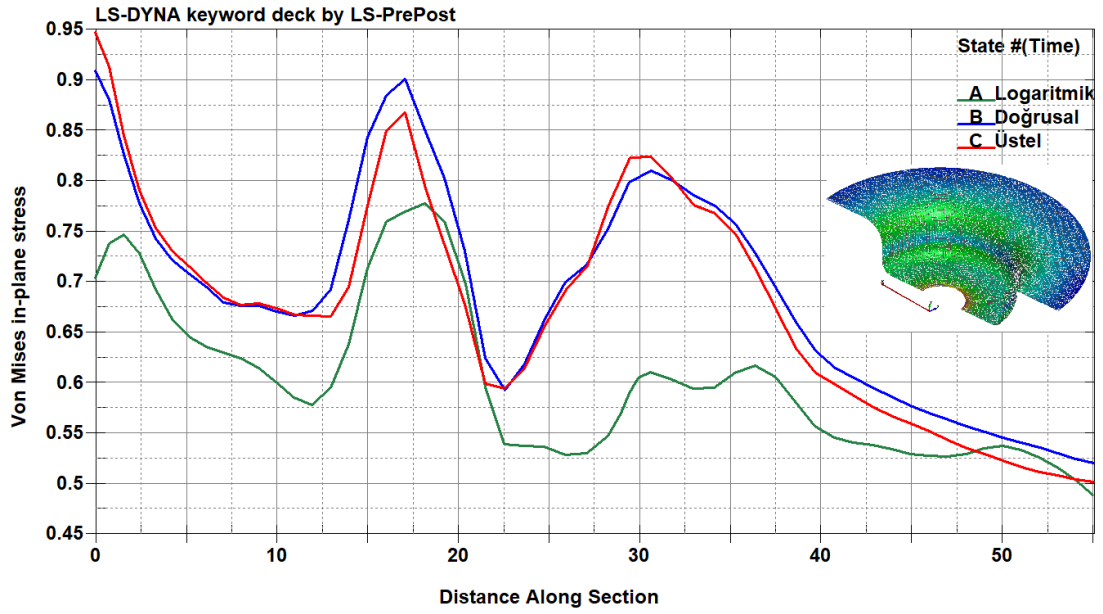
Şekil 4. 9. Değişken baskı plakası kuvveti.

Aşağıda Şekil 4.10’da gösterilen şekilde uyguladığımız değişken baskı BPK için yüzeyde meydana gelen von mises gerilmeleri gösterilmiştir. Uygulanan kuvvetin zamana bağlı farklı fonksiyonların türevleri olarak, teorik değere yaklaşması durumunda yüzeyde meydana gelen gerilmeler incelenmiştir. Kuvvetin logaritmik olarak artması durumunda yüzey gerilmelerinin homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. Zımba yarıçap ve dışı kalıp ağız radyuz bölgelerinde gerilim değerlerinin arttığı görülmektedir. Üstel ve doğrusal olarak artan kuvvetler altındaki gerilmeler birbirine yakın yüzey gerilmeleri yaratsa da özellikle zımba radyuz kenarlarında farkın arttığı görülmektedir.



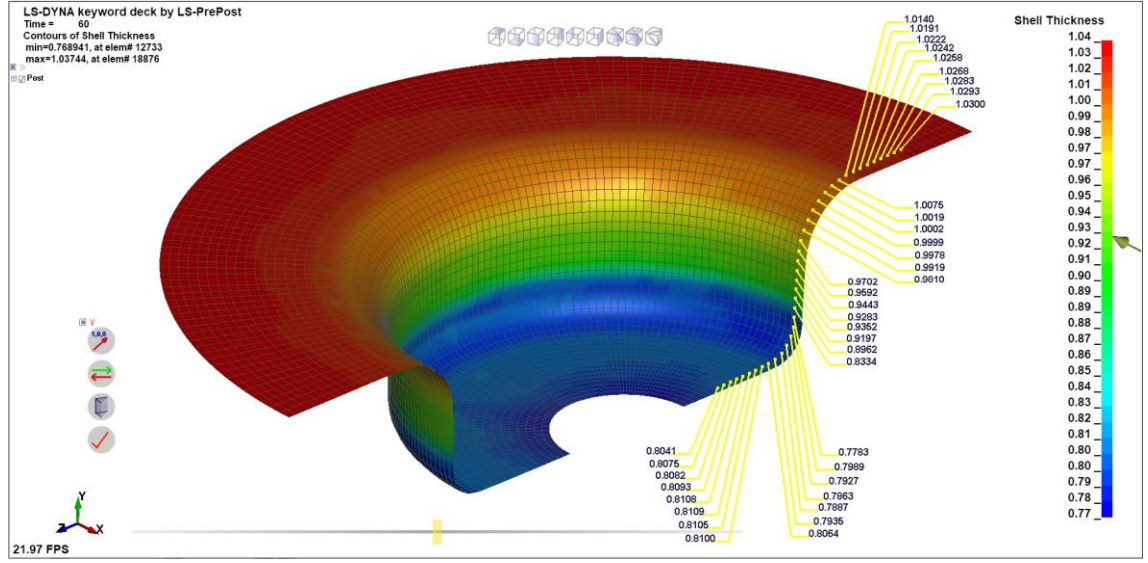
Şekil 4. 10. Değişken baskı plakası kuvvetlerinde Von-Mises yüzey gerilmeleri **(a)** Logaritmik artan; **(b)** Doğrusal artan; **(c)** Üstel artan.

Aşağıdaki şekilde gösterilen grafik kesit boyunca oluşan gerilmeleri göstermektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere kesit boyunca en ez gerilim yaratan kuvvet türünün logaritmik artan kuvvet olduğu gözükmektedir. Bunu üstel ve doğrusal kuvvetler izlemektedir.

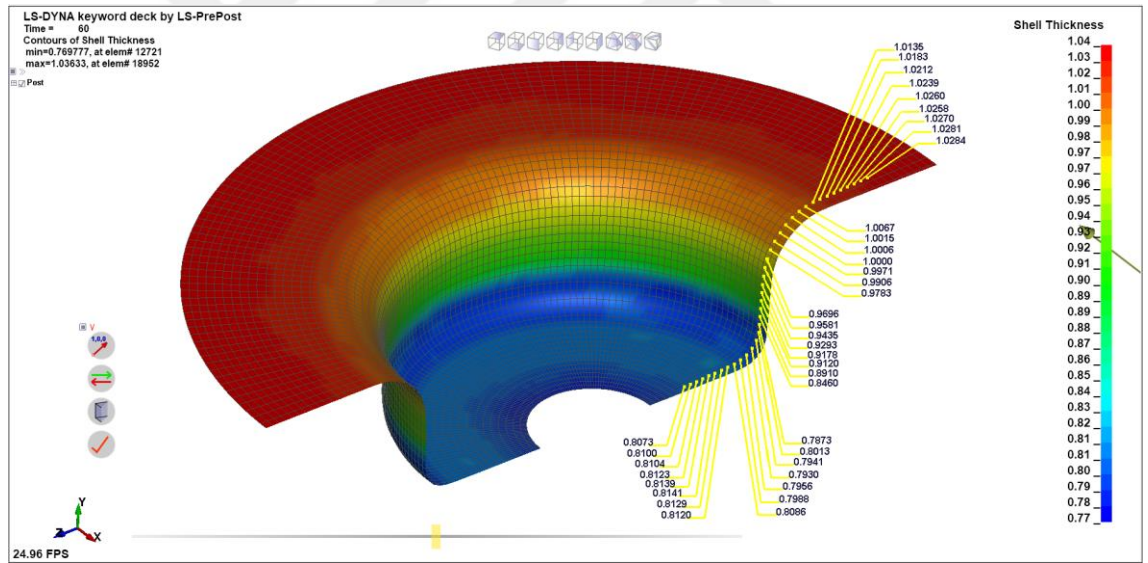


Şekil 4. 11. Değişken baskı plakası kuvvetleri için Von-Mises yüzey gerilmeleri.

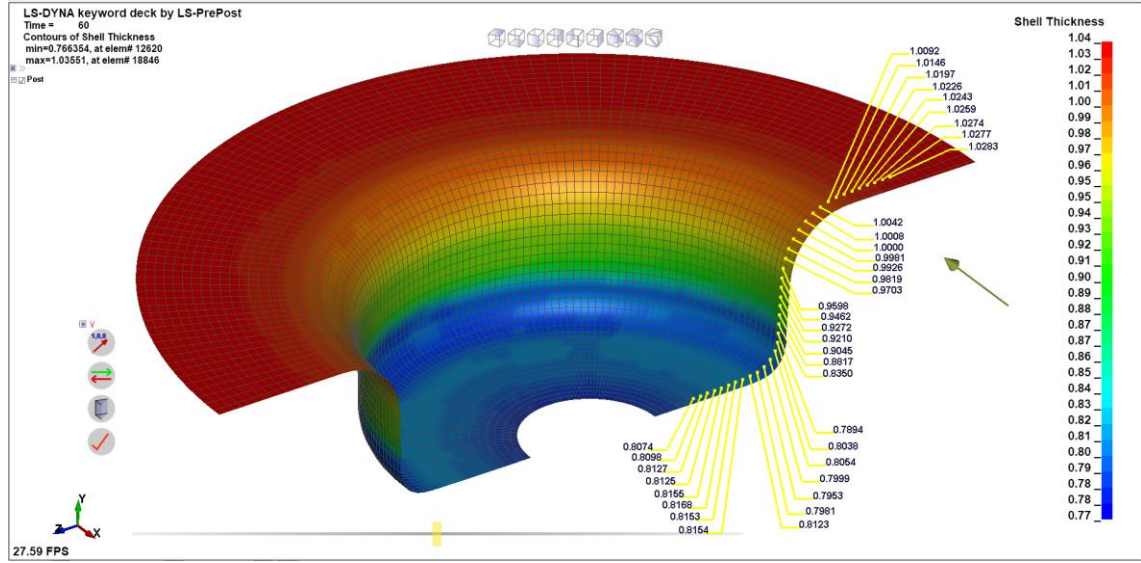
Derin çekme işleminde parça kalınlığındaki değişimler birçok sorun yaratmaktadır. Bundan dolayı parça kesiti boyunca minimum kalınlık değerinin olabildiğince yüksek olması beklenir. Maksimum kalınlık düşüşünün en fazla olduğu yerlerde yırtılma problemi görüleceği gibi, yığılmadan kaynaklı kalınlık artışının maksimum olduğu yerlerde de kırılma problemi görülmesi muhtemeldir. Aşağıdaki şekillerde sırasıyla logaritmik, doğrusal ve üstel artan BPK için iş parçasındaki kalınlık değişimine ait değerler kesit üzerinde gösterilmiştir. Okunan değerlere bakıldığında farklı değişken türlerindeki BPK için oluşturulan sayısal modellerde, kalınlık değişiminin birbirlerine yakın olduğu halde logaritmik artan kuvvet için zımba yarıçap bölgelerindeki değişimin bir miktar fazla olduğu okumuştur.



Şekil 4. 12. Logaritmik artan baskı plakası kuvveti için iş parçası kesit kalınlık değerleri.

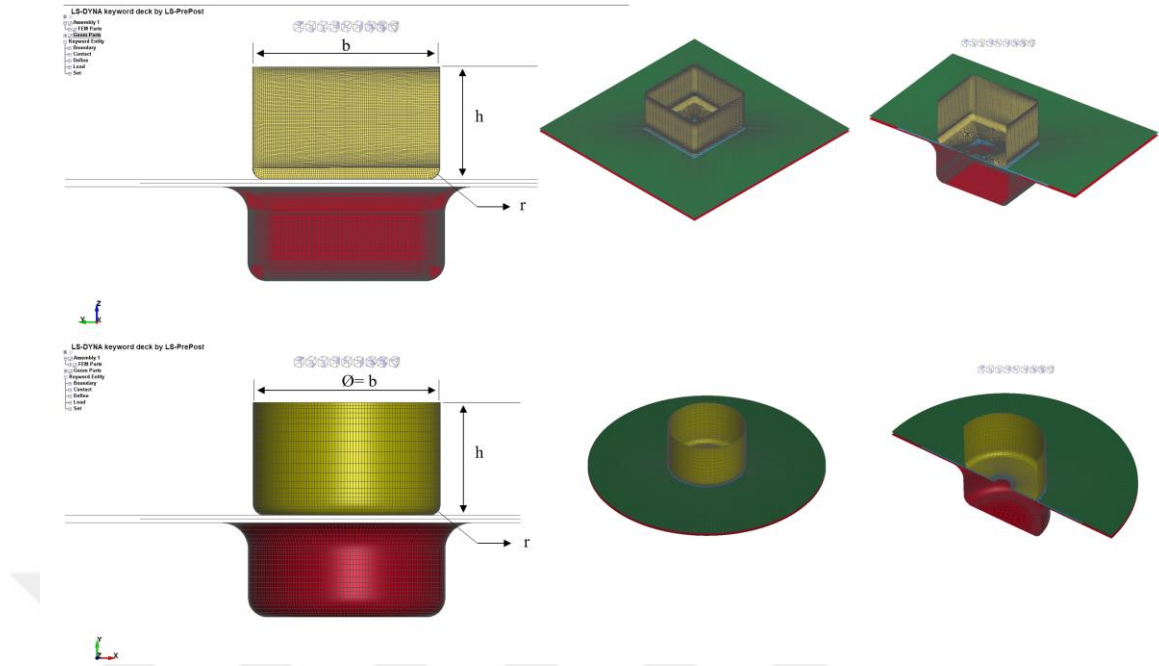


Şekil 4. 13. Doğrusal artan baskı plakası kuvveti için iş parçası kesit kalınlık değerleri.



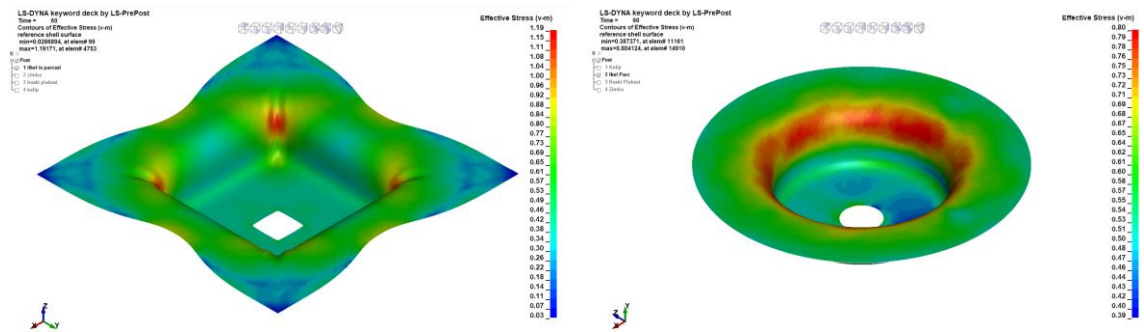
Şekil 4. 14. Üstel artan baskı plakası kuvveti için iş parçası kesit kalınlık değerleri.

Sac malzemelerin şekillendirilmesinde keskin geometrilerin elde edilmesi genellikle istenilen bir durumdur. Bu tarz keskin hatlar istenilen bir özellik olmasına rağmen, gerilmeler parça üzerindeki bu bölgelerde yığılma gösterecektir. Bu sebeple özellikle küçük yarıçaplı ve dar açılardan birbirini izlediği yüzeylerin olduğu parçaların şekillendirilmesi çok daha zor ve hassastır. Şekillendirmede kritik olacağı ve farklı geometrilerdeki durumların karşılaştırması adına, aşağıdaki şekilde eşdeğer geometrik ölçülerdeki zımba, kalıp ve iş parçası için kare ile silindirik kesit alanlı parçaların derin çekilebilirliği karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Örneklem paçalarda derin çekilebilirlik için daha önceki analiz çıktılarından elde edilen ve en kritik değerli R3 yarıçaplı zımba formu kullanılmıştır. Eşit baskı plakası kuvveti altındaki iş parçasında oluşan gerilmeler, birim şekil değişimleri gibi mekanik davranışlar üzerinde parça geometrisinin etkisi incelenmiştir.



Şekil 4. 15. Kare ve silindir kesitli parçaların şekillendirilmesi.

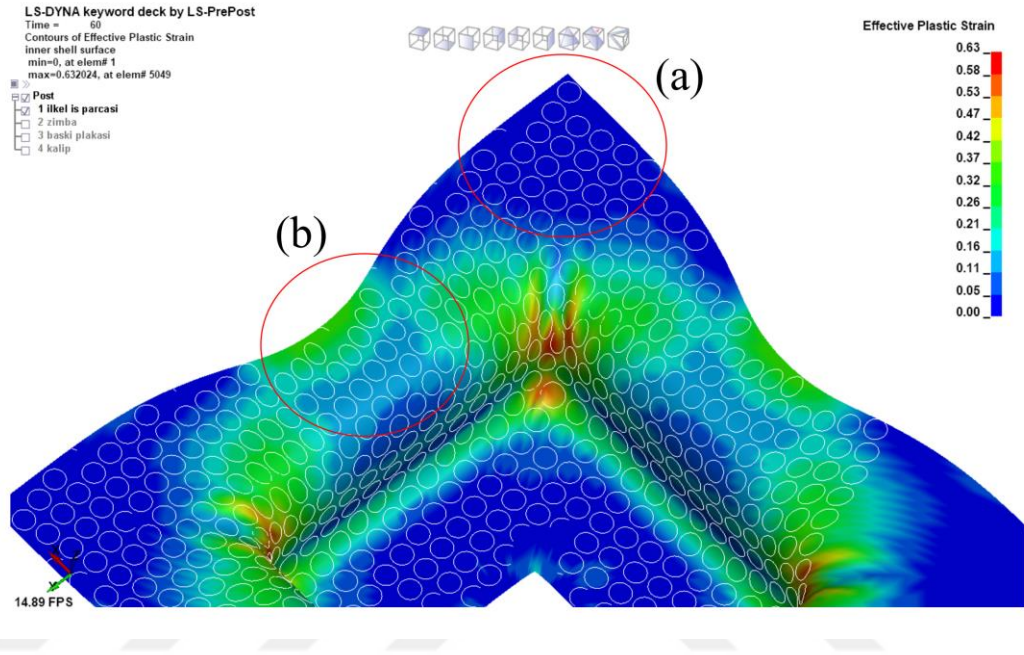
Şekil 4.16 da kare ve silindirik kesit alana sahip iş parçalarına ait efektif gerilme değerleri verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere en fazla gerilme kare parçada görülmektedir. Silindirik parça kesit boyunca eşit ve homojen bir gerilme dağılımı sergilerken; kare parça için flanş bölgesindeki kalıp girişi iç köşelerde gerilme maksimuma çıkmıştır. Ayrıca özellikle flanş bölgesindeki farklı gerilme eğiliminden kaynaklı iş parçası geometrisinde homojen olmayan bir değişim söz konusudur.



Şekil 4. 16. Kare ve silindir kesitli parçalara ait efektif gerilme değerleri.

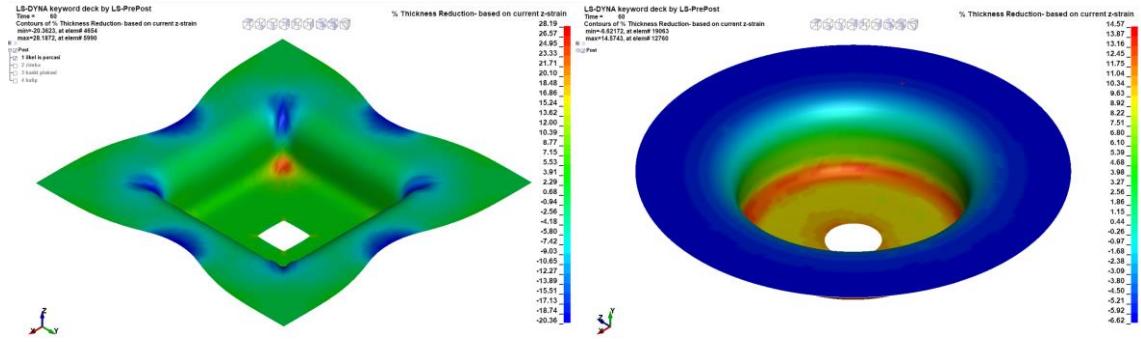
Aşağıdaki gösterilen iş parçası şekil değiştirme çizgilerinden de anlaşılacağı üzere; (b) ile gösterilen üst flanşın orta bölgeleri çekme gerilmelerine maruz kaldığı için

malzemenin bu bölgelerde daha fazla aktığı görülmektedir. Özellikle (a) ile gösterilen kenarlarını dik kesiştiği köşe noktalarına yakın bölgelerde, şekil değiştirme dairelerinin çaplarında bir değişim olmadığı görülmüştür. Malzemenin bu bölgelerdeki BŞD' de "0" olarak gözükmekte ve burada malzeme akışında doğal bir frenleme olduğu görülmektedir. Köşelerden orta kenarlara doğru geldikçe malzemenin kalıba daha fazla aktığı ölçülmüştür.



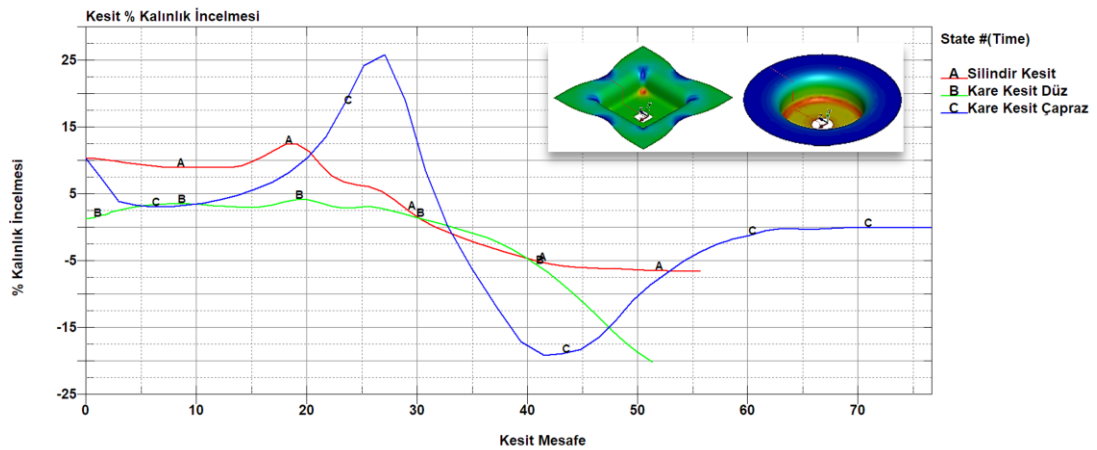
Şekil 4. 17. Kare kesit parça şekil değiştirme çizgileri ve BŞD.

İş parçası üzerinde derin çekme işlemi uygulanırken, malzemede kalıcı deformasyondan kaynaklı kalınlığında değişim meydana gelmektedir. Kalınlıktaki bu değişim istenilmeyen bir dezavantaj oluşturmalarına rağmen, en azından bu değişimin sacın bütününe homojen dağılması ve nihai sac kalınlığının her bölgede aynı olması istenir. Aşağıdaki şekil iki farklı geometrik parça için % kalınlık incelmelerini göstermektedir. Şekilden de okunacağı üzere pozitif (+) olan bölgelerde kalınlık incelmeleri meydana gelirken, negatif (-) bölgelerde sacın yığılmasın kaynaklı kalınlık artışı görülmektedir.



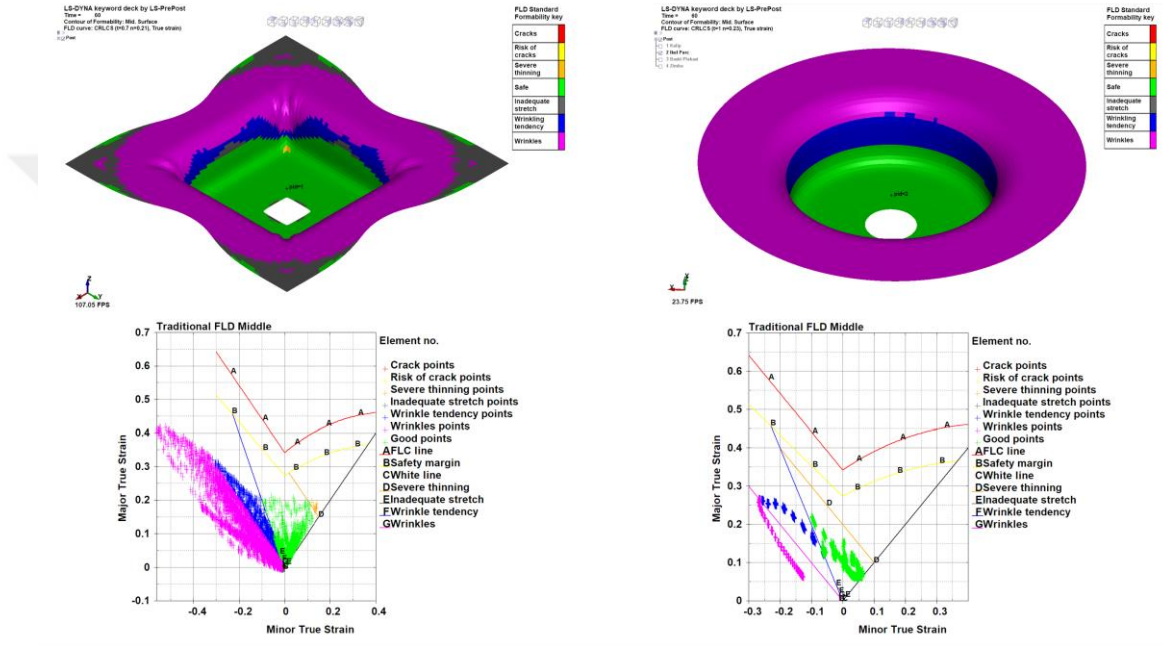
Şekil 4. 18. Kare ve silindirik kesitli parçalar için % kesit incelmeleri.

Şekil 4.19’da kare ve silindirik kesitli iş parçalarının, koordinat eksenleri ile gösterilen merkezlerinden kenarlarına kadar olan kesit boyunca kalınlık değişimini gösterilmektedir. Silindirik parça her yerde simetrik olduğu için tek bir kesitle gösterilirken, kare kap iki farklı kritik kesit eksenini üzerinden ele alınmıştır. Silindirik parçadaki “A” ile gösterilen maksimum kesit incelmeleri %14,5 civarı ile zımba yarıçapının olduğu bölgede görülürken, baskı plakasının uygulandığı flanş bölgelerinde yığılma % 6’ya kadar çıkmaktadır ve homojen olarak dağılmaktadır. Kare kaptaki “B” ile gösterilen kesit boyunca daha % 2 ile 4 arasında doğrusala yakın bir kesit incelmeleri görülürken en dışta akış hızındaki fark kaynaklı % 20 yığılma kaynaklı kalınlık artışı görülmektedir. Aynı parça da “C” ile gösterilen kesit % kalınlık değişim miktarının en fazla ve dalgalı olduğu kesittir. Zımba yarıçap bölgesinde % 28 kesit incelmeleri olurken kalıp girişinde tam tersi yönde %20 yığılma oluşmuştur. Grafikten de anlaşılacağı bölgesel bazda kare kaptaki % kalınlık azalması çok daha fazla oluşmaktadır. Buda derin çekilebilirlik açısından kare kabı daha zorlayıcı kılmaktadır.



Şekil 4. 19. Parça kesitleri boyunca kalınlık değişimi grafik.

Yapılan simülasyon neticesinde aşağıdaki şekillendirme sınır diyagramları, malzemelerin hasara uğrayıp uğramadığı hakkında bilgi vermektedir. Kritik bölgeleri, olası çekme hatalarını bu diyagramlar üzerinden okumak mümkündür. “B” ile gösterilen çizginin üstünde kalan bölgeler yırtılma için tehlikeli durum oluşacağını altında kalan bölgelerin ise güvenli olduğu göstermektedir. İki farklı kesitli geometri karşılaştırıldığı zaman; silindirik parçada kırışma ihtimalinin daha düşük olduğu görülmektedir. Kare kesitli parça flanş köşe bölgelerinde yetersiz çekme bölgeleri oluşurken, silindir parçada yetersiz çekilme bölgeleri görülmemektedir. Ayrıca kare kesitli parça için zımba köşe bölgeleri çok fazla sac incelmesinin görüldüğü riskli alanlar oluşmaktadır.



Şekil 4. 20. Kare ve silindir kesitli parçalar için ŞSD.

5. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında Bölüm 4’de zimba yarıçapının ve baskı plakası kuvvetinin, iş parçasının derin çekilebilirliğine olan etkileri ve sayısal sonuçları detaylı bir biçimde incelenmiştir. Elde edilen bulgular kapsamında genel bir değerlendirme yaptığımız taktirde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Sabit bir baskı plakası kuvveti altında zimba yarıçapı küçüldükçe malzemenin kalıp içerisinde akışı zorlaştığı için, iş parçası zimba yarıçap kenarlarında gerilme değerlerinin arttığı saptanmıştır. Artan gerilmeler, malzemenin müsaade edilebilir mukavemet değerine ulaşması durumunda kenarlarda yırtılmadan kaynaklı deformasyon yaratacağı muhtemeldir.
2. Zimba yarıçapının artmasıyla beraber iş parçası genelindeki gerilim değerlerinde ve kesit daralmasında düşüş görülmektedir. Bu derin çekilebilirlik için olumlu bir etki yaratsa da artan zimba yarıçapının baskı plakası etki alanını da azaltmasından kaynaklı kırışmalara sebep olacaktır.
3. Sabit baskı plakası kuvveti altındaki 3mm ile 15mm arasında değişen zimba yarıçapı değerleri için şekillendirilen iş parçasına ait yüzde(%) kesit daralması incelendiğinde; yarıçap değerinin artmasıyla birlikte taban bölgesinde yüzde(%) kesit daralması artarken, flanş bölgesinde ise malzeme yığılmasının artmasından kaynaklı negatif yüzde(%) kesit artışı görülmektedir.
4. Farklı zimba yarıçapları için BŞD değerleri incelendiğinde en fazla değişimin 3mm yarıçaplı zimbanın şekillendirdiği iş parçasında görülürken, değişimin özellikle dışı kalıp yarıçap kenarlarında olduğu görülmüştür ve zimba yarıçapının artmasıyla BŞD değerlerinde düşüş olduğu saptanmıştır.
5. Teorik sonuca çok uzak değerde uygulanan (20kN) baskı plakası kuvvetinin, iş parçasının flanş bölgesinde potluklar yarattığı saptanmıştır. Kuvvetin teorik sonuca yaklaşmasıyla potlukların azalarak flanş bölgesinde daha homojen bir basınç dağılımı sağlandığı görülmüştür.
6. Baskı plakası kuvvetindeki artışın etkisine şekillendirme sınır diyagramları üzerinden bakıldığında, iş parçası üzerindeki şekil değişiminin pot oluşum bölgelerinden tek eksenli çekme ve derin çekme bölgelerine doğru yöneldiği görülmektedir. Bu yönelme aynı zamanda malzemeyi çekme limit bölgesine de yaklaştırmaktadır. Bu alanın aşılması çekmenin hatalı olarak sonuçlanacağını göstermektedir.
7. Baskı plakası kuvvetinin logaritmik, doğrusal ve üstel artması durumları incelendiğinde logaritmik artan kuvvetin iş parçası üzerinde yarattığı gerilim dağılımları için en uygun yöntem olduğu saptanmıştır. Bu kuvvet değişkenleri arasındaki kesit daralmalarında kayda değer bir fark olmakla birlikte zimba yarıçap kenarlarındaki kesit daralmasının en fazla logaritmik artan baskı plakası kuvvetinde olduğu görülmüştür.
8. Baskı plakasının kuvvetinin iki yada üç tesirli presler yardımıyla kontrol edilme imkanının olmadığı durumlarda; kuvveti yay, kauçuk, gazlı gibi yöntemlerle de

kontrol ederek istenilen kalitede derin çekme işleminin sağlanacağı sonucuna ulaşılmıştır.

9. Silindirik parçaların derin çekilebilirliği kara gibi köşeli kesite sahip parçaların derin çekilebilirliğine göre daha kolaydır.
10. Kare ve silindirik kesitli parçaları karşılaştırdığımız taktirde, iş parçası üzerindeki aşırı incelme ve yırtık riski teşkil eden bölgeler kare kesitli parçalarda daha fazladır.
11. Kare benzeri kesitli parçalar için iş parçası üzerinde farklı çekme ve basma gerilmelerinden kaynaklı daha fazla geometri bozulması görüldüğünden; parça açılımı tayini daha zor ve mühendislik fire miktarı daha fazla olacağı sonucu çıkarılabilir.
12. Zorunlu bir gereklilik olmadıkça daha silindirik geometrili parçaların tasarımı, keskin köşe kullanılmaması ile köşe ve kenarlar için daha yüksek yarıçaplı tasarımların tercih edilmesi üretilebilirlik ve mühendislik maliyetinde avantaj sağlayacaktır.

Elde edilen sonuçlar neticesinde bundan sonraki yapılacak akademik çalışmalar ve sanayi uygulamaları için öneriler şu şekilde özetleyebiliriz:

1. Sonlu elemanlar modeli için kullanılan ağ yapısını çok daha sık ve adaptif örerak sonuçlara olan etkisi araştırılabilir.
2. Değişken baskı plakası kuvvetleri ile yapılan çalışmalarda en uygun kuvvet fonksiyonu için bir optimizasyon çalışması yapılabilir.
3. Örnek modelin daha karmaşık geometriye sahip olması ve limit çekme oranına çok daha yakın olması durumundaki parçalar için örnekleme yapılabilir.
4. Sanayide derin çekme metodu kullanılarak üretilen, seri ve standartlaşmış malzemelerin kalıp üretim aşamasında oluşabilecek problemlerin öngörülmesinde bu metoda başvurulabilir.
5. Sonlu elemanlar metodu kullanarak yapılan çalışmalar sayesinde uygun baskı plakası kuvvetinin belirlenmesi, şekillendirme sınır diyagramlarının oluşturulması ve şekillendirme şartlarının belirlenmesinde kalıp tasarımındaki harcanan zaman ve maliyetten büyük kazanç sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Arkun, E. (2006). Paslanmaz çelik saclarda şekillendirme karakteristikleri. *Yüksek Lisans Tezi*, 141. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Aydoğan, C. S. (2015, Temmuz). Ti alaşımlarının diyaframla hidrolik şekillendirilmesinde geri esneme miktarının sayısal ve deneysel olarak incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, 91. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- Behrens, B. (2007). *Journal of Materials Processing Technology*.
- Boljanovic, V. (2004). *Sheet Metal Forming Processes And Die Design*. New York: Industrial Press.
- Çapan, L. (2003). *Metallere Plastik Sekil Verme*. İstanbul: Çağlayan Kitabevi.
- ÇAVUŞOĞLU, O. (2013, Haziran). Sac metal şekillendirme işlemlerinde pres hızı ve malzemenin şekillendirmeye etkilerinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çetin, H. (2005). Alüminyum alaşımlı hafif metal levhaların prizmatik derin çekmede biçimlendirilebilirlik özelliklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, 163. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Çetin, M. S. (2007). Derin Çekme ile Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Yardımıyla Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. Edirne: Trakya Üniversitesi.
- D. Banabic, H. B. (2010). *Formability of Metallic Materials*. New York: Springer.
- Değirmenci, H. (2006). Çelik sacların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimler ve nedenleri ile bunların şekillendirme prosesi üzerindeki etkileri. *Yüksek Lisans Tezi*, 221. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Emrah Uysal, F. Ö. (2010). Örnek bir uygulama ile yüksek mukavemetli çeliklerde şekillendirme sınır diyagramının elde edilmesi., (s. 388-389). Balıkesir.
- Esner, C. (2006, Haziran). AA 5754 Malzemelerde Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik ve Deneysel İncelenmesi. *Bilim Uzmanlığı Tezi*. Zonguldak: Zonguldak Karaelmas Üniversitesi.
- Gümrük, R. (2006, Ağustos). Şekil Verme İşleminin Çarpma Performansına Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, 208. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Gündü, T. (2000, Haziran). Derin Çekme Saclarında Derin Çekilebilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, 126. İstanbul.
- Güneş, A. (2002). *Pres İşleri Tekniği* (Cilt Cilt 2). Ankara: TMMOB.

- Gürün, H. (2008, Ağustos). Derin çekme kalıplarındaki parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini. *Doktora Tezi*, 154. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- Yıldız, H. Kırılı, O. (2004). Derin Çekme İşleminin Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Modellenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, s. 318.
- İspir, İ. (2011, Haziran). AISI 304L Paslanmaz Çeliğinin Şekillendirilebilirliğinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, 94. Karabük: Karabük Üniversitesi.
- Jones, R. M. (2009). *Deformation Theory Of Plasticity*. Virginia: Bull Ridge.
- Kara, E. (2011, Şubat). DP500 ve DP600 Sac Malzemelerin Derin Çekilebilirliğinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, 94. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- Karagöz, T. (2017, Haziran). Otomotivde kullanılan alüminyum esaslı saclarda geri yaylanma tahmin doğruluğunun arttırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, 89. Bursa: Uludağ Üniversitesi.
- Kelly, P. (2013). *Lecture Notes: An introduction to Solid Mechanics Part II*.
- Kemal, D. (2006, Şubat). AL 1050 malzemesinin derin çekme işleminde baskı plakasının etkisinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi. *Bilim Uzmanlığı Tezi*. Karabük: Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kurt, L. (1985). *Handbook of Metal Forming*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Mutlu, S. (2012). Progresif Kalıplarla Derin Çekme Otomasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, 57. Edirne: Trakya Üniversitesi.
- MÜLKOĞLU, O. (2016, Ocak). Yeni bir bulaşık makinesi mekanik yapı ve ambalaj modülünün sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyonu. Ankara: TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özçelik, G. (2008, Haziran). Derin Çekme İşleminin Simülasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, 146. Sakarya: Sakarya Üniversitesi.
- Özdilli, Ö. (2018, Eylül). Polimer Kaplı Metal Sacların Derin Çekme Davranışlarının İncelenmesi. *Doktora Tezi*. Çorum: Hitit Üniversitesi.
- Özer, F. (2011, Aralık). Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerde şekil verme operasyonları sonucu oluşan geri yaylanmanın doğru tahmin ve telafisi. *Yüksek Lisans Tezi*, 170. Ankara: TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi.
- Suchy, I. (1998). *Handbook of Die Design*. New York: McGraw-Hill.

- Szumera, J. A. (2003). *The Metal Stamping Process*. New York: Industrial Press.
- Şahin, Ç. Ö. (2013, Mayıs). Sac Levhaların V-Bükme Sonucu Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, 111. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- Şen, N. (2018). DP600 Malzemenin Şekillendirilmesinde Değişken Baskı Plakası Kuvveti Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, s. 1297.
- Şener, B. (2012, Ocak). Otomotiv sektöründe kullanılan derin çekme saclarının şekillendirilebilirliğinin analizi. 140. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- T.C Milli Eğitim Bakanlığı. (2006). *Çekme Kalıpları 1*. Ankara.
- Türköz, M. (2009). AL 2024 ve AL 5754 alaşımlı alüminyum sacların şekillendirilebilme kabiliyetinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, 129. Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yıldız, B. (2017, Temmuz). Derin Çekme İşleminde Kalıp Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Optimizasyonu. *YÜKSEK LİSANS TEZİ*, 73. Diyarbakır: Dicle Üniversitesi.

7. EKLER

EK-1. SS304 kalite paslanmaz çelik malzeme sertifikasyonu.



Mill Test Certificate/Mill Test Sertifikası

Certificate No./Sertifika No. : 200420-RCZ7AN-0003A1-0001

Date of Issue/Yayın tarihi : Apr., 21, 2020

Surface Finish /Yüzey : NO.2B

Order No./Sipariş No. : Z7S2016663

PO No./PO NO. : B3357/0220

Supplier /Tedarikçi Firma : BAYAR PASLANMAZ ÇELİK A.Ş.

Commodity : STS CR AP COIL

Customer : BAYAR PASLANMAZ ÇELİK A.Ş.

Spec & Type /Spesifikasyon : EN10088-1.4301

Size/Ebat (mm)	Product No. /Ürün no.	Quantity /Miktar	Weight /Ağırlık (kg)	Heat No. /Çelik yapım No.	Position	Tensile Test				Hardness /Sertlik HV	Division	Chemical Composition/Kimyasal Kompozisyon							
						YS 0.2%	YS 1.0%	TS	EL (%)			C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	N (ppm)
0.6x1250xC	Z7Y69006AA	1	9.809	SE16289_0	T	247	282	636	57	150.0	L	0.0508	0.373	1.029	0.0312	0.0024	18.249	8.064	357
0.6x1250xC	Z7Y69006AB	1	9.888	SE16289_0	T	247	282	636	57	150.0	L	0.0508	0.373	1.029	0.0312	0.0024	18.249	8.064	357
*** Sub Total (040) ***		2	19.697 (kg)																
1x1250xC	Z7H0774SAA	1	8.089	SD41648_9	T	267	304	641	54	158.0	L	0.0512	0.476	1.014	0.0322	0.0027	18.197	8.045	407
*** Sub Total (120) ***		1	8.089 (kg)																
*** Grade Total ***		3	27.786 (kg)																
*** Grand Total ***		3	27.786 (kg)																

* Position - T : Top, M : Middle, B : Bottom

* Tensile Test Direction : Transversal, Gauge Length : 80mm (Rectangular),

* YP Method : 0.2% off-set

* Division - L : Ladle Analysis

We hereby certify that the material herein has been in accordance with: EN10088-2, TS EN ISO 9445-2, ASTM A240/A240M, ASTM A480/A480M, POSCO ASSAN TST is ISO 9001:2015 & ISO 14001:2015 Certified, NACE MR0175 and MR0103, ASME SA 240 / SA 240M, ASME SA 480, EN10088-4, EN10028-7 and PED 2014/68 EU - AD2000.

W2-W10, ISPM 15 Certified

Test Certificate is issued according to EN10204 3.1.

This product includes all requirements of TS EN 10028-7 standard.

Legal sanction can be imposed on forging. Improper use of product can cause safety issues.



EN 10088-4

305/2011/EU (19) 1922

CPR - 1159

Surveyor To :

POSCO ASSAN TST Ataturk District 1st Street No:4, 41310 Izmit/Kocaeli - TURKEY

< PAGE : 1 >

Chief of material testing section

WOO CHUL CHO

EK-2. Ls-Dyna analiz .k dosyası.

```

## LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost(R) V4.7.4 - 15Jan2020
## Created on Apr-05-2021 (23:12:54)
*KEYWORD
*TITLE
##
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_ACCURACY
##      osu      inn      pidosu      iacc
      1      4      0      0
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
##      q1      q2      type      btype      tstype
      1.5      0.06      -2      0      0
*CONTROL_CONTACT
##      slsfac      rwpnal      islchk      slthk      penopt      thkchg      orien      enmass
      0.0      0.0      1      1      1      1      2      0
##      usrstr      usrfrc      nsbcs      interm      xpene      ssthk      ecdt      tiedprj
      0      0      0      0      4.0      0      0      0
##      sfrc      dfrc      edc      vfc      th      th_sf      pen_sf
      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
##      ignore      frceng      skiprwg      outseg      spotstp      spotdel      spothin
      2      0      0      1      1      1      0.5
##      isym      nserod      rwgaps      rwgdt      rwksf      icov      swradf      ithoff
      0      0      2      0.0      1.0      0      0.0      0
##      shldg      pstiff      ithcnt      tdcnof      ftall      unused      shltrw      igactc
      1      0      0      0      1      0.0      0
*CONTROL_ENERGY
$      hgen      rwen      slnten      rylen
##      hgen      rwen      slnten      rylen      irgen
      2      1      2      2      2
*CONTROL_HOURLASS
$      ihq      qh
##      ihq      qh
      1      0.1
*CONTROL_SHELL
$      wrpang      esort      irnxx      istupd      theory      bwc      miter      proj
##      wrpang      esort      irnxx      istupd      theory      bwc      miter      proj
      0.0      1      -2      2      2      2      2      1
##      rotasc1      intgrd      lamsht      cstyp6      thshel
      1.0      0      0      1      0
##      psstupd      sidt4tu      cntco      itsflg      irquad      w-mode      stretch      icrq
      0      0      0      0      2      0.0      0.0      0
##      nfail1      nfail4      psnfail      keepcs      delfr      drcpsid      drcprm      intperr
      0      0      0      0      0      0      1.0      0
*CONTROL_SOLUTION
##      soln      nlq      isnan      lcint      lcacc      ncdcf
      0      0      0      1000      0      1
*CONTROL_TERMINATION
$      endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
##      endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas      nosol
      60.0      10000000      0.0      0.0      0.0      0

```

```

*DATABASE_ELOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt      option1      option2      option3      option4
      6.0      0      0      1      0      0      0      0

*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      6.0      0      0      1

*DATABASE_MATSUM
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      6.0      0      0      1

*DATABASE_NODOUT
$#      dt      binary      lcur      ioopt      option1      option2
      6.0      3      0      1      0.0      0

*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$  dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode      ms1st
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
      1.0      0      0      0      0
$#      ioopt      rate      cutoff      window      type      pset
      0      0.0      0.0      0.0      0      0

*DATABASE_BINARY_RUNRSF
$#      cycl      nr      beam      npltc      psetid
      5000.0      0      0      0      0

*DATABASE_EXTENT_BINARY
$  dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode      ms1st
$#      neiph      neips      maxint      strflg      sigflg      epsflg      rltflg      engflg
      0      0      3      1      1      1      1      1
$#      cmpflg      ieverp      beamip      dcomp      shge      stssz      n3thdt      ialemat
      0      0      0      1      1      1      2      1
$#      nintsld      pkp_sen      sclp      hydro      msscl      therm      intout      nodout
      0      0      1.0      0      0      0
$#      dtdt      resplt      neipb      quadr      cubic
      0      0      0      0      0

*DATABASE_FORMAT
$  dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode      ms1st
$#      iform      ibinary
      0      0

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_ID
$#      id
      0zimba hareket
$#      pid      dof      vad      lcld      sf      vid      death      birth
      4      2      0      1      -1.0      01.00000E28      0.0

*LOAD_RIGID_BODY
$#      pid      dof      lcld      sf      cid      m1      m2      m3
      3      2      3      -1.0      0      0      0      0

*CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE
$#      cid
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
      3      1      0      0      0      0      0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk      bt      dt
      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0      0.01.00000E20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt      fsf      vsf
      1.0      1.0      0.0      0.0      1.0      1.0      1.0      1.0

*SET_SEGMENT_TITLE
is parcası
$#      sid      da1      da2      da3      da4      solver
      3      0.0      0.0      0.0      0.0MECH
$#      n1      n2      n3      n4      a1      a2      a3      a4
      19091      13690      13638      19090      0.0      0.0      0.0      0.0

*END

```

ÖZGEÇMİŞ

ÇAĞATAY ÇETİNKAYA

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2022-2023	Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Antalya
Lisans	Çukurova Üniversitesi
2006-2011	Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana
Lise	Metin Nuran Çakallıklı Anadolu Lisesi Fen-Matematik Bölümü
2002-2006	

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Lider Mühendis	Arçelik A.Ş.
2022-	Yapısal Tasarım Lider Mühendis
Kıdemli Uzman Mühendis	Arçelik A.Ş.
2021-2022	Yapısal Tasarım Uzman Mühendis
Mühendis	Kristal Endüstriyel
2013-2021	AR-GE-Makine Tasarım Mühendisi
Mühendis	Sm Krom Yat ve Gemi Ekipmanları Tasarım
2012-2013	AR-GE-Makine Ekipman Tasarım Mühendisi