



**T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**PASLANMAZ ÇELİK SAC PARÇALARIN DERİN ÇEKME
PROSESİNİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ VE
OPTİMİZASYONU**

MUSTAFA AY

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Temmuz 2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa AY tarafından hazırlanan “Paslanmaz Çelik Sac Parçaların Derin Çekme Prosesinin Bilgisayar Destekli Analizi ve Optimizasyonu” adlı tez çalışması 25/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr Üyesi Muhammed Arif ŞEN
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Danışman

Prof. Dr. Mete KALYONCU
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Üye

Dr. Öğr Üyesi Haşmet Çağrı SEZGEN
Necmettin Erbakan Üniversitesi

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Mustafa AY

Tarih:

YÜKSEK LİSANS

PASLANMAZ ÇELİK SAC PARÇALARIN DERİN ÇEKME PROSESİNİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Mustafa AY

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Prof. Dr. Mete KALYONCU

2024, 86 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Mete KALYONCU
Dr. Öğr Üyesi Muhammed Arif ŞEN
Dr. Öğr Üyesi Haşmet Çağrı SEZGEN**

ÖZET

Bu tez çalışmasında, sac metal şekillendirme proseslerinden derin çekme araştırılmış. Derin çekme işlemine etki eden kalıp tasarım parametrelerinden dişi kalıp yarıçapı, zımba yarıçapı, kalıp boşluğu, kalıp derinliği, zımba çapı, pod çapı parametrelerinin farklı seviyelerde katı modelleri oluşturulup, bir mühendislik yazılımı ile analiz edilmiştir. Malzeme olarak AISI 304 seçilmiştir. Bilgisayar ortamında, daha kalıp üretimine başlamadan, bu analizler yapıp istenilen ölçülere en yakın kalıp modellemesini bulabilmek için çıkan sonuçları Taguchi analizi ile bütünleştirilerek optimum parametreler bulunmuştur. İş parçası modeline göre bulunan parametreler dişi kalıp yarıçapı 15 mm , zımba yarıçapı 6 mm , kalıp boşluğu 2.7 mm, derin çekme derinliği 60 mm , zımba çapı 70 mm , pod çapı 145 mm olarak bulunmuştur. Bulunan optimum değerlere göre ANOVA’da Varyans analizi uygulanarak %86.06 doğruluk oranı bulunmuştur. S/N değerlerine göre hesaplanan Varyans analizinde en etkin parametre olarak %38.66 zımba çapı, %29.32 kalıp derinliği, %13.21 zımba yarıçapı, %5.25 pod çapı, %2.56 dişi kalıp yarıçapı, %2.24 kalıp boşluğu olarak bulunmuştur. Sonuç olarak yapılan analizlerde dişi ve zımba yarıçapları büyüdüğünde derin çekme işlemi hata oranı azalmıştır. Kalıp boşluğu ve pod çapı iş parçasına göre verilmez ise; derin çekme işleminde yırtılma, çizilme, kulaklanma gibi problemlerin olabileceği ve kalıp derinliği ve zımba çapının birbirine bağlı olduğu anlatılmıştır.

Anahtar kelimeler: Bilgisayar Destekli Analiz Derin Çekme Prosesi, Optimizasyon, Paslanmaz Çelik, Taguchi Metodu, Varyans Analizi

MS/PhD THESIS

**COMPUTER AIDED ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF DEEP DRAWING
PROCESS OF STAINLESS STEEL SHEET PARTS**

Mustafa AY

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Prof. Dr. Mete KALYONCU

2024, 86 Pages

Jury

**Prof. Dr. Mete KALYONCU
Dr. Öğr Üyesi Muhammed Arif ŞEN
Dr. Öğr Üyesi Haşmet Çağrı SEZGEN**

ABSTRACT

In this thesis study, deep drawing, one of the sheet metal forming processes, was investigated. Solid models of the die design parameters affecting the deep drawing process, such as female die radius, punch radius, die gap, die depth, punch diameter and pod diameter, were created at different levels and analyzed with an engineering software. AISI 304 was chosen as the material. These analyzes were carried out in the computer environment before the mold production started, and the optimum parameters were found by integrating the results with Taguchi analysis in order to find the mold modeling closest to the desired dimensions. The parameters found according to the workpiece model were found to be female die radius 15 mm, punch radius 6 mm, die gap 2.7 mm, skin drawing depth 60 mm, punch diameter 70 mm, pod diameter 145 mm. According to the optimum values found, an accuracy rate of 86.06% was found by applying variance analysis in ANOVA. In the variance analysis calculated according to S/N values, the most effective parameters were found to be 38.66% punch diameter, 29.32% die depth, 13.21% punch radius, 5.25% pod diameter, 2.56% female die radius, 2.24% die cavity. As a result, the analysis showed that when the tooth and punch radii increased, the error rate in the deep drawing process decreased. If the mold cavity and pod diameter are not given according to the workpiece; It has been explained that problems such as tearing, scratching and earing may occur in the deep drawing process and that the die depth and punch diameter are interconnected.

Keywords: Computer Aided Analysis Deep Drawing Process, , Optimization, Stainless Steel, Taguchi Method, Analysis of Variance

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında ve yürütülmesinde bana rehberlik eden, bilgi ve tecrübelerinden fazlasıyla faydalandığım, yönlendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışman hocam Prof. Dr. Mete KALYONCU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmalarımın her aşamasında maddi ve manevi destekleriyle bana güç veren aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında benden desteği esirgemeyen, maddi ve manevi her şekilde yanımda olan sevgili abim Muzaffer ELMALI' ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımda bana bu imkanları tanıyan Yıldız Pul Otomotiv Motor Parçaları Sanayi A.Ş. yönetici ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Mustafa AY
KONYA-25/07/2024

İÇİNDEKİLER TABLOSU

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Derin Çekme.....	1
1.2. Çekmeyi Etkileyen Unsurlar	4
1.3. Çekme Prosesinde Yaşanan Problemler.....	10
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI	14
3.MATARYEL ve METOT	22
3.1 Deneysel Tasarım Yöntemleri	22
3.1.1 Tam Faktöriyel	23
3.1.2 Kesirli Faktöriyel.....	23
3.2 Taguchi Metodu	24
3.3 Ortogonal Düzen	25
3.4 Varyans Analizi	25
3.5. Sinyal/Gürültü Oranı	27
3.6. Solidworks.....	28
3.7 Autoform	29
3.8 Mesh.....	30
3.9 Yağlayıcılar	30
3.10 Kararsızlık, Non- Lineer Analizi.....	31
4. DENEYSEL TASARIM VE ANALİZ ÇALIŞMALARI.....	33
5.SAYISAL BULGULAR	61
6. SONUÇ	69
7.KAYNAKLAR.....	71

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Db	Sac açınım ölçüsü
B	Sınır çekme oranı
Fs	Zımba kuvveti
Rp	Zımba köşe yarı çapı
Fb	Baskı kuvveti
C	Çekme boşluğu
Rd	Kalıp köşe yarı çapı
R	Plastik anizotropi
n	Gerinim sertleştirme katsayısı
Ts	Çekme mukavemeti
μ	Sürtünme katsayısı
t	Sac metal kalınlığı
σ_{ak}	Akma dayanımı
h	Yükseklik
d	Çap ölçüsü

Kısaltmalar	Açıklama
FLD	Şekillendirme Sınır Diyagramı
Mn	Mangan
P	Fosfor
S	Kükürt
C	Karbon
Si	Silisyum
Cr	Krom
Ni	Nikel
Dr	Doktor
Vb	Ve benzeri
Ld	Ortogonal düzen
S/N	Sinyal /Gürültü oranı
MPa	Megapaskal
Mm	Milimetre
J	İş
M	Marullanma
Ç	Çizilme
K	Kulaklanma

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Derin çekme prosesi (Erbaş 2014)	2
Şekil 1.2. Derin çekme işlem adımları. 1) İş parçasının kalıba yerleştirilmesi. 2) Baskı plakası ile sıkıştırma işlemi. 3) Zimba iş parçası ile teması. 4) Derin çekme işlemi gerçekleşmesi.	2
Şekil 1.3 Derin çekme işleminde deformasyon yönleri	3
Şekil 1.4. Farklı modların gerinim dağılımını göstermektedir	4
Şekil 1.5. Alan Metodu ile çap hesaplanması. (Gürün, 2008)	6
Şekil 1.6. Uzunluk ve ağırlık merkezi metodu ile çapın hesaplanması (Gürün, 2008).....	6
Şekil 1.7. Zimba ucu kavisi ve dişi kalıp kavisi (Gürün, 2008).....	8
Şekil 1.8. Derin çekme kalıp yapısı	8
Şekil 1.9. Derin çekme işleminde karşılaşılan problemler. Arslan, 2021	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 3.1. Genel Süreç Modeli. (Kap,2022)	22
Şekil 3.2. Solidworks kullanılarak yapılan kalıp modellemesi	29
Şekil 3.3 a-b) Mesh yapısı görseli	30
Şekil 4.1. Deney numunesi	33
Şekil 4.2. Deney numunesi a) 1.Derin çekme operasyonu b) 2.Derin çekme operasyonu c) Küçük delik delme ve iç çap derin çekme d)Tüm delik delme işlemi	34
Şekil 4.3. Deney numunesi teknik resmi.....	34
Şekil 4.4 Zimba yarıçapları a) 6 mm b) 16 mm c) 20 mm	36
Şekil 4.5 Dişi kalıp yarıçapları a) 2 mm b) 10 mm c) 15 mm	37
Şekil 4.6 Kalıp boşluğu, dişi kalıp ve zimba yarıçaplarına ait görsel	37
Şekil 4.7 Zimba çapı, kalıp derinliği ve pod çapına ait görsel	38
Şekil 4.8. Kalıp modeli	39
Şekil 4.9. 1.4301 (AISI 304) Autoform simülasyon parametreleri a) Sertleşme eğrisi b) Verim Yüzeyi c) Limit eğrisi	41
Şekil 4.10 Derin çekme analizinde a) Başlangıç b) İlerleme c) Yırtılma başlangıç d) Yırtılma anı	42
Şekil 4.11 Derin çekme analizinde a) Başlangıç b) İlerleme c) Yırtılma başlangıç d) Yırtılma anı	43
Şekil 4.12. İş parçası kalınlık kontrol bölgesi	44
Şekil 4.13 1 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	45
Şekil 4.14 2 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	46
Şekil 4.15 3 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	46
Şekil 4.16 4 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	47
Şekil 4.17. 5 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	47
Şekil 4.18. 6 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	48
Şekil 4.19. 7 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	49
Şekil 4.20. 8 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	49
Şekil.4.21 9 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	50
Şekil.4.22 10 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	50
Şekil.4.23 11 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	51
Şekil.4.24 12 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	52
Şekil.4.25 13 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	52
Şekil.4.26 14 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	53
Şekil.4.27 15 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	53
Şekil.4.28 16 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	54
Şekil.4.29 17 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	54
Şekil.4.30 18 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	55

Şekil.4.31 19 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	55
Şekil.4.32 20 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	56
Şekil.4.33 21 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	56
Şekil.4.34 22 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	57
Şekil.4.35 23 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	57
Şekil.4.36 24 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	58
Şekil.4.37 25 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	58
Şekil.4.38 26 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	59
Şekil.4.39 27 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı.....	59
Şekil 5.1 Minitap optimum parametre seçim grafiği	65
Şekil 5.2 a) Bulunan değerlere göre yapılan analiz	66
Şekil 5.2 b) Bulunan değerlere göre yapılan analizin FLD diyagramı	66



TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1 Yağlayıcı bilgileri.....	31
Tablo 4.1. AISI 304 Kimyasal bileşimi	35
Tablo 4.2. AISI 304 Mekanik özellikleri.....	35
Tablo 4.3. AISI 304 Fiziksel özellikleri	35
Tablo 4.4. Belirlenen parametreler ve seviyeleri.....	36
Tablo 4.5. Parametrelerin L27 ortogonal düzene yerleşimi	38
Tablo 4.7 Autoform programı sertleşme eğrisi bilgileri.....	41
Tablo 4.8 Autoform programı verim yüzeyi bilgileri	41
Tablo 4.9 Autoform programı limit eğrisi	41
Tablo 4.10 Analizlerdeki renklerin açıklamaları	43
Tablo 4.11 1 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	45
Tablo 4.12 2 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	46
Tablo 4.13 3 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	46
Tablo 4.14 4 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	47
Tablo 4.15 5 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	48
Tablo 4.16 6 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	48
Tablo 4.17 7 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	49
Tablo 4.18 8 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	49
Tablo 4.19 9 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	50
Tablo 4.20 10 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	50
Tablo 4.21 11 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	51
Tablo 4.22 12 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	52
Tablo 4.23 13 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	52
Tablo 4.24 14 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	53
Tablo 4.25 15 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	53
Tablo 4.26 16 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	54
Tablo 4.27 17 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	55
Tablo 4.28 18 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	55
Tablo 4.29 19 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	56
Tablo 4.30 20 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	56
Tablo 4.31 21 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	57
Tablo 4.32 22 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	57
Tablo 4.33 23 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	58
Tablo 4.34 24 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	58
Tablo 4.35 25 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	59
Tablo 4.36 26 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	59
Tablo 4.37 27 nolu analize ait oluşan max kuvvetler	60
Tablo 5.1 a) Deneysel tasarımlar.....	61
Tablo 5.1 b) Analiz çıktı sonuçları	62
Tablo 5.2 Amaç fonksiyon değerleri	63
Tablo 5.3 Hata olmayan parametreler girdiler.....	64
Tablo 5.4 Hata olmayan parametreler çıktılar	64
Tablo 5.5 Amaç fonksiyon sonuçları.....	64
Tablo 5.6 Bulunan değerlere göre oluşan kuvvetler.....	66
Tablo 5.7 a) S/N değerlerine göre uygulanan amaç fonksiyon girdi parametreleri	67
Tablo 5.7 b) S/N değerlerine göre uygulanan amaç fonksiyon çıktıları sonuçları	67
Tablo 5.8 S/N değerlerine göre uygulanan 5.2 denklem amaç fonksiyon çıktıları	67

Tablo 5.9 Anova doğruluk oranı.....	67
Tablo 5.10 Varyans Analiz katkı oranları	67
Tablo 5.11 S/N değerlerine göre oluşturulna Varyans Analizi	68



1. GİRİŞ

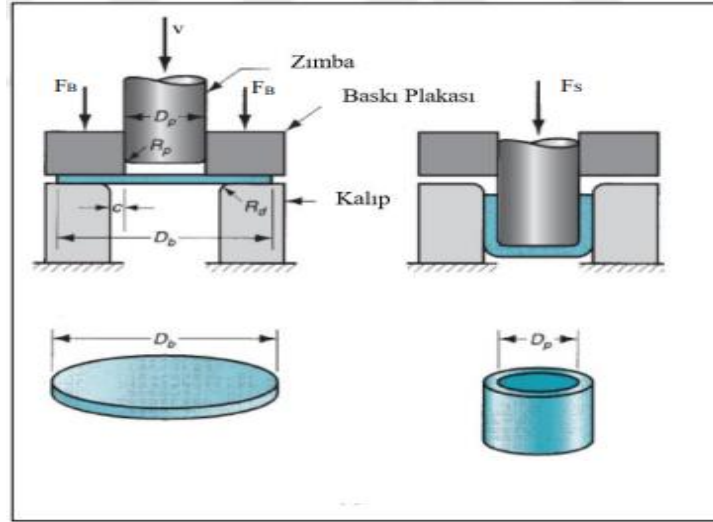
Sac metal şekillendirme, son zamanlarda dünya çapında otomotiv, ambalaj ve havacılık endüstrilerinde artan bir ilgi kazanmıştır. Sac metallerin plastik şekillendirilmesi, belirli malzemelerin birçok farklı parametre etkisi altında istenilen uygun şekillere getirilmesidir. Derin çekme işlemi soğuk şekillendirme yöntemlerinden en sık kullanılanıdır.

Günümüz rekabetçi ortamda parça kalitesi ve üretim metotları değişikçe beklenti artmaktadır. Bu yüzden üretilen parçaların kalitesini arttırmak ve aynı zamanda maliyetinin azaltılması yönünde çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalara örnek gösterecek olursak, üretim aşamasında olan bir parçada çıkabilecek problemlerde geri dönüş çok zor ve maliyetlidir. Bu yüzden hataları önceden tahmin etmek için analiz edilip giderilmesi istenir.

Sac metal şekillendirme proseslerinde oluşabilecek hataları tasarım esnasında bulunup düzeltilmesi gerekmektedir. Günümüzde bilgisayar destekli mühendislik çalışmaları ile bu problemler en aza indirgenmiştir. Derin çekme prosesinde parametrelerin doğru seçilmesi en büyük etkenlerdendir. Bu aşamada proses parametrelerinin optimizasyon analizleri büyük yere sahiptir. Maliyeti düşürmek, zamandan kazanmak, iş gücünü düşürmek için atılan önemli bir adımdır. Bu çalışmada kalıp tasarım parametrelerinden zımba yarıçapı, kalıp yarıçapı, kalıp derinliği, zımba çapı, pod çapı, kalıp boşluğu parametrelerinin farklı seviyelerdeki ölçülerini Taguchi metodu kullanılarak derin çekme prosesinin optimum değerleri belirlenmiştir.

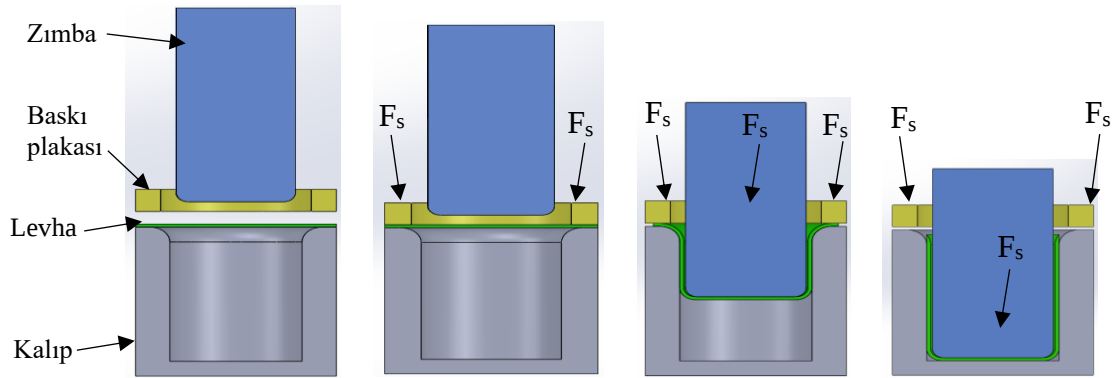
1.1. Derin Çekme

Teknolojinin insan yaşamının modern ve gelişmiş olanaklarının ana kaynağı olduğu ve dolayısıyla mevcut imalat endüstrilerinde ilerici gelişimin yaygın olarak fark edildiği bilinen bir gerçektir. Teknolojik gelişmeleri karşılamak ve rekabet ortamında ayakta kalabilmek için, imalat şirketleri, ürünlerin kalitesini ve üretim oranlarını düşük maliyetlerle iyileştirmek için yeni teknikler geliştiriyor. Derin çekme işlemi, DIN 8584 standardına göre, düz bir levhanın çekme-basma kuvveti altında bir tarafı açık içi boş bir gövde halinde şekillendirilmesi veya önceden çekilmiş bir kabın kasıtlı olarak herhangi bir müdahale olmaksızın daha küçük kesitli başka bir kaba dönüştürülmesidir. Çekme işleminde kullanılan bileşenler zımba, kalıp ve baskı plakası olarak Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Derin çekme prosesi (Erbaş 2014)

Derin çekme işleminde bir sürecin uygun bir simülasyon modelinin oluşturulması, çalışma parametrelerinin etkisinin tahmin edilmesinde ön bilgi sağlar. Derin çekme işleminde, boş olarak bilinen iki boyutlu bir düzlem levha, üç boyutlu bir bileşene dönüşür. İşlenmemiş malzemenin akışını düzenlemek için flanş bölgesini işlenmemiş parça tutucu ile kalıp omuzu arasında tutarken, işlenmemiş malzemenin bir zimba ile yavaş yavaş kalıp boşluğuna zorlanmasını içerir. Çekme operasyonun adımları Şekil 1.2’de adım adım verilmiştir.



Şekil 1.2. Derin çekme işlem adımları. 1) İş parçasının kalıba yerleştirilmesi. 2) Baskı plakası ile sıkıştırma işlemi. 3) Zimba iş parçası ile teması. 4) Derin çekme işlemi gerçekleşmesi.

Sac Metal Deformasyon Olgusu

Şekillendirme Süreçleri

George ve arkadaşları çalışmalarında derin çekmedeki tüm elemanları, σ_1 ve σ_2 membran gerilmeleri altında deforme olduğunu ve σ_3 gerilmesinin oldukça küçüldüğünü söylemişler. Aynı zamanda gerçek gerinimlerin toplamı sıfır olduğunu bulmuşlar.

Yani,

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (1.1)$$

Efektif gerilme Denklem 1.2’de verilmiştir.

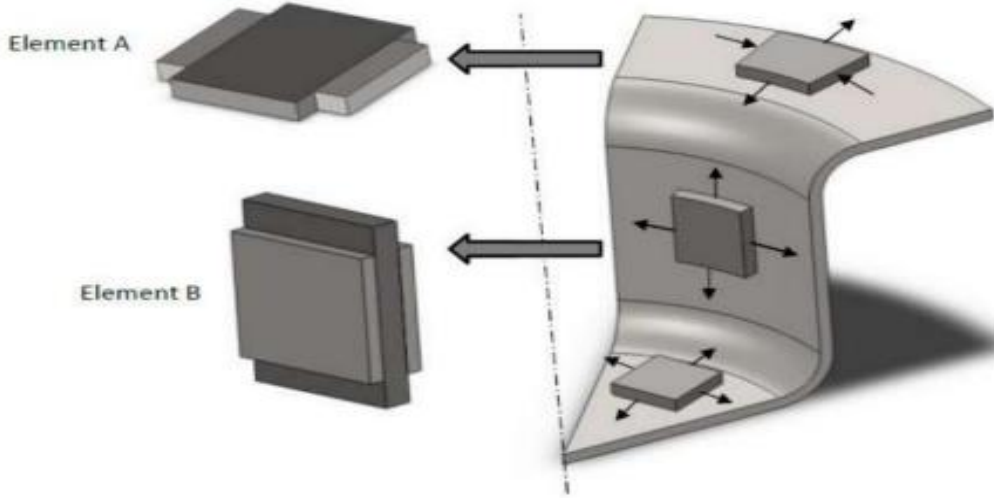
$$\sigma^- = \sqrt{(1-\alpha + \alpha^2)} \sigma_1 \quad (1.2)$$

Burada, σ^- efektif gerilme ve α gerilme oranıdır σ_1/σ_2 .

Etkili gerinim 1.3 denklemi kullanılarak bulunur.

$$\varepsilon^- = \sqrt{\frac{4}{3}} (1 + \beta + \beta^2) \varepsilon_1 \quad (1.3)$$

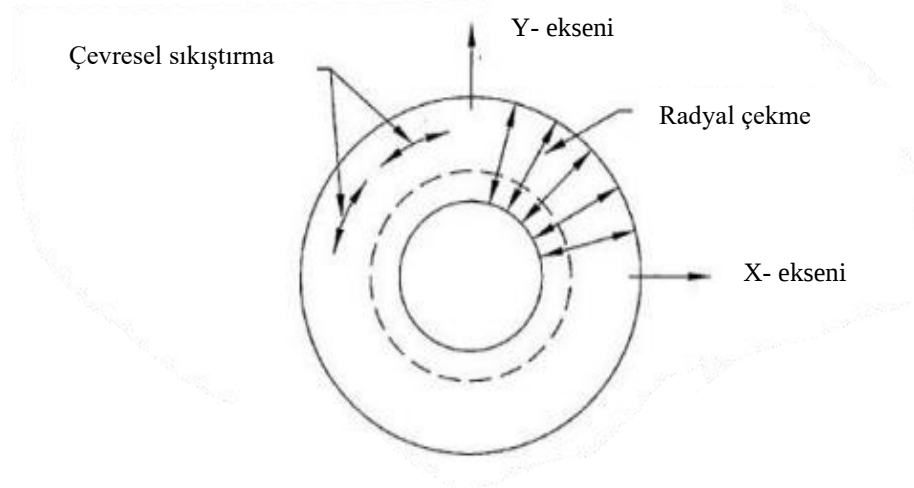
Burada, ε^- etkin gerinim ve β gerinim oranıdır. $\varepsilon_1/\varepsilon_2$



Şekil 1.3 Derin çekme işleminde deformasyon yönleri

Derin çekme sırasındaki gerinim oluşum durumu, Şekil 1.3’de gösterilen duvarın farklı kısımlarındaki elemanlar dikkate alınarak açıkça anlaşılmaktadır.

Farklı deformasyon alanlarındaki gerinim değerleri Şekil 1.4’te gösterildiği gibi ızgara işaretleri aracılığıyla belirlenecektir. Geleneksel olarak, büyük asal yön, en büyük ana gerilme yönüdür. Küçük asal yön, büyük asal yöne dik olarak kabul edilir. Farklı modların dağılımı Şekil 1.4’te verilmiştir.



Şekil 1.4. Farklı modların gerinim dağılımını göstermektedir. (Yılmaz, 2015)

1.2. Derin Çekmeyi Etkileyen Unsurlar

Derin çekme işlemine etki eden parametreleri üç başlık altında toplayabiliriz. Bu parametreler kendi içinde doğrudan ilişkilidir.

1. Malzeme etkisi
2. Kalıp şekil etkisi
3. İşlem koşullarının etkisi

Malzeme Etkisi

Derin çekmede malzeme etkisi 3 maddeyi kapsar. Bunlar;

- Malzeme Kalınlığı
- Anizotropi
- Sertleşme Üssü ve Deformasyon Hız Duyarlılığı Üssü

Derin çekme işleminde sac kalınlığı malzemenin şekillendirilebilirliği ile yakından ilişkilidir. Malzeme kalınlığı arttıkça oluşan deformasyon miktarı artar. İnce malzemelerin derin çekilebilme kabiliyeti daha iyidir.

Anizotropi derin çekilebilirlik ölçütü olarak yüksek etkiye sahiptir. Anizotropi parametresi dikey olarak hesaplandığında ortalama değeri 1 ve 1'den büyük olması istenmektedir. Anizotropiye bakıldığında malzemenin kalınlık yönündeki geriniminin, genişlik yönündeki

gerinimine göre daha dirençli olması istenir. Böylece malzeme cidarı fazla düşmeden, şekil değişimi büyük ölçüde sac yüzeyinde oluşacak ve istenilen forma getirilecektir. (Kap, 2022)

Sertleşme üssü değeri ve deformasyon hız hassasiyet üssü değerinin yüksek olması çekmeyi iyi yönde etkilemektedir fakat etki oranının az olduğu düşünülmektedir. (Kap, 2022)

Kalıp Şekil Etkisi

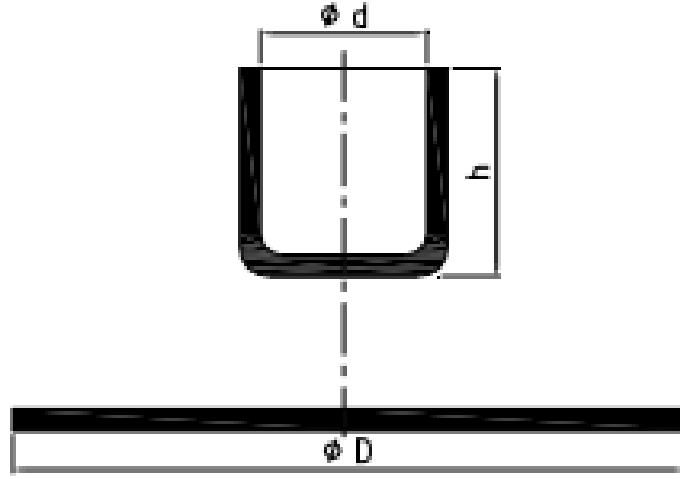
Derin çekme işlemine en çok etki eden parametrelerden biride kalıp geometrileridir. Kalıp geometrileri istenilen şekle doğrudan etki eder. Kalıp geometri parametreleri aşağıdaki gibidir;

- Zımba Çapı
- Zımba Köşe Yarıçapı
- Sac Kalınlığı
- Sac Metal Çapı
- Kalıp Çapı
- Kalıp Köşe Yarıçapı
- Derin Çekme Boşluğu
- Tutucu ve Sac Parça Boşluğu
- Eğme Açısı
- Kalıp Derinliği
- Kalıp Yüzey Pürüzlülüğü

Verilmiş olan parametrelerden zımba çapı, zımba köşe yarıçapı, kalıp köşe yarıçapı, derin çekme boşluğu, sac metal çapı ve kalıp derinliği parametreleri değiştirilip diğer parametreler sabit kabul edilmiştir. Başlangıç sacının çapını alan metodu veya uzunluk ve ağırlık merkezi metodu ile bulunabilir.

Alan Metodu

Parçanın derin çekme işleminde başlangıç kesit alanı, form verilmiş kesit alanına eşit kabul etmiştir. Şekil 1.5'te alan metodu görseli verilmiştir. (Kap, 2022)



Şekil 1.5. Alan Metodu ile çap hesaplanması. (Gürün, 2008)

$$\text{Çekilecek olan parçanın alanı} = \frac{\pi D^2}{4}, \text{ mm}^2 \quad (1.4)$$

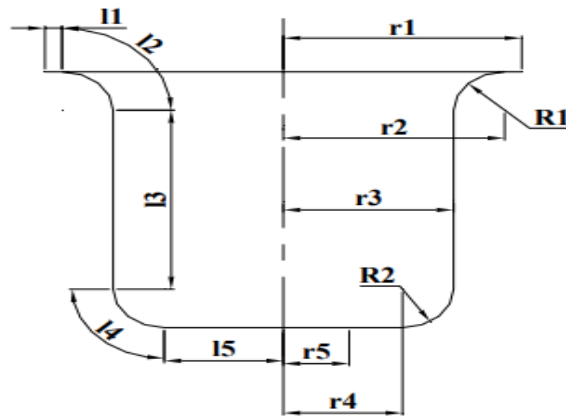
$$\text{Çekilen kap alanı} = \frac{\pi d^2}{4} + \pi d h, \text{ mm}^2 \quad (1.5)$$

Buradan;

$$D = \sqrt{d^2 + 4d(h - 0.43r)}, \text{ mm olarak bulunur.} \quad (1.6)$$

Uzunluk ve Ağırlık Merkezi Metodu

Bu metot ile çap hesabının yapılabilmesi için, çekme işlemi yapılan parçanın simetrik kesiti alınır ve çekme etkisine maruz kalan kenarların uzunluklarının her biri hesaplanır. Hesaplanan uzunluklar ve ağırlık merkezlerinin parça eksenine olan mesafeleri çarpımının toplamı, form verilecek olan parça alanına eşitlenir. Uzunluk ve ağırlık merkezine ait görsel Şekil 1.6’da verilmiştir. (Koçer, 2014)



Şekil 1.6. Uzunluk ve ağırlık merkezi metodu ile çapın hesaplanması (Gürün, 2008)

$$\text{Çekilecek olan parçanın alanı} = \frac{\pi D^2}{4}, \text{mm}^2 \quad (1.7)$$

$$\text{Çekilen kap alanı} = 2 \pi r_1 l_1 + 2 \pi r_2 l_2 + 2 \pi r_3 l_3 + 2 \pi r_4 l_4 + 2 \pi r_5 l_5 \text{ mm}^2 \quad (1.8)$$

Buradan;

$$D = \sqrt{8(r_1 l_1 + r_2 l_2 + r_3 l_3 + r_4 l_4 + r_5 l_5)} \text{ mm} , \text{ olarak bulunur.} \quad (1.9)$$

Çekme Kuvveti

Çekme kuvveti, çekilecek olan parçanın çaplarına, sac malzeme cidarına ve malzeme türüne göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca baskı plakası basıncı, zımba hızı, kalıp ve zımba yarıçapı, çekme boşluğu ve yağlayıcı gibi parametreler etkilemektedir. Derin çekme prosesinin yapılabilmesi için gerekli olan zımba kuvvet hesabı;

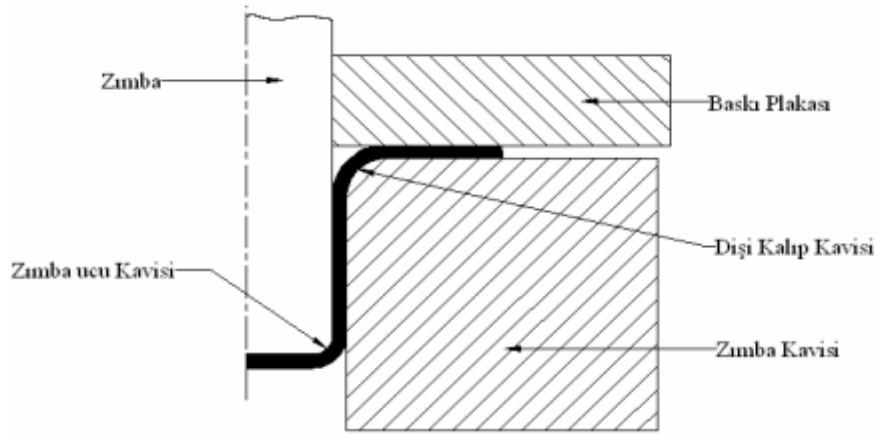
$$F_s = \pi D \sigma_{\text{ç}} \left(\frac{D}{d} - 0.7 \right) \quad (1.10)$$

Şeklinde formüle edilir.

$\sigma_{\text{ç}}$: Çekme dayanımı. 0,7 : sürtünmeyi dikkate alan düzeltme faktörüdür.

Çekme Kavisleri

Çekme işleminde saca ilk temas eden bölgeler zımba ve kalıp kavisleri olduğu için sac malzemenin kalıp içerisindeki akışını kolaylaştırmak için kavislerin büyük olması istenir. Ama gereğinden büyük yapılırsa parça üzerindeki istenilen temas sağlanamazsa çekim esnasında hatlar meydana gelebilir. Gereğinden fazla küçük yapılırsa parça derin çekme işlemi yapılırken yırtılma problemi ile karşılaşılabilir. Şekil 1.7’de görseli verilmiştir.



Şekil 1.7. Zımba ucu kavisi ve dişi kalıp kavisi (Gürün, 2008)

$$R_{kalıp} = 0.9\sqrt{(D - d) t} \quad (1.11)$$

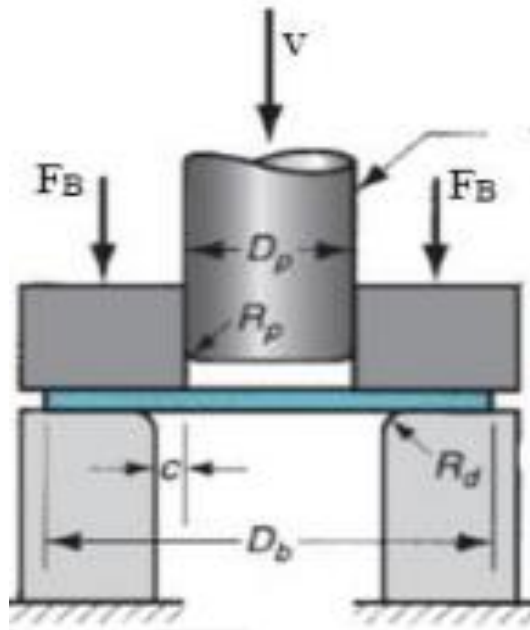
Çelikler için şeklinde hesaplanır.

Zımba yarıçapı hesabı;

$$R_{parça} = (3 - 10) t \quad (1.12)$$

Olarak hesaplanabilir.

Derin çekme kalıp yapısına ait görsel Şekil 1.8’de verilmiştir.



Şekil 1.8. Derin çekme kalıp yapısı

Çekme Boşluğu

Çekme işlemi yapılırken, zımba ile dişi kalıp arasında kalan aralığa “çekme boşluğu” denilmektedir. Çekme boşluğunu belirlerken çekilecek sac parçanın kalınlığına göre verilmektedir. Çekme boşluğu düşük olursa cidar inceltme işlemine dönüşür ve parça sıkıştığı için yırtılmaya zorlanır. Çekme boşluğu fazla olursa kırışıklıklar olur ve parça istenilen ölçüde çıkmaz.

Malzeme cinslerine göre bırakılması gereken çekme boşluğu hesapları aşağıda verilmiştir.

$$\text{Çelik için} \quad c = t + 0.07\sqrt{10} t \quad (1.13)$$

$$\text{Alüminyum için} \quad c = t + 0.02\sqrt{10} t \quad (1.14)$$

$$\text{Erime sıcaklığı yüksek alaşımlar için} \quad c = t + 0.20\sqrt{10} t \quad (1.15)$$

$$\text{Demir içermeyen metaller için} \quad c = t + 0.04\sqrt{10} t \quad (1.16)$$

Baskı Kuvveti

Derin çekme işleminde baskı kuvvet hesabı iyi yapılmalıdır. Parça şekillendirme işleminde baskı kuvveti fazla olursa parçanın yırtılma riski, kuvvet az olursa parçada kırışıklık oluşma durumları olabilir.

Baskı kuvvet hesabı;

$$F_B = 0.015 \cdot \sigma_{ak} \frac{\pi}{4} [D^2 - (d + 2.2t + 2R_{parça})^2] \quad (1.17)$$

Şeklinde hesaplanır.

Yağlayıcı Etkisi

Derin çekme işleminde yağlayıcı amacı kalıp ile parça arasındaki sürtünmeyi azaltmaktır. Böylelikle parçanın şekillendirmeye karşı göstermiş olduğu direnç azaltılmış olur. Aynı zamanda kullanılmış olan iyi bir yağlayıcı kalıp ömrünü uzatmaya yardımcı olur. Yağlama işlemi parçanın kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırır.

Çekme Derinliği

Çekme işleminde malzeme derinlik hesabı iyi hesaplanması gerekmektedir. Derin çekme işlemi yapmadan önceki çapına bağlı olarak, çekme işlemi kademelerinin yüksekliği aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$h = \frac{D^2 - d^2}{4d} , mm \quad (1.18)$$

$$h_n = \frac{d_{(n-1)}^2 - d_n^2}{4d_n} , mm \quad (1.19)$$

Burada;

h: Derin çekme yüksekliği, mm

h_n : n defa çekilen parça yüksekliği, mm'dir.

1.3. Derin Çekme Prosesinde Yaşanan Problemler

Sac malzemelerin şekillendirme işleminde sık karşılaşılan sorunlar; çatlama, buruşma, yırtılma, kulaklanma, çizilme, çentiklenme, yanma gibi problemlerdir. Bu problemlerin oluşmasında kalıp tasarımının büyük önemi vardır. Dış etkenler olarak malzeme seçimi ve yağlayıcı etkisi söylenebilir. Şekil 1.10'da çekme prosesinde yaşanan problemlere ait görsel verilmiştir.

Buruşma

Buruşma, yetersiz tutucu kuvveti nedeniyle çekme işleminde önemli bir başarısızlıktır. Sıkıştırılabilir gerilmelere maruz kalan tabakanın desteklenmeyen bölgesi, kırıksıklıkların oluşmasının nedenidir. Aşırı basma gerilmeleri altında lokal burkulmaya bağlı olarak çekilen kabın flanş veya yan duvar bölgesinde kırıksıklık gelişir. Buruşmaya neden olan etkenler arasında kalıp tasarımı, malzeme kalitesi ve elastikiyeti, yağlama gibi faktörlerden etkilenmektedir.

Kulaklanma

Derin çekilmiş kabın yan duvarı, kulak oluşumuna yol açacak şekilde eşit olmayan bir yüksekliğe sahiptir. Kulaklanma, çekilmiş bardağın dairesel kenarındaki dalgalanmadır. Derin

çekme duvarındaki kulaklar dört, altı, sekiz gibi çift sayılardadır. Kulaklanma genellikle köşelerde veya levhaların malzeme birikimi veya yoğun deformasyon şeklinde ortaya çıkar. Kulaklanmanın başlıca nedenleri olarak stres yoğunlaşması, malzeme akışı ve deformasyon kontrolü, formasyon çalışması, sürtünme ve yüzey koşullarından etkilenir.

- **Stres yoğunlaşması:** Malzeme kalıp içinde şekil alırken köşe veya kenar bölgelerinde stress yoğunlaşması meydana gelebilir. Malzemenin bu bölgelerindeki gerilme seviyelerinin diğer bölgelere göre daha yüksek olmasına neden olur.
- **Malzeme akışı ve deformasyon kontrolü:** Derin çekme işlemi sırasında, malzeme levha içinde akarken, özellikle köşe veya kenarlarda akışın kontrolsüz olması veya duraklaması mümkündür. Bu durumda, malzeme bu bölgelerde birikerek kulaklanma oluşturabilir.
- **Formasyon çalışması:** Köşe veya kenar bölgelerinde formasyon çalışması, malzemenin burada birden fazla katmanda birikmesine veya büzülmesine neden olabilir.
- **Sürtünme ve yüzey koşulları:** Malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme katsayısı, işlem sırasında malzemenin akışını etkileyebilir. Yüksek sürtünme katsayısı veya yetersiz yağlama, malzemenin köşe veya kenarlarda istenmeyen bir şekilde birikmesine ve kulaklanma oluşumuna yol açabilir.

Yırtılma ve boyun verme

Hızlı bir şekilde yırtılmaya ve başarısızlığa yol açan herhangi bir lokal boyun görünümü, şekillendirme operasyonunu açıkça sonlandıracaktır. Bu, sürecin tamamını kapsamadan, yerel bir unsur dikkate alınarak analiz edilen yerel istikrarsızlık olarak değerlendirilmektedir. Yırtılma parçaların alt kısımlarında yüksek çekme gerilmesine maruz kalan kısımlarda gerçekleşir. Yırtılmaya baskı kuvvetinin çok olması, kalıp derinliğinin çok olması ve çekme boşluğunun az verilmesi gibi etkenler neden olur. Yapısal olarak incelendiğinde ise yırtılmanın nedenleri gerilme yoğunlaşması, plastik deformasyon ve yorgunluk, keskin köşeler veya zayıf bölgeler, malzeme seçimi ve özellikleri, sürtünme ve yağlama olarak tanımlanabilir.

- **Gerilme yoğunlaşması:** Malzeme kalıp içinde şekil alırken özellikle belirli bölgelerde gerilme yoğunlaşması oluşabilir. Bu yoğunlaşma, malzemenin bu bölgelerinde gerilme seviyelerinin diğer bölgelere göre daha yüksek olmasına neden olur.

- **Plastik deformasyon ve yorgunluk:** Malzeme, derin çekme işlemi sırasında plastik deformasyona uğrar. Bu deformasyon, malzemenin elastik sınırlarının ötesine geçmesine ve plastik akışa yol açar. Uzun süreli veya tekrarlayan yüksek gerilme altında malzeme yorgunluğa maruz kalabilir ve sonuç olarak yırtılabilir.
- **Keskin köşeler veya zayıf bölgeler:** Kalıp tasarımında keskin köşeler veya zayıf bölgeler, malzemenin stress yoğunlaşmasına ve bölgesel olarak yüksek gerilme birikimine neden olabilir. Bu bölgelerdeki gerilme yoğunlaşması, malzemenin kırılma veya çatlaması için zemin hazırlar.
- **Malzeme seçimi ve özellikleri:** Kullanılan malzemenin mukavemeti, sertlik derecesi ve plastik deformasyon özellikleri, derin çekme işlemi sırasında yırtılma direncini doğrudan etkiler. Düşük mukavemetli veya yeterince şekillendirilebilir olmayan malzemeler, yüksek gerilme altında yırtılmaya daha yatkın olabilir.
- **Sürtünme ve yağlama:** Malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme katsayısı, malzemenin akışını ve deformasyonunu etkiler. Yetersiz yağlama veya yüksek sürtünme, malzemenin kontrolsüz bir şekilde akmasına ve buna bağlı olarak yırtılma riskini artırabilir.

Yanma (Renk Değişimi)

İyi derecede parlaklık istenen proseslerde oluşan kusurlardandır. Bu gibi hataların oluşumunu engellemek için kalıp boşluğu tek taraflı artırılarak çözülebilir.

Çizilme ve Çentiklenme

Çekme işlemi esnasında sac plaka, kalıba temas eder. Sac yüzeyine etki eden sürtünme, zedelenmeye veya çentiklenmelere neden olabilmektedir. Başlıca nedenleri olarak sürtünme kuvvetleri, malzeme seçimi ve yüzey sertliği, kalıp tasarımları ve kenar geometrileri, yetersiz yağlama ve proses parametreleri olarak söylenebilir.

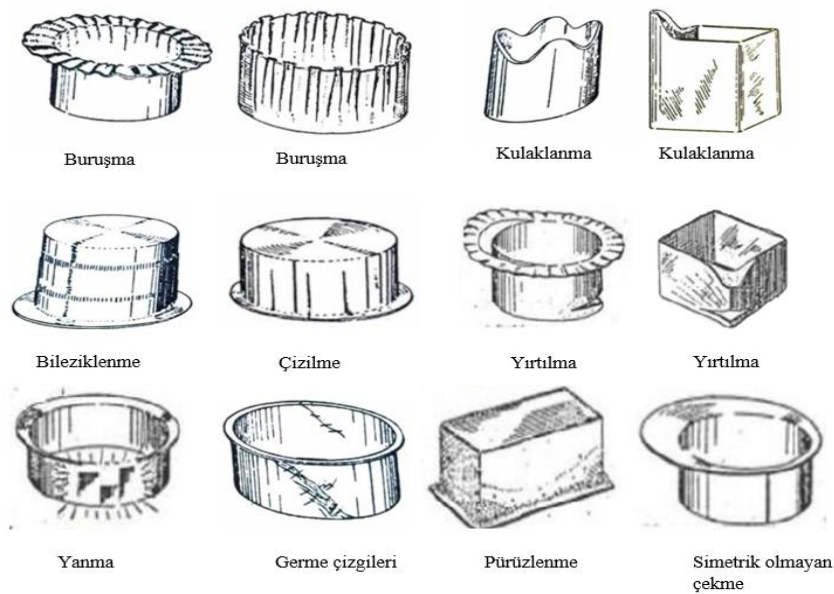
Marullanma

Derin çekme işlemi sırasında marul, genellikle malzemenin köşelerinde veya kenarlarında oluşan fazla malzeme birikimidir. Marullanma oluşumu malzeme akışı ve birikim, kalıp tasarımı, malzeme özellikleri, sürtünme ve yağlama gibi faktörlerden etkilenir.

- **Malzeme akışı ve birikim:** Malzeme kalıp içinde şekil almaya çalışırken köşe veya kenarlarda duraklama veya yavaşlama olabilir. Bu durumda, malzeme bu bölgelerde birikir ve fazladan malzeme birikimi oluşur. Bu fazla malzeme birikimi, köşelerde veya kenarlarda marul oluşumuna neden olabilir.
- **Kalıp tasarımı:** Yanlış tasarlanmış bir kalıp, malzemenin belirli bölgelerde istenmeyen şekilde birikmesine veya deformasyona neden olabilir. Özellikle köşelerde veya kenarlarda sert geçişler veya dar açılar, malzemenin akışını engelleyebilir ve marul oluşumuna zemin hazırlayabilir.
- **Malzeme özellikleri:** Malzemenin şekillendirme özellikleri (örneğin, sertlik, plastik deformasyon direnci) marul oluşumunu etkiler. Daha sert veya daha az şekillendirilebilir malzemeler, derin çekme işlemi sırasında köşelerde veya kenarlarda daha fazla birikime yol açabilir.
- **Sürtünme ve yağlama:** Kalıp ve malzeme arasındaki sürtünme katsayısı, malzemenin akışını ve deformasyonunu etkiler. Yetersiz yağlama veya yüksek sürtünme katsayısı, malzemenin kontrolsüz bir şekilde akmasına ve dolayısıyla köşelerde veya kenarlarda marul oluşumuna yol açabilir.

Geri esneme (Yaylanma)

Derin çekme işleminde sac malzeme üzerinde çekme kuvvetlerinden kaynaklı malzemenin eskiye dönmek istemesidir. Derin çekme işleminde karşılaşılan hatalar Şekil 1.9'da verilmiştir.



Şekil 1.9. Derin çekme işleminde karşılaşılan problemler. Arslan, 2021

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Soğuk metal şekillendirme yöntemleri endüstride çok fazla kullanılan bir yöntemdir. Bu durum soğuk şekillendirme yöntemlerini sürekli geliştirme ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Yapılan literatür taramasında çok fazla geliştirilebilir yön mevcuttur. Bu çalışmada soğuk metal şekillendirme işlemi olan derin çekme işleminde zamandan tasarruf etmek ve maliyeti minimuma indirebilmek için yapılan kalıp modellemelerine etki eden parametreler incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda kalıp tasarımına etki eden parametrelerin en optimum şekilde belirlenebilmesi için kullanılan yöntemler ve optimizasyonlar incelenmiştir. İncelenen literatür taramalarına ait bazı veriler burada verilmiştir.

Arslan V. (2021) Soğuk şekillendirme yöntemlerinden olan derin çekme işleminde, doğru parametrelerin seçiminin etkilerinden bahsetmiştir. Klasik yöntem olan deneme yanılma yöntemi yerine sonlu elemanlar yöntemini kullanarak proses parametrelerini incelemiştir. Sonlu elmanlar analizinde Eta-Dynaform yazılımı kullanarak 304 ve 430 paslanmaz çeliklerin plastisite modeli olarak günümüzde kullanmış olduğumuz malzeme modellerinden Hill-48 modelini kullanmıştır. Sonuçlarını karşılaştırma olarak çalışmasında vermiştir.

Tavşanlı E. (2022) Soğuk şekillendirme malzemesi olan 304 paslanmaz malzemelerde firmaların sürdürülebilirliğini sağlamak için kaliteli ürünler üreterek ve müşteri isteklerini karşılamaları gerektiğinden bahsedilmiştir. Kaliteli ürünler üretmekte ek maliyetler getirmektedir. Bu maliyeti azaltmak içinde Altı Sigma kültürü ile yapılabileceği hakkında çalışmalar yapmıştır. Altı Sigma kültürü; ölçme, analiz etme, iyileştirme ve kontrol safhaları olarak tanımlamıştır. Bu verileri analiz ederek, istatistiksel olarak değerlendirmiştir.

Kap E. (2022) Çalışmasında AA 6061 malzemesinin derin çekme prosesinde etki eden parametreleri sonlu elemanlar analizi ve Taguchi metodunu kullanarak incelemiştir. Simülasyonlarını, Autuform programı yardımıyla yapmıştır. AA 6061 malzemesine en çok etki eden parametrelere %34,43 ile baskı kuvveti, %31,21 olarak zımba yarıçapı, %27,67 kalıp çapının etkisi olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Meral ve ark. (2011) Delik delme işleminde kaplamalı ve kaplamasız kesici takımların, kesme özellikleriyle bağdaştırılarak performansını incelemişler. Taguchi metodu ve Minitap yazılımı yardımıyla optimum parametreleri belirleyerek çok fazla deney yapmaktan kurtulmuşlardır. Parametrelerin etkisini ise Varyans analizi (ANOVA) ile bulmuşlar. Doğrulama deneylerini yaparak sonuçları karşılaştırmışlar.

Özkan U. (2022) Kare geometriye sahip parçaların derin çekme işleminde, yüzeylerde yırtılma ve cidarlarda incelme olduğunu gözlemlemiştir. Derin çekme işleminde baskı plakası kuvveti, baskı plakası boşluğu, yağlama, çekme kuvveti, matris-baskı plakası açısı, çekme hızı, matris-zımba yarıçapı gibi soğuk şekillendirmeye etkileri olan parametreler kullanmıştır. Bu parametrelerin içerisinde matris-baskı plakası açısı 0° , 5° , 10° ve 15° olmak üzere 4 farklı açı değeri belirlemiştir. Matris-zımba yarıçapı 4 mm, 6 mm ve 8 mm olmak üzere 3 farklı yarıçap değeri ve baskı plakası kuvveti 5500 N, 7950 N, 10400 N olmak üzere 3 farklı değeri sonlu elemanlar metodu ile analiz etmiştir. Kare kesitli parçaların deneysel ve analizsel karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışmaları neticesinde matris-baskı plakası açısı için 15° , matris-zımba yarıçapı için 8 mm ve baskı plakası kuvveti için 10400 N olduğu bulunmuştur.

Güneşgörmez G. (2020) Sac metal şekillendirmede eskiden deneme yanılma ve deneyimli kişilerin bilgi birikimi sayesinde yapıldığını belirtmiş. Bu durum kalıplarda çok fazla oynama yapılmasına neden olmuştur. Zaman ve maliyet açısından yük getirdiğini söylemiş. Günümüzde ise bilgisayar ortamından daha önceden simülasyonu yapılarak kazanç sağladığını belirtmiştir. Çalışmasında sonlu elemanlar tabanlı Autoform programı Plus R7 ve CAD tasarımında Solidworks programını kullanmış. Simülasyon raporlarına bakarak, birçok kalıp tasarımında istenilen teknik özelliklerde parçalarda yırtılma, kırılma ve yüzey çizikleri olmaksızın parça alınmasını yardımcı olmuş.

Süzen M. (2019) Bu çalışmasında derin çekme işlemini etki eden parametrelerden olan malzeme çeşitleri üzerinde çalışmıştır. Şartların aynı olduğu DC03 ve DC05 sac malzemelerinin, Autoform programı üzerinde derin çekme analizi yaparak karşılaştırmıştır. Karşılaştırmanın sonucunda DC03 sac malzemesinin daha iyi soğuk şekillendirilebildiği sonucuna ulaşmıştır.

Edis R. (2022) Çalışmasında soğuk sac şekillendirme metodlarından derin çekme işlemine etki eden parametrelerden kalıp malzemesine uygulanan ısıtma işlemi ve yüzey kaplamalarını incelemiştir. 1.2379 soğuk iş takım çeliğine ısıtma işlemi ve yüzey işlemi çalışması yapmıştır. Yapılan işlemlerin aşınma ve sürtünme performansını değerlendirmiş. Verimli gördüğü işlemleri derin çekme kalıplarına uygulayarak deneysel olarak incelemiştir.

Gülbüz E. (2022) Endüstriyel bir uygulamada yağlayıcıların soğuk şekillendirme işlemine olan etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmasında hammaddesi 6224 olan sac

malzeme kullanmış. Malzeme 2.5mm kalınlığında olup, kuru, İpek naylon, Belgin yağı, Klüber yağı, Hint Yağı gibi farklı yağlayıcılar ve farklı yüksekliklerde derin çekme işlemini gerçekleştirmiş. Yapılan deneyler sonucunda yağlayıcıların birim şekil değişimine, homojen kalınlık dağılımına ve uzamalara etkisinin olduğunu gözlemlemiştir.

Çelik S. (2020) Çalışmasında sac metal malzemelere şekil verilmesi sonucunda geri yaylanma davranışlarını incelemiştir. Nihai parçayı elde etmek için sonlu elemanlar analizini kullanmış. CAD programı olan CATIA programında DC04 malzemesini kullanarak modellemesini yapmış. Tasarımı analiz programına aktararak parametreler ile simülasyon çözümlerini elde etmiş. Simülasyon sonuçlarına göre tasarımda değişiklikler yapıldıktan sonra kalıp yapılmış. Deneysel sonuçlar ile yazılımdan bulunduğu analizi karşılaştırıldığında, geri yaylanma davranışı arasında büyük oranda benzerlik görmüş.

Erbilir G. (2021) Sac şekillendirme adedinin yüksek olduğu çamaşır makinesinde kullanılan bir parçanın malzeme cinsi ve sac kalınlığındaki değişikliğin, şekillendirilebilirliğe etkisini incelemiştir. ANSI 430, DX54D, DC04 malzemelerinin sac kalınlığını 0.5mm'den 0.37mm'ye indirerek; buruşma, incelme, çatlak, geri yaylanma ve kalıp üzerinde oluşacak kuvvetler analizini incelemiştir. Sac kalınlığı azaldıkça akma ve çekme dayanımının düştüğünü gözlemlemiştir. İncelme miktarı, geri esneme ve kenar çatlakları artmış.

A. C. S. Reddy ve ark. (2015) Derin çekme prosesine etki eden parametreleri Taguchi metodu kullanarak tespit etmişler. AA6111 Alüminyum malzeme için varyans analizinde derin çekme prosesinde kalınlık değişimine etki eden parametreleri; zımba uç çapı, kalıp boşluğu olarak belirlemişler. Deneysel sonuçlarında ise en fazla etkiyi %56,98 kalıp boşluğu, %30,12 zımba çapı, %12,9 kalıp profili olarak bulmuşlardır.

Huy, TQ (2023) Bu çalışmada düz levhanın derin çekme işleminde inceltme sürecini etkileyen faktörlerin karmaşık dinamiklerini keşfetmeye çalışmışlar. Delme yarıçapı (R_p), kalıp yarıçapı (R_d) ve iş parçası kelepçe kuvveti (F) dahil olmak üzere, derin çekme işleminin sonucunu şekillendiren önemli parametrelerin optimizasyonunu araştırmış. Gelişmiş CAE (Bilgisayar Destekli Mühendislik) yazılımını kullandığı bu çalışmada, derin çekme işlemi sırasında yaşanan deformasyonu simüle etmek için sonlu elemanlar analizinden yararlanmış. Bunu yaparak, yalnızca inceltme işleminin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda malzemenin şekillendirilebilirliği hakkında tahmin olanağı sunduğunu belirtmiş. Ayrıca bu derin çekme işlemi için en uygun parametreleri belirlemeye çalışmış.

Simülasyona ek olarak, bu araştırma Taguchi ortogonal dizi deneysel planlama yöntemini kullanarak ve bu parametrelerin etkisini değerlendirmek ve etkilerini yüzde cinsinden ölçmek için varyans analizinden (ANOVA) yararlanmıştır. Sonuç olarak, kalıp yarıçapının etkisinin %90,02'sini oluşturduğunu, ardından %9,56 ile zımba yarıçapının geldiğini ortaya çıkarmış. İş parçası blokaj kuvvetinin %0,42'sini oluşturduğunu görmüş.

Özbek, R. ve Gül, O. (2023, Haziran) Çalışmalarında derin çekme işleminde yarıçapın çekme üzerindeki gerileme analizini incelemişlerdir. Farklı yarıçap değerlerinde tasarım yaparak Ansys programı üzerinde analiz etmişlerdir. Analiz sonucunda yarıçap miktarı arttıkça gerilmelerin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Ballıkaya, H. Ve ark. (2023) Bu çalışmada, kalıp yüzeyi açılı hidro-mekanik derin çekme yönteminin sac levha duvar kalınlığı ve zımba kuvvetine etkisi deneysel ve sayısal analiz olarak incelemişlerdir. Çalışmalarda 0,9 mm kalınlığında DIN EN 10130-1999 sac malzeme kullanılmışlar. Değişkenlerin test sonuçlarına etkisi, deneysel parametreler olarak kalıp yüzeyi/ham tutucu açısı, zımba burun yarıçapı, kalıp omuz yarıçapı, hazne basıncı ve kalıp tutucu kuvveti kullanılarak araştırmışlar. Sayısal analiz deneylerini ANSYS programı kullanılarak gerçekleştirmişler. Ayrıca Taguchi deney planına ve L18 ortogonal dizisine göre deneyler yapmışlar. Elde edilen verileri MINITAB programında ANOVA varyans analizi ile istatistiksel olarak analiz etmişler ve her bir parametrenin sonuçlara etkisi yüzde olarak belirlemişler. Sonuçta incelenen en fazla %15, kalınlaşmanın ise %10 civarında olduğu belirlemişler.

Leelaseat, J ve ark. (2024) Derin çekme işleminin, motorlu taşıt imalatında yaygın olarak kullanılan bir sac şekillendirme tekniği olduğundan bahsetmişler. Derin çekme parçalarında meydana gelebilecek üç temel kusuru: yırtılma, buruşma ve incelme olarak tanımlamışlar. Gözle muayene işleminde incelmeyi tespit etmenin zor olduğundan bahsetmişler. Yakıt deposu imalatı yapan bir firmada sac kalınlığının incelme üst limiti %20 olarak belirlenmiş. Bu limit dahilinde AA5754-O alaşımlı malzemenin 1.5mm kalınlığındaki derin çekme prosesindeki incelme sorununu incelemişler. Etki eden iki parametreyi yani zımba kuvveti ve ham parça başlangıç boyutu olarak ele almışlar. 1948 de Hill'in anizotropik akama kriterine ve Swift sertleşme yasasına dayanan doğrulanmış malzeme modeliyle PAM-STAMP simülasyon yazılımını kullanmışlar. Sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanarak optimize etmişler. Modeldeki mekanik parametrelerin sonuçlarını tek eksenli çekme testlerinin

cihazından elde etmişler. Çalışmalarında sonuç olarak, hem hidrolik yastığın ham parça tutucu basıncının hem de ham parçanın başlangıç boyutunun tek başına veya birlikte parçanın incelmesine etki ettiği bulunmuşlar. Yapılan optimizasyon çalışmasına rağmen istenilen limitlere ulaşamamışlar.

Ozül S (2019) Bu çalışmada, farklı iki profil olan kare ve silindirik çekme işlemlerinde meydana gelen buruşma Von Mises, BBC2008-8p, Hill'48, BBC2008-16p, CPB06ex2 akma kriterleri ve izotropik, kinematik ve birleşik pekleşme modellerinden yararlanılarak bünye denklemleri üzerinde çalışmıştır. Sayısal analizleri, BBC2008-8p, BBC2008-16p ve CPB06ex2 modelleri bir ticari sonlu elemanlar yazılımına kullanıcı malzeme altprogramı ekleyerek yapmış. Kalınlığı 1mm olan AA5042-H2 alüminyum alaşımı kullanmış. Geliştirilen modellerin doğruluğunu değerlendirmek için literatürde verilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırmış. Analizlerdeki sonuçlarda bulunan kırışıklık değerleri ile deneysel verilerle uyumlu olduğunu gözlemlemiştir. CPB06ex2 modeli, kırışıklık profili ve zımba kuvveti analizinde diğer modellerle kıyaslandığında deneyler daha tutarlı sonuçlar vermiş. Ek olarak, kare plaka kullanılan işlemlerde, silindirik kap işlemleriyle kıyaslandığında kırışıklık olmaması için baskı plakası kuvvetinin daha fazla olması gerektiği görülmüştür.

Subramanian, M (2020) Bu araştırma çalışmasında, 100,200 ve 300µm farklı kalınlıklarda 316 ve 430 kalite paslanmaz çelik folyolar kullanılarak mikro derin çekme deneyleri gerçekleştirmiş. Folyo kalınlığının, kabın boyutunun, kalıplama parametrelerinin, yağlamanın ve tane boyutunun maksimum zımba yükü üzerindeki etkisi, kap kalınlığındaki değişim, LDR, radyal ve kasnak gerinimleri analiz etmiştir. Folyoların deformasyon davranışı da karakterize etmiş. Mikro derin çekme işleminde proses parametrelerini optimize etmek için Gray ilişkisel analizi ile birleştirmiş Taguchi tekniği kullanmış. Deneyleri gerçekleştirmek için zımba köşesi yarıçapı, kalıp köşesi yarıçapı, sürtünme ve boşluk için üç seviyeli giriş parametreleri kullanmıştır. Varyans Analizi (ANOVA), çıktı yanıtlarına dayalı olarak bu parametrelerin önemini bulmak için kullanmış. Paslanmaz çelik 316 ve 430 folyoların mekanik özellikleri çekme ve anizotropik testlerle belirlemiştir. Folyoların tane boyutu ve yüzey pürüzlülüğü de belirlemiştir. Seçilen folyoların şekillendirilebilirliğini araştırmak için geometrik ölçekli mikro derin çekme deneyleri yapmıştır. Sonlu Elemanlar (FE) simülasyon yazılımı ABAQUS 6.10/standart, farklı takım ve proses parametresi koşulları için mikro derin çekme prosesini modellemek ve analiz etmek için kullanmış.

Lin, BT ve ark. (2023) Bu çalışmalarında, doğrudan tahrikli bir servo presin hareket davranışının bir modelini oluşturmak için MATLAB yazılımı kullanmışlar. Model, hareket eğrilerini tahmin etmek ve metal şekillendirme sürelerini karşılaştırmak için kullanmışlar. Ancak tahmin modelinin hareket eğrisi ile gerçek hareket eğrisi arasındaki hata %13,84 olarak bulmuşlar. Bu nedenle, bir servo hareket eğilim yüzeyi oluşturmak için gerçek hareket eğrisi ölçmüşler. Daha sonra tahmin modelini optimize etmek için servo hareket eğilim yüzeyi tahmin programıyla entegre etmişler. Son olarak, adım eğrisi, basma eğrisi ve titreşimli eğri gibi optimize edilmiş servo hareket eğrisi ile silindirik kapların inceltme oranı ve şekillendirme kuvveti arasındaki farkı araştırmak için sonlu eleman analiz yazılımı DYNAFORM'u kullanmışlar. Analiz sonucu, optimize edilmiş ve gerçek servo hareket eğrileri arasında inceltme oranının ve maksimum kuvvet oluşturma hatasının sırasıyla %4 ve %4,11 oranında azaldığını görmüşler.

Van Dinh ve arkadaşları (2024) Jant parçasında kırışıklıkları önlemek için, metal zımba tarafından kalıba çekilmeden önce iş parçasını sıkıştırmak ve düzleştirmek için bir boş tutucu kullanmışlardır. İş parçası tutma kuvveti kullanılmadan derin çekme, düşük derinliğe sahip içi boş parçalar oluşturmak için uygulamışlardır. Bu durumda, kalıbın basit bir yapıya sahip olduğunu, üretim süresini ve maliyetlerini azaltmaya yardımcı olduğunu ve bakım-onarımının kolaylaştığını söylemişler. Boş tutucu kullanılmadan yapılan derin çekmede, kalıbın konik açısı α 'nın ürünlerin gövdesinin ve kenarının kalitesi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu, örneğin ürünlerin kırışıklıklara sahip olabileceğini veya olmayabileceğini, inceltmiş veya kalınlaştırılmış olabileceğini göstermişler. Çalışmalarında $\alpha > 120^\circ$ olduğunda parça duvarında kırışmanın oluşmaya başladığını ve α açısı arttıkça kırışmanın artma eğiliminde olduğunu belirlemişler. Kaliteli bir ürün eldesi için kalıp konik açısının $100^\circ < \alpha \leq 120^\circ$ olması gerektiğini söylemişler. Yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalar ile uygun açını $\alpha = 120^\circ$ olarak bulmuşlar.

Taşkın A ve ark. (2024) Bu çalışmada, kare tıbbi kapların tasarım faktörleri belirlenmiş ve Abaqus/Explicit sonlu elemanlar yazılımında modellenen derin çekme işlemi deneysel olarak doğrulamışlar. Deney sayısını azaltmak için Taguchi istatistiksel yöntemi kullanmışlar. Değişken faktörler olarak tutucu kuvveti, zımba yarıçapı, kalıp yarıçapı, kalıp ile boş arasındaki sürtünme katsayısı, zımba ile boş arasındaki sürtünme katsayısı, tutucu ile boş arasındaki sürtünme katsayısı seçmişler. Çıkış parametreleri olarak kalınlık azaltma ve maksimum zımba kuvveti incelemişler. Değişken faktörlerin çıkış parametreleri üzerindeki etkisi ANOVA analizi

ile belirlemişler. Yaptıkları incelemeler sonucunda tutucu kuvveti, kalıp ile sürtünme katsayısı ve tutucu ile sürtünme katsayısı değerleri arttıkça kalınlıkta ve zımba kuvvetinin arttığı, zımba yarıçapı ve kalıp yarıçapı arttıkça ise azaldığı bulmuşlar. Diğer taraftan zımba ile sürtünme katsayısı arttıkça kalınlıkta azalmanın azaldığı ve maksimum zımba kuvvetinin arttığı bulmuşlar. Ayrıca kaplarda kulak oluşumunu engellemek için sacların köşeleri farklı ölçülerde pahlamışlar ve sac kalınlıkları inceleyerek uygun pah ölçüsü bulmuşlar.

Zhao ve ark. (2024) Bu çalışmada, bakır folyoların şekillendirilebilirliği bir dizi çok adımlı mikro derin çekme testine dayalı olarak analiz yapmışlar. Bakır folyolar 300 ila 700 °C arasındaki sıcaklıklarda 5 dakika tavlamışlar, ardından çekme testleri ve tavllanmış numunelerin mekanik davranışının ve mikro yapısal karakterizasyonunun araştırılmak için elektron geri saçılma kırınımı testlerini yapmışlar. Sonuçlar, alındığı haliyle bakır folyoların zayıf şekillendirilebilirlik gösterdiğini ve mikro derin çekme sırasında mikro kaplar oluşturmadığını görmüşler. Tavlama sıcaklığı 500 °C'ye ulaştığında, bakır folyoların içinde homojen bir mikro yapı oluşmuş, malzemelerin şekillendirilebilirliği arttığını ve şekillendirilmiş ürünlerin yüzey kalitesinin arttığını görmüşler. Bununla birlikte, tavlama sıcaklığının 700 °C'ye artırılmasıyla iri taneli bantlarda inkoordinasyon deformasyonunun kolayca oluşması nedeniyle hem uzama hem de çekme mukavemetinin önemli ölçüde düştüğünü gözlemlemişler. Sonuç olarak, çekilmiş kapların yüzeyinde belirgin kırışıklıklar oluşmuş ve metal akışı nedeniyle burun yarıçapı bölgesinde belirgin inceltme meydana gelmiş. Genel olarak, bakır folyoların iyileştirilmiş şekillendirilebilirliği ve çekilmiş kapların şekillendirme kalitesi ile 500 °C'lik optimum bir tavlama sıcaklığı olduğunu bulmuşlar.

Lee ve ark. (2024) Bu araştırma, malzeme, işlem ve geometrik parametreler arasındaki etkileşimi göz önünde bulundurarak, derin çekme işlemiyle üretilen bileşenlerin optimum boş tasarımı için makine öğrenimi tabanlı bir metodoloji üzerinde çalışmışlar. AISI-304 çelik ve AA5754 alüminyum alaşımından yapılmış R47,5 mm flanşlı bir kap üzerinde yapılan laboratuvar ölçekli deneyler, sonlu elemanlar analiz modellerini ve önerilen boş tasarım eşleme fonksiyonunu doğrulamak için kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar analiz sonuçları arasındaki karşılaştırma, çekme kuvvetinde maksimum %13,3'lük ve 90°'lik bir segment üzerindeki kulak profili için maksimum %0,35'lik sapmalar olarak bulmuşlar. Sac levha ham metali için deneysel veriler ile boş tasarım eşleme fonksiyonu tahminleri arasındaki karşılaştırmışlar. Kalınlığın tahmininde ortalama 0,015 mm (veya %1,3) ve dış yarıçapın tahmininde ortalama 0,12 mm (veya %0,25) sapmalar göstermiş. Boş tasarım eşleme

fonksiyonunun farklı şekillerdeki dört ek flanşlı geometriye uygulamışlardır. Kulak profili için maksimum ve ortalama sapmalar sırasıyla %4,3 ve %3,1 iken, şekillendirme sonrası sac kalınlığı için sırasıyla %6,7 ve %3,1 olarak değiştiğini bulmuşlar.

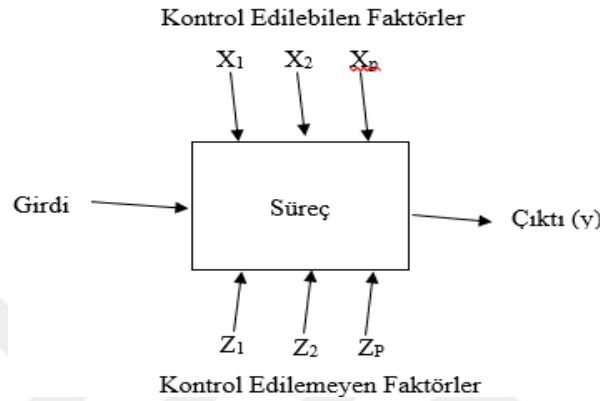
Civelek ve ark. (2024) Çalışmalarında şekillendirme sınır diyagramı ve Erichsen Sabitini kullanarak malzeme özelliklerinden ve deney şartlarından kaynaklanan faktörleri incelemiş ve derlemişlerdir. Erichsen Sabitini iş parçasını kalıp ve baskı plakası arasına sıkıştırarak küresel uçlu bir zımba ile şekillendirme işlemi başladıktan sonra malzeme yüzeyinde çatlak oluşumu başlayana kadar aldığı mesafe olarak tanımlamışlar. Çalışmalarında pekleşme üsteli ve sıcaklığın artmasının malzeme şekillendirme işlemini kolaylaştırdığını görmüşler. Aynı zamanda literatürde yaptıkları araştırmalarda sac kalınlığının artması, zımba çapının artması ve yağlayıcı kullanımı ile Erichsen Sabiti değerinin büyüdüğünü saptamışlar.

Sattari ve ark. derin çekme ile elde edilen sac metal şekillendirme parçalarındaki büyük elasto-plastik gerilimlerdeki hassasiyetleri hesaplamak için Toplam ve Güncellenmiş Lagrangian yaklaşımına dayalı bir sonlu eleman formülasyonu geliştirmişler. Karmaşık parçaların boş konturlarının analizi ve optimum tasarımında verimliliği artırmak için Toplam ve Güncellenmiş Lagrangian çarpımsal ayrıştırılmasının kullanımını ele almışlar. Başlangıçta düz boşluğundaki her bir malzeme noktasının orijinal konumunu bulmak için yinelemeli bir şema geliştirilmiştir; bundan sonra son iş parçasındaki gerinimleri ve stresleri tahmin etmek mümkün olduğunu görmüşler. Oluşturulan denklemler açısından von Mises plastisitesi benimsenmişler. Mevcut çalışmada, eğilme etkileri gevşeme katsayısı, boş konturların şekil optimizasyonu gibi çeşitli gelişmeler sunulmuştur: Karşılaştırma testi için Lagrangian yaklaşımları kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar, mevcut deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Optimizasyon prosedürü, derin çekme işleminde bir fincan üretmek için kullanılan kare bir boşluğun şekil optimizasyonuna uygulamışlar. Kalınlık değişimlerini en aza indirmek için amaç fonksiyonu tanımlanmıştır.

3.MATARYEL ve METOT

3.1 Deneysel Tasarım Yöntemleri

Deneysel tasarım, yapılmak istenen bir çalışmada ilerleyişini ve doğruluğunu takip etmeye yönelik bir sistemdir. Çalışma girdilerinde yapılan bir değişikliğin, çıktılar üzerindeki etkisi, analiz ederek görmemizi sağlar. Süreç modeline ait görsel Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Genel Süreç Modeli. (Kap,2022)

Soğuk şekillendirme proseslerinde yaygın olarak kullanılan derin çekme proseslerinde çok fazla girdi ve çıktılar vardır. Çalışmamda AISI 304 paslanmaz çeliklerin derin çekme işlemi yapılırken girdi parametreleri olarak kalıp şekil etkisi, malzeme cinsi, yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık, kalıp derinliği v.b parametrelerinin çıktılar olarak malzemenin istenilen ölçüler ve hatasız ürün eldesi gibi sonuçları vardır. Bunların yanında bizim kontrolümüzde olan kalıp şekil etkileri gibi ve bizim kontrolümüzde olmayan sürtünme kaynaklı ısınma gibi etkenlerde mevcuttur. Bu bilgiler ışığında yaşanan sıkıntılardan olan; yırtılma, çizilme, sıkışma, şekil bozukluğu, geri yaylanma ve marullanma gibi problemlerin kalıp daha tasarım aşamasında iken analiz ederek problemlerin giderilmesine çalışılacaktır. Aynı zamanda deney sayısı azaltılacaktır.

Deney tasarımında, deneme sayısı, veri analizi v.b gibi çıktıları etkileyen faktörler dikkat edilecektir.

Tasarım adımları;

1. Problemin belirlenmesi
2. Amacın tanımlanması
3. Performans karakteristiği belirlenmesi

4. Karakteristiğine etki eden faktörlerin seçilmesi
5. Faktör seviyelerinin belirlenmesi
6. Deney tasarımının belirlenmesi
7. Veri toplama ve analizi
8. Sonuçların değerlendirilmesi
9. Seçimlerin doğruluğunun denenmesi (Kap, 2022)

İstatistiksel deneysel tasarım yöntemleri ile faktörlerin kendi arasındaki etkileşimlerine dikkat edilmelidir.

3.1.1 Tam Faktöriyel

Çıktılara etki eden tüm faktörlerin kombinasyonları denenerek incelenir.

$$n = a^k \quad (3.1)$$

a : parametre düzeyi, k : seçilen parametre sayısı, n : deney sayısı

Seçilen faktör sayısı ve düzeyi arttıkça denemesi yapılacak sayısı da artmaktadır. Çalışmada çok fazla girdi parametresi olduğu için 6 kriteri belirleyip diğer faktörleri sabit olarak kabul edilip çalışmaya devam edilmiştir.

Çalışma girdi parametreleri;

1. Kalıp parça boşluğu
2. Kalıp derinliği
3. Dişi kalıp yarıçapı
4. Zımba yarıçapı
5. Pod çapı
6. Zımba çapı

3.1.2 Kesirli Faktöriyel

Tam faktöriyelin fazla zaman alması ve yüksek maliyetli olmasıyla, deney faktörleri ve seviyelerin yüksek olduğu durumları azaltarak deney sayısını düşürmesidir.

$$n = a^{k-p} \quad (3.2)$$

p: bağımsız jeneratör

p=1 için 1/2 KFD

p=2 için 1/4 KFD

p=3 için 1/8 KFD

Şeklinde ifade edilmiştir. (Taylan 2009)

3.2 Taguchi Metodu

Birçok parametreye sahip ve parametrenin kendi içinde de seviye farklılığı gösterdiği durumlarda deney sayısında aynı şekilde artmakta, maliyet artmakta ve uygulanabilirlik zorlaşmaktadır. Genichi Taguchi deney sayılarını düşürecek ve verimliliği arttıracak bir bir çözüm üretmiştir. Üretmiş olduğu çözüm ile deney sayılarında büyük ölçüde azalma görülmüştür. (Koçar, 2014)

Yüksek sayıda faktör ve seviye olduğunda bu metot kullanılarak sonuca ulaşmak daha kolay olur. Taguchi tasarım yöntem adımları aşağıdaki gibidir.

- Faktör ve etkileşimlerinin bulunması
- Seviyelerin tanımlanması
- Ortogonal Düzen belirlenmesi
- Faktör ve etkileşimlerin ortogonal düzene uygulanması
- Deneylerin yapılması
- Sonuç Varyans analizi ve etkin faktörlerin bulunması
- Deneylerin doğruluğunun tespit edilmesi

Faktör ve etkileşimlerin belirlenmesinde, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörler olarak iki gruba ayrılır. Kontrolünü sağlayabildiğimiz faktörler anlık müdahale edebildiğimiz faktörlerdir. Bu belirlemeler, deney tasarımını ve testleri doğrudan etkiler. Performans karakteristiği olarak bulunan etkinin ölçüleceği çıktı da bu aşamada belirlenmelidir. Faktörleri bulduktan sonra belirlenen seviyeler, serbestlik derecesiyle doğrudan ilişkilidir. Her faktörün serbestlik derecesi, seviyesi bir eksiltiyle bulunur. Faktörler dışında etkileşimlerin de serbestlik derecesi bulunur. Etkileşimde bulunan faktörlerin serbestlik derecelerinin çarpımı ile hesaplanır. Toplam serbestlik derecesi, tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri toplamına eşittir. Hesaplanan serbestlik derecesi, deneyde yapılacak deneme sayısını belirler.

$$n = 1 + \sum_{i=1}^n (A_i - 1) \quad (3.3)$$

n: deney sayısı, A_i : i parametresinin düzeyi, k: parametre sayısı

Belirlenen deneme sayısı, ortogonal düzenin seçiminde dikkate alınır. Ortogonal düzen seçimi ile tam faktöriyele göre a^k kadar deney yapılması gerekirken yapılacak deneme sayısı düşürülmektedir. Ortogonal düzen gösterimi;

$$L_d(a^k) \text{ ya da } L_d \quad (3.4)$$

Şeklinde ifade edilir.

Ortogonal düzene göre seçilen parametreler ve etkileşimleri yerleştirilir. Deneylerin belirlenen parametreler ve seviyelere göre yapılması önemlidir çünkü bu, sonuçların güvenilirliğini ve doğru bir şekilde yorumlama yapmayı sağlar. Denemeler uygulamalı şekilde ya da sonlu elemanlar analizi şeklinde yapılabilmektedir. Performans karakteristiği özelliklerine göre uygun S/N performans istatistiği hesaplanır. Hesaplanan S/N oranlarında faktörlerin etkinlik yüzdelerinin bulabilmek için varyans analizinde performans karakteristiğinin etkilerine bakılır.

3.3 Ortogonal Düzen

Ortogonal düzenler, deney tasarımı alanında, faktörlerin ve seviyelerinin etkileşimlerini etkin bir şekilde incelemek için kullanılır. Belirli bir sayıda faktörün ve her faktörün belirli bir sayıda seviyesinin etkileşimlerini minimum deneme sayısı ile analiz etmek için tasarlanmıştır. Deney tasarımı, kalite kontrol, ürün optimizasyonu gibi alanlarda kullanılır. Deney sayısını minimumda tutarak faktörler arası etkileşimleri anlamayı sağlar. Deneysel verilerin analizini basitleştirir ve yorumlanmasını kolaylaştıran bir metottur.

3.4 Varyans Analizi

Varyans Analizi, istatistiksel bir yöntemdir ve bir veya birden fazla parametre arasındaki ortalamaların farklı olup olmadığını belirleme tekniğidir. Gruplar arasındaki farkın rastgele mi yoksa gerçek farklılıktan mı kaynaklandığını belirlemek için hipotezler kullanır. İstatistiksel verilerin analizinde en sık kullanılan metottur. Deney tasarımı sonrasında elde edilen verilere dayanarak varyans hesaplanır. Hesaplamalarda kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

Genel kareler toplamı;

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AXB} + SS_e \quad (3.5)$$

SS_T : Genel kareler toplamı, SS_A : A parametresine ait kareler toplamı, SS_B : B parametresine ait kareler toplamı, SS_{AXB} : AxB etkileşimine ait kareler toplamı, SS_e : Hata kareler toplamı

$$SS_{Te} = SS_T - SS_B - SS_{AXB} - SS_A \quad (3.6)$$

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (3.7)$$

N: Gözlem toplam sayısı, $y_i = i$. Gözlem, T: Tüm gözlemlerin toplamı

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (3.8)$$

k_A : A parametresinin seviye sayısı, A_i : A_i seviyesindeki gözlemlerin toplamı, n_{Ai} : A_i seviyesi altındaki gözlem sayısı

$$SS_{AXB} = \left[\sum_{i=1}^c \left(\frac{(AXB)_i^2}{n_{AXB_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B \quad (3.9)$$

c = Etkileşim faktörlerinin kombinasyon sayısı

$$Sd_A = k_A - 1 \quad (3.10)$$

$$Sd_B = k_B - 1 \quad (3.11)$$

$$Sd_{AXB} = Sd_A \cdot Sd_B \quad (3.12)$$

k_A : A parametresinin seviye sayısı, Sd_A : A parametresinin serbestlik derecesi

$$Sd_T = Sd_A + Sd_B + Sd_{AXB} + Sd_e \quad (3.13)$$

$$Sd_T = N - 1 \quad (3.14)$$

$$Sd_e = Sd_T - Sd_A - Sd_{AXB} - Sd_B \quad (3.15)$$

Sd_T: Toplam serbestlik derecesi, Sd_A: A parametresinin serbestlik derecesi, Sd_B: B parametresinin serbestlik derecesi, Sd_{AxB}: AxB etkileşiminin serbestlik derecesi, Sd_e: Hata serbestlik derecesi

$$V_A = \frac{SS_A}{Sd_A} \quad (3.16)$$

$$V_B = \frac{SS_B}{Sd_B} \quad (3.17)$$

$$V_{AxB} = \frac{SS_{AxB}}{Sd_{AxB}} \quad (3.18)$$

$$V_e = \frac{SS_e}{Sd_e} \quad (3.19)$$

V_A: A Parametresinin varyansı, V_B: B Parametresinin varyansı, V_{AxB}: AxB etkileşiminin varyansı, V_e: hatanın varyansı

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (3.20)$$

F_A: A faktörüne ait F değeri, F_{Tablo}: F_{α,v1,v2, α}: Risk/Anlamlılık Düzeyi

Her parametrenin ve etkileşimlerinin serbestlik derecesi ve kareler toplamı hesaplanır. Aynı zamanda kontrol edilemeyen parametrelerin serbestlik dereceleri ve kareler toplamı hesaplanır. Ortogonal dizide bulunan ve bulunamayan serbestlik derecesi ve parametrelerin serbestlik dereceleri farkı hata oranı olarak hesaplanır. Hatanın kareler toplamının serbestlik derecesine oranı ile hata varyansı belirlenir. Bütün parametreler için F değeri bulunur ve tablo değerleri ile karşılaştırılır. Karşılaştırmada tablodaki değerden büyük olması, analiz sonuçlarının güvenli olduğu anlamına gelir.

3.5. Sinyal/Gürültü Oranı

Taguchinin geliştirmiş olduğu S/N oranı, ürün veya süreç performansının istenmeyen faktörlerden minimum etkilenecek gürültü ile başa çıkabilecek kontrol seviyelerini belirlemek için performans değeridir. S/N oranı ortalamayı ve değişkenliği kullanarak işlem yapar. 3 kategori ile belirtilmektedir.

Performans karakteristiğinin en düşük en iyi olduğu durum için;

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.21)$$

En büyük/yüksek en iyi olduğu durum için;

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.22)$$

Nominalin en iyi olduğu durum için;

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (3.23)$$

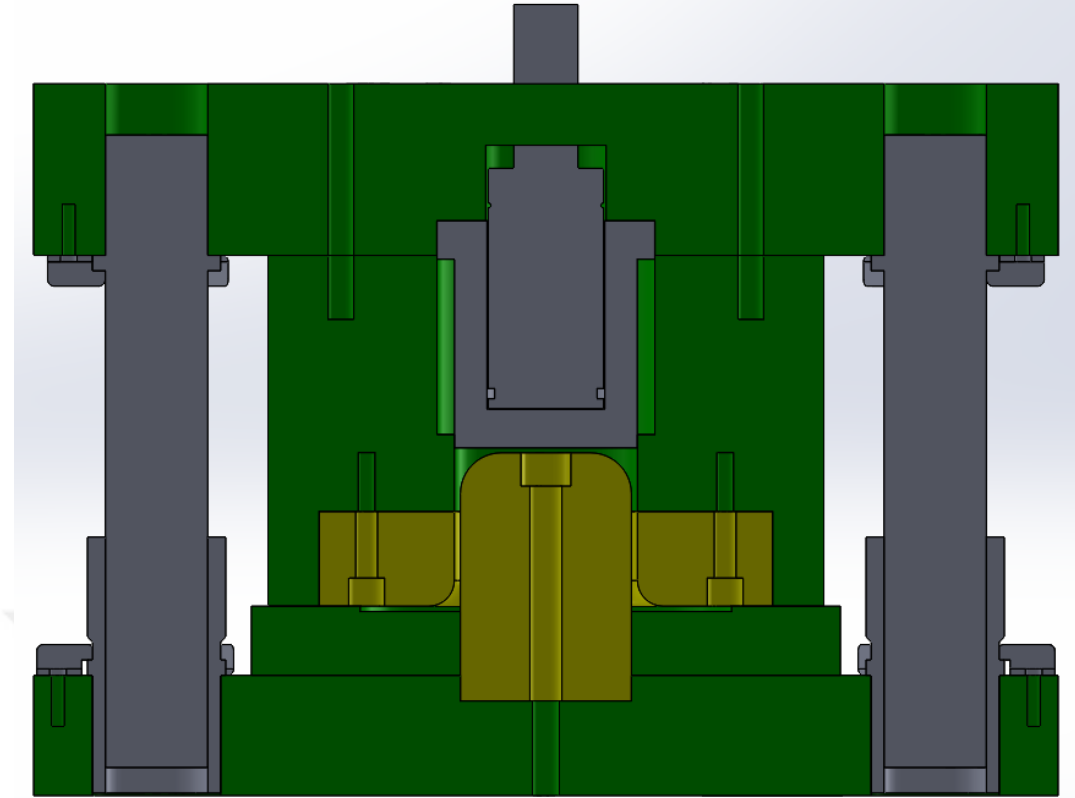
$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.24)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.25)$$

y_i : Performans karakteristiğinin i . Gözlem değeri, n :1 denemedeki test sayısı, $\bar{y}$: Gözlem değerlerinin ortalaması, S^2 : Gözlem değerlerinin varyansı olup S/N büyüdükçe hedef etrafında ürün varyansı küçülür.

3.6. Solidworks

Günümüzde gelişmekte olan teknoloji, çalışma hayatını kolaylaştırmaktadır. Bunlardan birtaneside katı modelleme programlarıdır. Bu programlar hayal ettiğimiz bir fikri görsele çevirme, modelleme, prototip oluşturma ve proje yönetimi için kullanılır. Parça ve kalıp modelleme işlemi bu programlar yardımıyla yapılacaktır. Derin çekme prosesine ait model Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Solidworks kullanılarak yapılan kalıp modellemesi

3.7 Autoform

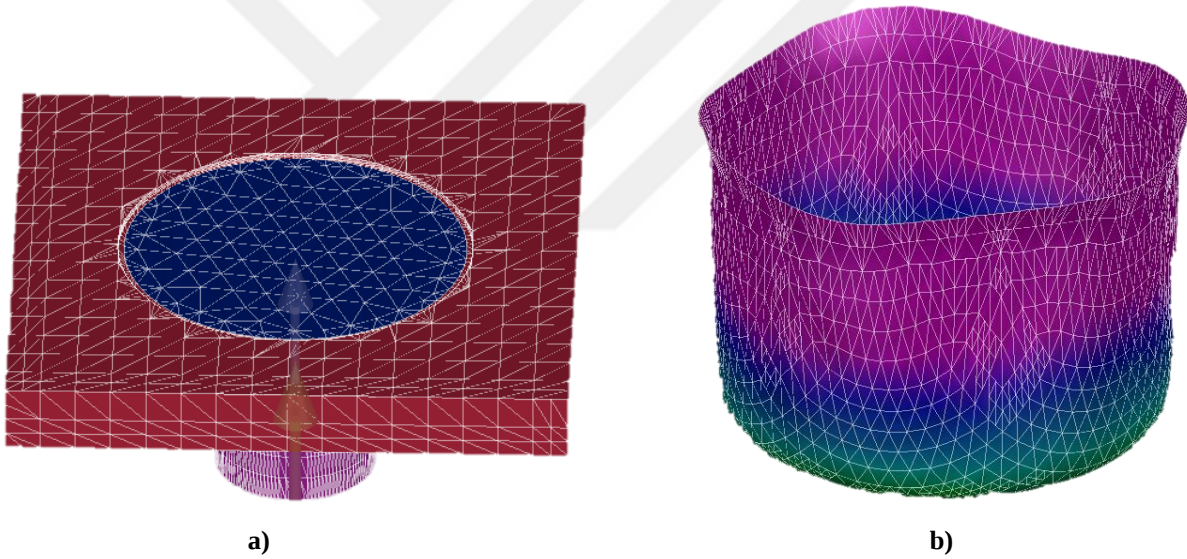
Günümüz teknolojisinde sac şekillendirme işlemlerinde oluşabilecek hataları ön görmek, çok büyük zaman ve maliyet sağlar. Program metal şekillendirme süreçlerinde, özellikle kalıp tasarımı, malzeme akışı analizi, deformasyon tahmini ve kalite kontrol gibi alanlarda sağladığı çözümlerle büyük öneme sahiptir. Programın başlıca özellikleri şunlardır;

- **Kalıp Tasarımı ve Analizi:** Metal levha şekillendirme kalıplarının tasarımı ve optimize edilmesi için gelişmiş araçlar sunar. Kalıp tasarımı sürecinde deformasyon analizleri ve malzeme akış simülasyonları yaparak kalıbın performansını önceden değerlendirme imkanı sağlar.
- **Malzeme Akışı Analizi:** Metal levha şekillendirme işlemlerinde malzemenin nasıl akacağını, deformasyonun nasıl oluşacağını ve son ürün kalitesini belirleyen faktörleri detaylı bir şekilde analiz eder.
- **Deformasyon Tahmini:** Yazılım, metal levha şekillendirme süreçlerinde oluşan deformasyonları tahmin etmek için ileri düzey simülasyon teknikleri kullanır. Bu sayede, ürünün son şeklini ve kalitesini önceden tahmin edebilir.
- **Kalite Kontrol:** Kalıp tasarımında ve üretimde potansiyel problemleri önceden tespit ederek atıkları azaltır ve üretim süreçlerini optimize eder.

Yazılım, metal şekillendirme süreçlerinin karmaşıklığını azaltarak, ürün kalitesini artırmaya ve maliyetleri düşürmeye yönelik çözümler sunar.

3.8 Mesh

Mesh analizlerde, özellikle sonlu elemanlar yöntemi kullanıldığında, büyük bir parçayı çok sayıda küçük parçalara böler ve her eleman için denklem sistemi oluşturarak yapı veya parçanın davranışlarını simüle eder. İyi bir mesh yapılandırması, analiz sonuçlarının doğruluğunu, hesaplama performansını ve modelin doğru temsilini sağlar. Şekil 3.3 a ve b 'de mesh modeline ait görsel verilmiştir. Meshlerin eşkanar üçgen yada kare olması gibi etkenlerin küçük parçalara bölündüğünde iletimin bu bölgelerden olduğunu anlatmaktadır. Meshlerin birleşim noktaları olan düğümler kuvvetin iletimi sağlamaktadır. (Anonim, 2024c). Autoform programı mesh yapısını kendisi otomatik olarak oluşturmaktadır.



Şekil 3.3 a-b) Mesh yapısı görseli

3.9 Yağlayıcılar

Yağlayıcılar, derin çekme işlemi sırasında levha malzeme ile kalıp arasında bir pürüzsüzleştirici etki sağlar. Kalıp içindeki yağlayıcıların sürtünmeyi azaltma, yüzey kalitesini iyileştirme, malzeme akışını kolaylaştırma, aşınmayı azaltma gibi etkileri vardır. Derin çekme işleminde doğru yağlayıcı seçimi, işlemin verimliliği ve son ürün kalitesi açısından kritiktir. Yağlayıcılar genellikle mineral yağlar, sentetik yağlar veya bazı durumlarda metalurjik katkı maddeleri içerebilirler, bu da işlemin spesifik gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir. Çalışmada

yağlayıcı olarak bor yağı kullanılmıştır. Sürtünme katsayısı olarak ise 0.05 kabul edilmiştir. Tablo 3.1’deki yağlayıcı bilgileri verilmiştir. (Anonim,2024a)

Tablo 3.1 Yağlayıcı bilgileri

Yoğunluk 15°C g/ml	ASTM-4052	0,89
Kinematik viskozite 40°C’de mm ² /s 100°C’de mm ² /s	ASTM D-445	25
Emülsiyon Ph, 20°C	D-1287	8,9
Pas testi 2 st 5g yağ/ 95g 300 PPM sert su	DIN 51360-2	Geçer

3.10 Kararsızlık, Non- Lineer Analizi

Kararsızlık genellikle non-lineer analizlerde önemli bir konudur ve özellikle malzeme ve yapının davranışlarının anlaşılması ve modellenmesi açısından dikkate alınması gereken bir faktördür. İşte kararsızlığın non-lineer analizlerde nasıl bir rol oynadığını ve nasıl ele alındığını açıklayan bazı önemli noktalar:

1. Kararsızlık Türleri: Non-lineer analizlerde kararsızlık, genellikle elastik olmayan malzeme davranışı, büyük deformasyonlar, büyük yer değiştirmeler veya yapısal düzensizlikler gibi durumlarda ortaya çıkabilir. Bu tür kararsızlıklar, yapısal bütünlüğü veya işlevselliği etkileyebilir.

2.Yük ve Deformasyon Durumları: Non-lineer analizlerde kararsızlık, belirli yük veya deformasyon durumlarında yapısal birimlerin ani veya sürekli bir şekilde büyük deformasyonlara veya yer değiştirmelere girmesi sonucu oluşabilir. Bu durumlar, yapıyı etkileyen ani değişimler veya başarısızlıklarla sonuçlanabilir.

3. Malzeme Modellemesi: Non-lineer analizlerde, malzeme modellerinin doğru bir şekilde seçilmesi ve tanımlanması kararsızlık analizlerinde kritik bir rol oynar. Elastik olmayan malzeme modelleri, plastik deformasyon, kırılma veya kavitasyon gibi kararsızlık durumlarını doğru bir şekilde simüle etmelidir.

4. Geometrik Non-Lineerlik: Büyük deformasyonlar veya büyük yer deşiştirmeler, geometrik non-lineerlik olarak adlandırılır ve yapısal kararsızlık riskini artırabilir. Bu durum, yapı elemanlarının belirli bir noktada veya belirli bir yük altında aniden bir maruziyet veya değişiklik yaşaması anlamına gelir.

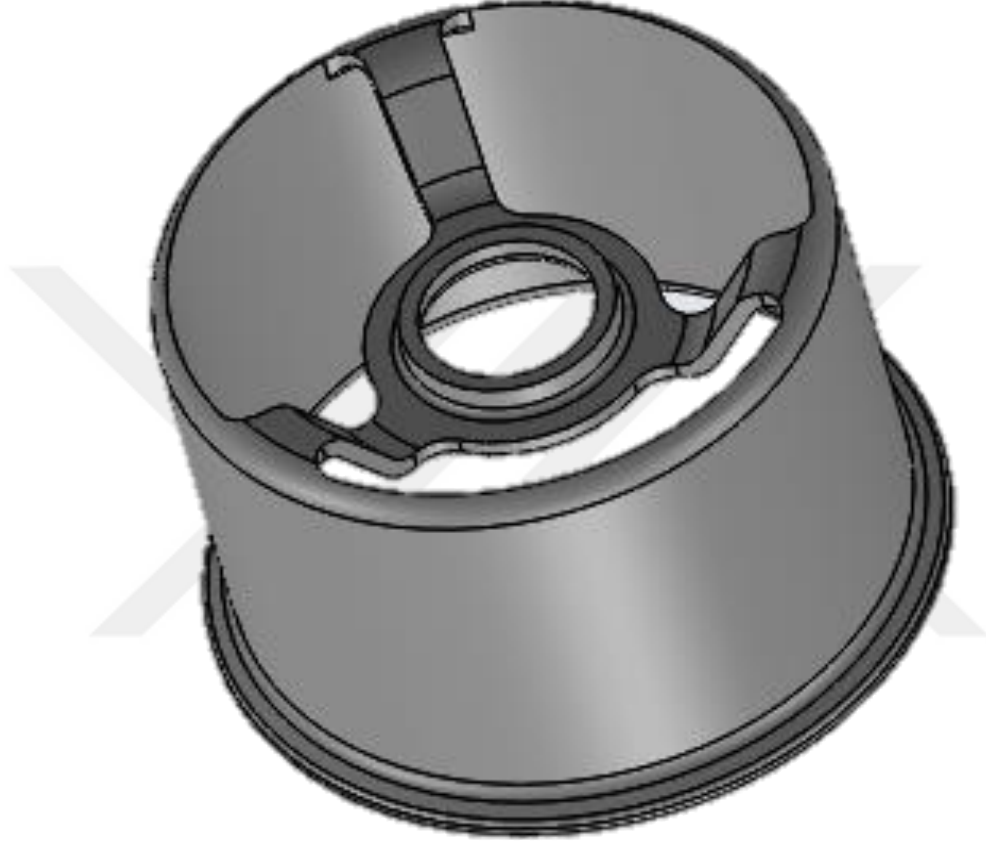
5. Analiz Teknikleri: Kararsızlık genellikle doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri (FEM) veya benzeri teknikler kullanılarak değerlendirilir. Bu teknikler, yapısal bütünlüğün korunmasını sağlamak ve kararsızlık durumlarını tespit etmek için yapısal modellerin karmaşıklığını ve doğruluğunu dikkate alır.

6. Kararsızlık Önleme ve Kontrol: Yapı mühendisliğinde kararsızlık önleme ve kontrolü, yapısal tasarımın önemli bir parçasıdır. Bu, yapısal düzenliliklerin sağlanması, uygun malzeme seçimi, doğru yük ve deformasyon analizleri ile mümkün olur.

Sonuç olarak, non-lineer analizlerde kararsızlık, yapısal mühendislik uygulamalarında dikkate alınması gereken kritik bir konudur. Doğru analiz teknikleri, malzeme modelleri ve yapısal düzenlilikler ile kararsızlık riski azaltılabilir ve yapıların güvenliği ve dayanıklılığı artırılabilir.

4. DENEYSEL TASARIM VE ANALİZ ÇALIŞMALARI

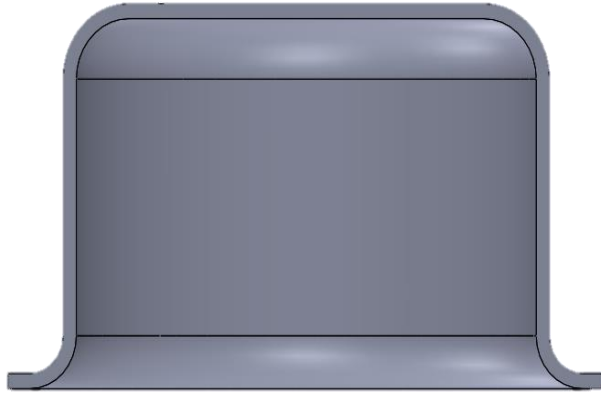
Bu çalışmada ağır vasıta araçlarda motor soğutma sisteminin bileşenlerinden olan termostat ürünü içinde bulunan sac piston ürünü üretimi yapılacaktır. Deney numunesine ait görsek Şekil 4.1’de verilmiştir.



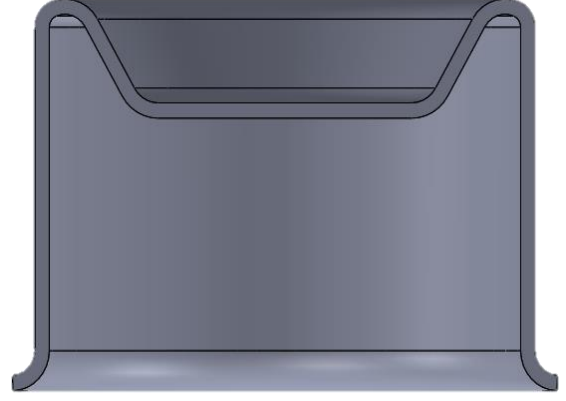
Şekil 4.1. Deney numunesi

Üretimi yapılacak olan deney numunesinin kalıp çalışması, ürünün ölçüleri dahilinde çalışılmıştır. Deney numunesine ait teknik resim ölçüleri Şekil 4.3’de verilmiştir. Üretim aşaması olarak 2 mm kalınlığındaki AISI 304 levhadan belirlenen pod çapında lazer kesme ile kesilecektir. İstenilen forma tek seferde getirelemeyeceği için parça adım adım işlem görmektedir. Operasyon adımları Şekil 4.2 a, b, c, d’de verilmiştir.

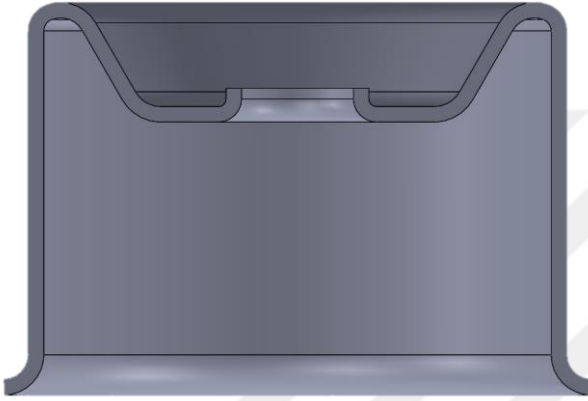
- a) 1. derin çekme operasyonu
- b) 2. derin çekme operasyonu
- c) Küçük delik delme ve iç çap derin çekme
- d) Tüm delik delme



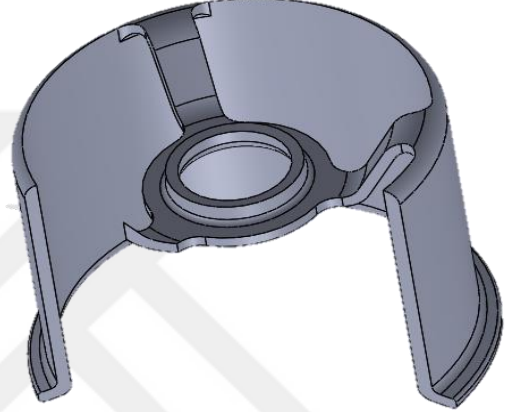
a) 1.Derin çekme operasyonu



b) 2.Derin çekme operasyonu

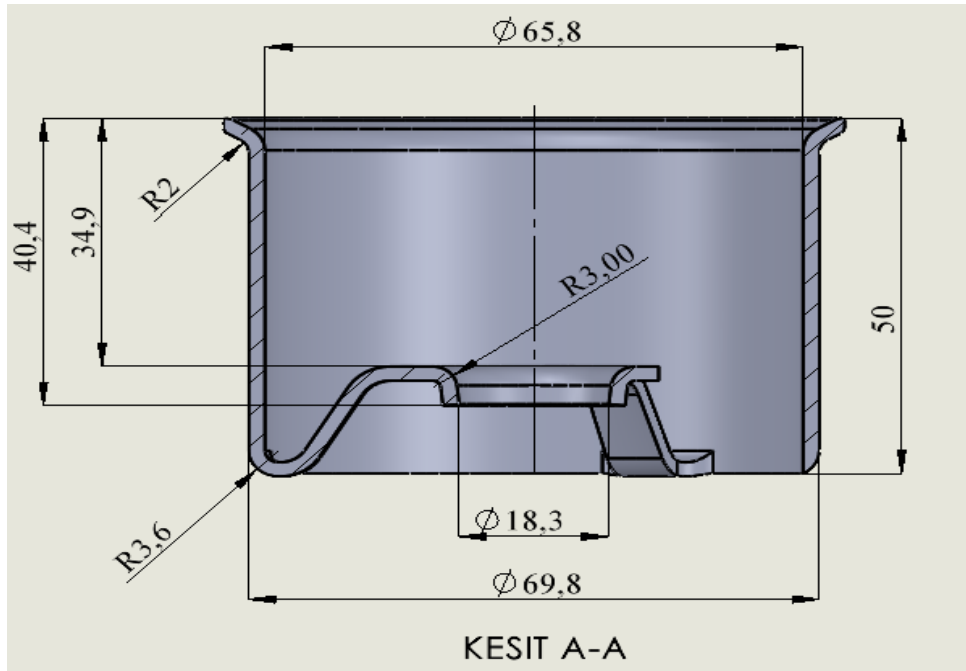


c) Küçük delik delme ve iç çap derin çekme



d) Tüm delik delme işlemi

Şekil 4.2. Deney numunesi a) 1.Derin çekme operasyonu b) 2.Derin çekme operasyonu c) Küçük delik delme ve iç çap derin çekme d)Tüm delik delme işlemi



Şekil 4.3. Deney numunesi teknik resmi

Bu çalışmada Şekil 4.2 a' da verilen 1. derin çekme operasyonu üzerinde çalışılmıştır. Uygulaması yapılacak olan derin çekme işleme için malzemenin giriş parametreleri belirlenmeye başlanmıştır. Parça yapısı günümüzde çok fazla karşılaştığımız silindirik seçilmiştir ve kalınlığı 2 mm olarak belirlenmiştir. AISI 304 malzemesi tercih edilmiştir. Bu malzemeyi seçmemizdeki etki, derin çekme operasyonlarında kullanımı yüksek olmasıdır. Parça yapısı ise literatürlerde çok fazla yer verilmesi ve analizlerin dahil edilmesiyle seçilmiştir. Tablo 4.1'de AISI 304 malzemesinin kimyasal özellikleri, Tablo 4.2 'de mekanik özellikleri ve Tablo 4.3'de fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.1. AISI 304 Kimyasal bileşimi

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
0,08	2	0,05	0,03	0,08	18-20	8-10

Tablo 4.2. AISI 304 Mekanik özellikleri

Kopma mukavemeti	515 MPa
Akma mukavemeti (%0.2)	210 MPa (min)
Sertlik, Rockwell (HB)	201

Tablo 4.3. AISI 304 Fiziksel özellikleri

Özellikler	Değerler
Öz kütlesi	8000 kg/ m^3
Erime sıcaklığı	1450°C
Elastise modülü	193 GPa
Isı geçirgenliği	17.2 W/m.K

Çalışmanın 2. adımında derin çekme işlemine etki eden parametrelerin seçilmesidir. Seçilen değişken parametreler ve parametrelerin farklı seviyeleri belirlenmiştir.

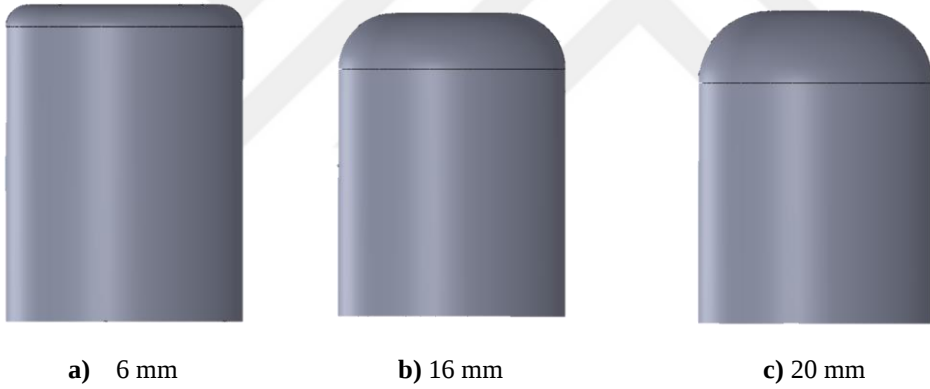
Derin çekmede en çok karşılaşılan yırtılma, kulaklanma, çizilme, marullanma gibi hatalar mevcuttur. Bu hatalara etkisi olan parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler; dışı kalıp yarıçapı, zımba yarıçapı, kalıp boşluğu, kalıp derinliği, zımba çapı, pod çapıdır. Her parametre için 3 seviye belirlenmiştir.

Seviyelerin belirlenmesinde litaretür taramalarında verilmiş olan öneriler, hesaplamalar göz önünde bulundurulmuştur. Parametreler ve seviyeler Tablo 4.4’te mevcuttur.

Tablo 4.4. Belirlenen parametreler ve seviyeleri

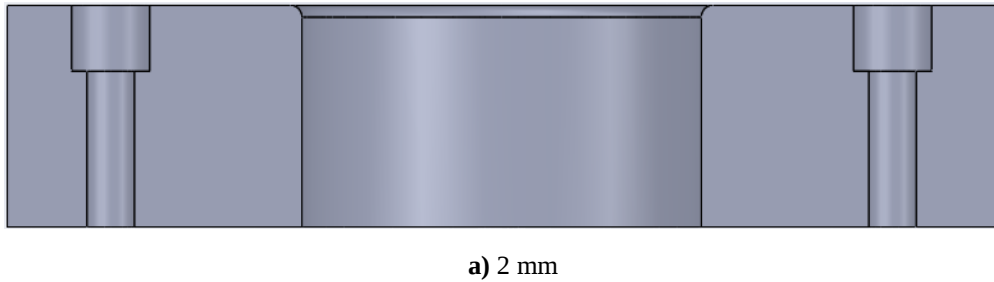
Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Dişi kalıp Yarıçapı (mm)	2	10	15
Zımba Yarıçapı (mm)	6	16	20
Kalıp boşluğu (mm)	0,7	1	2,7
Kalıp derinliği (mm)	50	60	70
Zımba çapı (mm)	65	67	70
Pad çapı (mm)	140	145	147

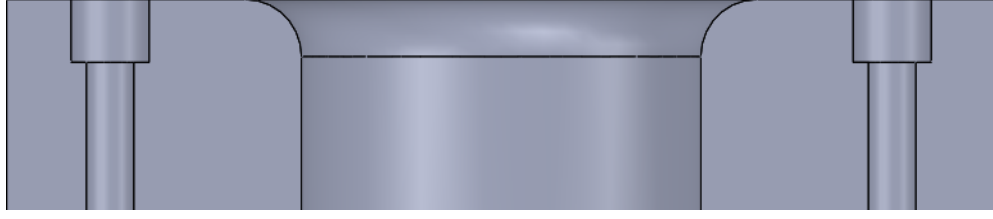
Tablo 4.4’de verilen zımba yarıçapına ait modellemeler aşağıdaki Şekil 4.4 a, b, c’de verilmiştir.



Şekil 4.4 Zımba yarıçapları a) 6 mm b) 16 mm c) 20 mm

Tablo 4.4’de verilen dişi kalıp yarıçapına ait modellemeler aşağıdaki Şekil 4.5 a, b, c’de verilmiştir.





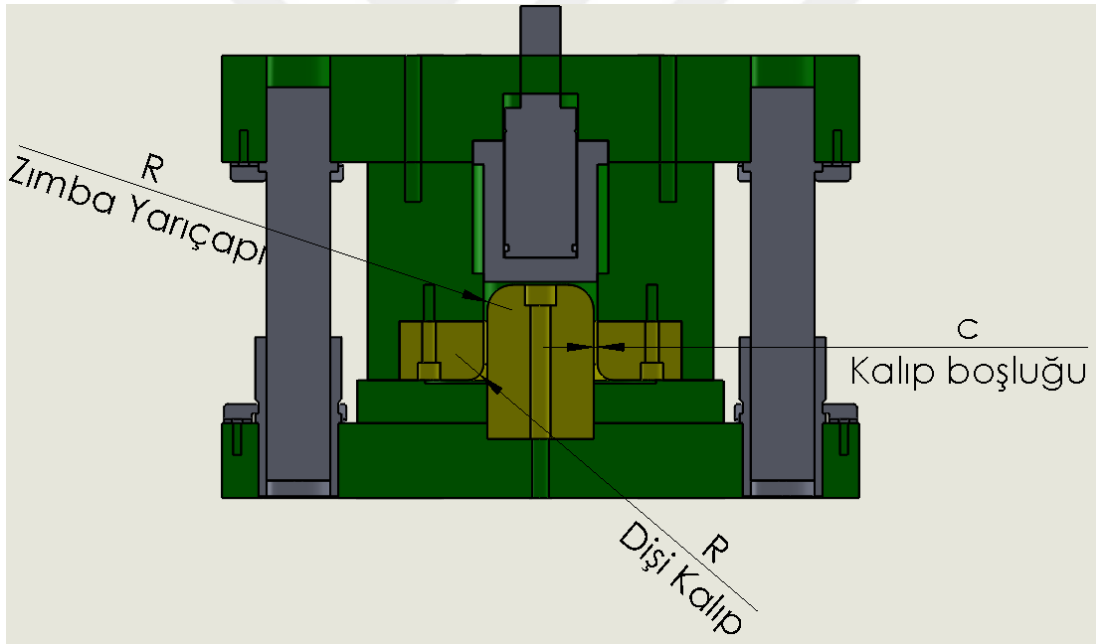
b) 10 mm



c) 15 mm

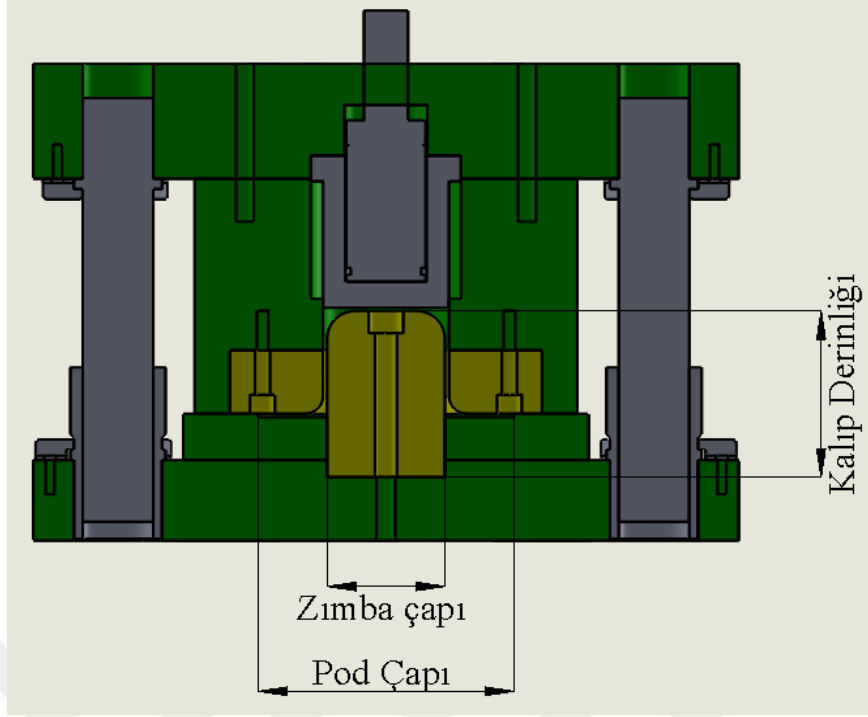
Şekil 4.5 Dişi kalıp yarıçapları a) 2 mm b) 10 mm c) 15 mm

Tablo 4.4’de verilen dişi kalıp yarıçapı, zımba yarıçapı ve kalıp boşluğuna ait kalıp modeli aşağıdaki Şekil 4.6 ’da verilmiştir.



Şekil 4.6 Kalıp boşluğu, dişi kalıp ve zımba yarıçaplarına ait görsel

Tablo 4.4’de verilen pod çapı, zımba çapı ve kalıp derinliğine ait kalıp modeli aşağıdaki Şekil 4.7 ’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Zımba çapı, kalıp derinliği ve pod çapına ait görsel

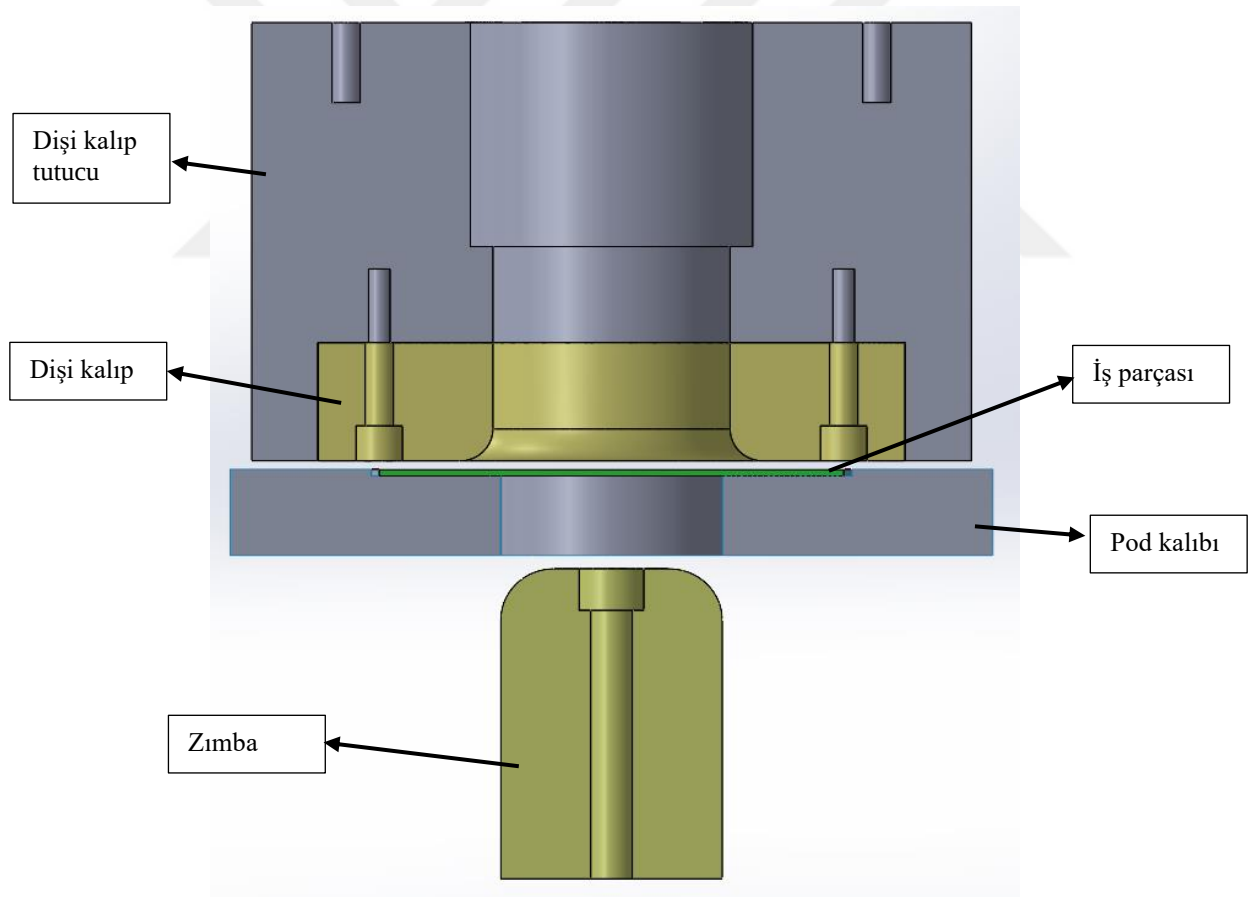
Tam faktöriyel deney tasarımı, birçok parametrenin etkisini değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle 3^6 şeklinde hesaplandığında 729 adet deney yapılması gerekmektedir. Ortogonal düzen kullanılmasıyla deneme sayıları azaltılarak önemli ölçüde maliyet ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. Seçilen parametreler ve seviyeler doğrultusunda 6 parametre 3 seviye için L27 Ortogonal düzene tercih edilmiştir. Ortogonal dağılım aşağıdaki Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5. Parametrelerin L27 ortogonal düzene yerleşimi

Deney sayısı	Dişi kalıp Yarıçapı (mm)	Erkek kalıp Yarıçapı (mm)	Kalıp boşluğu (mm)	Kalıp derinliği (mm)	Zımba çapı (mm)	Pod çapı (mm)
1	2	6	1.0	50	65	140
2	2	6	1.0	50	67	145
3	2	6	1.0	50	70	147
4	2	16	0.7	60	65	140
5	2	16	0.7	60	67	145
6	2	16	0.7	60	70	147
7	2	20	2.7	70	65	140
8	2	20	2.7	70	67	145
9	2	20	2.7	70	70	147
10	10	6	0.7	70	65	145
11	10	6	0.7	70	67	147
12	10	6	0.7	70	70	140
13	10	16	2.7	50	65	145
14	10	16	2.7	50	67	147

15	10	16	2.7	50	70	140
16	10	20	1.0	60	65	145
17	10	20	1.0	60	67	147
18	10	20	1.0	60	70	140
19	15	6	2.7	60	65	147
20	15	6	2.7	60	67	140
21	15	6	2.7	60	70	145
22	15	16	1.0	70	65	147
23	15	16	1.0	70	67	140
24	15	16	1.0	70	70	145
25	15	20	0.7	50	65	147
26	15	20	0.7	50	67	140
27	15	20	0.7	50	70	145

Belirlenen değerler doğrultusunda sonlu elemanlar analizleri yapılacaktır. Derin çekme analizin yapılabilmesi için verilen parametrelere göre kalıp tasarımı Solidworks programında yapılmıştır. Tasarımda zımba, dişi kalıp, dişi kalıp tutucu, pod kalıbı ve iş parçasından oluşmaktadır. Şekil 4.8’de kalıp modellemesi verilmiştir.



Şekil 4.8. Kalıp modeli

Analizlerin yapılabilmesi için kütük halinde bulunan parçaların Tablo 4.5’de verilen parametrelere göre kalıp dizaynı değiştirilmiş ve modellenmiştir.

Ürün kalitesini artırmak için, kalıp tasarım aşamasında kullanılan parametrelerin gerçek üretim koşullarına mümkün olduğunca yakın olması önemlidir. Kalıp tasarım aşamasında yapılacak olan minimal bir hata çok yüklü bir maliyet ve onunla birlikte çok büyük bir zaman kaybına yol açabilir. Bu yüzden sanal ortamda kalıp tasarımın yapılıp simüle edilmesi önemlidir. Sac şekillendirme için en etkili analiz yöntemi, sacın durumunu şekillendirme sırasında belirleyen denklemlerin zamanda entegrasyonunu içeren yöntemdir. Bu çözüm yöntemi, genellikle iki farklı metotla gerçekleştirilir: örtük ve açık yöntem. (Anonim, 2024b)

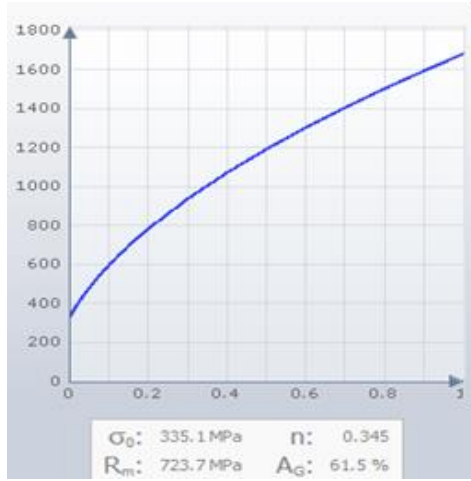
Örtük metot, sonuçları bir sonraki adıma aktarmak için kullanılan iteratif bir yöntemdir. Bu yöntemde, sonraki adımdaki değerler, mevcut adımdaki bilinen değerler ve bir iterasyon süreci kullanılarak hesaplanır. Bu yöntem, genellikle kararlılık ve doğruluk sağlar, ancak hesaplama maliyeti daha yüksektir.

Açık metot ise, sonraki adımdaki değerleri doğrudan mevcut adımdaki bilinen değerlerden hesaplar. Bu yöntem daha hızlı olabilir ancak kararlılık ve doğruluk açısından bazı sınırlamaları olabilir. Her iki yöntem de sac şekillendirme analizinde kullanılabilir, ancak tercih edilen yöntem genellikle analizin gereksinimlerine, hassasiyetine ve hesaplama kaynaklarına bağlıdır. Ben bu çalışmamda açık metot olarak bilinen parçanın işlem öncesi ve işlem sonrası olarak kullanılan metodu kullandım.

Çalışmada bir Autoform programı kullanılarak 27 farklı analiz yapılmıştır. Analizlerde derin çekme işlemi sırasında oluşabilecek olan hatalardan yırtılma, marullanma, kulaklanma, çizilme ve parçadaki cidar değişimleri gözlemlenmiştir. Programda kullanmış olduğumuz AISI 304 malzemesinin simülasyon parametreleri EN 10088-2 standartlarına göre Şekil 4.9 a,b,c de ve Tablo 4.6-4.7-4.8 ve 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.6 Autoform programı aısı 304 genel bilg

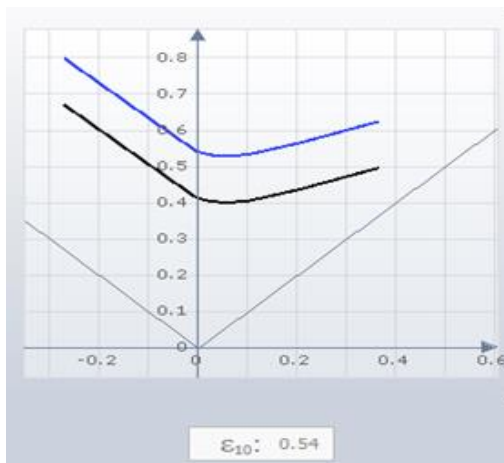
Genel Bilgi	
Standart tanım	1.4301
Standardına göre	EN 10088-2
2. Tanım	X5CrNi18-10 (AISI 304)
Temel Özellikler	
Young Modülü	2.1E+0.5 MPa
Poisson Oranı	0.3
Termal Özellikler	
Hacimsel Isı kapasitesi	3.64 mJ/(mm)



a) Sertleşme Eğrisi



b) Verim Yüzeyi



c) Limit Eğrisi

Tablo 4.7 Autoform programı sertleşme eğrisi bilgileri

Sertleşme Eğrisi (swift)	
ϵ_0	0.05
m	0.529
C	1637 MPa
Hockett-sherby	
σ_i	342.3 MPa
σ_{sat}	3836 MPa
a	0.526
p	0.85
α	0
Versiyon	
σ_0	335.1 MPa
R_m	723.7 MPa
n	0.345

Tablo 4.8 Autoform programı verim yüzeyi bilgileri

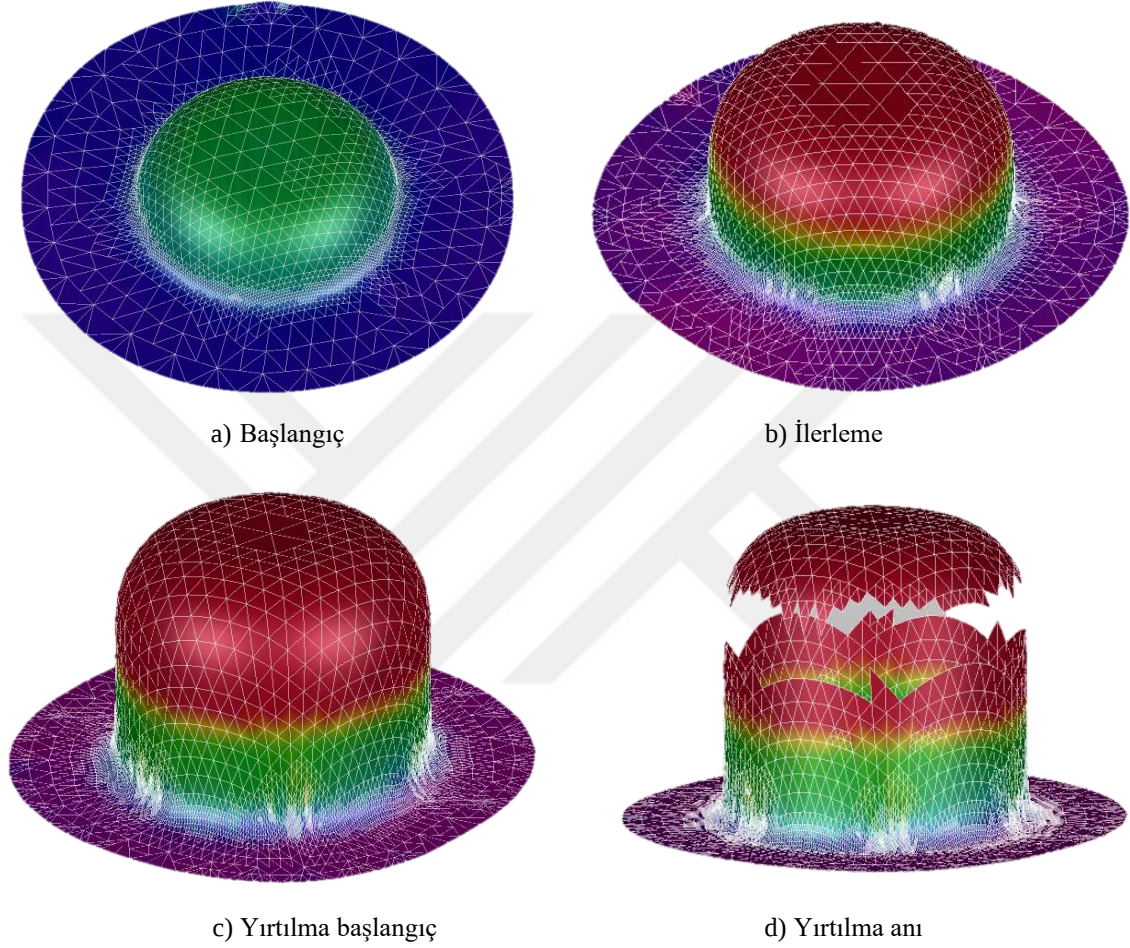
Verim Yüzeyi (hill)	
r-values	
r_0	0.81
r_{45}	1.19
r_{90}	0.96
Gerilmeler	
σ_0	335.1 MPa
σ_{45}	317.3 MPa
σ_{90}	350.6 MPa
Biaxial	
r_b	0.844
σ_b	332.1 MPa
Biax	1
M	2
Versiyon	
r_m	1.04

Tablo 4.9 Autoform programı limit eğrisi

Limit Eğrisi Modeli (tablo)	
Referans Kalınlığı	1 mm
Kalınlık	2 mm

Şekil 4.9. 1.4301 (AISI 304) Autoform simülasyon parametreleri **a)** Sertleşme eğrisi **b)** Verim Yüzeyi **c)** Limit eğrisi

Derin çekme işleminde Autoform programının vermiş olduğu parametreler yukarıdaki Tablo 4.7, 4.8 ve 4.9'da verilmiştir. Programında simüle edilerek parçada oluşabilecek problemler önceden görülerek hata oranı minimize edilebilir. Şekil 4.10 a,b,c,d'de aşama adımlarına ait analiz görseli verilmiştir.



Şekil 4.10 Derin çekme analizinde **a)** Başlangıç **b)** İlerleme **c)** Yırtılma başlangıç **d)** Yırtılma anı

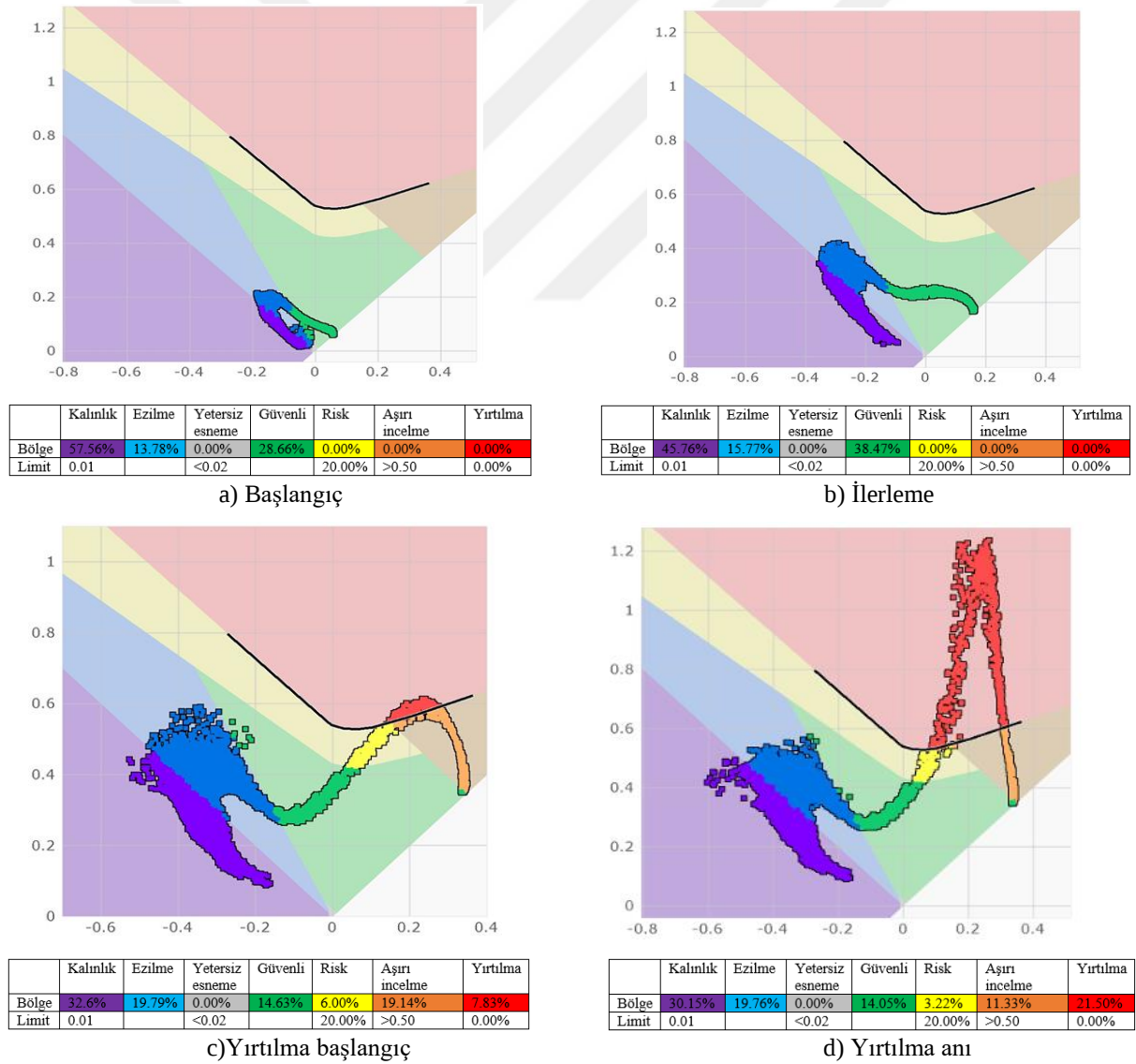
Sac metalin yırtılma olmadan uzayabileceği limitler sabit değildir ve farklı doğrultulardaki uzama durumuna bağlıdır. Bu nedenle, çizilen minimum ve maksimum gerilme diyagramlarına FLD (Forming Limit Diagram) (Şekil 4.11 a,b,c,d) denir. FLD sac metalin farklı doğrultulardaki uzama durumlarını görselleştirir ve ürün tasarımı ve şekillendirme işlemlerinde kullanılan önemli bir diyagramdır. Şekil 4.11 a, b, c, d'de görülen siyah çizgi FLD diyagramında bir eğri ya da bölgeyi temsil edebilir ve sac metalin belirli bir malzeme kalınlığı ve belirli bir şekillendirme işlemi için maksimum uzama sınırları tanımlanır. Eğer malzeme bu değeri aşarsa, yırtılma bölgesinde olabilir. Görsellere bakıldığında oldukça renkli bir yapıya

sahiptir. Bu renkler bizim yapmış olduğumuz analizleri yorumlamamızı sağlar. Tablo 4.10'da renklerin ne anlama geldiği hakkında bilgi verilmiştir. (Yalçın, 2021)

Tablo 4.10 Analizlerdeki renklerin açıklamaları

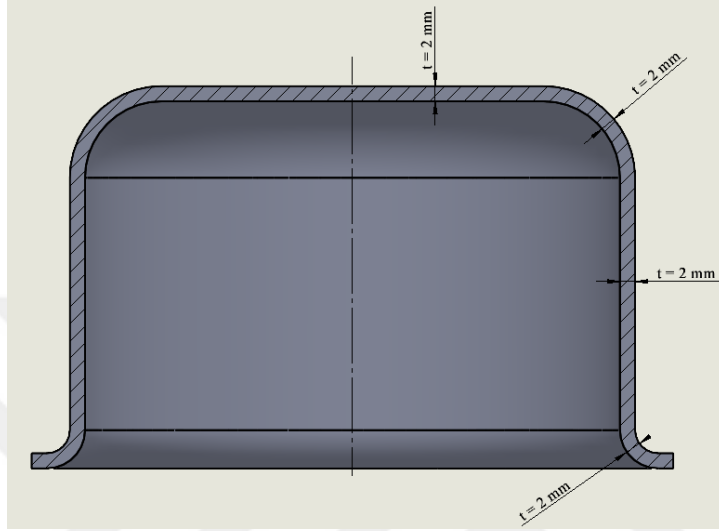
Renkler	Açıklama
Kırmızı	Malzemenin şekillendirme işlemi sırasında belirli bir deformasyon miktarını aşması durumunda yırtılma olasılığının yüksek olduğu bölgeyi temsil eder.
Sarı	Yırtılma riski olan bölgeleri temsil eder.
Turuncu	Aşırı incelme bölgelerini gösterir.
Yeşil	Çekme işleminin istenilen değerlerde olduğu bölgeleri gösterir.
Gri	Çekme işleminin tamamlanmadığı bölgeleri gösterir.
Mavi	Çekme esansında parçanın ezilen bölgesini gösterir.
Mor	Çekme işleminde cidar kalınlığının arttığı bölgelerini gösterir.

Tablo 4.10 da verilen renkler aynı zamanda FLD diyagramı içinde geçerlidir. Şekil 4.11'de verilen FLD diyagramlarında renklerin verilmiş olduğu bölgeler parça hakkında yorum yapmamızı sağlar.



Şekil 4.11 Derin çekme analizinde **a) Başlangıç b) İlerleme c) Yırtılma başlangıç d) Yırtılma anı**

Analizlerde verilen bilgilere bakılarak iş parçası üzerindeki Şekil 4.12’de verilen bölgelerdeki cidar incelmeleri gözlemlenmiştir. Cidar incelmelerine göre iş parçasının kullanılabilirliği ve kalıp tasarımının doğruluğu hakkında bir yorum yapılabilir. Nihai ürünü elde etmek için yapılan kalıp tasarımı uygunluğu ve kalıp iyileştirmeleri yapılarak reel uygulamaya geçildiğinde zaman ve maliyet kaybını önleyecektir.



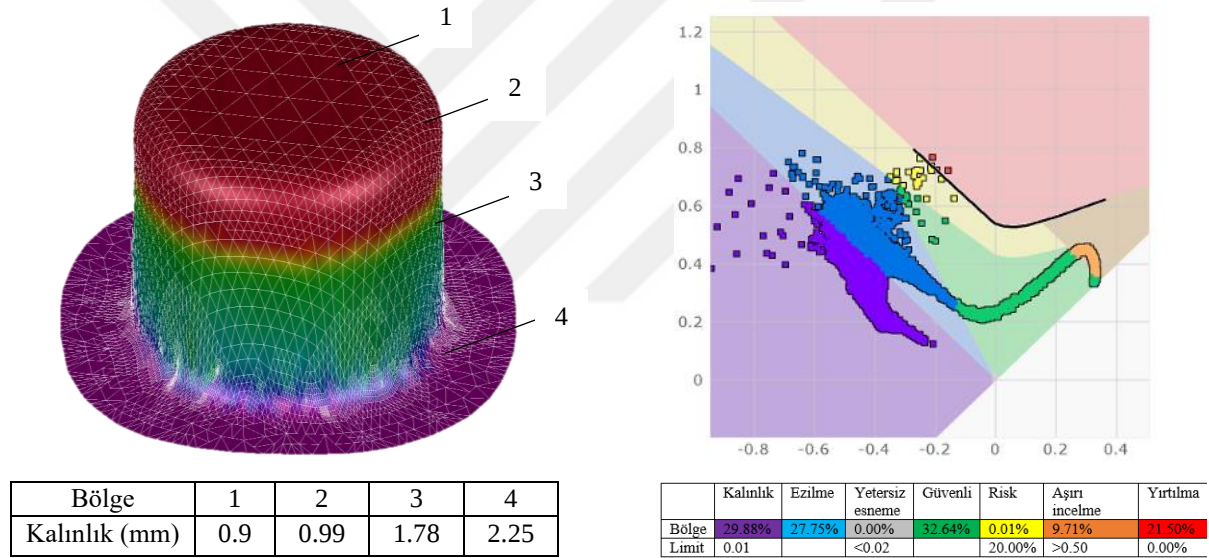
Şekil 4.12. İş parçası kalınlık kontrol bölgesi

Şekil 4.12’de gösterilen kalınlık değerlerinin analizi için S/N (Signal-to-Noise) performans karakteristiği seçilmelidir. Bu karakteristik, ölçüm sonuçlarının gürültüye (rastgele varyasyonlara) karşı sinyale (istenen sinyale) oranını değerlendirir. Bu şekilde, kalınlık değerlerinin istenilen özelliklere ne kadar uygun olduğunu belirlemek için S/N oranı kullanılabilir. Daha yüksek S/N oranları, istenilen özelliklere daha yakın kalınlık değerlerini gösterirken, düşük S/N oranları istenmeyen varyasyonları veya hataları gösterebilir. Bu nedenle, S/N performans karakteristiği, kalınlık değerlerinin analizi için uygun bir seçenek olabilir. Parça kalitesi ve yırtılmayı önlemek için, kalınlık değerinin mümkün olduğunca küçük olması ve daha düzgün bir kalınlık dağılımına sahip olması istenir. Bu, parçanın istenilen özelliklere daha yakın ve daha tutarlı olmasını sağlar. Daha ince bir kalınlık, parçanın hafif olmasını ve daha az malzeme kullanılmasını sağlayabilir, ancak yırtılma riskini artırabilir. Düzgün bir kalınlık dağılımı ise parçanın mukavemetini ve performansını artırabilir. Bu nedenle, kalınlık değerinin en küçük değere yakın olması ve daha düzgün bir kalınlık dağılımına sahip olması, parça kalitesini artırmanın ve yırtılmayı önlemenin önemli bir parçasıdır. Bu nedenle, performans istatistiği olarak en küçük değer en iyisi olduğu durumlar için geçerli olan formüller kullanılmıştır. Bu formüller, parça kalitesini ve yırtılmayı önlemek için kalınlık

değerlerinin en küçük ve en istikrarlı olmasını sağlamak amacıyla kullanılır. En küçük değerin en iyisi olduğu durumlar, istenilen özelliklerin daha yakın ve daha tutarlı bir şekilde karşılandığı durumları ifade eder.

Proses parametrelerinin sacın kalınlık değerleri üzerindeki etkisini hesaplamak için Varyans analizi (Anova) uygulanmıştır. Hesaplanan S/N değerleri dikkate alınarak analiz çalışması tamamlanmıştır.

Proses parametreleri L27 ortogonal düzeni kullanılarak 27 adet analiz yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarında iş parçası üzerindeki bölgelerin kalınlıkları ve değişen kalıp parametrelerine göre parçanın derin çekilme esnasında oluşan hataları ve FLD diyagramlarına ait görseller verilmiştir. Şekil 4.13'de 1. Analize ait görsel ve FLD diyagramı verilmiştir.

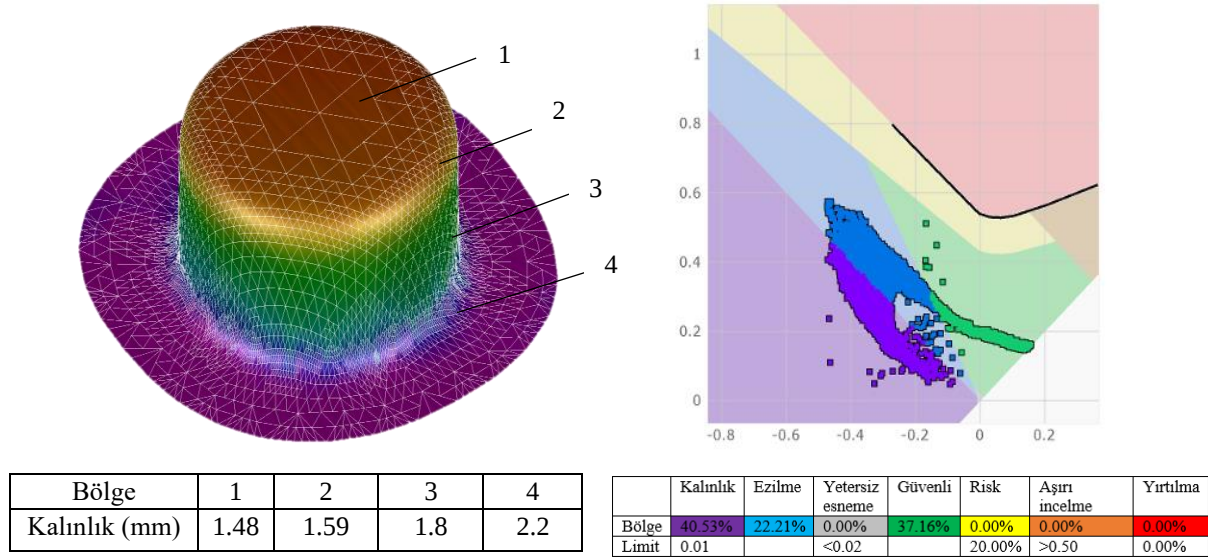


Şekil 4.13 1 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.11 1 nolu analizde oluşan max kuvvetler

Parametre	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	307.5	283.9	19.7

Tablo 4.11'ye bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Dişi kalıp yarıçapı küçük olduğu için derin çekme esnasında parçanın etek kısmında cidar kalınlaşması olmuştur. Kalınlaşma nedeniyle kalıp boşluğu azalarak etek kısmında mesh yapısından da görüldüğü gibi gerilmeler bu bölgelerde yoğunlaşmış ve yırtılma oluşmuştur. Görsel üzerinden cidar değişimleri görülmektedir.

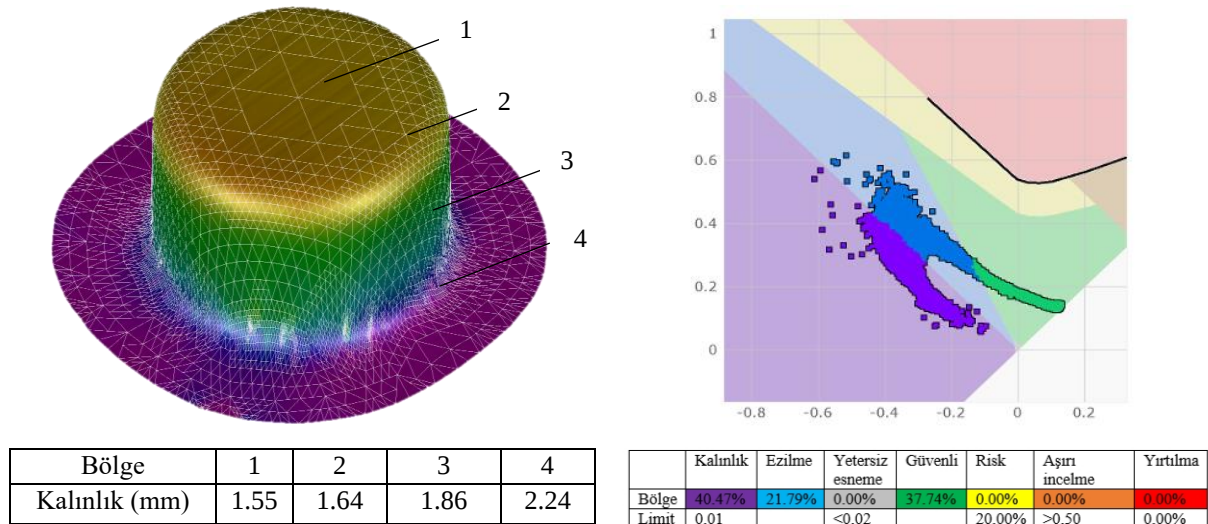


Şekil 4.14 2 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.12 2 nolu analizde oluşan max kuvvetler

Parametre	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	309.5	275.3	34.3

Tablo 4.12'ye bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.14'de 2. analiz değerlerine bakıldığında dişi kalıp yarıçapı küçük olduğu için derin çekme esnasında parçanın etek kısmında cidar kalınlaşması olmuştur. Kalınlaşma nedeniyle kalıp boşluğu azalarak etek kısmında yırtılma mesh yapısından da görüldüğü gibi gerilmeler bu bölgelerde yoğunlaşmış ve yırtılma oluşmuştur. Görsel üzerinden cidar değişimleri görülmektedir.

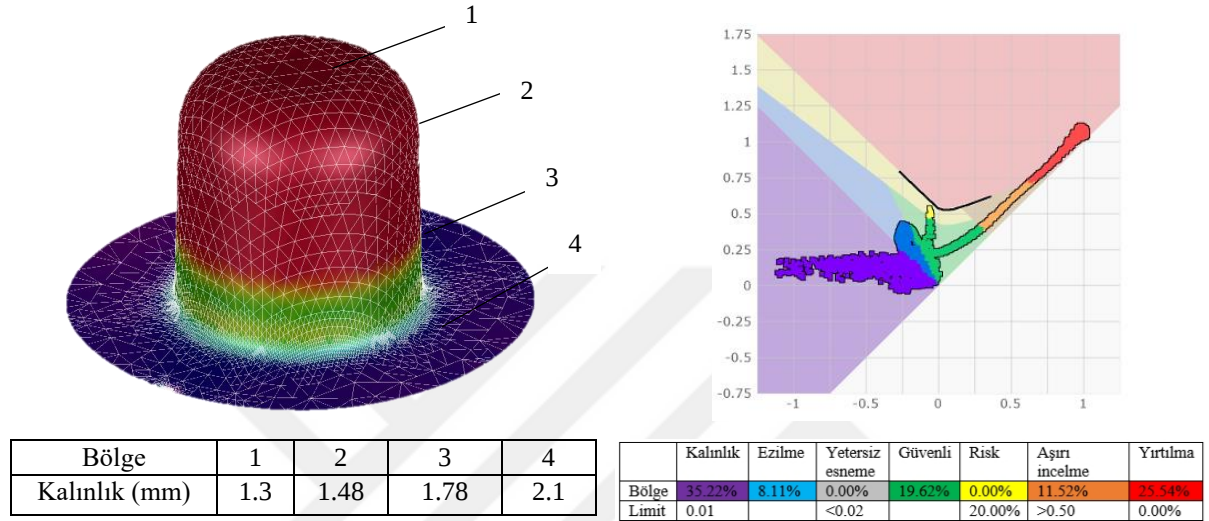


Şekil 4.15 3 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.13 3 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	294.7	262.9	31.7

Tablo 4.13'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.15 3. analiz sonuçlarına bakıldığında dişi kalıp yarıçapı küçük ve pod çapı büyük olduğu için gerilmeler bu bölgede yoğunlaşmıştır. Mesh yapısına bakıldığında mesh boyutlarının küçüldüğü ve sıklaştığı görülmektedir. Kalınlaşma nedeniyle kalıp boşluğu az geldiğinden plastik şekil değiştirme işlemi sonlanmış olup iş parçasının etek kısmında yırtılma ve marullanma problemi oluşmuştur.

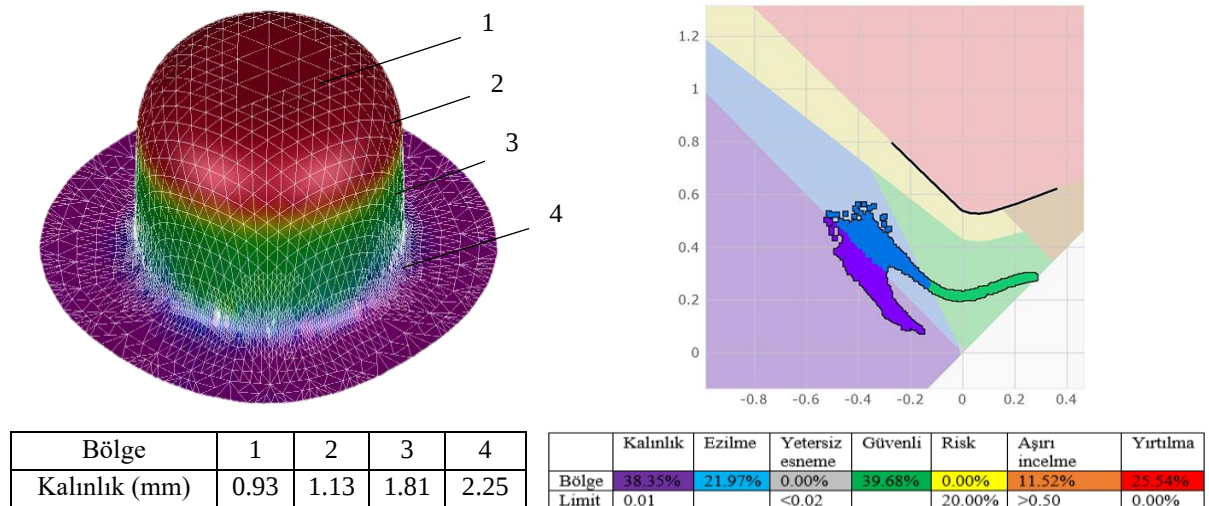


Şekil 4.16 4 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.14 4 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	388.1	322	71.3

Tablo 4.14'a bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.16'de 4. analiz sonuçlarına bakıldığında dişi kalıp yarıçapı küçük ve kalıp boşluğu az olduğu için gerilmeler mesh yapısının sık olduğu bölgelerde oluşmuştur. Kalınlaşmış bölgeler kalıp boşluğunu kapattığı için yırtılma meydana gelmiştir.

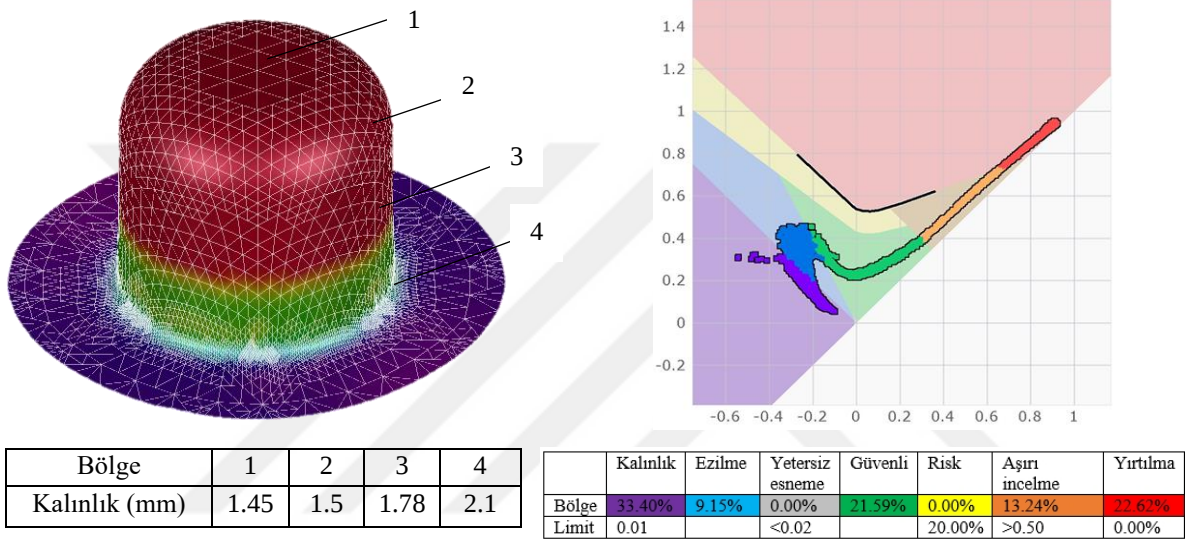


Şekil 4.17. 5 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.15 5 nolu analizde oluşan max kuvvetler

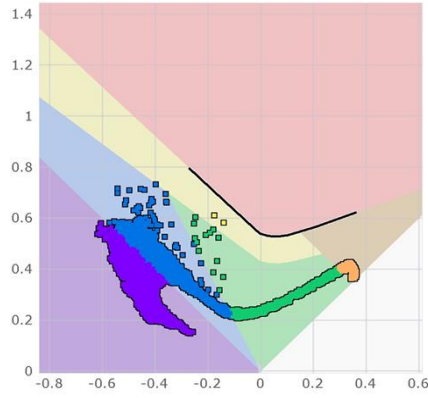
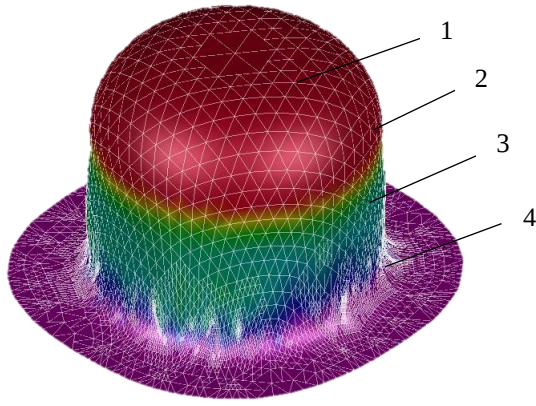
	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	291.9	265.7	26.1

Tablo 4.15'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.17'de 5. analiz sonuçlarına bakıldığında dişi kalıp yarıçapı küçük olduğu için derin çekme esnasında parçanın etek kısmında cidar kalınlaşması olmuştur. Kalınlaşma nedeniyle kalıp boşluğu azalarak etek kısmında yırtılma ve marullanma problemi oluşmuştur.

**Şekil 4.18.** 6 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı**Tablo 4.16** 6 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	581.1	264.1	321.6

Tablo 4.16'ya bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.18'e 6. analiz sonuçlarına bakıldığında dişi kalıp yarıçapı küçük ve kalıp boşluğu az olduğu için yırtılma olmuştur. Mesh yoğunluğuna bakıldığında ise 4 numaralı bölgede gerilmelerin yoğun olduğu görülmektedir.



Bölge	1	2	3	4
Kalınlık (mm)	0.94	1.14	1.87	2.33

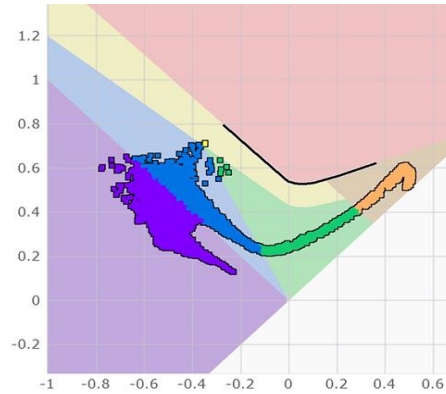
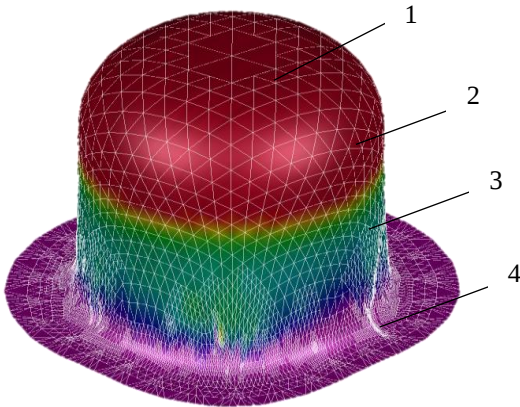
	Kalınlık	Ezilme	Yetersiz esneme	Güvenli	Risk	Aşırı incelme	Yırtılma
Bölge	31.11%	27.23%	0.00%	25.37%	0.00%	16.29%	0.00%
Limit	0.01		<0.02		20.00%	>0.50	0.00%

Şekil 4.19. 7 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.17 7 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	581.1	264.1	321.6

Tablo 4.17'ye bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.19'da 7. analiz sonuçlarına bakıldığında dişi kalıp yarıçapı küçük olduğu için derin çekme esnasında parçanın etek kısmında cidar kalınlaşması olmuştur. Kalınlaşma nedeniyle kalıp boşluğu azalarak etek kısmında yırtılma meydana gelmiştir. Mesh yapısına bakıldığında etek kısmında gerilmelerin yoğun olduğu görülebilir.



Bölge	1	2	3	4
Kalınlık (mm)	0.7	0.89	1.84	2.21

	Kalınlık	Ezilme	Yetersiz esneme	Güvenli	Risk	Aşırı incelme	Yırtılma
Bölge	28.09%	26.53%	0.00%	18.87%	0.00%	26.50%	0.00%
Limit	0.01		<0.02		20.00%	>0.50	0.00%

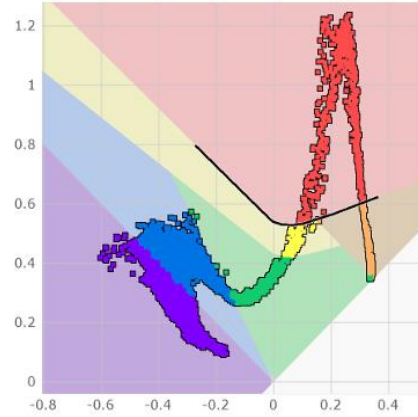
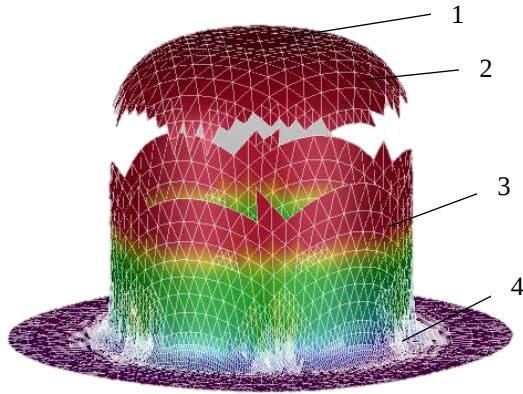
Şekil 4.20. 8 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.18 8 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	525.1	269	280.2

Tablo 4.18'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.20'de 8. analiz sonuçlarına bakıldığında kalıp derinliği ve kalıp

boşluğu fazla olduğu için parça analizinde marullanma problemi oluşmuştur. Aynı zamanda yırtılma eğrisine de yaklaşmıştır.



Bölge	1	2	3	4
Kalınlık (mm)	1.16	1.23	1.81	2.29

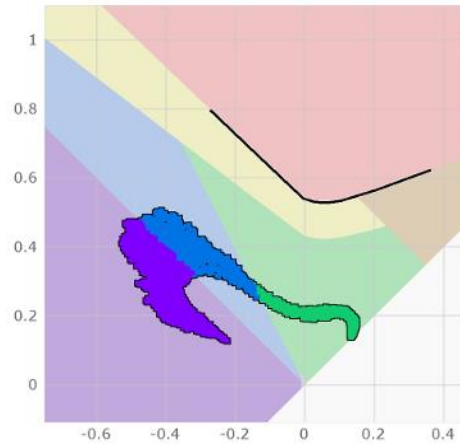
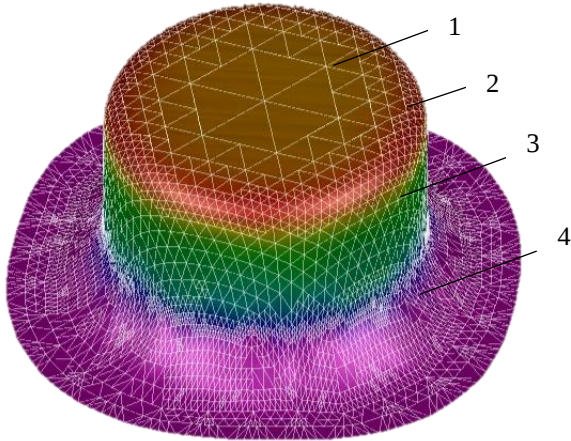
	Kalınlık	Ezilme	Yetersiz esneme	Güvenli	Risk	Aşırı incelme	Yırtılma
Bölge	30.15%	19.76%	0.00%	14.05%	3.22%	11.33%	21.50%
Limit	0.01		<0.02		20.00%	>0.50	0.00%

Şekil.4.21 9 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.19 9 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	807.8	296	551.4

Tablo 4.19'a bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.21'de 9. analiz sonuçlarına bakıldığında dişi kalıp yarıçapı küçük, pod çapı ve kalıp derinliği büyük olduğu için parçada yırtılma ve etek kısmında marullanma meydana gelmiştir.



Bölge	1	2	3	4
Kalınlık (mm)	1.52	1.44	1.85	2.34

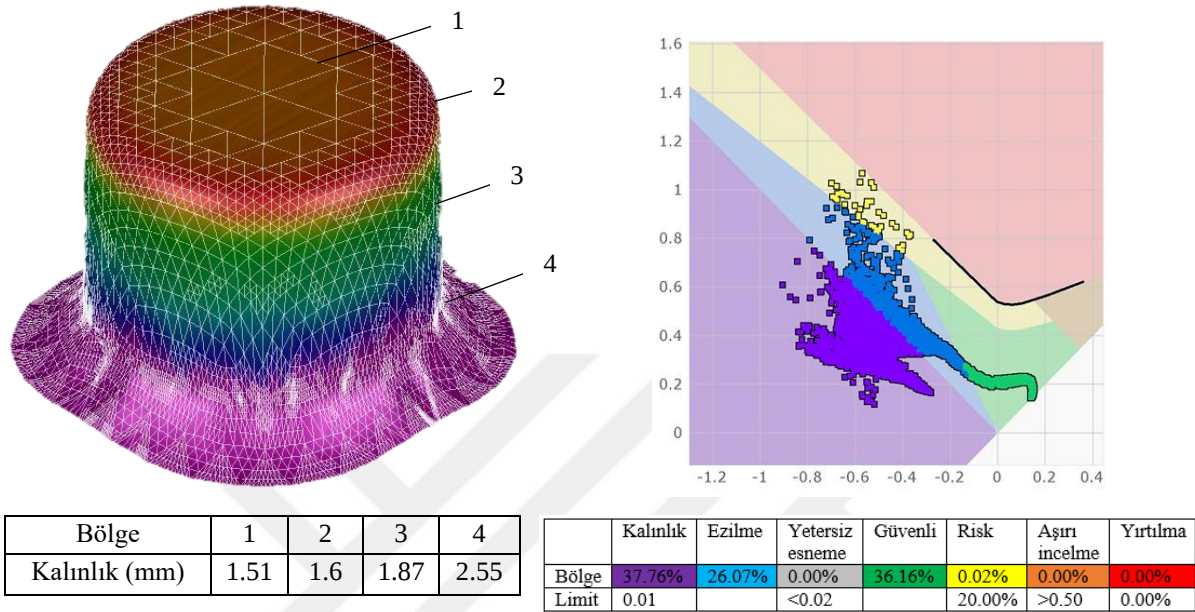
	Kalınlık	Ezilme	Yetersiz esneme	Güvenli	Risk	Aşırı incelme	Yırtılma
Bölge	43.44%	21.99%	0.00%	34.57%	0.00%	0.00%	0.00%
Limit	0.01		<0.02		20.00%	>0.50	0.00%

Şekil.4.22 10 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.20 10 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	294.2	275.1	15.5

Tablo 4.20'ye bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.22'de 10. analiz sonuçlarına bakıldığında kalıp boşluğu az olduğu için derin çekme esnasında eteklerde cidar kalınlığı arttığı için yırtılma ve marullanma meydana gelmiştir.

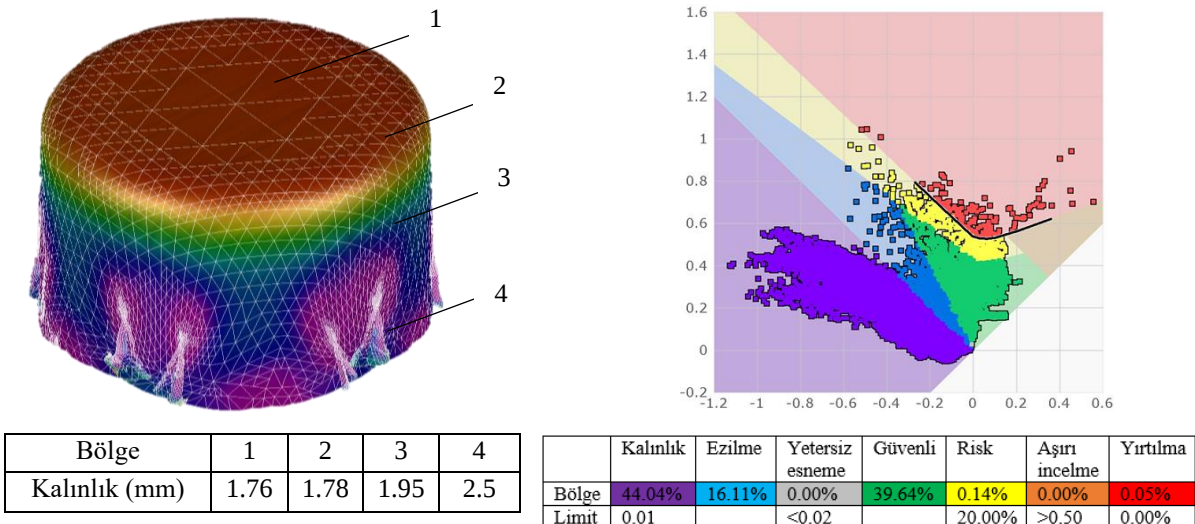


Şekil.4.23 11 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.21 11 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	309	296.1	14.5

Tablo 4.21'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.23'e 11. analiz sonuçlarına bakıldığında kalıp boşluğu az olduğu için derin çekme esnasında eteklerde cidar kalınlığı arttığı için yırtılma ve marullanma meydana gelmiştir.

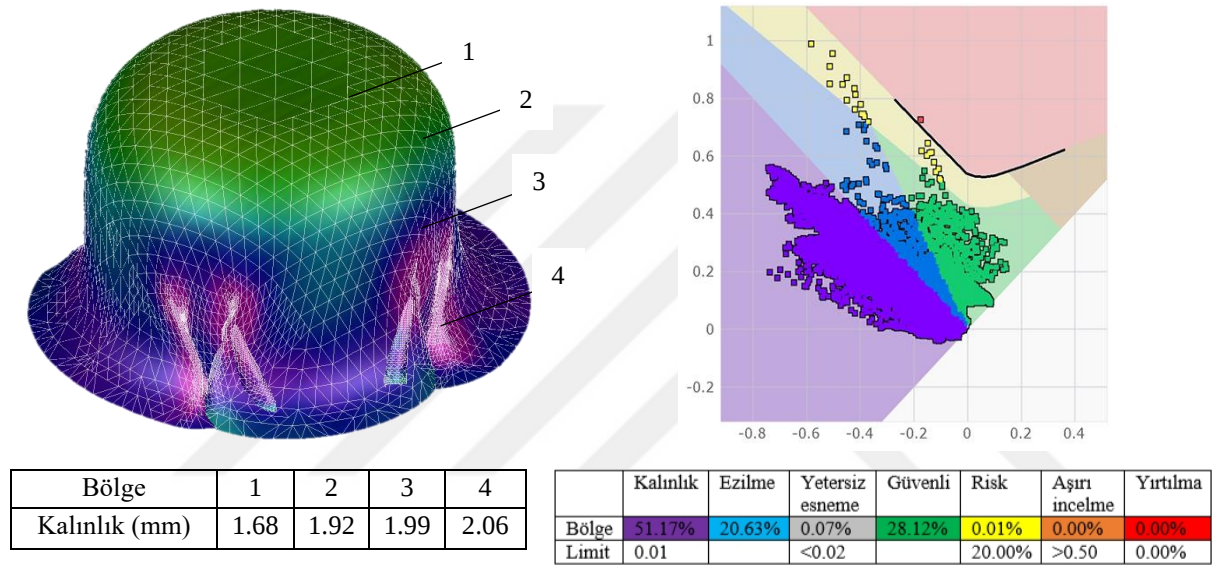


Şekil.4.24 12 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.22 12 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zimba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	330	330	0

Tablo 4.22'ye bakıldığında derin çekme işlemi sırasında dişi kalıp ve zimba üzerine gelen kuvvet eşit çıkmıştır. Şekil 4.24'te 12. analiz sonuçlarına bakıldığında kalıp modellemesinde kalıp boşluğu az kalıp kalıp derinliği fazla zimba yarıçapı küçük olduğu için analiz sırasında yırtılma, marullanma, çizilme, kulaklanma problemlerinin hepsi gözlemlenmiştir.

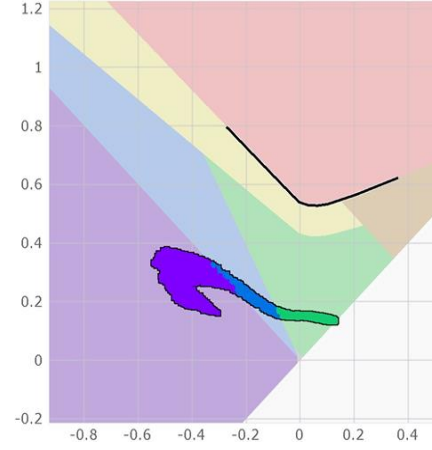
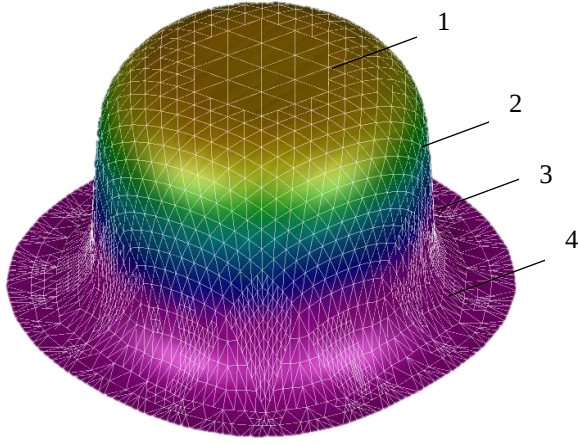


Şekil.4.25 13 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.23 13 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zimba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	266.7	262.9	78.3

Tablo 4.23'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.25'te 13. analiz sonuçlarına bakıldığında kalıp tasarım modellemesinde kalıp boşluğu fazla verildiği için parçada kulaklanma, çizilme ve marullanma problemleri olmuştur. Aynı zamanda kıvrılan bölgelerden yırtılmaya başlangıcı seviyesine ulaşmıştır.



Bölge	1	2	3	4
Kalınlık (mm)	1.55	1.72	1.98	2.38

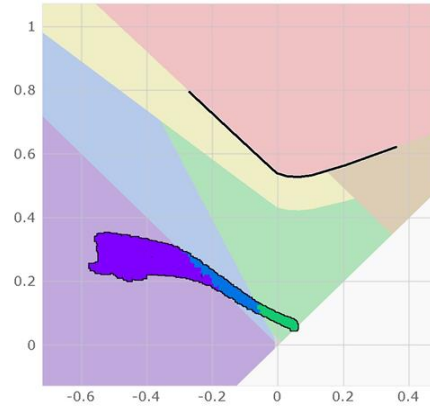
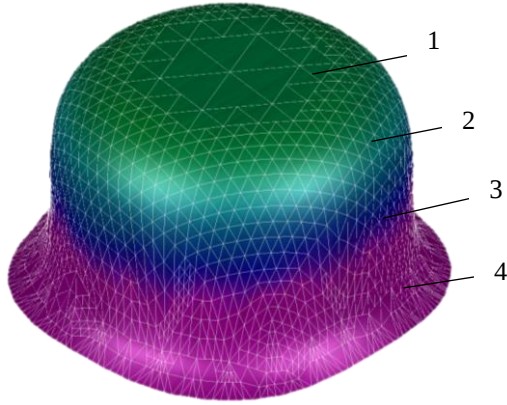
	Kalınlık	Ezilme	Yetersiz esneme	Güvenli	Risk	Aşırı inceleme	Yırtılma
Bölge	52.67%	14.96%	0.00%	32.37%	0.00%	0.00%	0.00%
Limit	0.01		<0.02		20.00%	>0.50	0.00%

Şekil.4.26 14 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.24 14 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	560	333.5	227.9

Tablo 4.24'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.26'ya 14. analiz sonuçlarına bakıldığında parça derin çekmesi uygun şekilde gerçekleşmiştir.



Bölge	1	2	3	4
Kalınlık (mm)	1.81	1.9	2	2.6

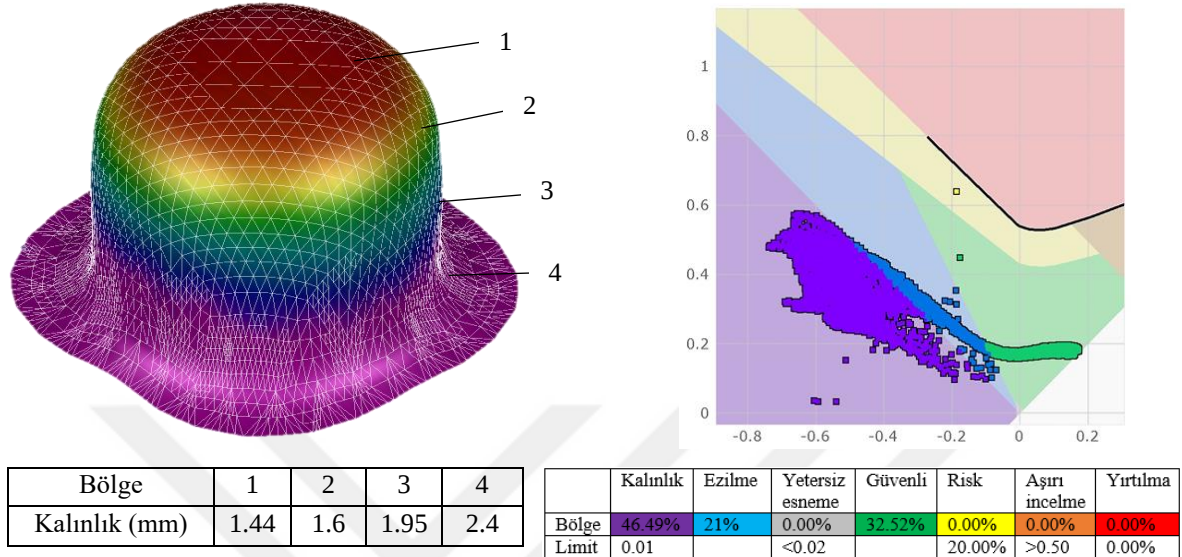
	Kalınlık	Ezilme	Yetersiz esneme	Güvenli	Risk	Aşırı inceleme	Yırtılma
Bölge	50.54%	17.75%	0.00%	31.71%	0.00%	0.00%	0.00%
Limit	0.01		<0.02		20.00%	>0.50	0.00%

Şekil.4.27 15 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.25 15 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	289.7	214.4	76.7

Tablo 4.25'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.27'de 15. analiz sonuçlarına bakıldığında parça derin çekmesi uygun şekilde gerçekleşmiştir.

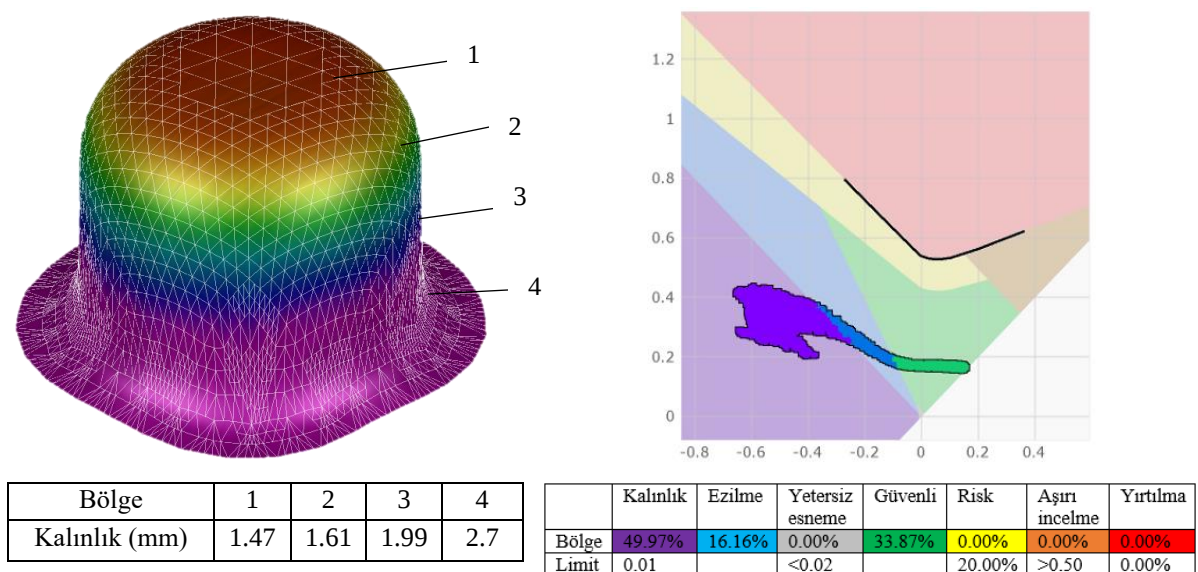


Şekil.4.28 16 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.26 16 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	541.7	323.4	224.5

Tablo 4.26'ya bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.28'de 16. analiz sonuçlarına bakıldığında derin çekme sırasında kalıp boşluğu yetersiz geldiği için marullanma meydana gelmiştir.

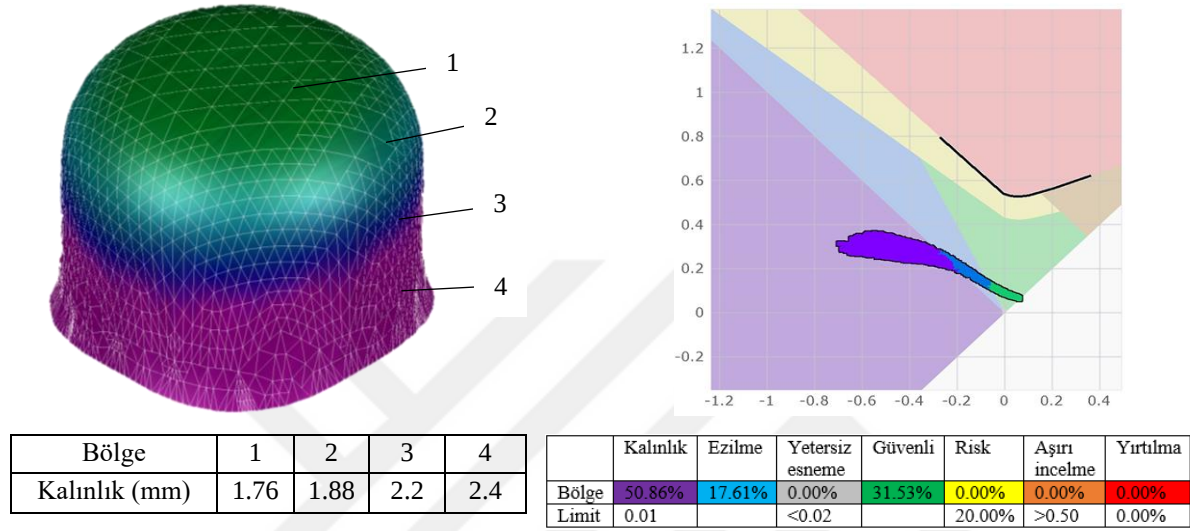


Şekil.4.29 17 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.27 17 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	540.9	332	214.3

Tablo 4.27'ye bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.29'da 17. analiz sonuçlarına bakıldığında parça derin çekme işlemi uygun şekilde gerçekleşmiştir.

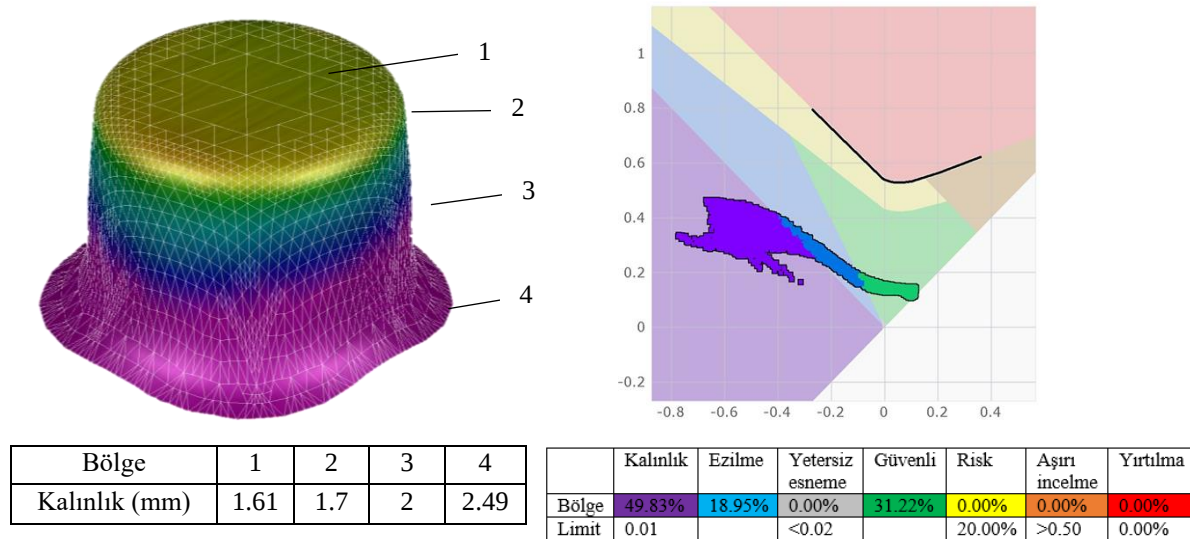


Şekil.4.30 18 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.28 18 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	228.6	200.3	28.8

Tablo 4.28'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.30'da 18. analiz sonuçlarına bakıldığında parça derin çekme işlemi uygun şekilde gerçekleşmiştir.

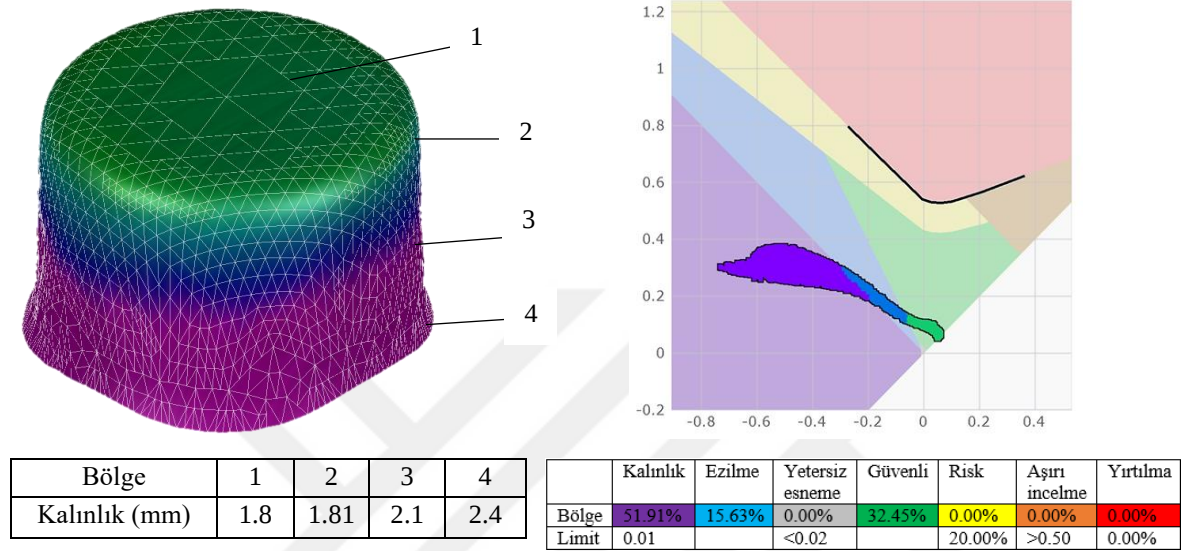


Şekil.4.31 19 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.29 19 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	285.4	254.5	44.3

Tablo 4.29'a bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.31'de 19. analiz sonuçlarına bakıldığında kalıp tasarımında kalıp boşluğu fazla olduğu için kulaklanma meydana gelmiştir.

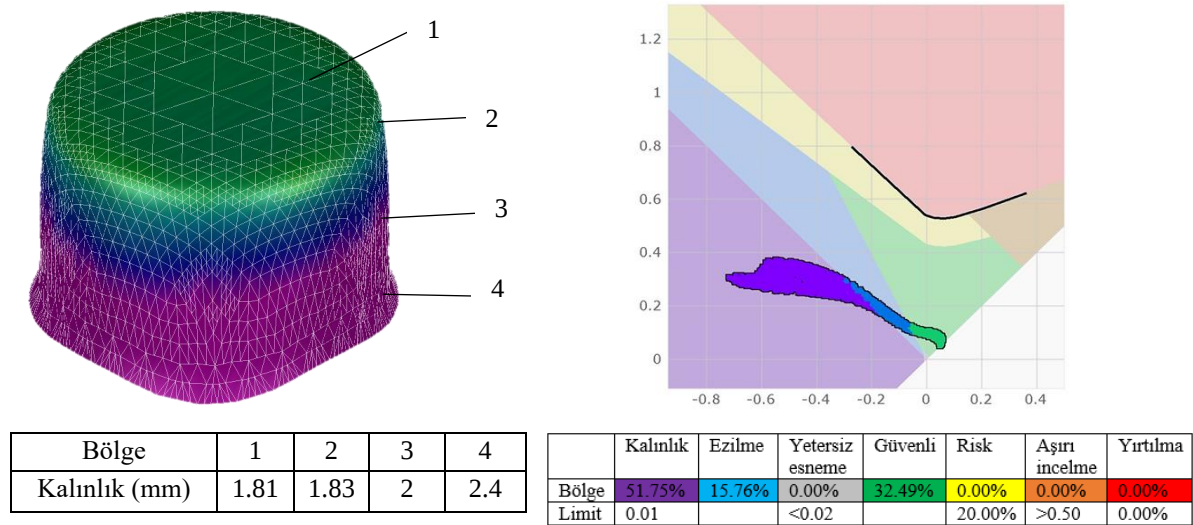


Şekil.4.32 20 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.30 20 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	238.5	212.5	25.5

Tablo 4.30'a bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.32'de 20. analiz sonuçlarına bakıldığında parça derin çekme işlemi uygun şekilde gerçekleşmiştir.

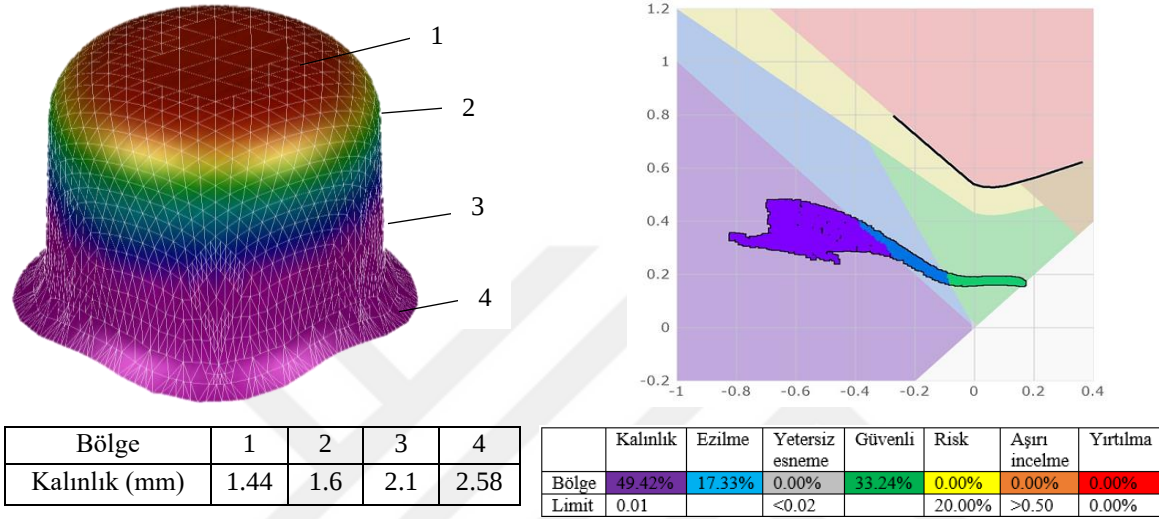


Şekil.4.33 21 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.31 21 nolu analizde oluşan max kuvvetler

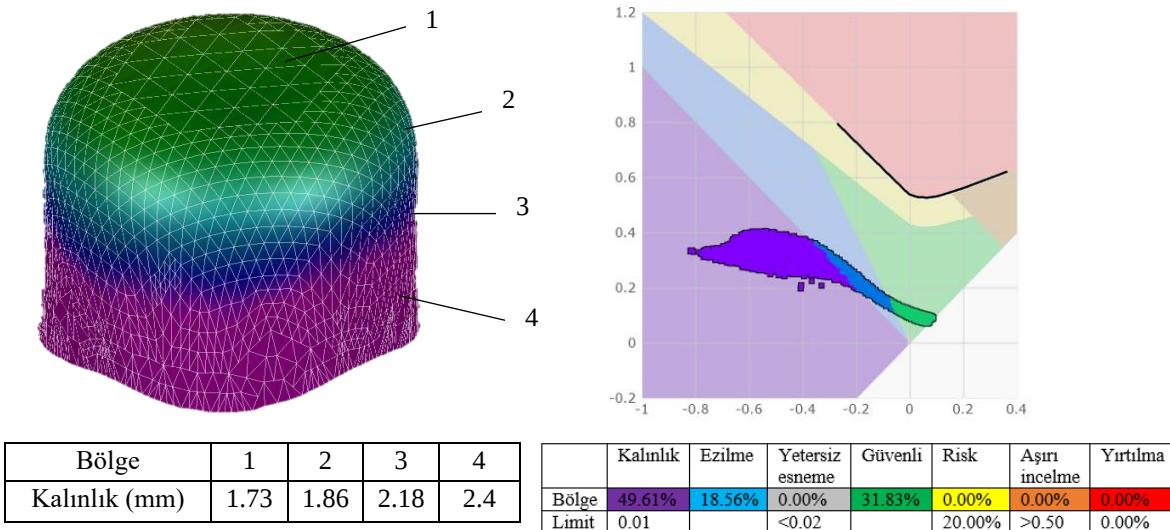
	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	247.8	220.8	26.9

Tablo 4.31'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.33'te 21. analiz sonuçlarına bakıldığında parça derin çekme işlemi uygun şekilde gerçekleşmiştir.

**Şekil.4.34** 22 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı**Tablo 4.32** 22 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	290.9	264.7	26.5

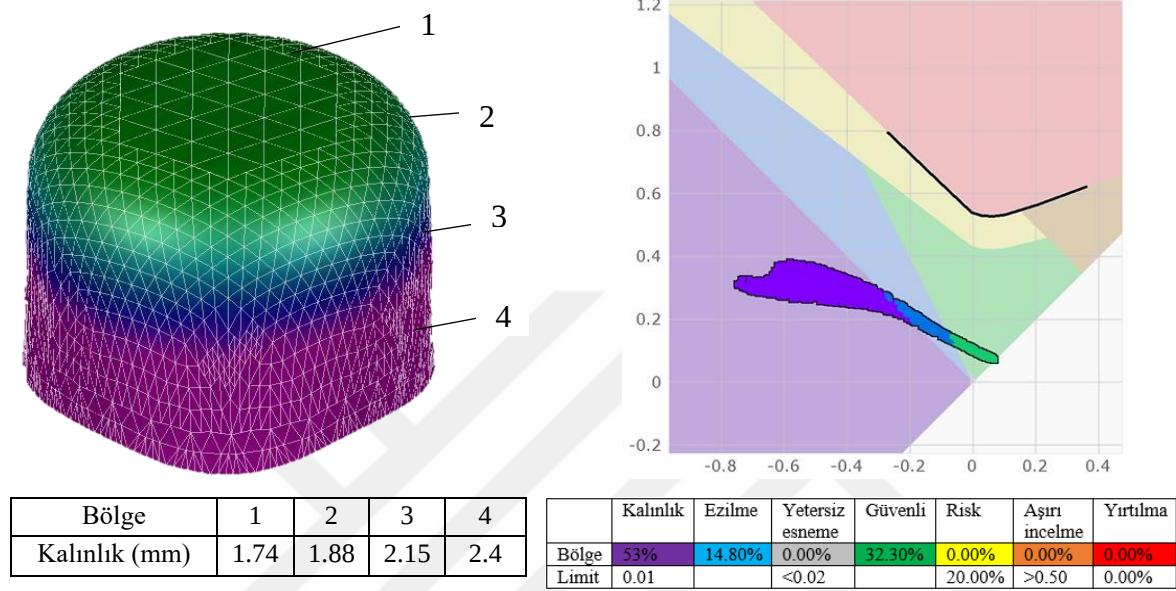
Tablo 4.31'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.34'te 22. analiz sonuçlarına bakıldığında parça derin çekme işlemi uygun şekilde gerçekleşmiştir.

**Şekil.4.35** 23 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.33 23 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	254.8	226.2	28.4

Tablo 4.33'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.35'te 23. analiz sonuçlarına bakıldığında kalıp tasarımında kalıp boşluğu yetersiz olduğu için kulaklanma problemi olmuştur.

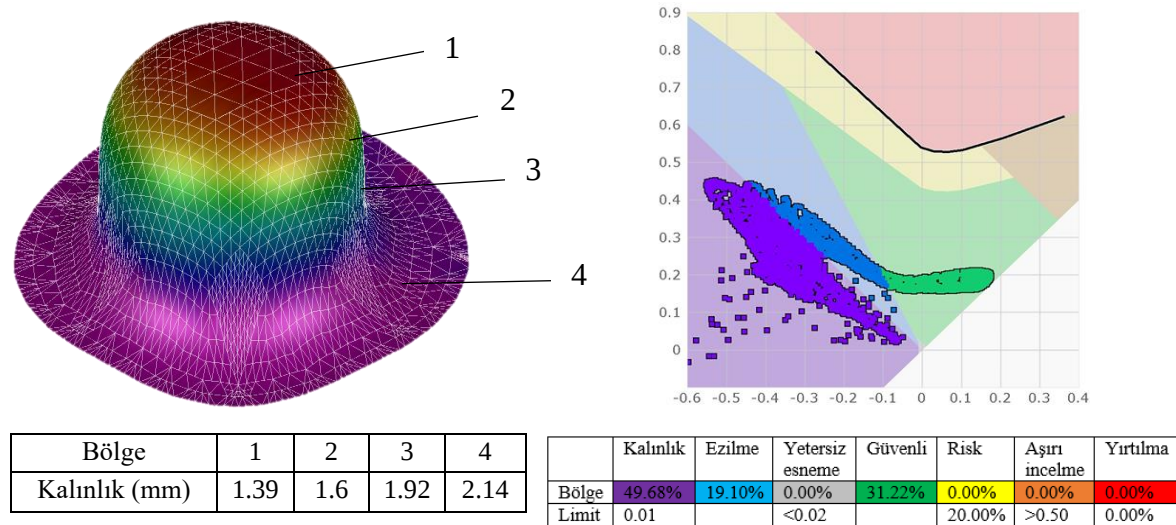


Şekil.4.36 24 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.34 24 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	253.4	228.2	25.5

Tablo 4.34'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.36'da 24. analiz sonuçlarına bakıldığında parça derin çekme işlemi uygun şekilde gerçekleşmiştir.

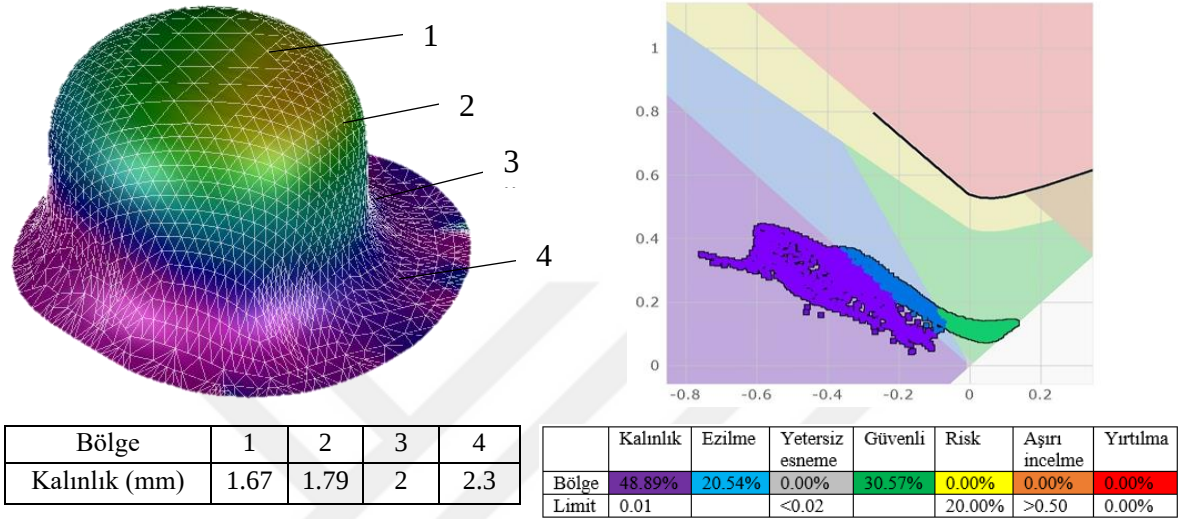


Şekil.4.37 25 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.35 25 nolu analizde oluşan max kuvvetler

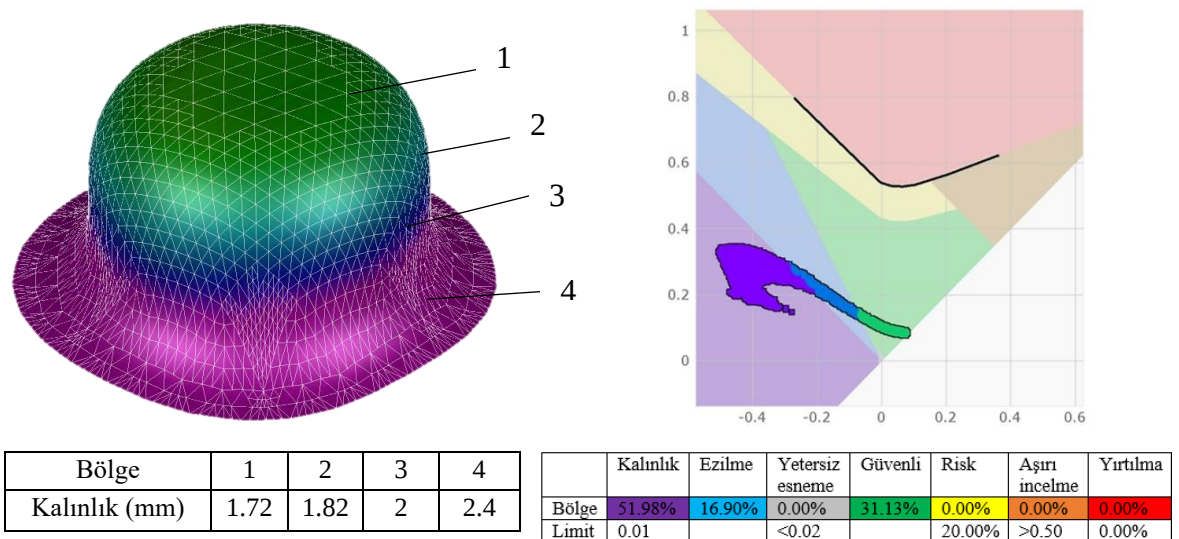
	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	498.4	289.6	211.2

Tablo 4.35'e bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.37'de 25. analiz sonuçlarına bakıldığında kalıp tasarımında kalıp boşluğu yetersiz ve pod çapı büyük olduğu için kulaklanma ve marullanma problemi olmuştur.

**Şekil.4.38** 26 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı**Tablo 4.36** 26 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	366.3	241.6	125.1

Tablo 4.36'ya bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur. Şekil 4.38'de 26. analiz sonuçlarına bakıldığında kalıp tasarımında kalıp boşluğu yetersiz ve pod çapı büyük olduğu için kulaklanma ve marullanma problemi olmuştur.

**Şekil.4.39** 27 nolu analize ait görsel ve FLD diyagramı

Tablo 4.37 27 nolu analizde oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	404.3	266.4	138.1

Tablo 4.37'ye bakıldığında derin çekme işlemi sırasında en fazla kuvvet dişi kalıp üzerinde oluşmuştur.Şekil 4.39'da 27. analiz sonuçlarına bakıldığında parça derin çekme işlemi uygun şekilde gerçekleşmiştir.

Yapılmış olan 27 farklı analize ait olan sonuçlar aşağıdaki Tablo 5 a ve b'de verilmiştir. Kalınlıkları verilmiş olan her analiz için S/N değeri hesaplanacaktır. Hesaplanan S/N değerlerine göre istenilen iş parçasına en uygun kalıp modellemesi ve parametrelerin etkisi görülecektir.

5.SAYISAL BULGULAR

Yapılan çalışmaya ait sayısal bulgular Tablo 5.1 a ve b’de verilmiştir.

Tablo 5.1 a) Deneysel tasarımlar

Analiz sırası	GİRDİLER					
	Dişi kalıp yarıçapı (mm)	Zımba yarıçapı (mm)	Kalıp boşluğu (mm)	Kalıp derinliği (mm)	Zımba çapı (mm)	Pod çapı (mm)
1	2	6	1	50	65	140
2	2	6	1	50	67	145
3	2	6	1	50	70	147
4	2	16	0,7	60	65	140
5	2	16	0,7	60	67	145
6	2	16	0,7	60	70	147
7	2	20	2,7	70	65	140
8	2	20	2,7	70	67	145
9	2	20	2,7	70	70	147
10	10	6	0,7	70	65	145
11	10	6	0,7	70	67	147
12	10	6	0,7	70	70	140
13	10	16	2,7	50	65	145
14	10	16	2,7	50	67	147
15	10	16	2,7	50	70	140
16	10	20	1	60	65	145
17	10	20	1	60	67	147
18	10	20	1	60	70	140
19	15	6	2,7	60	65	147
20	15	6	2,7	60	67	140
21	15	6	2,7	60	70	145
22	15	16	1	70	65	147
23	15	16	1	70	67	140
24	15	16	1	70	70	145
25	15	20	0,7	50	65	147
26	15	20	0,7	50	67	140
27	15	20	0,7	50	70	145

Tablo 5.1 b) Analiz çıktı sonuçları

ÇIKTILAR								
Analiz sırası	Yırtılma	Marullanma	Çizilme	Kulaklanma	T1 (mm)	T2 (mm)	T3 (mm)	T1 (mm)
1	10	1	1	1	0,9	0,99	1,78	2,25
2	10	1	1	1	1,48	1,59	1,8	2,2
3	10	10	1	1	1,55	1,64	1,86	2,24
4	10	10	1	1	1,3	1,48	1,78	2,1
5	10	10	1	1	0,93	1,13	1,81	2,25
6	10	1	1	1	1,45	1,5	1,78	2,1
7	10	1	1	1	0,94	1,14	1,87	2,33
8	1	10	1	1	0,7	0,89	1,84	2,21
9	10	10	1	1	1,16	1,23	1,81	2,29
10	10	10	1	1	1,52	1,44	1,85	2,34
11	10	10	1	10	1,51	1,6	1,87	2,55
12	10	10	10	10	1,76	1,78	1,95	2,5
13	1	10	10	10	1,68	1,92	1,99	2,06
14	1	1	1	1	1,55	1,72	1,98	2,38
15	1	1	1	1	1,81	1,9	2	2,6
16	1	10	1	1	1,44	1,6	1,95	2,4
17	1	1	1	1	1,47	1,61	1,99	2,7
18	1	1	1	1	1,76	1,88	2,2	2,4
19	1	1	1	10	1,61	1,7	2	2,49
20	1	1	1	1	1,8	1,81	2,1	2,4
21	1	1	1	1	1,81	1,83	2	2,4
22	1	1	1	1	1,44	1,6	2,1	2,58
23	1	1	1	10	1,73	1,86	2,18	2,4
24	1	1	1	1	1,74	1,88	2,15	2,4
25	1	10	1	10	1,39	1,6	1,92	2,14
26	1	10	1	10	1,67	1,79	2	2,3
27	1	1	1	1	1,72	1,82	2	2,4

Analiz sonucunda yırtılma, marullanma, çizilme, kulaklanma ve kalınlık ölçümü gibi birden fazla değişkeni kullanarak tek bir hedef noktası oluşturulmak için amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Burada her değişkenin etkisini ölçmek için hatalı olarak kabul edilen parçaların değerlerine 10 yazılmıştır. Hatalı olmayan durumlara ise 1 yazılmıştır. Bunlar göz önünde bulundurularak hesaplamalar yapılmıştır.

$$J = Y \times M \times \text{Ç} \times K \times (|2-t_1| + |2-t_2| + |2-t_3| + |2-t_4|) \quad (5.1)$$

J: İş Y: yırtılma M: marullanma Ç: çizilme K: kulaklanma t_1, t_2, t_3, t_4 : cidar kalınlığı

2: iş parçası sac kalınlık sabiti

Tablo 5.2 Amaç fonksiyon değerleri

Analiz sırası	ÇIKTILAR								
	Yırtılma	Marullanma	Çizilme	Kulaklanma	l 2- t1 l (mm)	l 2- t2 l (mm)	l 2- t3 l (mm)	l 2- t4 l (mm)	Y x M x Ç x K x (T1+T2+T3+T4)
1	10	1	1	1	1,1	1,01	0,22	0,25	25.80
2	10	1	1	1	0,52	0,41	0,2	0,2	13.30
3	10	10	1	1	0,45	0,36	0,14	0,24	119
4	10	10	1	1	0,7	0,52	0,22	0,1	154
5	10	10	1	1	1,07	0,87	0,19	0,25	238
6	10	1	1	1	0,55	0,5	0,22	0,1	13.7
7	10	1	1	1	1,06	0,86	0,13	0,33	23.8
8	1	10	1	1	1,3	1,11	0,16	0,21	27.8
9	10	10	1	1	0,84	0,77	0,19	0,29	209
10	10	10	1	1	0,48	0,56	0,15	0,34	153
11	10	10	1	10	0,49	0,4	0,13	0,55	1570
12	10	10	10	10	0,24	0,22	0,05	0,5	10100
13	1	10	10	10	0,32	0,08	0,01	0,06	470
14	1	1	1	1	0,45	0,28	0,02	0,38	1.13
15	1	1	1	1	0,19	0,1	0	0,6	0.89
16	1	10	1	1	0,56	0,4	0,05	0,4	14.1
17	1	1	1	1	0,53	0,39	0,01	0,7	1.63
18	1	1	1	1	0,24	0,12	0,2	0,4	0.96
19	1	1	1	10	0,39	0,3	0	0,49	11.80
20	1	1	1	1	0,2	0,19	0,1	0,4	0.89
21	1	1	1	1	0,19	0,17	0	0,4	0.76
22	1	1	1	1	0,56	0,4	0,1	0,58	1.64
23	1	1	1	10	0,27	0,14	0,18	0,4	9.9
24	1	1	1	1	0,26	0,12	0,15	0,4	1.13
25	1	10	1	10	0,61	0,4	0,08	0,14	123
26	1	10	1	10	0,33	0,21	0	0,3	84
27	1	1	1	1	0,28	0,18	0	0,4	0.86

Yapılan analizlere denklem 5.1'deki uygulanan amaç fonksiyonu değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Hata olan analizlerde değer elde edebilmek için hatalı olan durumlara 10 yazılıp hata olmayan durumlar ise 1 yazılmıştır.

Tablo 5.2'deki verilere göre en uygun kalıp tasarım modellemesi yapılabilmesi için hata durumu ile karşılaşılmayan parametreler Tablo 5.3'de girdiler ve Tablo 5.4'te çıktılar olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.3 Hata olmayan parametreler girdiler

Analiz sırası	GİRDİLER					
	Dişi kalıp yarıçapı (mm)	Zımba yarıçapı (mm)	Kalıp boşluğu (mm)	Kalıp derinliği (mm)	Zımba çapı (mm)	Pod çapı (mm)
14	10	16	2,7	50	67	147
15	10	16	2,7	50	70	140
17	10	20	1	60	67	147
18	10	20	1	60	70	140
20	15	6	2,7	60	65	147
21	15	6	2,7	60	67	140
22	15	6	2,7	60	70	145
24	15	16	1	70	65	147
27	15	16	1	70	70	145

Tablo 5.4 Hata olmayan parametreler çıktılar

Analiz sırası	ÇIKTILAR							
	Yırtılma	Marullanma	Çizilme	Kulaklanma	T1 (mm)	T2 (mm)	T3 (mm)	T1 (mm)
14	1	1	1	1	1.55	1.72	1.98	2.38
15	1	1	1	1	1.81	1.9	2	2.6
17	1	1	1	1	1.47	1.61	1.99	2.7
18	1	1	1	1	1.76	1.88	2.2	2.4
20	1	1	1	1	1.8	1.81	2.1	2.4
21	1	1	1	1	1.81	1.83	2	2.4
22	1	1	1	1	1.44	1.6	2.1	2.58
24	1	1	1	1	1.74	1.88	2.15	2.4
27	1	1	1	1	1.72	1.82	2	2.4

Belirlenen parametreler sonucunda, hatasız ve istenilen ölçülerde uygun kalıp modelinin bulunabilmesi için kalınlık ölçümünü kullanarak aşağıdaki amaç fonksiyonu tanımlanmıştır.

$$J = (| 2-t_1 | + | 2-t_2 | + | 2-t_3 | + | 2-t_4 |) \quad (5.2)$$

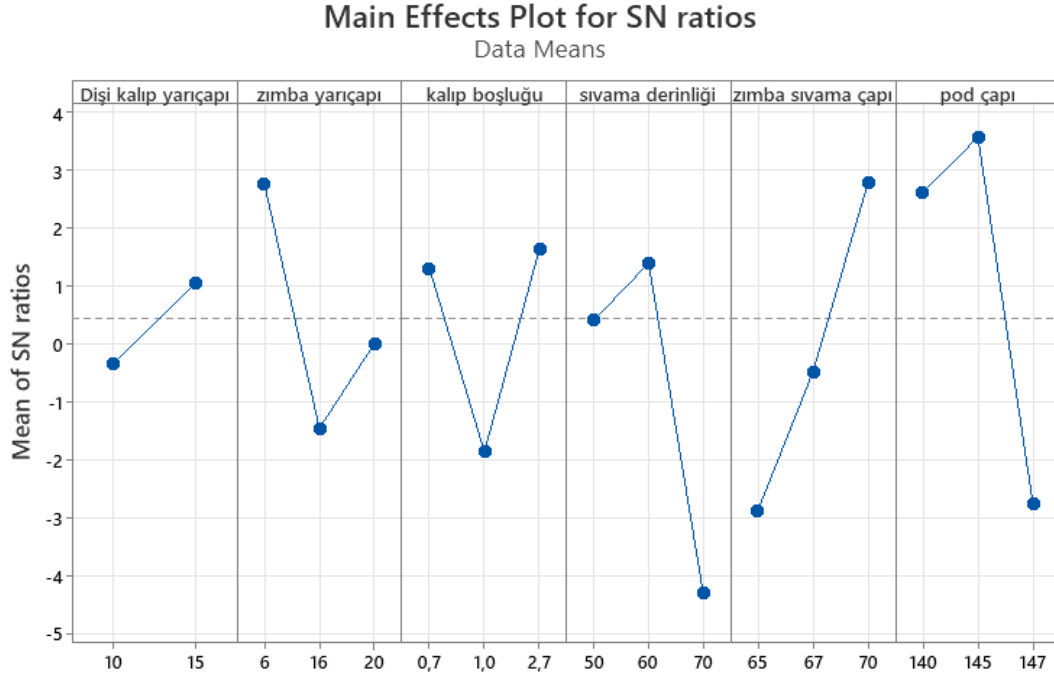
t_1, t_2, t_3, t_4 : cidar kalınlığı 2: iş parçası sac kalınlık sabiti

Yapılan analizlere denklem 5.2'deki uygulanan amaç fonksiyonu değerleri Tablo 5.5' de verilmiştir.

Tablo 5.5 Amaç fonksiyon sonuçları

Analiz sırası	$ 2-t_1 $ (mm)	$ 2-t_2 $ (mm)	$ 2-t_3 $ (mm)	$ 2-t_4 $ (mm)	$(2-t_1 + 2-t_2 + 2-t_3 + 2-t_4)$ (mm)
14	0,45	0,28	0,02	0,38	1,13
15	0,19	0,1	0	0,6	0,89
17	0,53	0,39	0,01	0,7	1,63
18	0,24	0,12	0,2	0,4	0,96
20	0,2	0,19	0,1	0,4	0,89
21	0,19	0,17	0	0,4	0,76
22	0,56	0,4	0,1	0,58	1,64
24	0,26	0,12	0,15	0,4	1,13
27	0,28	0,18	0	0,4	0,86

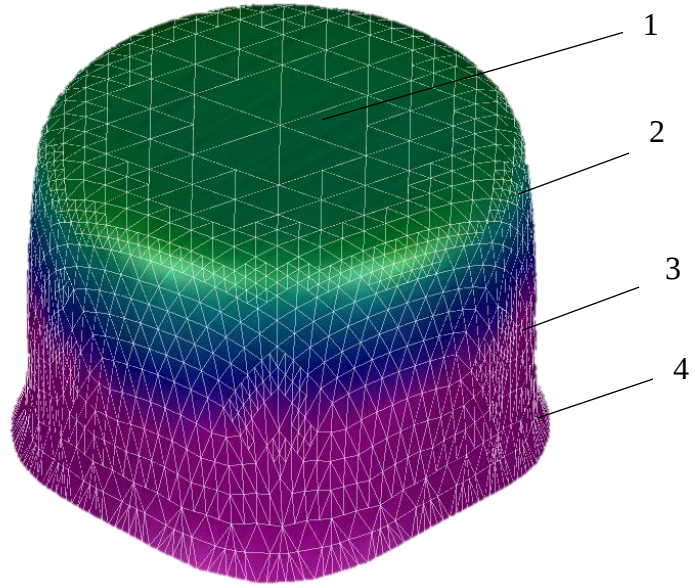
Tablo 5.3’de belirlenen girdi değerleri ve Tablo 5.4’te bulunan çıktı değerleri ile Tablo 5.5’te verilen sonuç değerleri ile Minitab programında Taguchi methodunda analiz edilmiştir. Analiz sonucunda S/N değerleri Şekil 5.1’te verilmiştir.



Şekil 5.1 Minitap optimum parametre seçim grafiği

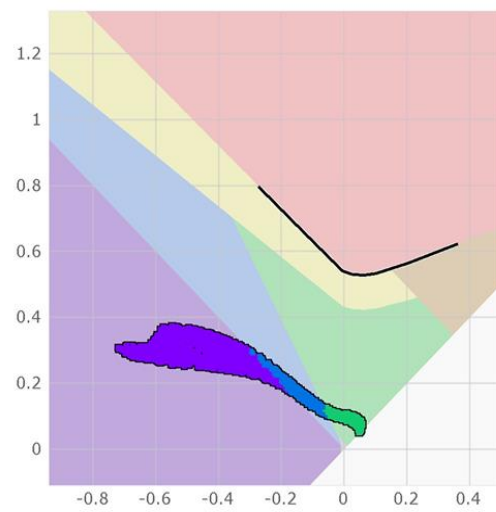
Yapılan Taguchi analizi sonucunda kalıp tasarımında max değerler alınmıştır. Dişi kalıp yarıçapı 15 mm , zımba yarıçapı 6 mm , kalıp boşluğu 2.7 mm , kalıp derinliği 60 mm , zımba çapı 70 mm , pod çapı 145 mm olarak bulunmuştur.

Bulunan değerler ile kalıp tasarım parametreleri, kalıp modellemesine yansıtılarak programında analiz edilmiştir. Analize ait FLD diyagramı ve cidar incelme görseli aşağıdaki Şekil 5.2.a ve b’de verilmiştir.



Bölge	1	2	3	4
Kalınlık (mm)	1.81	1.95	2.1	2.4

Şekil 5.2 a) Bulunan değerlere göre yapılan analiz



	Kalınlık	Ezilme	Yetersiz esneme	Güvenli	Risk	Aşırı incelme	Yırtılma
Bölge	51.75%	15.76%	0.00%	32.49%	0.00%	0.00%	0.00%
Limit	0.01		<0.02		20.00%	>0.50	0.00%

Şekil 5.2 b) Bulunan değerlere göre yapılan analizin FLD diyagramı

Tablo 5.6 Bulunan değerlere göre oluşan max kuvvetler

	Dişi Kalıp	Zımba	Pod kalıbı
Oluşan max kuvvet (kN)	247.8	220.8	26.9

Yapılan analiz sonucunda parçada yırtılma, kulaklanma, çizilme, marullanma gibi hatalar görülmemektedir. Bulunan değerlere göre max kuvvet dişi kalıpta oluşmuştur.

Yapılan analiz değerlerine göre Denklem 5.2'deki amaç fonksiyonu S/N oranından hesaplanan değerlere uygulanmış olup Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.7 a) S/N değerlerine göre uygulanan amaç fonksiyon girdi parametreleri

Analiz sırası	GİRDİLER					
	Dişi kalıp yarıçapı (mm)	Zımba yarıçapı (mm)	Kalıp boşluğu (mm)	Kalıp derinliği (mm)	Zımba çapı (mm)	Pod çapı (mm)
1	15	6	2.7	60	70	145

Tablo 5.7 b) S/N değerlerine göre uygulanan amaç fonksiyon çıktıları sonuçları

ÇIKTILAR							
Yırtılma	Marullanma	Çizilme	Kulaklanma	T1 (mm)	T2 (mm)	T3 (mm)	T1 (mm)
1	1	1	1	1.81	1.95	2.1	2.4

5.2 denklemindeki amaç fonksiyon çıktıları Tablo 5.7 b’de verilmiştir.

Tablo 5.8 S/N değerlerine göre uygulanan 5.2 denklem amaç fonksiyon çıktıları

l2-t1l (mm)	l2-t2l (mm)	l2-t3l (mm)	l2-t4l (mm)	(l 2-t1 l + l 2-t2 l + l 2-t3 l + l 2-t4 l) (mm)
0.19	0.05	0.1	0.4	0.74

S/N oranına göre belirlemiş olduğumuz optimum değerlerin doğruluğu ANOVA metodu ile hesaplanmıştır. Hesaplanan doğruluk değeri Tablo 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.9 Anova doğruluk oranı

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,25	86,08 %	62,87%	5,34%

ANOVA doğruluk hesabına göre model doğruluğu % 86.06 olarak bulunmuştur. Parametrelerin etkinlik oranları Varyans analizinde hesaplanmış ve Tablo 5.10’da verilmiştir.

Tablo 5.10 Varyans Analiz katkı oranları

Parametre	Katkı Yüzdesi	F	P
Dişi kalıp yarıçapı	2.56 %	0	1
Zımba yarıçapı	13.21 %	0.70	0.49
Kalıp boşluğu	2.24 %	0.12	0.76
Kalıpderinliği	29.32%	0.37	0.61
Zımba çapı	38.66 %	3.01	0.23
Pod çapı	5.25 %	1.20	0.39

S/N değerlerine göre yapılan Varyans analizinde her bir parametrenin katkı oranları hesaplanmıştır. En etkin parametre olarak %38.66 zımba çapı, %29.32 kalıp derinliği, %13.21

zımba yarıçapı, %5.25 pod çapı, %2.56 dişi kalıp yarıçapı, %2.24 kalıp boşluğu olarak bulunmuştur.

Tablo 5.11 S/N değerlerine göre oluşturulna Varyans Analizi

Parametre	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Dişi kalıp yarıçapı	1	0.01	0.01	0.04	0.85
Zımba yarıçapı	2	0.28	0.14	2.24	0.25
Zımba çapı	2	0.82	0.41	6.55	0.08
Hata	3	0.19	0.06		
Toplam	8	1.34			

S/N değerlerine göre yapılan Varyans analizinde en etkin parametre olarak 0.08 değeri ile zımba çapı bulunmuştur. 0.25 zımba yarıçapı ve 0.85 dişi kalıp yarıçapı olarak bulunmuştur. Tablo 5.11’da bulunan değerler verilmiştir.

6. SONUÇ

Sac şekillendirme metotlarından birisi olan derin çekme işleminde iş parçasının kalitesini arttırmak için kontrolü ve tahmin edilebilir olmasıdır. Derin çekme işleminde geliştirme çalışmaları yapılmış bir o kadar da geliştirilebilir bir alandır. Bu çalışmada derin çekme prosesine etki eden kalıp parametrelerinin farklı seviyelerdeki etkisi üzerinde çalışılmıştır.

Derin çekme operasyonuna etki eden bir çok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin en doğru şekilde verilmesi iş parçasının doğruluğunu etkilemektedir. Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile dişi kalıp yarıçapı, zımba yarıçapı, kalıp boşluğu, kalıp derinliği, zımba çapı, pod çapının derin çekilebilirlik ve iş parçası cidar kalınlığına olan etkisi gözlemlenmiştir.

Eski metotlarla deneme yanılma süreci oldukça zaman alabilir. CAD ortamında yapılan kalıp tasarımlarının analizleri, ilgili parametrelerin doğrudan geliştirilmesine olanak tanır, bu da daha hızlı ve maliyetsiz sonuçlar elde etmeyi sağlar. Eski metotlarla 729 analiz yapılması gerekirken L27 ortogonal düzeni kullanılarak sadece 27 adet analiz yapılmıştır. Yapılan analiz çalışmalarından hata ile karşılaşılmayan 9 adet deneyin girdi parametreleri alınmış ve Taguchi analizinden S/N oranına göre parametrelerine bakılmıştır.

Dişi kalıp yarıçapı 2 mm , 10 mm , 15 mm , zımba yarıçapı 6 mm , 16 mm , 20 mm , Kalıp boşluğu 0.7 mm , 1 mm , 2.7 mm , kalıp derinliği 50 mm , 60 mm , 70 mm , zımba çapı 65 mm , 67 mm , 70 mm , pod çapı 140 mm , 145 mm , 147 mm olacak şekilde 3 seviyede değerler verilmiştir. Analizler Autuform programı kullanılarak simüle edilmiştir. Bulunan kalınlık değerleri, yırtılma, çizilme, marullanma ve kulaklanma değerleri ile (Denklem 4.1 ve 4.2) amaç fonksiyonları ile bağdaştırılarak ve minimum S/N oranı ile bağdaştırılarak optimum parametre değerleri belirlenmiştir. Optimum parametre değerleri olarak dişi kalıp yarıçapı 15 mm , zımba yarıçapı 6 mm , kalıp boşluğu 2.7 mm , kalıp derinliği 60 mm , zımba çapı 70 mm , pod çapı 145 mm olarak belirlenmiştir.

Belirlenen parametrelerin model üzerindeki doğruluk oranı ANOVA metodu ile hesaplanmış ve %86,06 olarak bulunmuştur. S/N değerlerine göre hesaplanan Varyans analizinde en etkin parametre olarak %38.66 zımba çapı, %29.32 kalıp derinliği, %13.21 zımba yarıçapı, %5.25 pod çapı, %2.56 dişi kalıp yarıçapı, %2.24 kalıp boşluğu olarak bulunmuştur. S/N oranına göre parametrelerin birbiri arasındaki bağlantı incelendiğinde etkin parametre

olarak 0.080 zımba çapı, 0.25 zımba yarıçapı, 0.85 olarak diři kalıp yarıçapı bulunmuştır. Burada değerlerin anlamlı olabilmesi için 0.05 değerine ne kadar yakınsa birbiri ile o kadar bağlantılıdır. Bu bilgiler dahilinde en dūřuk en etkin parametredir.

Yapılan çalışmaya bakıldığında derin çekme işlemine etkileyen parametrelerden dişi kalıp yarıçapı ve zımba yarıçapı bŸyŸdŸke derin çekme işlemi kolaylaşmaktadır. Kalıp boşluğu iş parçasının 1.1 veya 1.5 katı aralığında daha uygun olduğu gŸzlemlenmiřtir. Kalıp derinliği dŸřŸp, zımba çapı bŸyŸdŸke derin çekme işlemi daha kolay yapılabilir.

Derin ekme işlemi kompleks bir yapıya sahip olduğu için birçok parametre etkisi altındadır. Bu nedenle, yapılacak çalışmalarda seçilecek parametrelerin detaylı olması, daha doğru sonuçları sağlayacaktır. Yapılan işlemin sanal ortamda olması ve analiz sayısının az olması zaman ve maliyet açısından bŸyŸk önem taşımaktadır.

İlerleyen çalışmalarda farklı deneysel tasarım yöntemleri ve farklı parametrelerle geliştirilmeye açık bir alandır.

7.KAYNAKLAR

- Arslan, V. (2021). Paslanmaz çelik sacların derin çekilebilirlik kabiliyetlerinin sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi (Master's thesis, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Anonim,2024a, Bor yağı, <https://www.apetpetrol.com/bor-yagi/> , [Ziyaret tarihi : 15.06.2024]
- Anonim,2024b, Sonlu elemanlar yönteminde implicit vs explicit yaklaşım, <https://yasincapar.com/tr/sonlu-elemanlar-yontemde-implicit-vs-explicit-yaklasimi> 2024 [Ziyaret tarihi : 15.07.2024]
- Anonim,2024c, Mesh atmanın sırları,<https://medium.com/@muhendisinnotdefteri/g%C3%BCzel-mesh-atmanin-sirlari-aab9837f18b8>, [Ziyaret tarihi : 20.06.2024]
- Ballıkaya, H., Savaş, V., & Çetin, Özay (2023). Kalıp Yüzeyi Açılı Hidro-Mekanik Derin Çekme Yönteminde Sac Kalınlığı Ve Zimba Kuvvetinin İncelenmesi. El-Cezeri , 10 (3), 475-491.
- Civelek, F., & Özdemir, A. Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirlik kriterlerinin değerlendirilmesi. Politeknik Dergisi , 1-1.
- Edis, R. (2022). Kalıp Malzemesine Uygulanan Isıl İşlem ve Yüzey Kaplamalarının Sac Şekillendirme Etkileri (Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Erbaş, O. (2014). Experimental and Numerical Analysis of Deep Drawability of Aluminium alloys AA5754-H22 and AA6061-T6, Fakultät Maschinenbau, Master of Science in Manufacturing Technology, Master Thesis
- Erbilir, G. (2021). Yüksek Mukavemetli Sacların Şekillendirilmesinde Meydana Gelen İncelemenin Etüd Edilmesi (Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Güneşgörmez, G. Sac metal ölçü tasarımına etki edenlerin incelenmesi ve simülasyonu (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Gürbüz, E. (2022). Otomotiv endüstrisinde kullanılan sacların şekillenebilirliğine farklı yağlayıcıların etkisi (doktora tezi).
- Gürün, H. (2008). Derin çekme kalıplarındaki parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini (Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kap, E. (2022). Alüminyum Sac Parçaların Derin Çekme Proses Optimizasyonu (Doktora tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi (Türkiye)).
- Koçar, O. (2014). Derin çekme işleminde ürün kalitesinin tahmini ve kontrolü, Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitim Anabilim Dalı, Doktora tezi
- Lee, S., Lim, Y., Galdos, L., Lee, T., & Quagliato, L. (2024). Gaussian process regression-driven deep drawing blank design method. International Journal of Mechanical Sciences, 265, 108898.

- Leelaseat, J., Larprasoetkun, P., Sunanta, A., Nakwattanaset, A., & Suranuntchai, S. (2024). Investigation on the Effect of Blank Holder Force and Initial Blank Size on the Thinning Problem of the Fuel Tank Part Made from Aluminum Alloy Sheet 5754-O under Deep Drawing Process. *Key Engineering Materials*, 973, 101-107.
- Lin, B. T., Liu, K. W., Li, T. C., Li, P. H., & Kuo, C. C. (2023). Motion profile optimization of servo press in deep drawing process of SUS 304 stainless steel sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(9), 4181-4198.
- Meral, G., SARIKAYA, M. ve Dilipak, H. (2011). Delme işlemlerinin kesilmesinin Taguchi yöntemiyle değiştirilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 27 (4), 332-338.
- Ozül S, Derin çekme işlemlerinde kırışma analizi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü , Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek lisans tezi
- Özbek, R. ve Gül, O. (2023, Haziran). Yarıçapın Derin Çekme Gerilme Analizine Etkisi. *Uluslararası Öncü ve Yenilikçi Çalışmalar Konferansı'nda* (Cilt 1, s. 374-378).
- Özkan, U. (2022) Östenitik Paslanmaz Çelik Sacların Kare Kap Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi ve İşlem Parametrelerinin Şekillendirilebilirliğine Etkisinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Reddy, a. C. S. Optimisation of parameters and evaluation of limiting drawing ratio in deep drawing.
- Sattari, H., Sedaghati, R., & Ganesan, R. (2007). Analysis and design optimization of deep drawing process: Part II: Optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1-3), 84-92.
- Süzen, M. (2019). Traktör emniyet aralıklarının korunması kullanılan yapısal sac malzemelerin şekillendirilmesinin sonlu elemanların yönetimi ile analizi (Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Subramanian, M. Investigation on micro deep drawing process of stainless steel 316 and 430 foils.
- Taşkın, A., & Dengiz, C. G. (2024). Experimental and numerical optimization of deep drawing process parameters for square medical container design with the Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(5), 2643-2659.
- Tavşanlı, H. (2022) 304 Paslanmaz Çelik Soğuk Sac Şekillendirme Parça Özelliklerinin İyileştirilmesi ve İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Taylan, D. (2009). Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Isparta
- Van Dinh, D., Van Nguyen, S., Pham, A. N., Van Nguyen, L., & Do, V. D. (2024). Investigation and establishment of rational geometric factors of die in the deep drawing without a blank holder. *EUREKA: Physics and Engineering*, (1), 105-115.

- Wifi, A. S., Abdelmaguid, T. F., & El-Ghandour, A. I. (2007, October). A review of the optimization techniques applied to the deep drawing process. In Proceedings of the 37th international conference on computers and industrial engineering (pp. 1111-1121).
- Yalçın, C. (2021). Derin çekmede iş malzemesi ve proses parametrelerinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- YILMAZ, Ş., & DOĞAN, U. Progresif kalıpla derin çekme süreçlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi ve optimizasyonu.
- Zhao, J., Zhang, K., Ma, X., & Zhang, J. (2024). Study on the formability of copper foils during multi-step micro deep drawing. Journal of Materials Research and Technology, 28, 2187-2198.

