



T.C.  
Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü

**ALÜMİNYUM SAC PARÇALARIN  
DERİN ÇEKME PROSES  
OPTİMİZASYONU**

**Ezgi KAP**

Yüksek Lisans Tezi



**ALÜMİNYUM SAC PARÇALARIN DERİN ÇEKME  
PROSES OPTİMİZASYONU**

**Ezgi KAP**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM SAC PARÇALARIN DERİN ÇEKME PROSES  
OPTİMİZASYONU**

Ezgi KAP  
0000-0002-6380-9013

Prof. Dr. Necmettin KAYA  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022  
Her Hakkı Saklıdır

## ÖZET

Yüksek Lisans

ALÜMİNYUM SAC PARÇALARIN DERİN ÇEKME PROSES OPTİMİZASYONU

**Ezgi KAP**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Necmettin KAYA

Şekillenebilirliği ölçmenin yollarından biri, parçaların derin çekilebilirlik özelliklerini bulmaktır. Sac metal şekillendirilme yöntemleri içerisinde derin çekme önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada, derin çekme proses parametrelerinden, kalıp yarıçapı, zımba yarıçapı ve baskı kuvvetinin AA 6061 sacının derin çekme işlemi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Proses parametrelerinin etkisini belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi ve Taguchi analizi birlikte kullanılmıştır. Simülasyonlar, Autoform yazılımı kullanılarak ortogonal diziye göre gerçekleştirilmiştir. Derin çekilmiş kapların tahmin edilen deformasyonuna ve varyans testinin (Anova) analizine dayanarak, alüminyum malzemenin şekillendirilebilirliği üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametre belirlenmiştir. Prosese en çok etkisi olan parametre %34,43 ile baskı kuvvetidir. Zımba yarıçapı ve kalıp yarıçapının da sırasıyla %31,21, %27,67 etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum derin çekme, Taguchi, Parametre optimizasyonu, Varyans Analizi

**2022, vii + 38 pages.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

DEEP DRAWING PROCESS OPTIMIZATION OF ALUMINIUM SHEET METALS

**Ezgi KAP**

Bursa Uludag University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Necmettin KAYA

One of the ways to measure formability is to find the deep drawability properties of parts. Deep drawing has an important place in sheet metal forming methods. In this study, the effect of deep drawing process parameters such as die radius, punch radius and compression force on the deep drawing process of AA 6061 sheet was investigated. Finite element method and Taguchi analysis were used together to determine the effect of process parameters. Simulations were performed using Autoform software, according to the orthogonal array. Based on the measured thickness values of the deep drawn cups and the analysis of the variance test (Anova), the parameter with the greatest influence on the formability of the aluminum material was determined. The parameter that has the most effect on the process is the pressure force with 34.43%. It was observed that the punch force and die radius had an effect of 31.21% and 27.67%, respectively.

**Key words:** Aluminum deep drawing, Taguchi, Parameter optimization, Analysis of variance

**2022, vii + 38 pages.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans dönemim boyunca değerli yardım ve katkıları için saygıdeğer danışmanım Prof.Dr.Necmettin KAYA'ya , çalışmalarım sırasında destek olan değerli yöneticilerim ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

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

Çalışmalarım sırasında bana en büyük desteği veren, maddi ve manevi her şekilde yanımda olan sevgili dostlarım Eda Tansu KARAGÖZ ve Tugay KARAGÖZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Ezgi KAP  
08/01/2022

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
2.1. Derin Çekme.....	2
2.2. Çekmeye Etki Eden Parametreler.....	5
2.2.1. Malzeme Etkisi.....	5
2.2.2. Kalıp Geometri Etkisi.....	5
2.2.3. İşlem Şartlarının Etkisi.....	7
2.3. Çekme Prosesinde Yaşanan Problemler.....	8
2.4. Alüminyum Alaşımları.....	9
2.5. Literatürde Yapılan Benzer Çalışmalar.....	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	15
3.1. Deneysel Tasarım Yöntemleri.....	15
3.1.1. Tam Faktöriyel.....	16
3.1.2. Kesirli Faktöriyel.....	17
3.2. Taguchi Metodu.....	17
3.3. Varyans Analizi(Anova).....	19
3.4. Sinyal/Gürültü Oranı.....	21
3.5. Yapılan Çalışmalar.....	22
4. BULGULAR.....	27
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	31
KAYNAKLAR.....	33
EKLER.....	36
EK 1.....	37
ÖZGEÇMİŞ.....	38

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
Db	Sac açınım ölçüsü
$\beta$	Sınır çekme oranı
Fs	Zımba kuvveti
Rd	Zımba köşe yarıçapı
Fb	Baskı kuvveti
c	Çekme boşluğu
Rb	Kalıp köşe yarıçapı
R	Plastik Anizotropi
n	Gerinim Sertleştirme Katsayısı
Ts	Çekme Mukavemet
$\mu$	Sürtünme Katsayısı
t	Sac Metal Kalınlığı
$\sigma_{ak}$	Akma Dayanımı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
FLD	Şekillendirme Sınır Diyagramı
Mn	Mangan
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
Si	Silisyum
Mg	Magnezyum
Zn	Çinko
Dr	Doktor
Vb	Ve benzeri
Ld	Ortogonal Düzen
S/N	Sinyal/Gürültü Oranı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Silindirik kap çekme operasyonu (Erbaş 2014).....	2
Şekil 2.2. Derin çekme işlem adımları.(Autoform Forming Reality) .....	3
Şekil 2.3 Çekmede oluşan gerilme bölgeleri (Ay 2015).....	4
Şekil 2.4. Silindirik derin çekme işleminde oluşan kuvvetler (Yalçın 2010) .....	4
Şekil 2.5. Silindirik kap ve açınım boyutları .....	6
Şekil 2.6. Derin çekme kalıp yapısı .....	7
Şekil 2.7. Çekme prosesinde yaşanan hatalar (Erbaş 2014) a)Kırışıklık(flanş bölgesinde), b)Kırışıklık(yan duvarda), c)Yırtılma, d)Kulaklanma, e)Çizik .....	8
Şekil 3.1. Genel Sürec Modeli(Montgomery,1991).....	15
Şekil 3.2. Analiz için tasarlanan proses yüzeyleri.....	25
Şekil 3.3. Simülasyon mesh yapısı.....	25
Şekil 3.4. Final sac üzerinden kalınlık ölçülecek noktalar.....	26
Şekil 4.1. Derin çekme simülasyon sonuçları .....	27
Şekil 4.2. Derin çekme simülasyon sonuçları -2.....	27
Şekil 4.3. Deney-3 sonucu yırtılan parça .....	28
Şekil 4.4. Doğrulama simülasyon kalınlık değerleri .....	30
Şekil 4.5. Doğrulama simülasyon sonucu .....	30

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Sac metal şekillendirmede kullanılan malzemelerin özellikleri (Ulu 2008)	9
Çizelge 2.2. Alüminyum alaşımları için temper ifadeleri (Ak 2012).	12
Çizelge 3.1. AA6061 kimyasal bileşimi	22
Çizelge 3.2. AA6061 mekanik özellikleri	22
Çizelge 3.3. Belirlenen parametre ve seviyeleri	23
Çizelge 3.4. L9 ortogonal düzen (Koçar 2014)	24
Çizelge 3.5. Parametrelerin L9 ortogonal düzene yerleşimi	24
Çizelge 4.1. Deney sonucunda ölçülen kalınlık değerleri	28
Çizelge 4.2. Hesaplanan S/N değerleri	29
Çizelge 4.3. S/N istatistiksel oran sonuçları	29
Çizelge 4.4. S/N değerlerine göre oluşturulan Varyans analizi	30

## 1. GİRİŞ

Sac metal şekillendirme yöntemleri arasında en çok dikkat çeken, derin çekme işlemidir. Otomobil, havacılık ve ambalaj endüstrilerinde parça seri üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Sac metal şekillendirmede, ince bir levha, istenen geometride parça elde edilmesi için plastik deformasyona tabi tutulur. Birçok parametrenin etkisi altında olması sebebiyle karmaşık bir yapıya sahiptir.

Günümüz üretim sektöründe parça kalitesi ve üretimi yöntemleri üzerinde bulunan beklentileri her geçen artmaktadır. Bu sebeple üretilen parça kalitesinin artırılması ve maliyet azaltılması yönünde çalışmalar hız kazanmaktadır. Üretim aşamasında çıkan problemlerin genellikle zorlu ve maliyet arttırıcı etkisi sebebiyle, ortaya çıkabilecek problemlerin önceden tahmini ve analiz sürecinde iyileştirilmesi beklenmektedir.

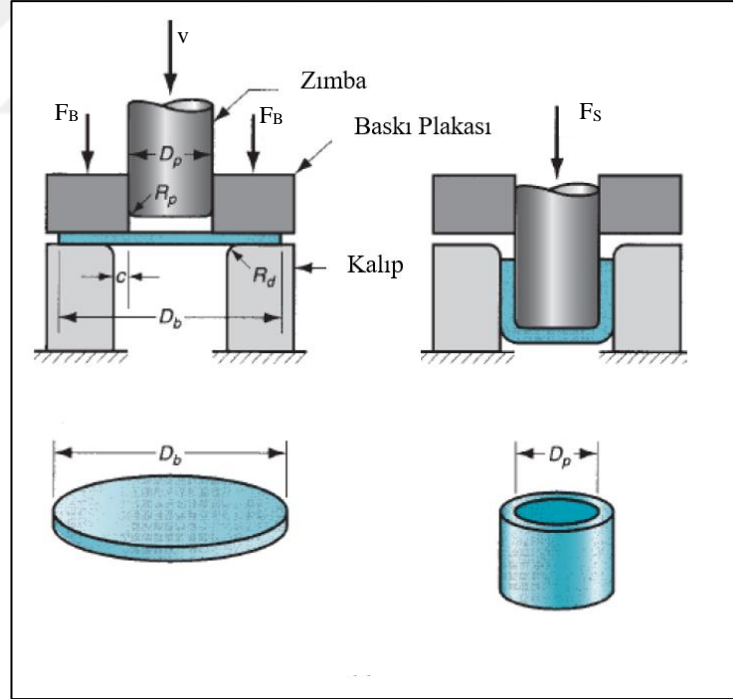
Derin çekme işleminde de kalite gerekliliklerini etkileyen parametrelerin seçiminin iyi yapılması gerekmektedir. Optimizasyon analizleri bu aşamada önemli bir yere sahiptir. Sac metal şekillendirmede proses parametrelerinin optimizasyonu, üretim maliyetini azaltmak adına yapılan önemli adımlardan biridir. Proses parametrelerinin optimum değerlerini belirlemek için, sac metalin deformasyon davranışı üzerindeki etkilerini bulmak esas alınmaktadır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Sac metal şekillendirme birçok farklı endüstriyel üretim sektöründe kullanılmaktadır. Seyahat için kullandığımız uçak ve otomobil parçalarından, mutfakta kullandığımız konservelelere kadar geniş alanda üretim yelpazesine sahiptir. Sac metal şekillendirme yöntemleri farklı uygulama şekilleri ile karşımıza çıkmaktadır fakat bu projede derin çekme işlemi ele alınacaktır.

### 2.1. Derin Çekme

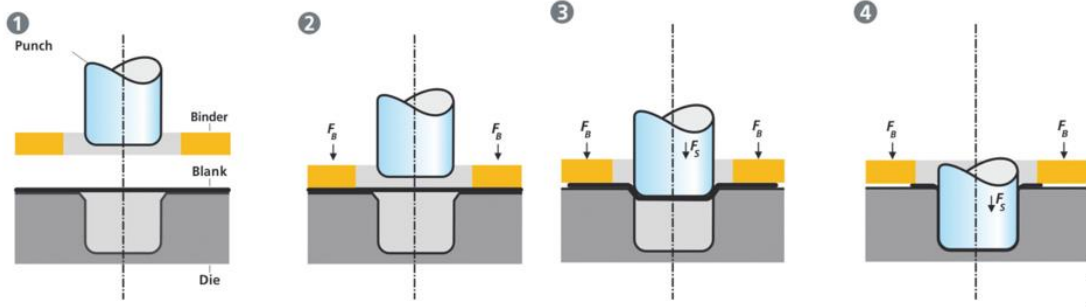
Derin çekme işlemi, sac metal şekillendirme işlemleri içerisinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Derin çekme işlemi, düz bir sac metalin çekme ve basma koşullarının kombinasyonu altında şekillendirmesidir (DIN8584). Çekme araçları olan zımba, kalıp ve baskı plakası Şekil 2.1’de belirtilmiştir. Sac malzeme, zımba yardımı ile kalıbın içerisinde bulunan boşluğa sıvanarak parçanın final şeklinin alınmasını sağlar.



Şekil 2.1. Silindirik kap çekme operasyonu (Erbaş 2014)

Çekme operasyon uygulanması, sac metalin kalıp üzerine yerleştirilmesi, baskı plakası ile kuvvet uygulanması, zımbanın form vermeye başlaması ve çekme işleminin

gerçekleştirilmesi şeklinde dört adımda Şekil 2.2’de belirtilmiştir. Baskı plakası ile uygulanan kuvvet, malzemenin düzensiz akışını kontrol altında tutularak final parçada oluşabilecek kırışıklık engellemektedir.



**Şekil 2.2.** Derin çekme işlem adımları.(Autoform Forming Reality)

Malzemenin derin çekilebilirliğinin ifade etmek için derin çekme oran sınırı kullanılmaktadır. Malzemelerin çatlak başlangıcından önce maksimum hangi çapa kadar çekileceğini açıklar(Ay 2015). Açınım sac çapının zımba çapına oranı ile hesaplanır.

$$\beta = \frac{D_b}{D_p} \quad (2.1)$$

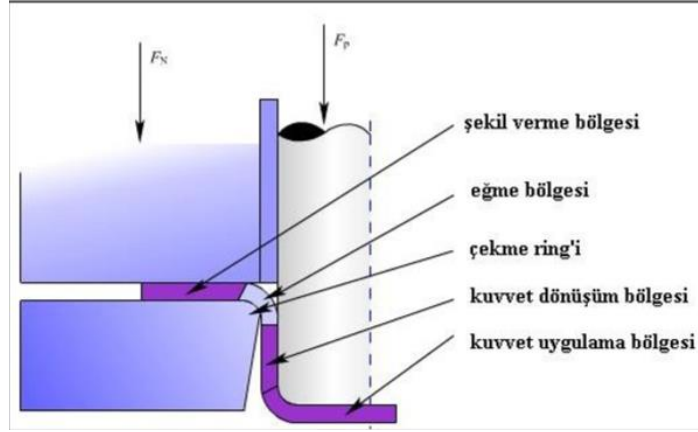
$D_b$ : Açınım sac çapı,  $D_p$ : Zımba çapı

Malzeme çeşidine göre literatürde belirlenen çekme oran sınır değerleri değişmektedir. Maksimum çekme sınır oranı ;

$$\beta \leq 2.0 \quad (2.2)$$

olarak belirtilmektedir (Groover, 2013).

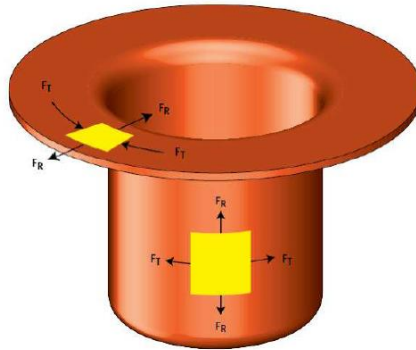
Zımba ve baskı kuvvetinden kaynaklı malzeme üzerinde farklı gerilme bölgeleri (bkz. Şekil 2.3) oluşmaktadır.



**Şekil 2.3** Çekmede oluşan gerilme bölgeleri (Ay 2015)

Çekme sırasında malzeme, radyal çekme kuvvetlerine  $F_R$  ve teğetsel sıkıştırma kuvvetlerine maruz kalır.(Şekil 2.4)

Kuvvet uygulama bölgesi, malzemenin kayması ve gerilmesi meydana gelir. Bu bölgede malzeme esneme nedeniyle incelir. Bu bölgede eş-çift eksenli çekme gerilmeleri etkilidir. Kalıp ve zımba arasındaki bölgede, kuvvet dönüşüm bölgesi, genellikle malzemenin zımba ve kalıp ile teması yoktur. Bu, kalıp ve zımba arasında bir geçiş bölgesidir. Bu bölgede radyal çekme gerilmeleri malzemeye etki eder. Malzeme incelir ve bu bölgede yırtılma veya boyunlaşma olabilir. Eğme bölgesi üzerinde malzemenin kayması ve bükülmesi meydana gelir. Bu bölgede radyal yönde çekme gerilmeleri meydana gelirken çevresel yönde basma gerilmeleri gözlenir. Flanş bölgesinde radyal çekme meydana gelir. Bu, basma gerilimi nedeniyle malzemenin kalınlaştığı tek bölgedir.



**Şekil 2.4.** Silindirik derin çekme işleminde oluşan kuvvetler (Yalçın 2010)

## 2.2. Çekmeye Etki Eden Parametreler

Derin çekme operasyonuna etki eden faktörler üç ana başlık altında belirtilebilir.

Bu faktörler birbiri ile doğrudan ilişkilidir.

1. Malzeme Etkisi
2. Kalıp Geometri Etkisi
3. İşlem Şartlarının Etkisi

### 2.2.1. Malzeme Etkisi

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

Sac kalınlığının fazla olması derin çekme oranını artırır. Sac kalınlığının incelmesini ve çekme derinliğinin artmasını sağlar.

Anizotropinin derin çekmeye etkisi fazla, derin çekilebilirlik ölçütü. Ortalama dikey anizotropi parametresinin 1 ve 1'den büyük olması istenmektedir. Bu değer sacın kalınlık yönündeki gerinim direncinin , genişlik yönündeki gerinim direncinden büyük olması demektir. Böylece malzeme kalınlığı fazla incelmeden gerinimin büyük oranda sac yüzey düzleminde oluşmasını ve şekillendirmenin başarıyla sonuçlanması sağlanır.

Sertleşme üssü ve deformasyon hız duyarlılığı üssü değerlerin yüksek olması çekmeyi olumlu etkilemektedir fakat etkilerinin düşük olduğu düşünülmektedir (Erdoğan 2017).

### 2.2.2. Kalıp Geometri Etkisi

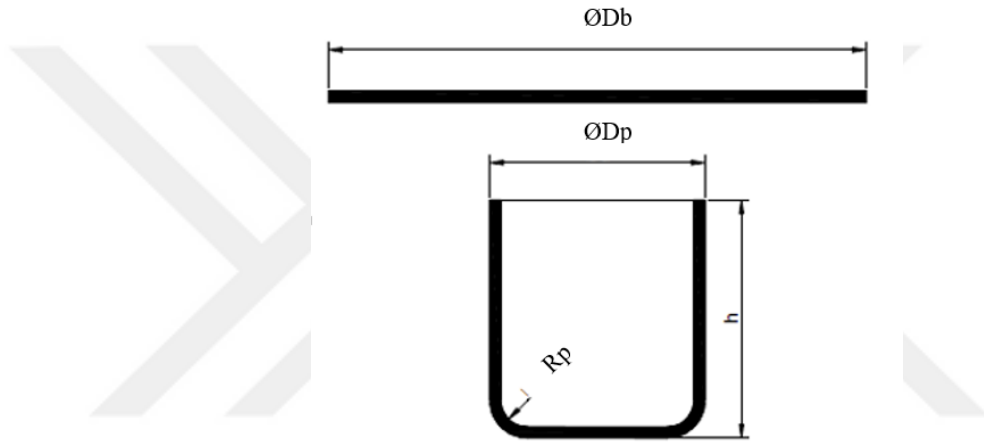
Bu faktörlerin doğru tayini önemli noktalardan biridir. Final parça geometrisini doğrudan etkilemektedirler.

- Zımba Çapı
- Zımba Köşe Yarıçapı
- Sac Kalınlığı
- Sac Metal Çapı

- Kalıp Çapı
- Kalıp köşe yarıçapı
- Zımba-Kalıp arasındaki boşluk

Başlangıç sacının çapı birkaç yöntemle hesaplanabilmektedir. Alan metodu ile hesaplanması şu şekildedir.

$$Db = \sqrt{(Dp^2 + 4(h - 0.43Rp))} \quad (2.3)$$



**Şekil 2.5.** Silindirik kap ve açınım boyutları

Derin çekme için gerekli zımba kuvveti,

$$Fs = \pi Db \sigma_{\zeta} \left( \frac{Db}{Dp} - 0.7 \right) \quad (2.4)$$

şeklinde formüle edilir.  $\sigma_{\zeta}$  çekme dayanımıdır. 0,7 sabiti sürtünmeyi dikkate alan düzeltme faktörüdür.

İşlem sırasında saca ilk temas eden bölgeler zımba köşe yarıçaplarıdır ve sacın şekil alabilmesini doğrudan etkilemektedir. Yarıçap değerini arttırmak malzeme akışını kolaylaştırarak çekmeye fayda sağlar fakat değerin fazla olması derin çekme oranını da arttırmaktadır.

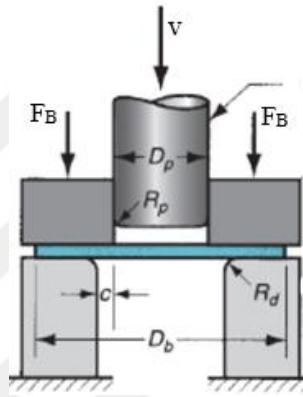
$$R_d = 0.9\sqrt{(D_b - D_p)t} \quad (2.5)$$

Alüminyum ve çelik arasındaki mekanik özelliklerin farklılığından kaynaklı olarak bu  $R_d$  hesabı %10 daha küçük olacak şekilde hesaplanır.

Zımba yarıçapı hesabı;

$$R_p = (3 - 10)t \quad (2.6)$$

olarak alınabilmektedir.



**Şekil 2.6.** Derin çekme kalıp yapısı

Zımba ve kalıp arasında bulunan çekme boşluğu malzemeye göre hesaplanmaktadır.

$$\text{Çelik için} \quad c = t + 0.07\sqrt{10t} \quad (2.7)$$

$$\text{Alüminyum için} \quad c = t + 0.02\sqrt{10t} \quad (2.8)$$

$$\text{Isıya dayanıklı alaşımlar için} \quad c = t + 0.20\sqrt{10t} \quad (2.9)$$

$$\text{Demir olmayan metaller için} \quad c = t + 0.04\sqrt{10t} \quad (2.10)$$

### 2.2.3. İşlem Şartlarının Etkisi

- Baskı kuvveti
- Zımba hızı
- Sürtünme Katsayısı
- Çekme Derinliği

Baskı kuvvetinin doğru tayini önemli noktalardan biridir. Kuvvetin az olması kırışıklık riskini arttırmakta, fazla olması da yırtılma riskini arttırmaktadır.

Baskı kuvveti;

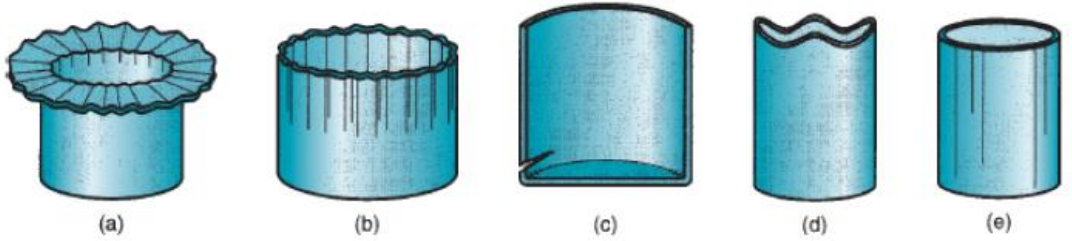
$$F_B = 0.015 \sigma_{ak} \frac{\pi}{4} [Db^2 - (Dp + 2.2t + 2Rp)^2] \quad (2.11)$$

şeklinde formüle edilir.

Sürtünme katsayısını değiştirmek adına işlem sırasında yağlama uygulanabilmektedir. Yağ seçimi ve yağlamanın yeterliliği sürtünme kuvvetlerinin oluşumunun azalmasını sağlamaktadır.

### 2.3. Çekme Prosesinde Yaşanan Problemler

Çekme operasyonunda yaşanan hatalar Şekil 2.7 'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.7.** Çekme prosesinde yaşanan hatalar (Erbaş 2014) a)Kırışıklık(flanş bölgesinde), b)Kırışıklık(yan duvarda), c)Yırtılma, d)Kulaklanma, e)Çizik

İşlem sırasında en sık görülen hatalar kırışıklık, yırtılma, kulaklanma, pürüzlenme şeklindedir. Kırışık, duvarda ve flanş bölgesinde görülebilmektedir. Parçanın çekilmeyen kısmında oluşan bası gerilmesi sebebiyle oluşmaktadır. Kırışıklık olmuş flanş bölgesi çekildiğinde, parçanın dikey duvarında çıkıntılar oluşturabilir. Baskı kuvvetinin uygun olmaması, çekme boşluğunun fazla verilmesi vb. sebeplerden oluşabilmektedir.

Yırtılma ve çatlaklar çoğunlukla parçanın alt kısmına, yarıçap bölgesine yakın olan kısımda gerçekleşir. Yüksek çekme gerilmesine maruz kalan kısımlarda incelmeye

gerçekleşir ve bu inceleme değerleri yırtılmaya sebebiyet verebilmektedir. Baskı kuvvetinin yüksek olması, yarıçapların küçük olması ya da çekme boşluğunun az verilmiş olmasından kaynaklı yırtılmalar oluşabilir.

Kulaklanma oluşumu, flanşlı çekme işlemlerinde genellikle karşımıza çıkmaktadır. Düzlemsel anizotropi derin çekilmiş bir kaptı yüksekliklerin yönlere göre farklılaşmasına ve kulaklanmaya sebep olur. Çekme boşluğunun uygun verilmemiş olması, sacın ilk yerleştirilmesi ve yağlamanın uygun yapılmaması da kulaklanmaya sebep olabilir.

Yağlamanın yeterli gelmediği durumlarda ya da kalıp ve zımba yüzeylerinin düzgün olmadığı durumlarda yüzeyde bazı çizikler görülebilmektedir.

#### 2.4. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum ve çelik kıyaslandığında, malzemeler arasında bulunan yoğunluk farkı dikkat çekmektedir. Düşük yoğunluğa sahip olması alüminyum malzemeleri havacılık ve otomotiv sektöründe tercih edilmesindeki önemli nedenlerden biridir.

**Çizelge 2.1.** Sac metal şekillendirmede kullanılan malzemelerin özellikleri (Ulu 2008)

Özellikler	Semboller	Çelik	Alüminyum	Magnezyum	Titanyum
Yoğunluk <sup>(1)</sup>	$\rho$	7,83	2,8	1,74	4,5
Young Modülü <sup>(2)</sup>	E	21,0	70	45	110
Çekme Dayanımı <sup>(3)</sup>	$R_m$	300-1200	150-680	100-380	910-
Özel Dayanım <sup>(4)</sup>	$R_m / \rho$	38-153	54-243	57-218	202-
Özel Tokluk <sup>(5)</sup>	$E / \rho$	26,8	25,0	25,9	24,4
Çentik Dayanımı <sup>(6)</sup>	$\sqrt{R_m / \rho}$	4,4	9,3	11,2	7,7
Kabuk Tokluğu <sup>(7)</sup>	$\sqrt{E / \rho}$	7,6	14,7	20,4	10,6

Çelik bir alaşım , alüminyum ise bir elementtir ancak genellikle diğer elementlerle karıştırılır ve kimyasal reaksiyonları önlemek için bir alaşım haline gelir. Alaşımlandırma ve ısıl işlemler sayesinde yüksek mukavemet kazandırılabilir olması da tercih edilme sebeplerinden biridir. Elektrik iletimi ve yüksek ısı taşınım katsayısına sahip olduğu için elektronik eşya sektöründe de tercih edilmektedir.

Young'ın alüminyum modülü, çeliğin modülünün neredeyse üçte biri kadardır. Bu, alüminyum levhaların elastik geri kazanımında daha büyük geri esneme etkilerine ve sorunlara neden olur. Ayrıca, alüminyum ve çelik malzemelerin farklı gerinim sertleştirme katsayıları vardır, bu da işleme sertleştirmede farklı gerilim-gerinim davranışı anlamına gelir.

Çelik numune için normal anizotropi oranı alüminyum numunenin iki katından fazladır. Bu, dairesel bir çelik kabından daha derin bir silindirik kabın çekilmesi için biraz daha büyük bir sınırlama çekme oranı mevcut olduğu anlamına gelir.

Çelik ve alüminyum arasındaki diğer bir fark, çeliğin normal anizotropi değerinin 1'den büyük olması, alüminyumun ise 1'den küçük. Bu, çelik ve alüminyum levhaların şekillendirme işlemlerinden sonraki şekil değişimlerine etki eder. Bunun dışında aynı derin çekme için bu malzemelerin kalınlık değişimleri işlemler farklı olabilir.

Alüminyum alaşımları üretim metoduna göre dövme ve döküm olarak iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Farklı mikroyapı ve kimyasal bileşenlere sahiptirler. Dövme ile üretilen alaşımlar dört karakter ile isimlendirilmektedir.

1XXX: Saf alüminyum sınıfıdır. Genellikle kimya endüstrisinde ve elektronik komponentlerin üretimde kullanılır.

2XXX: Al-Cu alaşımlı bu sınıfta asıl alaşım elementi bakırdır. Farklı alaşımlandırmalar yapılarak mukavemet değerleri daha da yükseltilebilir. Yüksek mukavemete sahip olabilmesi sebebiyle havacılık sektöründe tercih edilmektedir.

3XXX: Al-Mn alaşımlı bu sınıfta temel alaşım elementi mangandır. Genellikle mimari uygulamalarda tercih edilmektedir.

4XXX: Al-Si alaşımlı bu sınıfta temel alaşım elementi silisyumdur. Genleşme katsayısı düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek olması sebebiyle kaynaklı yapılarda kullanımı fazladır.

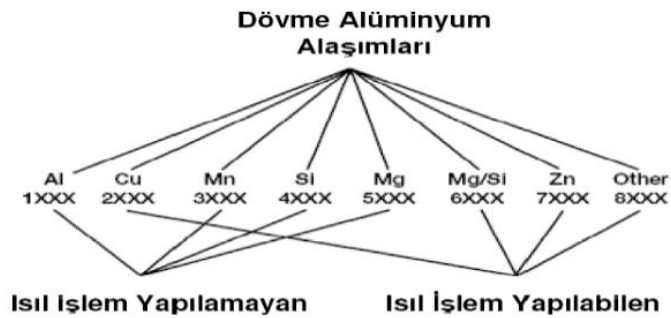
5XXX: Al-Mg alaşımlı bu sınıfta temel alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranının yüksek olması malzemede sertlik ve mukavemet artışı sağlar ancak süneklik azalmaktadır. Gemi sanayinde, korozyona olan yüksek direnci sebebiyle tercih edilmektedir.

6XXX: Al-Mg-Si alaşımlı bu sınıfta temel alaşım elementi hem magnezyumdur hem de silisyumdur. Şekillendirilebilirlik kabiliyeti yüksektir. Ekstrüzyon ile yapılan imalatlarda yoğun olarak tercih edilmektedir.

7XXX: Al-Zn alaşımlı bu sınıfta temel alaşım çinkodur, ayrıca ilave edilen bakır, magnezyum, zirkonyum ve krom elementleri de eklenmektedir. Bu sebeple en yüksek mukavemete sahip alaşımdır. Yüksek mukavemet istenen durumlarda, özellikle uçak ve uzay sektöründe tercih edilmektedir.

8XXX: Al-Li alaşımlı bu sınıfta temel alaşım lityumdur, ayrıca kalay ilave edilmektedir. Yorulma direncinin yüksek ve tok bir yapıya sahip olması, uçak ve uzay sanayisinde tercih sebebidir. Fakat diğer alaşımları kıyasla yüksek üretim maliyetlerine sahiptir (Karaca 2019).

Alüminyum alaşımlarda istenilen dayanımların elde edilebilmesi için ısıtım işlemleri uygulanarak çökeltilme sertleşmesi gerçekleştirilmektedir. Isıtım işlemi uygulanabilen ve uygulanamayan seriler Şekil 2.8’de belirtilen şekildedir. Isıtım işlemi uygulanamayan alaşımlarda dayanımın artırılması şekil değıştirme ile sağlanmaktadır.



**Şekil 2.8.** Isıtım işlem durumuna göre alaşımların sınıflandırılması (Asa 2010)

Alüminyum alaşımlarına mekanik veya ısı işlemlerin ya da her ikisinin uygulanması, alaşımın temper durumunu belirtir (Ak 2012). Alaşım isimlendirmesinden sonra temper simgesi belirtilmektedir. Örneğin AA7075-T6, AA5052-H32 vb. temper işaretlerinin açıklamaları Çizelge 2.2’de belirtilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Alüminyum alaşımları için temper ifadeleri (Ak 2012).

Temper No	Açıklama
F	İmal edildiği şekilde
0	Tavlannış (Mümkün olan en yumuşak şartlarda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1X	Sadece soğuk şekillendirilmiş ( x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder)
H2X	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlannış
H3X	Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş
HX2	0 ve HX4 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
HX4	0 ve HX8 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
HX6	HX4 ve HX8 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
HX8	HX8 temperi ulaşılabilen en yüksek sertlik değerini tanımlar.
HX9	HX8 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlar
W	Çözelti ısı işlemi görmüş
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T4	Çözelti ısı işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T5	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden ve soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış
T6	Çözelti ısı işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış
T7	Çözelti ısı işlemi görmüş ve kararlaştırılmış
T8	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
T10	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

## 2.5. Literatürde Yapılan Benzer Çalışmalar

Derin çekme operasyonu metal şekillendirme alanında kullanımının yaygın olması ve işlemin kompleks olması sebebiyle birçok araştırmacı tarafından inceleme konusu olarak ele alınmıştır.

Ulu (2008), derin çekme operasyonunda alüminyum malzeme için işlem parametrelerinin etkisini ortaya koymuştur ve farklı malzemeler için veri tabanı oluşturmuştur. Akıllı (2010), baskı plakasının, kalınlığa ve çekme derinliğine etkisini teorik ve deneysel analizlerle kıyaslayarak deney ve sonlu eleman analizleri arasında %90 uyum

gözlemlemiştir. Erbaş (2014) ise ,iki farklı alüminyum malzemenin derin çekme kabiliyetinin deneysel ve numerik çalışmalarla kıyaslanmıştır. Dwivedi ve Agnihotri (2016) alüminyum malzemede proses parametrelerinin etkilerinin değerlendirilmesi üzerine analiz çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Erdoğan (2017), parametrelerin etkisini incelemek için sonlu eleman analizleri gerçekleştirmiştir.

Derin çekme operasyonun parça kalite artışı ve maliyet düşümü sağlayabilmek için denemeler yapılmaktadır. Bu denemelerin uzun sürmesi ve maaliyetli olması deneysel tasarım yöntemlerinin önemini ortaya koymaktadır. Araştırmacılar tarafından, değişkenlerin sonuca etkisini görmek farklı deneysel tasarım yöntemleri kullanılmıştır.

Browne ve Hillery (2001), CR1 çeliği için belirledikleri yedi adet parametrenin zımba kuvvetini ve duvar kalınlığına etkisini analiz etmişlerdir. Seçilen parametreler; zımba yarıçapı, kalıp yarıçapı, baskı kuvveti, basınç, zımba hızı, yağlama tipi ve yağlama pozisyonu şeklindedir. Etkinin incelenmesinde Taguchi deneysel tasarım metodu yedi parametre-iki seviye için tasarlanmış ve deneylerle sonuçlar elde edilerek optimum parametre değerleri hesaplanmıştır. Bahloul ve Ark. (2005), yanıt yüzey metodu kullanarak dikdörtgen kesitli yüksek karbonlu düşük alaşım çelik için bükme operasyonunda, kalıp yarıçapı ve çekme boşluğunun geri yaylanma etkisini incelemişlerdir. Wifi ve ark. (2007) ,derin çekme operasyonunda parametre optimizasyonu üzerine yapılan çalışmaları inceleyerek literatür sunmuşlardır. Ayrıca deneysel tasarım yöntemleri ile yapılan çalışmalara da değinerek bu alanda araştırmaların geliştirilmeye açık olduğunu vurgulamışlardır.

Raju ve ark. (2010), kalıp yarıçapı, zımba yarıçapı ve kuvvetinin AA6061 alüminyum malzemenin kalınlık dağılımına etkisini incelemişlerdir. Taguchi metodu kullanarak optimum parametre değerlerini belirlemişlerdir. Bozkurt (2012), A8011 malzemenin derin çekme prosesine parametrelerin etkisini yanıt yüzey metodu kullanarak incelemiştir. Kulaklanmayı azaltmak ve çekme derinliğini arttırmak için seçilen dört parametre (homojen tav kalınlığı,homojen tav sıcaklığı, ara tav kalınlıkları) ve üç seviye ile deney tasarımı kullanılmıştır. Sonuçlarda elde edilen optimum değerleri ile parça kalitesinin arttırılabileceği gözlemlenmiştir.

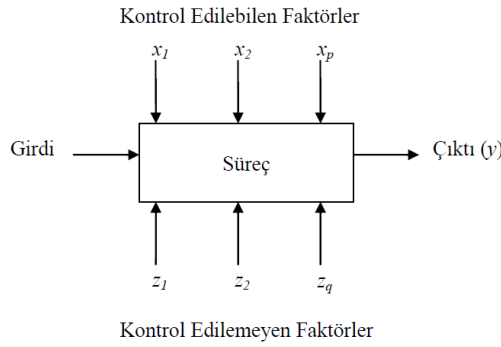
Sathakumar ve Arunkumar (2012), plastik anizotropi, gerinim sertleştirme katsayısı, çekme mukavemeti , sürtünme katsayısı değerlerinin kalınlığa ve şekillenebilirliğe etkisi analiz edilmiştir. Taguchi Deneysel tasarım metodu kullanarak dört parametre-üç seviyeli parametrelerin yüzde etkilerini belirlemişlerdir. Sürtünme katsayısı ve plastik anizotropinin sonuç üzerinde daha büyük etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Koçar (2014), Al5764 malzeme için işlem parametrelerinin çekme üzerinde etkisi araştırılmıştır. Deney tasarımında Taguchi metodu esas alınarak seçilen parametreler; kalıp köşe yarıçapı, yağlayıcı kullanımı, zımba hızı , baskı plakası şeklinde dört adettir ve bu parametrelerin üç farklı seviyesi için kırışıklık ve yırtılmaya etkisi incelenmiştir. Ayrıca çalışmalara farklı bir bakış açısı getirerek, Yapay Sinir Ağları kullanımı ile parça kalite tahmininin yapılabileceğini göstermiştir.

Reddy ve ark.(2015) , Taguchi methodu ile AA6111 malzemede parametrelerin kalınlık değişimine etkisini inceleyerek optimum proses parametreleri belirlemişlerdir. Deney tasarımı üç parametre için zımba köşe yarıçapı, kalıp köşe yarıçapı ve baskı kuvveti olarak seçilmiş ve üç seviye için denemeler yapılmıştır. Baskı kuvvetinin daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Chaudhari ve Patil (2015), CRDQ çeliğinin derin çekme operasyonunda parametrelerin springback etkisini araştırmışlardır. Her biri üç seviye olacak şekilde, kalıp köşe yarıçapı, zımba köşe yarıçapı ve baskı kuvvetinin etkisini Taguchi metodu kullanarak incelemiştir. Mahmoodi ve Sohrabi (2017), Taguchi metodu kullanarak çift katmanlı Al/Çelik dikdörtgen parça için derin çekme parametrelerinin kalınlık ve kırışıklığa etkisini araştırmışlardır. dört parametre; kalıp köşe yarıçapı, zımba köşe yarıçapı, baskı kuvveti ve çekme boşluğunun olarka belirlenmiştir ve sonlu eleman analizleri dört seviye için yapılmıştır. Sandeep (2019), A6061 malzemesinin derin çekmesinde için kalıp çekme yarıçapı, sac kalınlığı ve kuvvetin deformasyona olan etkisini incelemiştir. Parametreler üç seviye alınarak Taguchi deneysel metodu kullanılmıştır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Deneysel Tasarım Yöntemleri

Deneysel tasarım , bir sistem veya sürecin araştırılmasına yönelik sistematik bir yaklaşımdır. Girdilerde değişiklik yapılarak çıktılar üzerindeki etkisini gözlemlenir ve analiz edilir. Bir süreç ya da sistemin genel modeli Şekil 3.1 'de belirtilmiştir.



**Şekil 3.1.** Genel Sürec Modeli(Montgomery,1991)

Başlıca amaç; süreçte en fazla öneme sahip olan ana kritik faktörlerin belirlenmesi ve genel süreci kalite değişimlerine karşı daha sağlam hale getirmek için bu faktörlerin kontrol edilmeleridir. Deneysel tasarım ile kritik faktörlerin belirlenmesi sırasında yapılan deney sayısını da azaltılmaktadır.

Deneysel tasarım ilk olarak 1920'lerde İngiltere'de Rothamsted'deki tarım alanı istasyonunda çalışan R. A. Fischer tarafından tanıtıldı. 1980'lerde Japon mühendis Dr. Genichi Taguchi, ortogonal dizi tasarımı olarak bilinen ve geleneksel deney tasarımına yeni bir boyut katan yeni bir yöntem geliştirdi. Taguchi (Kackar 1985) deneysel tasarım yöntemi, düşük maliyetle üretim yapmak için geleneksel yaklaşımlardan biri olarak belirtilmektedir.

Deneysel tasarım , çıktıları etkileyen parametreler , kaç farklı parametre dikkate alınması gerektiği, yapılacak deneme sayısı, kullanılacak veri analizi.. vb. gibi konuların dikkate alınarak yapılmalıdır.

Tasarım adımları;

1. Problemin tanımlanması
2. Amacın belirlenmesi
3. Performans karakteristiği seçilmesi
4. Karakteristiği etkileyen parametrelerin belirlenmesi
5. Parametre seviyelerinin seçimi
6. Deney tasarım seçimi
7. Veri toplama ve analizi
8. Sonuçların yorumlanması
9. Doğrulama deneylerinin yapılması

Klasik deney tasarım yöntemlerinde diğer parametrelerin etkisi olmadığı kabul edilerek, sabit tutulur ve her denemede sadece bir parametre değiştirilerek çıktıya etkisi gözlemlenir. Bu yöntemler ile değişkenlerin birbiri ile etkileşimi yok sayılmaktadır ve bu açıdan bu yöntemler yetersiz kalmaktadır.

İstatistiksel deney tasarım yöntemleri ile parametrelerin birbirleri ile etkileşimleri dikkate alınmaktadır. İstatistiksel deney tasarım yöntemleri şu şekildedir.

### 3.1.1. Tam Faktöriyel

Çıktı üzerinde etkisi olan tüm parametre kombinasyonları için deneme yapılarak etkileri incelenir.

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

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

Seçilen parametrelerin sayısı ve düzeyi arttıkça yapılacak denemelerin sayısı da artmaktadır. Bu da deneylerin daha karmaşık ve maliyetli olmasına sebep olmaktadır.

### 3.1.2. Kesirli Faktöriyel

Tam faktöriyel deneylerin parametre ve seviyelerin yüksek olduğu durumlarda uzun zaman alması ve yüksek maliyetli olması sebebiyle deney sayısı azaltılmaktadır.

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

$p$ : 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

Farklı parametrelerin, farklı seviyeleri arasında optimum kombinasyonun belirlenmesinde bu yöntem sıkça kullanılmaktadır. Taguchi yöntemi de kesirli faktöriyel deney tasarımının bir türüdür.

Parametre ve seviye sayısının yüksek olduğu durumlarda bu yöntem kullanılarak daha az sayıda deneme ile sonuca varmak mümkündür. Taguchi tasarım yönteminin işlem adımları yedi adım olarak belirtilmiştir.

1. Parametre ve etkileşimlerinin belirlenmesi
2. Seviyelerin belirlenmesi
3. Ortogonal Düzen seçimi
4. Parametre ve etkileşimlerin ortogonal düzene atanması
5. Deneylerin yapılması
6. Sonuç Varyans analizi ve etkin parametre belirlenmesi
7. Doğrulama deneyi yapılması

Parametre ve etkileşimlerinin belirlenmesi aşamasında parametreler , kontrol edilebilen ve edilemeyen olarak ikiye ayrılmalıdır. Kontrol edilebilen parametreler direk müdahale

edebildiğimiz parametrelerdir. Bunların belirlenmesi deney tasarımı ve testleri doğrudan etkilemektedir. Bu aşamada performans karakteristiği diye belirtilen etkinin ölçüleceği çıktı da belirlenmelidir.

Diğer bir adım olarak bu parametrelerin seviyelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Seçilen seviyeler, serbestlik derecesi ile doğrudan ilişkilidir. Her parametrenin serbestlik derecesi, seviyesi bir eksilterek hesaplanır. Parametreler dışında etkileşimlerin de serbestlik derecesi bulunur. Etkileşimde olan parametrelerin serbestlik derecelerinin çarpımı ile hesaplanır. Toplam serbestlik derecesi, tüm parametre ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri toplamına eşittir. Hesaplanan serbestlik dereceleri ile deneyde yapılacak deneme sayısı hesaplanır.

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

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

Hesaplanan deney sayısı dikkate alınarak ortogonal düzen seçimi yapılır. Tam faktöritele göre  $a^k$  kadar deney yapmak gerekirken ortogonal düzen seçimi ile yapılacak deneme sayısı azaltılmaktadır. Ortogonal düzen gösterimi ;

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

şeklinde ifade edilir.

Seçilen ortogonal düzene göre parametreler ve etkileşimleri yerleştirilir. Belirlenen parametre ve seviyeleri doğrultusunda denemeler yapılır. Denemeler gerçek deney şeklinde ya da sonlu elemanlar analizi şeklinde uygulanabilmektedir. Performans karakteristiğine göre uygun  $S/N$  performans istatistiği uygulanır. Hesaplanan  $S/N$  oranlarına göre parametrelerin performans karakteristiği üzerinde etkisinin görülebilmesi için varyans analizi yapılarak ve etkilerin yüzdeleri hesaplanır.

### 3.3. Varyans Analizi(Anova)

Varyans Analizi , bir yanıt değişkeni ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi araştırmak ve modellemek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir. Deneysel koşullarda elde edilen ortalama bağımlı değişken performanslarının önemli ölçüde farklılık gösterip göstermediği ile ilgilenir. Verilerin istatistiksel analizinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Deney tasarımı sonrasında varyans hesabı yapılır. Hesaplama kullanılan formüller tüm formüller sırasıyla belirtilmiştir.

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

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

$k_A$ : A parametresinin seviye sayısı ,  $A_i$ :  $A_i$  seviyesindeki gözlemlerin toplamı,  $n_{A_i}$  :  $A_i$  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

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

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

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

$k_A$ : 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,  $F_{Tablo}$ :  $F_{\alpha, v_1, v_2}$ ,  $\alpha$  : Risk/Anlamlılık Düzeyi

Her parametrenin ve etkileşimlerinin kareler toplamı hesaplanır. Parametrelerin ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri belirlenir. Aynı şekilde kontrol edilemeyen parametrelerin serbestlik dereceleri ve kareler toplamı belirlenir. Ortogonal dizi serbestlik derecesi ve parametrelerin serbestlik dereceleri farkı hatanın serbestlik derecesini ifade eder. Hatanın kareler toplamının serbestlik derecesine oranı ile hata varyansı belirlenir. Her parametre için  $F$  değeri hesaplanır ve tablo değerleri ile karşılaştırma yapılır. Tablodaki değerden büyük olması testin güvenli olduğunu ifade eder.

### 3.4. Sinyal/Gürültü Oranı

Taguchi tarafından geliştirilen  $S/N$  oranı, gürültü ile en iyi şekilde başa çıkabilecek kontrol seviyelerini seçmek için bir performans ölçüsüdür.  $S/N$  oranı hem ortalamayı hem de değişkenliği hesaba katar. 3 kategori ile belirtilmektedir.

Performans karakteristiğinin en düşük en iyi olduğu durum için;

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

En büyük/yüksek en iyi olduğu durum için;

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

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.

### 3.5. Yapılan Çalışmalar

Uygulanacak olan derin çekme işlemi için malzeme ve parça seçimi ile başlanmıştır. Parça yapısı silindirik seçilmiştir ve kalınlığı 0,8 mm , A6061-O Alüminyum malzemesi tercih edilmiştir. Bu seçimlerde malzemenin çekme operasyonlarında kullanımının yüksek olması göz önünde bulundurulmuştur. Parça yapısı ise literatürde sık kullanılması ve analiz süreleri göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

**Çizelge 3.1.** AA6061 kimyasal bileşimi

Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Diğer	Al
0,5	0,6-1,0	0,1	0,2-0,8	0,8-1,2	0,25	0,6-1,1	0,1	0,15	Kalan

**Çizelge 3.2.** AA6061 mekanik özellikleri

Temper	Akma Mukavemeti (MPa) Min-Max	Çekme Mukavemeti (MPa) Min-Max	Uzama (%50) Min - Max	Sertlik (Brinel) Min-Max
0	103 - 228	55 - 124	26	30
T4	110 - 140	180 - 230	24	65
T6	240 - 270	260 - 310	20	95

Çalışmanın diğer bir adımı derin çekme operasyonuna etki eden parametrelerin belirlenmesidir. Belirlenen parametreler içerisinde değişken olarak alınacak parametreler ve üzerinde etkisinin gözleneceği parametreler belirlenmiştir.

Derin çekmede en sık yaşanan problemlerden biri parçada yırtıkların oluşması ya da bazı bölgelerin talep edilen incelleme limitleri dışına çıkmasıdır. Kalınlığa olan etkilerinin incelenmesi için 3 adet parametre belirlenmiştir. Bunlar; kalıp köşe yarıçapı, zımba yarıçapı ve baskı kuvvetidir. Her bir parametre için 3 adet seviye belirlenmiştir.

Seviyeler belirlenirken literatürde yer alan öneri, kısıtlama ve hesaplamalar dikkate alınmıştır. Zımba yarıçapı için sac kalınlığı kısıtı dikkate alınarak; 2,5 mm , 5 mm ve 8 mm olacak şekilde değerler belirlenmiştir. Kalıp yarıçap değerleri de min 3 mm , 6 mm ve 10 mm olacak şekilde seçilmiştir. Baskı kuvveti için seçilen değerler de şu şekildedir; 50 kN, 70 kN ve 90 kN.

**Çizelge 3.3.** Belirlenen parametre ve seviyeleri

	1	2	3
Kalıp Köşe Yarıçapı(mm)	3	6	10
Zımba Köşe Yarıçapı(mm)	2,5	5	8
Baskı Kuvveti(kN)	50	70	90

Tam faktöriyel yöntemler ile  $3^3$  şeklinde hesaplanarak 27 adet deneme yapılması gerekmektedir. Fakat ortogonal düzen seçimi ile bu deneme sayıları azaltılmakta ve büyük ölçüde maliyet ve zaman kazancı sağlanmaktadır. Belirlenen parametreler ve seviyeler doğrultusunda 3 parametre – 3 seviye için L9 Ortogonal düzeni seçilmiştir.

**Çizelge 3.4.** L9 ortogonal düzen (Koçar 2014)

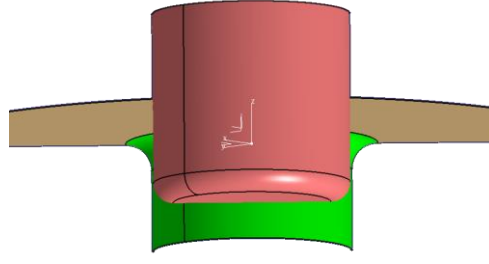
Deney No	Parametreler			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Parametre ve seviyeleri L9 ortogonal düzenine yerleştirilmiştir.(Çizelge 3.5)

**Çizelge 3.5.** Parametrelerin L9 ortogonal düzene yerleşimi

Deney No	Kalıp Yarıçapı (mm)	Zımba Yarıçapı (mm)	Baskı Kuvveti(kN)
1	3	2,5	50
2	3	5	70
3	3	8	90
4	6	2,5	90
5	6	5	50
6	6	8	70
7	10	2,5	70
8	10	5	90
9	10	8	50

Belirlenen değerler doğrultusunda sonlu elemanlar analizleri yapılacaktır. Analiz öncesinde, simülasyonda kullanılmak üzere kalıp yüzey çalışmaları yapılmıştır. Çalışmalar CATIA V5 kullanılarak oluşturulmuştur.

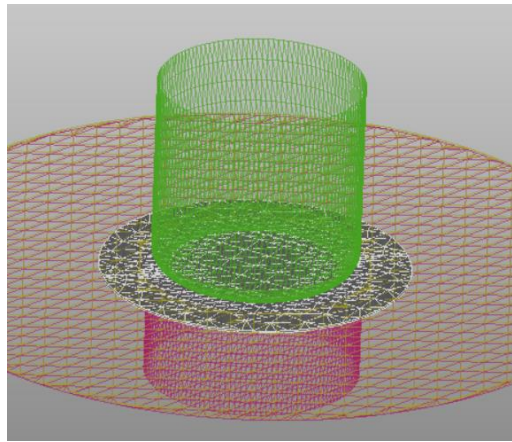


**Şekil 3.2.** Analiz için tasarlanan proses yüzeyleri

**Çizelge 3.6.** Parametrelerin L9 ortogonal düzene yerleşimi

Parametreler	
Açınım Ölçüsü (mm)	120
Sac Kalınlığı (mm)	0,8
Zimba Çapı (mm)	80
Zimba Yarıçapı (mm)	2,5-5-8
Kalıp Yarıçap (mm)	3-6-10
Sürtünme Katsayısı	1,5
Çekme Derinliği (mm)	20
Çekme Boşluğu (mm)	0,86
Baskı Kuvveti(kN)	50-80-120

Analiz çalışmaları Autoform R8 ile gerçekleştirilmiştir. 9 adet simülasyon çalıştırılarak final parçalar üzerinden kalınlık değerleri ölçülmüştür. Şekil 3.3’de sac parça kalıp mesh yapısı gösterilmiştir.

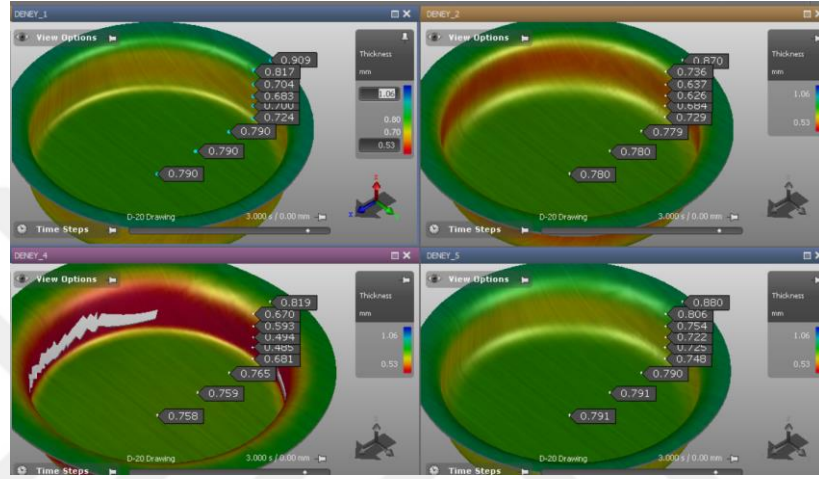


**Şekil 3.3.** Simülasyon mesh yapısı

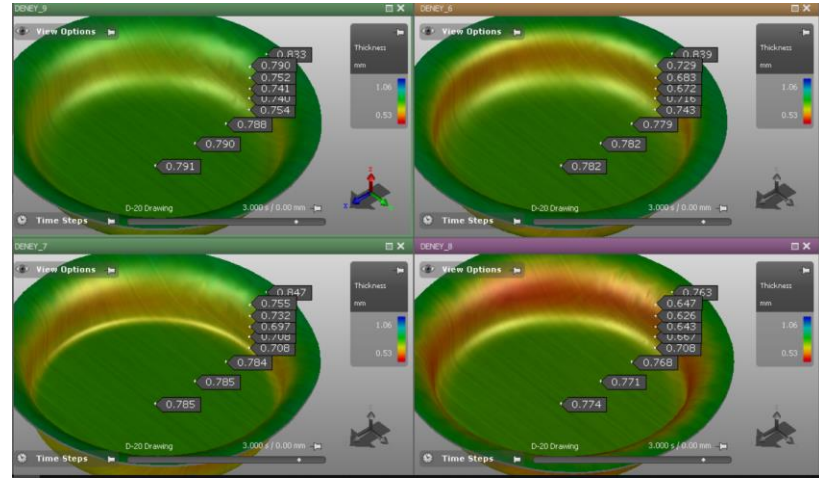


#### 4. BULGULAR

Proses parametreleri L9 ortogonal düzenine göre yerleştirilip 9 adet deney uygulanmıştır. Deneyler sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında ölçülen değerler final sacı üzerinde gösterilmiştir.(bkz.Şekil 4.1-Şekil 4.2) Şekillerde 8 adet parçadan ölçümler gözükmektedir.

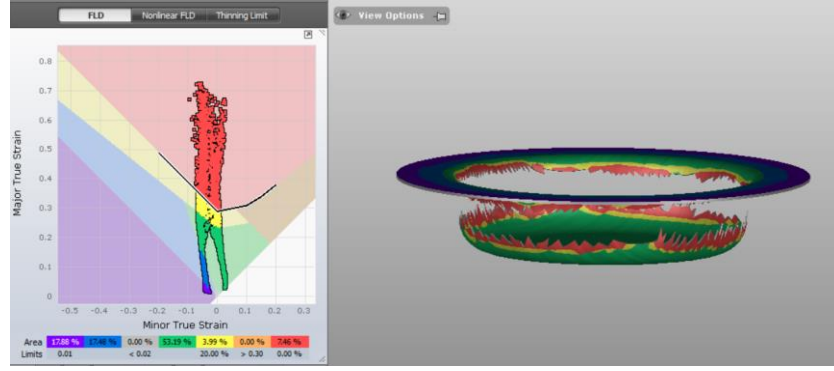


Şekil 4.1. Derin çekme simülasyon sonuçları



Şekil 4.2. Derin çekme simülasyon sonuçları -2

3 no'lu deney sonucunda parçanın tabanı tamamen yırtılmıştır. Bu sebeple ölçüm değerleri 0 alınacaktır. Parçalar üzerinden ölçülen kalınlık değerleri Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.3.** Deneysel-3 sonucu yırtılan parça

Kalınlık ölçümleri sonucunda tüm noktalardan alınan değerler Çizgelde 4.1’de belirtilmiştir. Ayrıca hesaplanan her deney için hesaplanan ortalama ve S/N değerleri de tabloda belirtilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Deneysel sonucunda ölçülen kalınlık değerleri

Deneysel No	Kalıp Yarıçapı (mm)	Zımba Yarıçapı (mm)	Baskı Kuvveti (kN)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\bar{y}$	$S^2$	S/N
1	3	2,5	50	0,909	0,817	0,704	0,683	0,700	0,724	0,790	0,790	0,790	0,76744	0,00520	20,53963
2	3	5	70	0,870	0,736	0,637	0,626	0,684	0,729	0,779	0,780	0,780	0,73567	0,00604	19,52235
3	3	8	90	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0,00000	0,00000	0
4	6	2,5	70	0,819	0,670	0,593	0,494	0,485	0,681	0,765	0,759	0,758	0,66933	0,01477	14,81985
5	6	5	90	0,880	0,806	0,754	0,722	0,725	0,748	0,790	0,791	0,791	0,77856	0,00239	24,04904
6	6	8	50	0,839	0,729	0,683	0,672	0,716	0,743	0,779	0,782	0,782	0,74722	0,00287	22,89026
7	10	2,5	90	0,847	0,755	0,732	0,697	0,708	0,708	0,784	0,785	0,785	0,75567	0,00243	23,7168
8	10	5	50	0,763	0,647	0,626	0,643	0,667	0,708	0,768	0,771	0,774	0,70744	0,00391	21,06955
9	10	8	70	0,833	0,790	0,752	0,741	0,740	0,754	0,788	0,790	0,791	0,77544	0,00095	28,02051

Her parametre için S/N değerleri hesaplanıp optimum proses parametre değerleri belirlenmiştir. S/N oranı için en iyi durum nominal olduğu durum seçilmiştir. Çizelge 4.3.’deki değerler incelendiğinde parametreler için nominal değerler şu şekildedir; kalıp yarıçapı için değer seviye 2, zımba yarıçapı için de seviye 2 ve baskı kuvveti için ise seviye 1 olarak gözükmektedir.

**Çizelge 4.2.** Hesaplanan S/N değerleri

	SEVİYE	DENEME SAYISI	S/N	$\bar{S}/N_{ij}$
Kalıp Yarıçapı(mm)	1	1	20,5396	20,0310
		2	19,5224	
		3	0,0000	
	2	4	14,8199	20,5864
		5	24,0490	
		6	22,8903	
	3	7	23,7168	24,2690
		8	21,0695	
		9	28,0205	
Zımba Yarıçapı(mm)	1	1	20,5396	19,6921
		4	14,8199	
		7	23,7168	
	2	2	19,5224	21,5470
		5	24,0490	
		8	21,0695	
	3	3	0,0000	25,4554
		6	22,8903	
		9	28,0205	
Baskı Kuvveti(kN)	1	1	20,5396	21,4998
		6	22,8903	
		8	21,0695	
	2	2	19,5224	20,7876
		4	14,8199	
		9	28,0205	
	3	3	0,0000	23,8829
		5	24,0490	
		7	23,7168	

**Çizelge 4.3.** S/N istatistiksel oran sonuçları

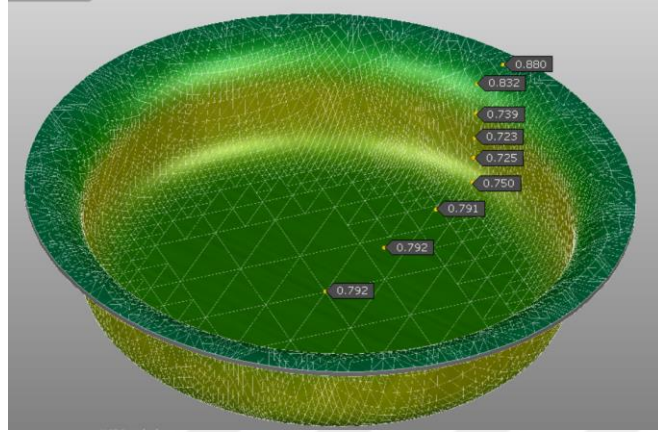
	Kalıp Yarıçapı (mm)	Zımba Yarıçapı(mm)	Baskı Kuvveti(kN)
1	20,031	19,692	21,500
2	20,586	21,547	20,788
3	24,269	25,455	23,883
Delta	4,238	5,763	3,095
Rank	2	1	3

Çizelge 4.3’de yer alan her seviyenin nominal değeri optimum değeri vermektedir. Optimum çekme operasyonu değerleri, yapılan 9 adet deneyin dışında olan kombinasyonlardan biri çıkmıştır. Kalıp yarıçapı 6 mm, zımba yarıçapı 5 mm, baskı kuvveti 50 kN olacak şekilde optimum durumu doğrulamak için simülasyon kurulmuştur.

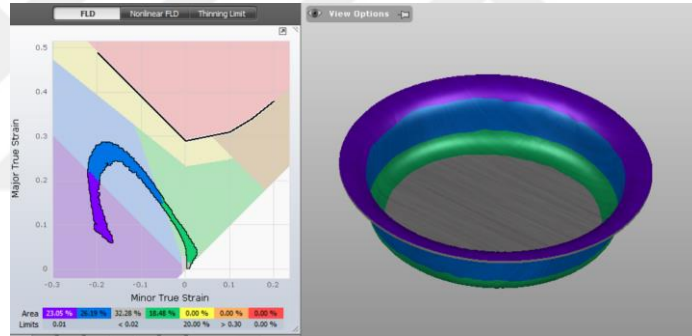
Simülasyon sonucunda çıkan parça üzerinden kalın değerleri Şekil 4.4’te gösterilmiştir.

Parçada herhangi bir yırtılma ya da %10'un üzerinde incelme değeri gözükmemektedir.

Şekil 4.5'te de FLD diyagramında görüldüğü gibi yırtılma riski gözükmemektedir.



Şekil 4.4. Doğrulama simülasyon kalınlık değerleri



Şekil 4.5. Doğrulama simülasyon sonucu

Çizelge 4.4. S/N değerlerine göre oluşturulan Varyans analizi

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı Yüzdesi	F-değeri	P-değeri
Kalıp Yarıçapı(mm)	2	28,958	27,67%	1,76	0,47
Zımba Yarıçapı((mm)	2	32,662	31,21%	4,4	0,319
Baskı Kuvveti(kN)	2	36,023	34,43%	2,57	0,403
Hata	1	6,998	6,69%		
Toplam	7	104,641	100%		

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Sac metal şekillendirmede final parça kalitesini arttırmak adına yapılacak çalışmalarda ilk adım çekme işleminin kontrolü ve geliştirme çalışması olmaktadır. Bu sebeple de pek çok geliştirme çalışması yapılmış ve çok daha fazlası yapılabilecek bir alandır. Bu çalışmada da derin çekme operasyonunda en çok problem yaşanan kalınlık değişiminin etkisi üzerinde araştırmalar yapılmıştır.

Operasyon sırasında etkili olan birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin doğru tayin edilmesi çekme operasyonunu ve final parçayı oldukça etkilemektedir. Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile baskı kuvveti, kalıp yarıçapı ve zımba yarıçapının operasyon sonunda oluşan kalınlık dağılımına ne derece etkisi olduğunu belirlemek için denemeler yapılmıştır.

Klasik yöntemlerle deneme yanılma süreci çok zaman almaktadır. Analizler sayesinde bu süreç kısaltılarak doğrudan ilgili parametreler geliştirilerek daha hızlı ve doğru sonuç elde edilebilmektedir. Klasik yöntemler ile 27 deneme yapılması gerekirken L9 ortogonal düzeni kullanılarak 9 adet deneme ile çalışmalar yapılmıştır.

Kalıp yarıçap değerleri 3mm ,6 mm ,10 mm, zımba yarıçapı 2,5 mm ,5 mm, 8 mm ve baskı kuvveti 50 kN , 70 kN ,90 kN olacak şekilde 3 seviyede değerler verilmiştir. Denemeler Autoform programı kullanılarak simüle edilmiştir. Elde edilen kalınlık değerleri nominal S/N oranına tabi tutularak optimum parametre değerleri hesaplanmıştır. Son olarak da varyans analizi uygulanarak final sonuca en çok etkisi olan parametreler belirlenmiştir. %34,43 oranla baskı kuvveti en yüksek etkiye sahiptir. Zımba kuvvetinin etkisi de ona yakın olarak %31,21 hesaplanmıştır. Kalıp yarıçapının da %27,67'lik bir değerinde etkisi olduğu görülmüştür (bkz. Şekil 4.4.). Yapılan çalışma sonunda seçilen parametrelerin yakın değerlerde etkili olduğu görülmüştür.

Çekme işlemi diğer yöntemlere kıyasla daha kompleks bir yapıya sahip ve bir çok parametre ve değişkenin etkisi altındadır. Bu sebeple yapılacak olan çalışmalarda

seçilecek parametrelerin çeşitliliği daha detaylı ve doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Deneme sayısının az olması zaman ve maliyet açısından büyük avantaj sağlamaktadır fakat sonuçların doğruluğunu artırmak adına, yapılacak deneme sayıları ya da ölçüm noktalarının artırılması avantaj sağlayacaktır.

İlerleyen çalışmalar için kullanılacak olan deneysel tasarım yöntemleri, istatistiksel analiz yöntemleri , farklı malzeme, farklı geometri seçimleri.. vb. gibi pek çok gelişmeye açık alan bulunmaktadır.



## KAYNAKLAR

- Browne, M.T. , Hillery, M.T. (2001). *Optimising The Variables When Deep-Drawing C.R.1 Cups* , Journal Of Materials Processing Technology 136 (2003) 64–71
- Bahloul, R. , Ben-Elechi, S., Potiron, A. (2005). *Optimisation of Springback Predicted by Experimental And Numerical Approach By Using Response Surface Methodology*, Journal of Materials Processing Technology 173 (2006) 101–110
- Wifi, A.S. , Abdelmaguid, T.F. , El-Ghandour, A.I. (2007). *Review of The Optimization Techniques Applied To The Deep Drawing Process*, Proceedings of the 37th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Alexandria, Egypt
- Ulu, D. (2008). *Derin Çekme Prosesi İle Üretilen Alüminyum Sac Metal Parçalarına Ait Veri Tabanı Oluşturulması*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisan Tezi, Ankara
- Taylan, D., (2009). *Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi , Isparta
- Raju, S., Ganesan, G., Karthikeyan, R. (2010). *Influence of Variables In Deep Drawing of AA 6061 Sheet*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China , 20(2010) 1856-1862
- Yalçın, S. (2010). *Analysis and Modelling of Plastic Wrinkling in Deep Drawing*, Master of Science in Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, Mechanical Engineering, Master Thesis
- Asa, S. (2010). *AA6061 İşlem Alaşımının Homojenizasyon Prosesinin Ekstrüzyon Kabiliyetine Etkisi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Akıllı, A. (2010). *AS 5754 Malzemesinin Derin Çekme Metodu İle Soğuk-Sıcak Şekillendirilmesi Ve Fem İle Analizi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Karabük
- Ak, M. (2012). *AA206 Alüminyum Döküm Alaşımında Empürite Demirin Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi* ,İstanbul Teknik Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Bozkurt, V. (2012). *Process Parameter Optimization of A8011 Pilfer-Proof Material Using Response Surface Methadology* , Istanbul Technical University Graduate School

of Science Engineering And Technology , Department of Mechanical Engineering Material And Manufacturing Programme , M.Sc. Thesis

Santhankumar, J. , Arunkumar, G. (2012). *Optimization of Deep Drawing Process Parameters Using Design of Experiments* , International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.), Vol. 6, N. 5 ,ISSN 1970 – 8734

Groover, M.P. (2013). *Principles of Modern Manufacturing 5/e*, John Wiley & Sons, Inc

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

Koçar, A. (2014). *Derin Çekme İşleminde Ürün Kalitesinin Tahmini Ve Kontrolü, Sakarya Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü , Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi*

Ay, İ. (2015) Balıkesir Üniversitesi, *İmalat Yöntemleri II Ders Notları*

Chaudhari, S. S., Patil, N.K. (2015). *Spring Back Prediction of Sheet Metal in Deep Drawing Process*, International Journal Of Mechanical Engineering And Technology (Ijmet) , Volume 6, Issue 12, Pp. 09-17

Dwivedi, R. , Agnihotri, G. (2016). *Study of Deep Drawing Process Parameters, 5th International Conference of Materials Processing and Characterization* ,ScienceDirect, 4 (2017) 820–826

Mahmoodi, M., Sohrabi, H. (2017). *Using the Taguchi Method for Experimental and Numerical Investigations on the Square-Cup Deep-Drawing Process for Aluminum/Steel Laminated Sheets*, Mechanics of Advanced Composite Structures 4 (2017) 169-177

Erdoğan, M. (2017). *Alüminyum Alaşımlarının Derin Çekme İşleminin Sonlu Eleman Yöntemi ile Analizi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*

Sandeep, M. (2019). *Optimization Of Deep Drawing Process Parameters For Cylindrical Cup*, Materials Today: Proceedings, ScienceDirect, 19 (2019) 772–777

Karaca, C. (2019). *Derin Çekme İşleminde Değişken Baskı Kuvvetinin En Aw 1070A H22 Alüminyum Sacının Şekil Alma Kabiliyetine Etkisi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Samsun

Autoform Forming Reality. Eriřim adresi:  
<https://www.autoform.com/en/glossary/deep-drawing/>

Avas Metal San. Tic. Ař. 6061 Alüminyum. Eriřim adresi:  
<https://www.avasmetal.com.tr/?/aluminyum/6061-aluminyum>



## **EKLER**

**EK 1**      %95 için F Tablosu



**EK 1**

*F* TABLOSU ( $\alpha=0.05$ )

		$V_1$ (Pay serbestlik derecesi)																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	18	20	25	30	40	60	100	200	
$V_2$ (Payda serbestlik derecesi)	1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.91	245.95	247.32	248.01	249.26	250.10	251.14	252.20	253.04	254.68	
	2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.44	19.45	19.46	19.46	19.46	19.47	19.48	19.49	19.49
	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.67	8.66	8.63	8.62	8.59	8.57	8.55	8.54	8.54
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.82	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.65	5.65
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.58	4.56	4.52	4.50	4.46	4.43	4.41	4.39	4.39
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.90	3.87	3.83	3.81	3.77	3.74	3.71	3.69	3.69
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.47	3.44	3.40	3.38	3.34	3.30	3.27	3.25	3.25
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.17	3.15	3.11	3.08	3.04	3.01	2.97	2.95	2.95
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.96	2.94	2.89	2.86	2.83	2.79	2.76	2.73	2.73
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.80	2.77	2.73	2.70	2.66	2.62	2.59	2.56	2.56
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.67	2.65	2.60	2.57	2.53	2.49	2.46	2.43	2.43
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.57	2.54	2.50	2.47	2.43	2.38	2.35	2.32	2.32
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.48	2.46	2.41	2.38	2.34	2.30	2.26	2.23	2.23
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.41	2.39	2.34	2.31	2.27	2.22	2.19	2.16	2.16
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.35	2.33	2.28	2.25	2.20	2.16	2.12	2.10	2.10
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.30	2.28	2.23	2.19	2.15	2.11	2.07	2.04	2.04
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.26	2.23	2.18	2.15	2.10	2.06	2.02	1.98	1.99
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.22	2.19	2.14	2.11	2.06	2.02	1.98	1.95	1.95
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.18	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.94	1.91	1.91
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.15	2.12	2.07	2.04	1.99	1.95	1.91	1.88	1.88
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.12	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.88	1.84	1.84	
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.10	2.07	2.02	1.98	1.94	1.89	1.85	1.82	1.82	
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.08	2.05	2.00	1.96	1.91	1.86	1.82	1.79	1.79	
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.05	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.80	1.77	1.77	
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.04	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.78	1.75	1.75	
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	2.02	1.99	1.94	1.90	1.85	1.80	1.76	1.73	1.73	
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	2.00	1.97	1.92	1.88	1.84	1.79	1.74	1.71	1.71	
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.99	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.73	1.69	1.69	
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.23	2.18	2.10	2.03	1.97	1.94	1.89	1.85	1.81	1.75	1.71	1.67	1.67	
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.96	1.93	1.88	1.84	1.79	1.74	1.70	1.66	1.66	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.87	1.84	1.78	1.74	1.69	1.64	1.59	1.55	1.55	
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.95	1.87	1.81	1.78	1.73	1.69	1.63	1.58	1.52	1.48	1.48	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.78	1.75	1.69	1.65	1.59	1.53	1.48	1.44	1.44	
70	3.98	3.13	2.74	2.50	2.35	2.23	2.14	2.07	2.02	1.97	1.89	1.81	1.75	1.72	1.66	1.62	1.57	1.50	1.45	1.40	1.40	
80	3.96	3.11	2.72	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.95	1.88	1.79	1.73	1.70	1.64	1.60	1.54	1.48	1.43	1.38	1.38	
90	3.95	3.10	2.71	2.47	2.32	2.20	2.11	2.04	1.99	1.94	1.86	1.78	1.72	1.69	1.63	1.59	1.53	1.46	1.41	1.36	1.36	
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.85	1.77	1.71	1.68	1.62	1.57	1.52	1.45	1.39	1.34	1.34	
200	3.89	3.04	2.65	2.42	2.26	2.14	2.06	1.98	1.93	1.88	1.80	1.72	1.66	1.62	1.56	1.52	1.46	1.39	1.32	1.26	1.26	