
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

# ALÜMİNYUM ENJEKSİYON MAKİNALARINDA KULLANILAN DÖKÜM PARAMETRELERİNİN MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE İŞLENEBİLİRLİĞİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

**Emre AKKAYA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**
**İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2023**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

Bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Emre AKKAYA

13/04/2023

# ALÜMİNYUM ENJEKSİYON MAKİNALARINDA KULLANILAN DÖKÜM PARAMETRELERİNİN MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE İŞLENEBİLİRLİĞİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Emre AKKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2023

## ÖZET

Alüminyum, günümüzde başta otomotiv, savunma ve havacılık olmak üzere birçok sektörde kullanılan temel malzemelerden biridir. Bu çalışmada alüminyum alaşımlarından Al$Si_{12}Cu$ malzemesi kullanılarak belirlenen enjeksiyon parametrelerine göre test numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde, önce sertlik ve çekme testleri, sonrasında ise CNC freze tezgâhında delik delme deneyleri yapılmıştır. Kesme kuvvetleri, bir dinamometre ile ölçülmüştür. Elde edilen delikler üzerinde, çaptan sapma ve silindiriklik kontrolleri yapılmıştır. Böylelikle, kullanılan enjeksiyon parametrelerinin malzemenin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerine olan etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Mekanik testler için tam faktöriyel deney tasarım yöntemi ve delik delme içinde Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılmıştır. Mekanik test sonuçlarının istatiksel analizlerine göre, en yüksek sertlik değerinin, ergimiş metal sıcaklığı 725 ℃, enjeksiyon hızı 4,0 m/s, kalıp açılma zamanı 10 s ile elde edildiği, en yüksek kopma dayanımının ise ergimiş metal sıcaklığı 725 ℃, enjeksiyon hızı 2,6 m/s, kalıp açılma zamanı 15 s olduğunda göstermiştir. Delik delme deneylerinin sonuçları, en düşük kesme kuvvetlerinin, kesme hızı 40 m/dk ve ilerleme 0,1 mm/dev alındığında, en düşük çaptan sapma değerlerinin, kesme hızı 90 m/dk ve ilerleme 0,22 mm/dev kullanıldığında meydana geldiğini, en iyi silindiriklik için ise, kesme hızının 90 m/dk ve ilerlemenin 0,1 mm/dev alınması gerektiğini ortaya çıkartmıştır.

| | | |
|---|---|---|
| Bilim Kodu | : | 91438 |
| Anahtar Kelimeler | : | Alüminyum, yüksek basınçlı döküm, faktöriyel tasarım, deney tasarımı, taguchi, talaşlı imalat |
| Sayfa Adedi | : | 89 |
| Danışman | : | Doç. Dr. Yunus KAYIR |

# INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CASTING PARAMETERS USED IN ALUMINUM INJECTION MACHINES ON MECHANICAL PROPERTIES AND MACHINABILITY OF THE MATERIAL

(M. Sc. Thesis)

Emre AKKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2023

## ABSTRACT

Aluminum is one of the basic materials used in many sectors, especially in automotive, defense, and aerospace. In this study, test samples were produced according to the injection parameters determined by using Al$Si_{12}Cu$ raw material from aluminum alloys. Hardness and tensile tests were carried out on the produced samples, and then drilling tests were carried out on the CNC milling machine. The cutting forces were measured by using a dynamometer. The drilled holes were controlled for deviation of diameter and cylindricity.Thus, it is aimed to understand the effect of the injection parameters used on the mechanical and machinability properties of the material. Full factorial test design method was used for mechanical tests and Taguchi test design method was used for hole drilling. According to the statistical analysis of the mechanical test results,the highest hardness value was obtained with molten metal temperature 725 ℃, injection speed 4.0 m/s, mold opening time 10 s, the highest breaking strength was obtained with molten metal temperature 725 ℃, injection speed 2.6 m/s and mold opening time was 15 s. The results of the drilling tests show that the lowest cutting forces occur when the cutting speed is 40 m/min and the feed is 0.1 mm/rev, the minimum deviation from the diameter is when the cutting speed is 90 m/min and the feed is 0.22 mm/rev. For best cylindricality, the cutting speed should be 90 m/min and the feed should be 0.1 mm/rev.

| | | |
|---|---|---|
| Science Code | : | 91438 |
| Key Words | : | Aluminum, high pressure die-casting, factorial design, design of experiment,taguchi, machining |
| Page Number | : | 89 |
| Supervisor | : | Assoc. Prof. Yunus KAYIR |

# TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Yunus KAYIR'a, yoğun çalışmalarım sürecinde bana destek olan aileme ve çalışma arkadaşlarıma, deneysel çalışmalarım sırasında yardımını esirgemeyen Onur TARHAN'a, teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

ÖZET ..... iv

ABSTRACT ..... v

TEŞEKKÜR ..... vi

İÇİNDEKİLER ..... vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ..... x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ..... xii

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... xiv

1. GİRİŞ ..... 1

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI ..... 3

2.1. Alüminyum ..... 3

2.2. Alüminyum Alaşımları ..... 3

2.2.1. Alüminyum alaşımları katkı elementleri ..... 5

2.3. Alüminyum Alaşımlarının İşlenebilirliği ..... 7

3. YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM ..... 9

3.1. Yüksek Basınçlı Döküm Makineleri ..... 10

3.1.1. Soğuk kamaralı döküm makineleri ..... 11

3.1.2. Sıcak kamaralı döküm makineleri ..... 12

3.2. Yüksek Basınçlı Döküm Yönteminde Kullanılan Parametreler ..... 13

3.2.1. Enjeksiyon hızı ..... 14

3.2.2. Kalıp sıcaklığı ..... 15

3.2.2. Kalıp açılma zamanı ..... 15

4. MEKANİK TESTLER ..... 17

4.1. Sertlik Testi ..... 17

4.2. Çekme Testi ..... 17

**Sayfa**

5. TALAŞLI İMALAT VE TALAŞ KALDIRMA ..... 19
5.1. Talaşlı İmalat Yöntemleri ..... 19
5.2. Talaşlı İmalatı Etkileyen Faktörler ..... 20
5.2.1. Kesici takım ..... 21
5.2.2. İlerleme miktarı ..... 21
5.2.3. Kesme hızı ..... 21
5.2.4. İş parçası ..... 22
5.2.5. Kesme (talaş) derinliği ..... 22
5.2.6. Soğutma sıvısı ..... 23
5.3. Talaş Oluşumu ..... 23
5.3.1. Talaşlı imalatta ısı oluşumu ..... 24
5.4. Talaş Tipleri ..... 25
5.5. Delik Delme ..... 25
5.5.1. Delik delme mekaniği ..... 26
5.5.2. Delik delme işleminde kuvvetler ..... 26
5.5.3. Delik delme işleminde kesici takım (matkap) ..... 27
5.5.4. Delik delme kalitesi ..... 28
6. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ ..... 31
6.1. Deney Tasarım Yöntemleri (Design Of Experiments: DOE) ..... 31
6.1.1. Faktöriyel Tasarım ..... 32
6.1.2. Taguchi ..... 33
6.1.3. Varyans Analizi (ANOVA) ..... 34
6.1.4. Regresyon Analizi ..... 34
7. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ..... 35
7.1. Literatürün Değerlendirilmesi ..... 38
8. MATERYAL VE METOT ..... 39

**Sayfa**

8.1. Deney malzemesi ve Parçasının Belirlenmesi ..... 39
8.2. Enjeksiyon Parametreleri ve Üretim ..... 40
8.3. Mekanik Testler ..... 42
8.4. Delik Delme Deneyleri ..... 46
8.5. Deney Sonuçları ve Değerlendirme ..... 50
9. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME..... 53
9.1. Mekanik Deney Sonuçları İstatiksel Analizi..... 53
9.1.1. Sertlik deneyi için istatiksel analiz..... 53
9.1.2. Çekme deneyi için İstatiksel Analiz..... 58
9.2. Delik Delme Deneyleri Analiz..... 63
9.2.1. Kesme kuvvetleri ve moment ölçüm sonuçları için istatiksel analiz ..... 64
9.2.2. Delik çapları ve silindiriklik ölçüm sonuçları için istatiksel analiz ..... 69
9.3. Mikroyapı İncelemesi..... 75
10. TARTIŞMA..... 77
11. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 79
KAYNAKLAR ..... 83
ÖZGEÇMİŞ ..... 89

# ÇİZELGELERİN LİSTESİ

**Çizelge** **Sayfa**

Çizelge 2.1. Alüminyum alaşımları katkı elementleri ..... 5

Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi ..... 7

Çizelge 8.1. Etial 141 Kimyasal özellikleri ..... 40

Çizelge 8.2. Basınçlı döküm makinesi teknik özellikleri ..... 41

Çizelge 8.3. Enjeksiyon Parametreleri ..... 41

Çizelge 8.4. Enjeksiyon üretim faktörleri ..... 43

Çizelge 8.5. Tam faktöriyel deney tasarım modeli ..... 44

Çizelge 8.6. Delik delme işleminde kullanılan matkap özellikleri ..... 47

Çizelge 8.7. Delik delme parametreleri ..... 47

Çizelge 8.8. Delik delme faktörleri ..... 48

Çizelge 8.9. Taguchi L27 deney tasarım modeli ..... 49

Çizelge 9.1. Enjeksiyon parametrelerine göre sertlik değerleri ..... 53

Çizelge 9.2. Sertlik testi için varyans analizi (ANOVA) ..... 55

Çizelge 9.3. Sertlik testi için faktörlerin etki oranları ..... 55

Çizelge 9.4. Enjeksiyon parametrelerine göre numunelerin kopma mukavemeti ..... 58

Çizelge 9.5. Kopma mukavemeti için varyans analizi ..... 60

Çizelge 9.6. Kopma mukavemeti için faktörlerin etki oranları ..... 61

Çizelge 9.7. Kesme kuvvetleri ölçüm sonuçları ..... 64

Çizelge 9.8. $Fz$ değeri için S/N oranları ..... 65

Çizelge 9.9. $Mz$ değeri için S/N oranları ..... 65

Çizelge 9.10. $Fz$ değerleri için varyans analizi ..... 67

Çizelge 9.11. $Mz$ değerleri için varyans analizi ..... 67

Çizelge 9.12. Kesme kuvvetleri için faktörlerin etki oranları ..... 68

Çizelge 9.13. Deliklerin çaptan sapma ve silindiriklik ölçüm sonuçları ..... 70

Çizelge 9.14. Çaptan sapma için S/N oranları ..... 71

**Çizelge** **Sayfa**

Çizelge 9.15. Silindiriklik için S/N oranları ..... 71

Çizelge 9.16. Çaptan sapma değerleri için varyans analizi ..... 73

Çizelge 9.17. Silindiriklik değerleri için varyans analizi..... 73

Çizelge 9.18. Çaptan sapma ve silindiriklik için faktörlerin etki oranları ..... 74

# ŞEKİLLERİN LİSTESİ

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 2.2. Alüminyum alaşım elementleri ve etkileri ..... 4

Şekil 3.1. YBD yöntemi ile üretilmiş örnek parça ..... 9

Şekil 3.2. Yüksek basınçlı dökümde fazların dağılımı ..... 10

Şekil 3.3. Yüksek basınçlı döküm makinesi ve kısımları ..... 11

Şekil 3.4. Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm yöntemi ..... 12

Şekil 3.5. Sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm yöntemi ..... 13

Şekil 4.1 a) Sertlik ölçüm cihazı, b) MITECH marka çekme cihazı ..... 18

Şekil 5.1. Talaşlı imalat yöntemleri: a) Tornalama, b) Delik delme, c) Frezeleme ..... 20

Şekil 5.2 Bir tornalama işleminde, kesme derinliği, ilerleme ve kesme hızı ..... 22

Şekil 5.3. Deformasyon bölgeleri ve ısı oluşumu ..... 24

Şekil 5.4. Sürekli talaş oluşumu ..... 25

Şekil 5.5. Delik delme şematik gösterimi ..... 26

Şekil 5.6. Matkap ucunu etkileyen faktörler ..... 27

Şekil 5.7. Matkap ucu ..... 28

Şekil 5.8. Silindiriklik: a) Şematik gösterimi, b) Kullanımı ..... 29

Şekil 5.9. Dairesellik a) Şematik gösterimi b) Kullanımı ..... 29

Şekil 5.10. Delik boyutlandırma ..... 30

Şekil 6.1. Genel sistem modeli ..... 31

Şekil 8.1. Çalışma planı ..... 39

Şekil 8.2. Yüksek basınçlı döküm makinesi ..... 40

Şekil 8.3. Deney parçası: a) Kalıptan çıkmış hali, b) Teknik resmi ..... 42

Şekil 8.4. Çekme numunesi: a) Parçadan çıkarılmış hali, b) Teknik resmi ..... 43

Şekil 8.5. Sertlik testi yapılan bölgeler ..... 45

Şekil 8.6. Delik delme deneylerinin yapıldığı CNC freze tezgâhı ..... 46

Şekil 8.7. HSS Matkap ve boyutları ..... 46

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 8.8. Test parçası dinamometre bağlantısı şematik gösterimi ..... 50

Şekil 8.9. Ölçüm yapılan CMM cihazı ..... 51

Şekil 8.10. a) Bir deliğin kesit görünümü b) CMM ile delik ölçümü ..... 51

Şekil 9.1. Sertlik için Pareto Grafiği ..... 56

Şekil 9.2. Sertlik deneyi ana etkiler grafiği ..... 57

Şekil 9.3. Sertlik değeri üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü ..... 57

Şekil 9.4. Örnek çekme testi numunesi ..... 58

Şekil 9.5. Kopma mukavemeti için pareto analizi ..... 61

Şekil 9.6. Çekme deneyi ana etkiler grafiği ..... 62

Şekil 9.7. Kopma mukavemeti üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü ..... 63

Şekil 9.8. Deliklerin arka taraftan patlatılmış görüntüsü ..... 63

Şekil 9.9. $Fz$ S/N ana etkiler grafiği ..... 66

Şekil 9.10. $Mz$ S/N ana etkiler grafiği ..... 66

Şekil 9.11. $Fz$ değeri üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü ..... 68

Şekil 9.12. $Mz$ değeri üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü ..... 69

Şekil 9.13. Deliklerin CMM ile çap ve silindiriklik ölçümü ..... 69

Şekil 9.14. Çaptan sapma S/N ana etkiler grafiği ..... 72

Şekil 9.15. Silindiriklik S/N ana etkiler grafiği ..... 72

Şekil 9.16. Çaptan değeri üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü ..... 74

Şekil 9.17. Silindiriklik değeri üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü ..... 75

Şekil 9.18. a) 11 numaralı enjeksiyon test numunesi mikroyapısı b) 9 numaralı enjeksiyon test numunesi mikroyapısı ..... 76

# SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler | Açıklamalar |
|---|---|
| **a** | Talaş Derinliği |
| **Al** | Alüminyum |
| **Bar** | Basınç |
| **°C** | Santigrat Derece |
| **Cu** | Bakır |
| **F** | İlerleme Miktarı |
| **Fe** | Demir |
| **g/$cm^3$** | Gram/Santimetreküp |
| **K** | Kelvin |
| **kg** | Kilogram |
| **kgF** | Kilogram Kuvvet |
| **kN** | Kilonewton |
| **kW** | KiloWatt |
| **mm** | Milimetre |
| **Mg** | Magnezyum |
| **Mn** | Mangan |
| **m/dk** | Metre/Dakika |
| **m/s** | Metre/Saniye |
| **mm/dev** | Milimetre/Devir |
| **mm/diş** | Milimetre/Diş |
| **N** | Devir Sayısı |
| **Ni** | Nikel |
| **N.m** | Newton Metre |
| **Pb** | Kurşun |
| **s** | Saniye |
| **Si** | Silisyum |
| **Sn** | Kalay |

| Simgeler | Açıklamalar |
|---|---|
| **V** | Kesme Hızı |
| **Zn** | Çinko |

| Kısaltmalar | Açıklamalar |
|---|---|
| **CMM** | Coordinate Measuring Machine |
| **CNC** | Computer Numerical Control |
| **HSS** | High Speed Steel |
| **S/N** | Signal/Noise |
| **TSE** | Türk Standartları Endüstrisi |
| **YBD** | Yüksek Basınçlı Döküm |
| **YT** | Yığıntı Talaş |

# 1. GİRİŞ

Alüminyum, günümüzde başta Otomotiv, Savunma, Havacılık olmak üzere birçok sektörde kullanılan temel malzemelerden biridir. Doğada bol miktarda bulunması, ucuz ve yumuşak olmasının yanı sıra ekonomik olması sebebi ile de tercih edilmektedir. Alüminyum üretimi için, Ekstrüzyon, Haddeleme, Döküm gibi yöntemler bulunmaktadır. Özellikle Otomotiv ve Savunma sanayi gibi yüksek adetli üretim yapılan sektörlerde alüminyum enjeksiyon yöntemi ile üretim tercih edilmektedir. Alüminyum enjeksiyon üretim yönteminde metal kalıp içerisine yüksek basınçta ergimiş metal enjektesi ile istenilen parçalar yüksek sayıda üretilebilmektedir. Enjeksiyon ile üretim yönteminde, enjeksiyon makineleri kullanılmaktadır. Enjeksiyon makineleri üzerinde ise ayarlanması gereken, kalıp açılma zamanı, malzemenin enjekte hızı, vb. birçok parametre bulunmaktadır. Belirlenen parametrelerin kalıplanan parçaların üzerinde etkisini olduğu bilinmektedir. Örneğin parçaların, kopma, kırılma, vb. mekanik özellikleri değişebilmektedir Bununla birlikte, meydana gelen gaz boşlukları, yüzey kalitesinde bozukluklar, yüzey çatlakları, gibi istenmeyen bazı kusurlar da meydana gelebilmektedir.

Alüminyum enjeksiyon yöntemi ile üretilen malzemeler genellikle yarı mamul olarak tanımlanmaktadır. Malzemeleri son ürüne yakın hale getirmek için ilave işlemler yapılması gerekmektedir. Bunlardan biri de talaşlı imalat yöntemidir.

Bu çalışmada, alüminyum enjeksiyon makinalarında kullanılan Etial 141 ya da TSE standardında yer alan ismiyle Al$Si_{12}Fe$ malzemesinin üretim parametrelerinin malzemenin talaşlı işlenebilme kabiliyetine, mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması ve yukarıda belirtilen kusurların en aza indirilebilmesi ve optimum döküm parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

# 2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

## 2.1. Alüminyum

Alüminyum ve alaşımları günümüzde çelikten sonra en çok kullanılan mühendislik malzemelerindendir. Düşük yoğunluk (2,7 g/$cm^3$), korozyona karşı yüksek dayanım gücü ve iyi elektrik iletkenliği gibi özellikler alüminyumun tercih edilmesini arttırmaktadır. Alüminyum alaşımları diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında, hafiflik, yüksek ısı iletkenliği, düşük ergime sıcaklığı, geri dönüşümü, kolay şekillendirilmesi, vb. gibi avantajlara sahip olduğu görülmektedir (Gökçe ve diğ., 2017).

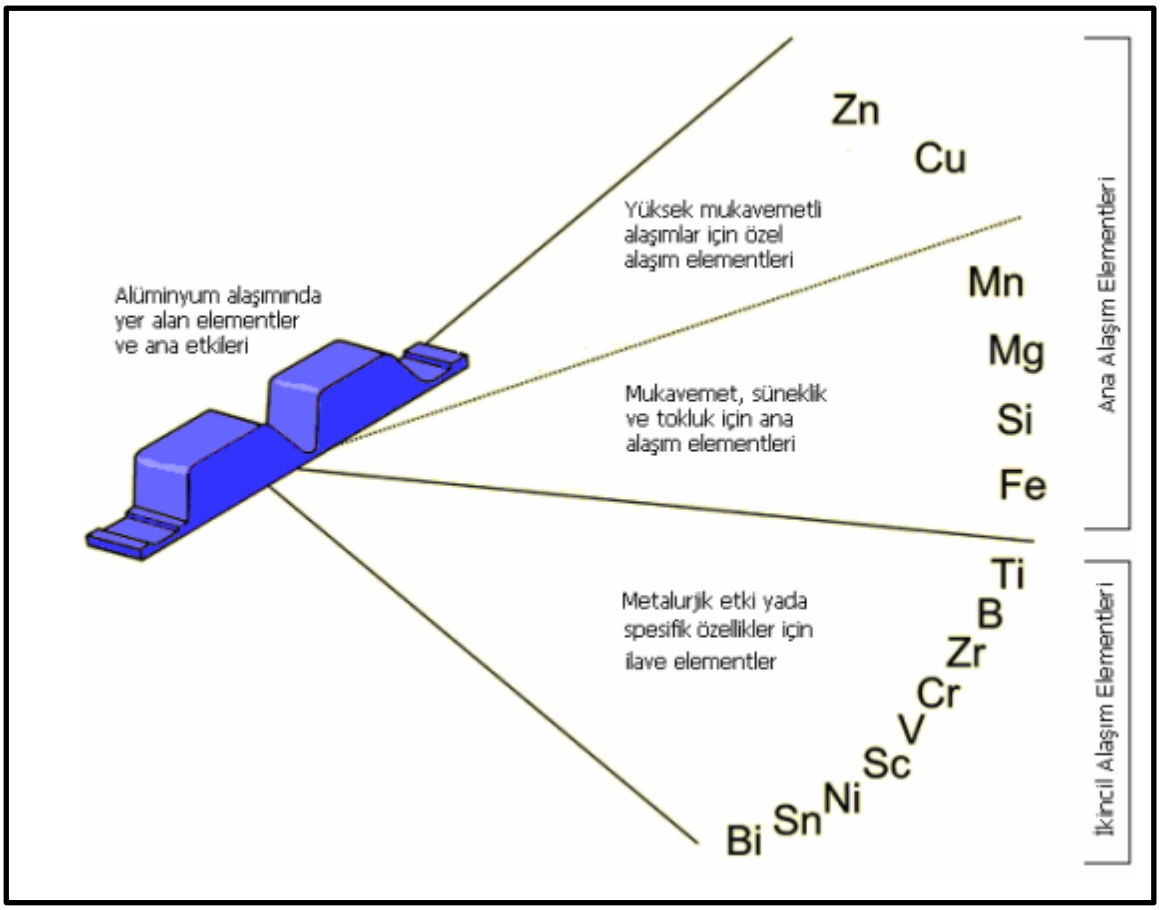
Alüminyum alaşımları yıllardır havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Son yıllarda mukavemetinin arttırılması ile savunma sanayiinde de kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyum, demir alaşımlarına göre yaklaşık üç kat daha hafiftir. Bu durum üretilen ürünlerin enerji tüketimini de azaltmaktadır (Özcömert, 2006).

## 2.2. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum saf halde iken mukavemeti az ve yumuşak durumdadır. Bu sebeple içine bazı elementler katılarak farklı türlerde alüminyum alaşımları oluşturulmaktadır. Alüminyum içerisine Cu, Mg, Si, Zn ve Mn gibi elementler ilave edilerek mukavemet, direnç ve dökülebilirlik özellikleri iyileştirilebilmektedir (Çağan ve diğ., 2017). Alüminyum alaşımlarının üretim yöntemleri göz önüne alındığında iki farklı üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar döküm ve dövme ile üretim metotlarıdır.

Alüminyum döküm alaşımlarının en temel özelliği özgül ağırlıklarının düşük olmasıdır. Ayrıca bu alaşımların ergime sıcaklık dereceleri demir alaşımlarına göre daha az ve %11,7 ötektik durumda dökülebilirlik özelliği yüksektir (Güven, 2006).

Alüminyum içerisine ilave edilen elementlerin alaşım üzerine olan etkileri eklenen elemente göre değişmektedir. Şekil 2.1.'de elementler ve alaşıma olan etkileri gösterilmektedir.




Şekil 2.1. Alüminyum alaşım elementleri ve etkileri (Soy, 2009)

Şekil 2.1' deki grafiğe göre alüminyum alaşımı için temel elementler Zn, Cu, Mn, Mg, Si ve Fe'dir. Bu elementler oluşturulan alaşımın mekanik ve metalürjik özelliklerine etki etmektedir. Ortaya çıkan özellikler, alüminyum malzemelerinin işlenebilirliğini de etkilemektedir (Soy, 2009).

### 2.2.1. Alüminyum alaşımları katkı elementleri

Çizelge 2.1. Alüminyum alaşımları katkı elementleri (Çetin, 2017)

| Dövme Al Alaşımı | Temel Alaşım Elementi | Döküm Al Alaşımı | Temel Alaşım Elementi |
|---|---|---|---|
| 1XXX | Saf alüminyum (En az %99,0 saflıkta) | 1XX | Saf alüminyum (En az %99,0 saflıkta) |
| 2XXX | Alüminyum- Bakır alaşımları | 2XX | Alüminyum- Bakır alaşımları |
| 3XXX | Alüminyum- Mangan alaşımları | 3XX | Alüminyum- Silisyum ve Bakır ve/veya Magnezyum alaşımları |
| 4XXX | Alüminyum- Silisyum alaşımları | 4XX | Alüminyum- Silisyum alaşımları |
| 5XXX | Alüminyum – Magnezyum alaşımları | 5XX | Alüminyum- Magnezyum alaşımları |
| 6XXX | Magnezyum – Silisyum alaşımları | 6XX | Kullanılmayan Seri |
| 7XXX | Alüminyum- Çinko alaşımları | 7XX | Alüminyum- Çinko alaşımları |
| 8XXX | Alüminyum- Lityum alaşımları | 8XX | Alüminyum- Kalay alaşımları |

Çizelge 2.1'de 1XXX ile gösterilen alaşımlar saf alüminyum olarak değerlendirilmektedir. Bu serideki son iki hane, minimum alüminyum saflığını %99 ile %100 arasında tanımlamaktadır. Örneğin, 1060 alüminyum, %99,60'lık bir minimum saf alüminyum içeriğine sahip olacaktır. Genellikle elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır. 2XXX alaşımlarının birçoğuna bakırın yanında magnezyum ve düşük miktarlarda diğer elementler eklenmektedir. Bu seri alaşımlarının birçoğuna bakırın yanında magnezyum ve düşük miktarlarda diğer elementler eklenmektedir. Yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. 3XXX alaşımları boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu serinin en önemli alaşımı 3003 tür. Bu alaşım 1100 alaşımına %1,25 mangan ilavesi ile oluşturulmaktadır. 4XXX alaşımları, termal genleşme katsayısı düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde kullanılmaktadır.

Örneğin 4043 alaşımı 6XXX serisi ile kaynak uygulamasında filler olarak sıkça kullanılmaktadır. 5XXX alaşımları, Magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artmakta fakat süneklik azalmaktadır. Deniz ortamında korozyona karşı direnci yüksek olduğu için, bu ortamda kullanılacak yapıların imalatında kullanılmaktadır. 5052 elektronik, 5083 deniz uygulamaları, 5005 levha mimari uygulamalarında, 5182 içecek kabı uygulamalarında kullanılmaktadır. 6XXX alaşımları ise şekillendirme kabiliyetleri yüksek olduğu için özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla tercih edilmektedir. 6061 serisi deniz araçlarında ve kamyonlarda sıkça kullanılır. 7XXX alaşımlarına, çinkonun yanı sıra magnezyum, krom ve zirkonyum ilave edilebilmektedir. 7XXX serisi, alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Uçak parçaları yapımı ve diğer yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılır. 7050 ve 7075 alaşımları havacılık endüstrisinde çok sık kullanılan iki alaşımdır. 8XXX alaşımlarına lityumun yanı sıra kalay ilavesi de yapılabilmektedir. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahip olmakla beraber diğer Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir.

2XX alaşımları, piston üretiminde yüksek ölçüde kullanılmaktadır. Bakır ile alaşımlanan alüminyum malzemeleri, genellikle yüksek sıcaklıkta dayanım ve tokluk istenen uygulamalarda tercih edilmektedir. Zaman zaman bakırın etkisini desteklemek amacıyla bu alaşımlarda nikel kullanıldığı da görülmektedir. 3XX alaşımlar, Alüminyum ve silisyuma ek olarak, bu alaşımlara bakır veya magnezyum da eklenmektedir (Al-Si + Mg/Cu). Bakır ile alaşımlanan alüminyum, genellikle yüksek sıcaklıkta dayanım ve tokluk istenen uygulamalarda tercih edilmektedir. Silisyumun sağladığı özelliklere ek olarak alaşımda bir miktar magnezyum da bulunması, ısıl işlem sonrasında oldukça iyi mekanik özelliklerin elde edilebilmesini sağlamaktadır. 4XX alaşımlar, mukavemetleri atmosfer etkilerine karşı yüksek olduğundan mimari ve dekoratif dökümler imalinde kullanılır. Yüksek silisyumlu dökümler içten yanmalı motorlarda, vites kutularında, silindir ve karterlerde, nikel gibi metallerin ilavesiyle de piston imalinde kullanılır. 5XX alaşımlar, deniz suyu etkilerine karşı yüksek direnç gösterirler, çekme mukavemetleri yüksektir, süneklik ve işlenebilme özellikleri çok iyidir. 7XX alaşımlar, Al-Zn alaşımları sıcak gevreklik özelliğinden dolayı ancak Cu ile birlikte kullanılır. Sıcak gevreklik ve yüksek katılaşma çekmesinden dolayı basınçlı dökümler için uygun olmayıp orta derecede mukavemet özelliği istenen ve esnekliğin istenmediği üretimlerde kullanılmaktadır. 8XX alaşımlar, Alüminyum ve kalay sıvı fazdayken birbirleriyle karışmamakta; iki metal arasındaki yoğunluk farkı da dikkate

alındığında, sıvı fazda bu iki metal katmanlı bir şekilde birbirlerinden ayrılmaktadır. Bu etkinin karşısında durmak için sıvı fazdayken bu karışımın etkili bir şekilde karıştırılması ve dağılan kalay damlacıklarının tekrar topaklanmasına fırsat vermeden alaşımın hızlıca katılaştırılması gerekmektedir (Çetin, 2017)

Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi (↑: Yükselir ↓: Azalır ≈: Değişmez −: Karakteristik değil veya bilinmiyor) (Güray Alüminyum, 2022)

| | Fe | Si | Mg | Mn | Cu | Zn | Ti | Cr | Ni | Li | Zr | V | Sn | B | Bi | Pb |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Yoğunluk | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ |
| Akışkanlık | ↓ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ≈ | ↓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Sertleşme | ↑ | ↑ | ↑ | ↑↑ | ↑↑↑ | ↑↑↑ | ↑ | ↑ | - | - | - | - | ↓ | - | - | ↓ |
| Mukavemet Sürtünme Mukavemeti | ↑ | ↑ | ↑ | ↑* | ↑↑* | ↑↑↑ | ↑↑ | - | ↑* | - | - | - | ↑* | ↑ | - | - |
| Elektrik İletkenliği | ↓ | ↓↓ | ↓↓ | ↓↓↓ | ↓↓ | ↓ | ↓↓↓ | ↓↓↓ | ↓ | ↓↓↓ | ↓↓ | ↓↓ | ≈ | ↑↑↑ | ≈ | - |
| Korozyon Mukavemeti | - | ↑ | ↑↑↑ | ↑↑ | ↓ | ↓ | - | - | ↓ | - | - | - | ↓ | - | ↓ | ↓ |
| Isısal Genleşme Katsayısı | - | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | - | ↓ | ↓ | - | - | - | - |

## 2.3. Alüminyum Alaşımlarının İşlenebilirliği

Genel olarak Alüminyum alaşımları, magnezyum ve titanyum gibi diğer hafif metalik alaşımlarına göre daha iyi talaşlı işlenebilirlik özelliğine sahiptirler. Alüminyum alaşımlarının işlenebilirlik kriterleri değerlendirilirken; kullanılan kesme parametrelerinin (kesme hızı, takımın talaş açısı, vb), işlenen yüzeyin kalitesine, kesici takım aşınmasına, kesici takım üzerinde oluşan yığıntı talaş (YT) oluşumuna, yüzey pürüzlülüğüne, vb. etkisi incelenebilir (Bican ve Pul, 2021). Talaş açısı diğer metalik alaşımların işlenmesinde olduğu gibi alüminyum alaşımlarının işlenmesinde de çok önemlidir. Talaş açısı alüminyum alaşımları işlenirken doğrudan yığıntı talaş oluşumunu ve kesme kuvvetlerini etkilemektedir. Talaş açısının arttırılması ile iş parçası ile kesici takım arasındaki yüzey alanını azaltılarak daha kolay kesme yapılması mümkün olmaktadır. Talaş açısının çok arttırılmasının kesici takım ömrü üzerinde olumsuz etkileri olmaktadır (Sekmen ve diğ., 2015).

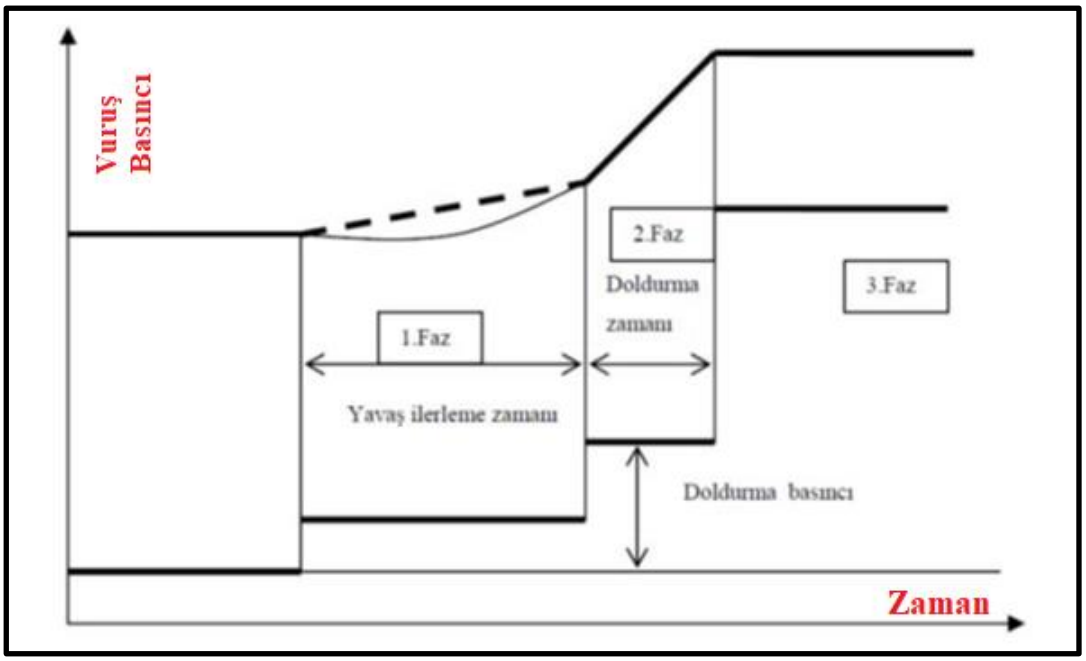
# 3. YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM

Yüksek basınçlı döküm (YBD) yöntemi, normal dökümden farklıdır. Bilinen döküm yöntemlerine göre YBD'nin en önemli farklılıklarından biri, kullanılan metal bir kalıp içerisine ergimiş (sıvı) metalin basınç altında gönderilmesidir. Diğer taraftan, bu yöntem ile yüksek adetlerde seri üretim yapılabilmektedir. YBD, ergime sıcaklığı düşük olan ve metal kalıplar içerisinde kalıplanabilme özelliğine sahip, içerisinde demir alaşımı olmayan, alüminyum, magnezyum ve çinko gibi malzemelerin yüksek basınç altında şekillendirilmesidir (Toptaş, 2014) . YBD üretim yöntemi ile endüstride birçok sektöre yönelik karmaşık şekilli ve ince kesitli parçaların üretilmesi mümkündür. Basınçlı döküm yöntemi, imalat yöntemlerinden biri olmakla beraber malzemenin eritilmesi ve katılaşması süreçlerinden oluşmaktadır. Ergimiş metalin kalıp içerisinde dağılımı ve ısınan kalıbın deformasyonu üretilen ürünlerin kalitesini büyük oranda etkilemektedir (Serçe ve Koru, 2015). Şekil 3.1'de YBD yöntemi ile üretilen örnek parça görülmektedir.



Şekil 3.1. YBD yöntemi ile üretilmiş örnek parça (RUTAŞ, 2022)

YBD üretim prosesinde üç faz bulunmaktadır. İlk fazda, ergimiş metal kalıbın yolluk girişinin olduğu bölgeye kadar yavaş bir şekilde iletilir; ikinci fazda ise ergimiş metal yüksek basınç altında kalıbın içerisine enjekte edilir. Üçüncü fazda ise yüksek basınç ile ergimiş metalin katılaşma süreci tamamlanır. Şekil 3.2 de fazların şematik gösterimi yer almaktadır (Işık ve diğ., 2020).

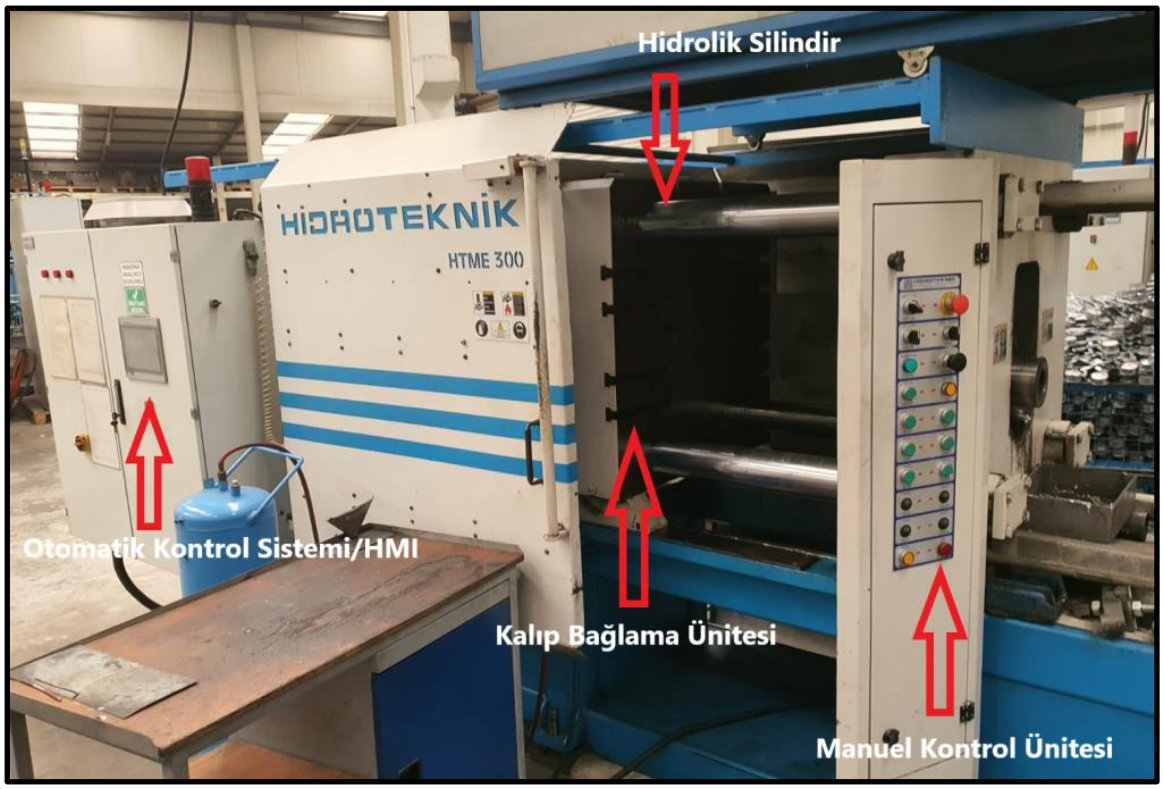



Şekil 3.2. Yüksek basınçlı dökümde fazların dağılımı (Işık ve diğ., 2020)

### 3.1. Yüksek Basınçlı Döküm Makineleri

Basınçlı döküm işleminin gerçekleştirilmesinde özel makineler kullanılmaktadır. Bu makineler, döküm işlemi yapılacak metal kalıpların iki parçasının da karşılıklı olarak yerinde durmasını temin etmek, kalıbın hareketli parçasını açıp kapatarak katılaşmış olan ürünün kalıptan çıkmasına imkân vermek ve ergimiş metalin kalıp içine enjekte edilmesini sağlamak gibi temel görevleri yerine getirmektedir. Basınçlı döküm makinelerinde kullanılan kalıplar temelde iki parçadan oluşmaktadır. YBD makineleri, üretim sisteminin farklı oluşlarına göre soğuk ve sıcak kamaralı olarak ikiye ayrılır. Kamara, basınçlı döküm makinalarında ergimiş metalin pistonlar aracılığı ile kalıp içerisine enjekte edildiği yerdir (Toptaş, 2014) .

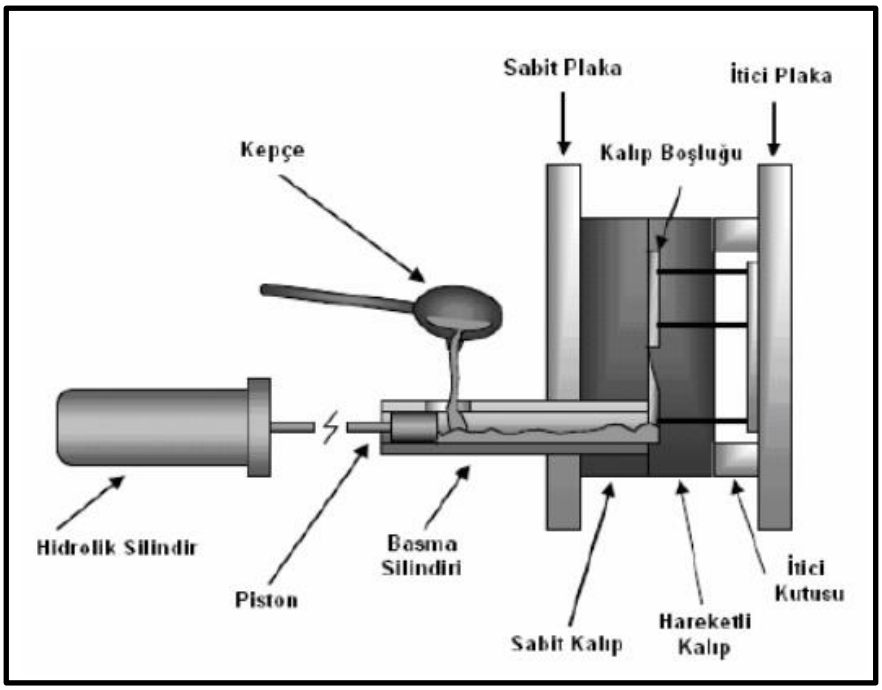
Şekil 3.3.'te örnek bir basınçlı döküm makinesi ve kısımları görülmektedir.




Şekil 3.3. Yüksek basınçlı döküm makinesi ve kısımları

### 3.1.1. Soğuk kamaralı döküm makineleri

Soğuk kamaralı YBD makinelerinde, ergimiş metal kepçe vb. bir alet yardımıyla kamara veya soğuk hazne silindiri ismi verilen yere dökülür. Daha sonra hidrolik pistonun ileriye hareket etmesi ile kalıp içerisine ergimiş metal yüksek basınç altında enjekte edilir (Şekil 3.4). Bu makinelerle üretim yapılırken kalıbın içerisine dolduracak hacimden daha fazla miktardaki ergimiş metal soğuk haznenin içerisine konulur. Gereğinden fazla olarak kullanılan ergimiş metal, kalıbın içerisindeki alaşımın katılaşması sırasında gerekli basınç aralığında tutulması için gereklidir (Mert ve diğ., 2010).

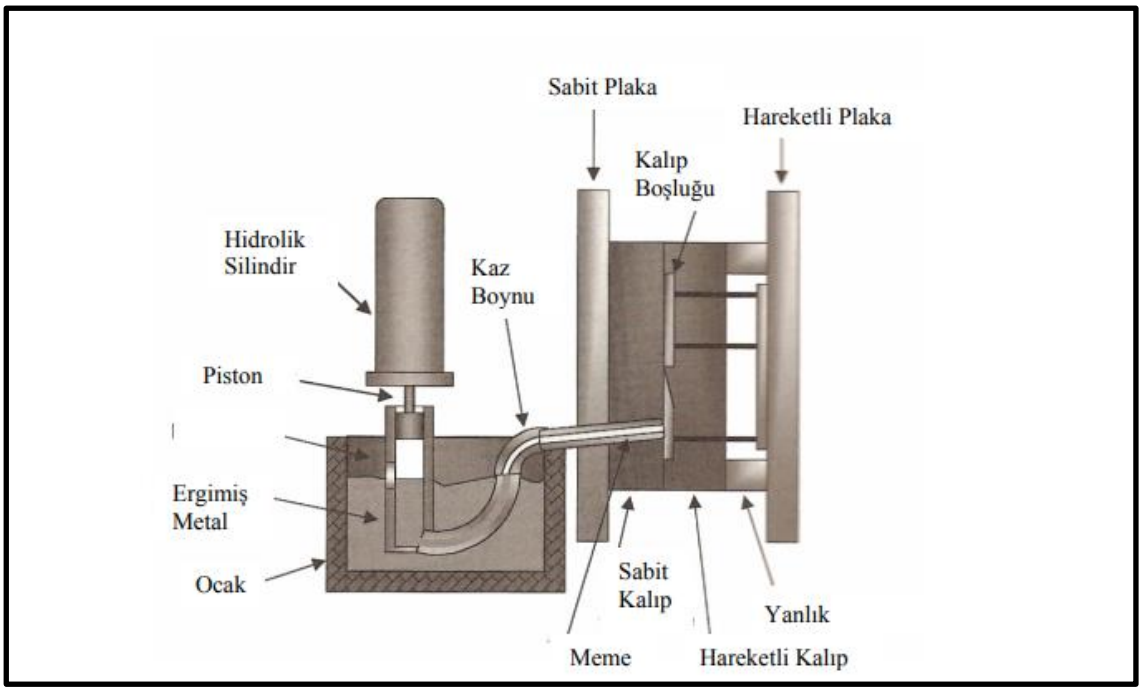



Şekil 3.4. Soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm yöntemi (Mert ve diğ., 2010)

Soğuk kamaralı döküm makineleri özellikle ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerin dökümünde kullanılmaktadır. Bu malzemelerin başında ergime sıcaklığı 665 ℃ olan alüminyum, 649 ℃ olan magnezyum ve 1083℃ olan bakır alaşımları yer almaktadır. Soğuk kamaralı döküm makinelerinin en büyük avantajlarından birisi ergimiş metalin silindir hazneyi etkilememesidir. Bunun nedeni soğuk kamaralı döküm makinelerinde ergimiş metalin farklı bir ergitme fırınında eritilerek daha sonra makine içerisine aktarılmasıdır.

### 3.1.2. Sıcak kamaralı döküm makineleri

Sıcak kamaralı YBD makinelerinde ergimiş metal fırını makinenin içinde yer almaktadır. Bu sistemde pistonların hareketi ile ergimiş metal, basıncın etkisiyle haznenin içine ve buradan da kalıbın içine enjekte edilmektedir. Kalıp içerisine enjekte edilen metal katılaştıktan sonra, piston da aşağıdayken kalıp açılarak üretilen parça makineden çıkartılır. Şekil 3.5'te sıcak kamaralı YBD işlemi gösterilmektedir.




Şekil 3.5. Sıcak kamaralı yüksek basınçlı döküm yöntemi (Vinarcik, 2003)

Bu yöntemde ergimiş metalin dış ortam ile teması olmamasından dolayı ergimiş metal içerisine de hava giremeyeceği için üretilen ürünün iç yapısında hava boşluğu olma ihtimali azalacaktır. Özellikle ince cidarlı parçaların üretiminde sıcak kamaralı YBD makineleri soğuk kamaralı YBD makinelerine göre tercih edilmektedir (Mert ve diğ., 2010).

## 3.2. Yüksek Basınçlı Döküm Yönteminde Kullanılan Parametreler

YBD yönteminde üretilecek ürünün kalitesini etkileyen enjeksiyon parametreleri bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; enjeksiyon hızı, enjeksiyon basıncı, kalıp ve ergimiş metal sıcaklıkları ve kalıp açılma zamanı vb. Bu parametrelerin bir veya birkaçının hatalı olması durumunda soğuk birleşme, çekme boşlukları, gaz boşlukları, yapışma ve yüzey çöküntüleri gibi ürünün kalitesini etkileyen birçok sorun meydana gelebilmektedir (Serçe ve Koru, 2015).

### 3.2.1. Enjeksiyon hızı

Basınçlı döküm makinelerinde enjeksiyon hızını belirlemek için bazı yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan ilki piston hareketini sağlayacak olan hidrolik silindirin içerisinde bulunan akışkanın kontrol altında tutularak enjeksiyon hızının belirlenmesidir. Döküm ağzı adı verilen ergimiş metalin kalıp içerisine girdiği yerin kesit alanı, yolluklar, besleyiciler ergimiş metalin kalıp içerisindeki döküm hızını etkileyen diğer faktörlerdir. Piston hareketinden sonra kamara içerisinde harekete başlayan ergimiş metalin türbülans adı verilen düzensiz hareketlerinin kontrol altına alınması ve ergimiş metalin akıcılığı da döküm hızını etkilemektedir (Bonollo ve Timelli, 2014). Enjeksiyon prosesindeki hız aşağıda verilen formül ile elde edilir.

$$V = (4v)/\emptyset^2 t\pi \tag{3.1}$$

Formülde V ikinci faz enjeksiyon hızını m/s olarak, v üretilen döküm parçanın toplam hacmini $m^3$ cinsinden, $\emptyset$ piston çapını metre cinsinden ve t ise saniye cinsinden ergimiş metalin dolum zamanını belirtmektedir.

Yüksek basınçlı döküm prosesi 3 ana fazdan oluşmaktadır. İlk fazda ergimiş metal, enjeksiyon kovanını doldurur. Enjeksiyon kovanı içerisinde oluşan hava kaynaklı türbülansı en aza indirmek için piston hızı çok olmamalıdır. Piston hızı ortalama olarak 0,25, 0,35 m/s ‘dir.

İkinci faz, ergimiş metalin kalıp içerisine dolumu ile başlamaktadır. Ergimiş metal kalıp yolluğuna geldiğinde kesit daralır. Bu sebeple kalıbın daha hızlı dolabilmesi için piston hızının, ilk faza göre daha fazla olması gerekmektedir.

Üçüncü faz, ergimiş metalin kalıp içerisine tamamen dolması ile başlar ve bu fazın amacı ergimiş metalin içerisinde bulunan gaz boşluklarının yüksek basınç ile yok edilmesini sağlamaktır (Bonollo ve Timelli, 2014).

### 3.2.2. Kalıp sıcaklığı

Basınçlı döküm işlemlerinde ürünün kalitesini etkileyen en önemli parametrelerden biri de kalıp sıcaklığıdır. Basınçlı döküm kalıplarında kalıp tasarımına ve cidar kalınlığına göre kalıp sıcaklığı belirlenir. Kalıp sıcaklığının en ideal değeri aşağıdaki şartlara bağlıdır:

1. Alaşımın sıcaklığı
2. Dökülecek malzemenin ağırlığı
3. Döküm hızı
4. Kalıp boşluğunun yüzey alanı ve kesiti
5. Kalıbın soğuma şartları

Kalıplar döküm aşamasında yeterli sıcaklıkta değil ise kalıbın tam olarak dolmaması, yetersiz besleme ve gaz boşluğu gibi döküm hataları meydana gelebilmektedir. Kalıp sıcaklığının arttırılması ile üretilen ürünün kalitesi artmakta; fakat bu durum soğutma süresini ve buna bağlı olarak üretim süresini de arttırmaktadır (Rai ve diğ., 2008).

Termal şokun azaltılması için kalıp içerisinde bulunan kanallar aracılığı ile su ve yağ gibi sıvılar kullanarak kalıbın 180 ile 350℃ arasında ön ısıtma işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Kalıplar döküm aşamasında olması gereken sıcaklık aralığının üzerinde ise, kalıbın tahrip (deformasyon) olmasına ve alüminyumun kalıba yapışmasına yol açmaktadır. Kullanılan alaşıma göre kalıp sıcaklığının olması gereken sıcaklık değerleri değişmektedir (Dadic ve diğ., 2017).

### 3.2.2. Kalıp açılma zamanı

YBD işleminde, ergimiş metal belirlenen enjeksiyon hızına göre kalıbın içine enjekte edilir. Bu işleme ergimiş metalin kalıp içerisine dolumu da denilmektedir. Belirlenen enjeksiyon hızı ve parça boyutları dolum süresini etkileyen bazı faktörlerdir. Buna bağlı olarak yapılan deneyler ve Novacast döküm simülasyon programına göre bu çalışmada dolum süresinin 1 saniyenin altında olduğu görülmektedir. Ergimiş metalin kalıp içerisine dolumundan sonra katılaşma gerçekleşmekte ve daha sonra kalıp açılarak elde edilen ürün enjeksiyon makinesinden alınmaktadır. Dolumun başlamasından, ürünün kalıp içerisinden alınmasına

kadar geçen süre kalıp açılma zamanı olarak ifade edilebilir. Kalıp açılma süresi enjeksiyon parametreleri ve parça boyutlarına bağlı olarak 10-40 s arasında değişebilmektedir.

# 4. MEKANİK TESTLER

Malzemelerin mekanik özellikleri, kullanılan malzemenin metalurjik özellikleri ve üretim yöntemine göre değişmektedir. Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi aşamasında kullanılan en yaygın test yöntemleri sertlik ve çekme testidir (Humphreys ve Hatherly, 2004).

## 4.1. Sertlik Testi

Sertlik, malzemenin sürtmeye, çizilmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilebilir. Konik veya küresel bir ucun malzemeye batırılması ile yüzeyde oluşan kalıcı izin derinliğine, büyüklüğüne göre sertlik değeri belirlenmektedir. Sertlik testinde kullanılan bataç ismi de verilen ucun biçimine ve uygulanan yüke göre farklı sertlik ölçme yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar;

i. Brinell Sertlik Ölçümü
ii. Vickers Sertlik ölçümü
iii. Rockwell Sertlik Ölçümü'dür (Humphreys ve Hatherly, 2004).

Sertlik ölçme işlemlerinde yaygın kullanıma sahip bir cihaz şekil 4.1.a'da verilmiştir. Galileo Ergotest Digi 25R olarak adlandırılan cihazın bazı özellikleri şu şekildedir:

- Ön Yük:10 kgf
- Uygulama Yükleri: 60-100-150 kgf
- Yük Uygulama Süresi:1-99 s
- Maksimum Test Parçası Yüksekliği ve Derinliği: 295 mm/220 mm

## 4.2. Çekme Testi

Çekme testi belirlenmiş standartlara göre hazırlanan numuneler üzerinde, tek yönde belirlenen bir hızla ve sabit sıcaklıkta numune kopana kadar artan kuvvetler uygulanarak yapılmaktadır. Çekme deneyi uygulama aşamasında, uygulanan kuvvetlerin zamana bağlı olarak artmasıyla numune üzerinde meydana gelen uzama miktarları da kaydedilmektedir.

Çekme deneyi ile malzemenin akma gerilmesi, çekme gerilmesi, % uzama miktarı ve elastiklik sınırı gibi özellikleri hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. (İpek, 2018)
Çekme testinde farklı özelliklere sahip cihazlar kullanılmaktadır. Şekil 4.1.b'de yaygın kullanıma sahip örnek bir çekme cihazı verilmiştir. MITECH marka WDW-100 serisi çekme cihazın bazı özellikleri şu şekildedir:

- Ölçüm Kapasitesi: 100 kN
- Test Hızı:0,01-500 mm/dk
- Test Parçası Uzunluğu (Max): 800 mm
- Hassasiyet: ±0.5%




Şekil 4.1 a) Sertlik ölçüm cihazı, b) MITECH marka çekme cihazı

# 5. TALAŞLI İMALAT VE TALAŞ KALDIRMA

Talaşlı imalat, kesici bir takımla belirli bir güç kullanarak hammadde (iş parçası) üzerinden talaş kaldırma işlemidir. Diğer bir ifadeyle, talaşlı imalat malzemelerin talaş kaldırılarak şekillendirilmesidir. Talaşlı imalat bir dizi farklı işlemlerden oluşmaktadır. (Özçatalbaş, 2020)

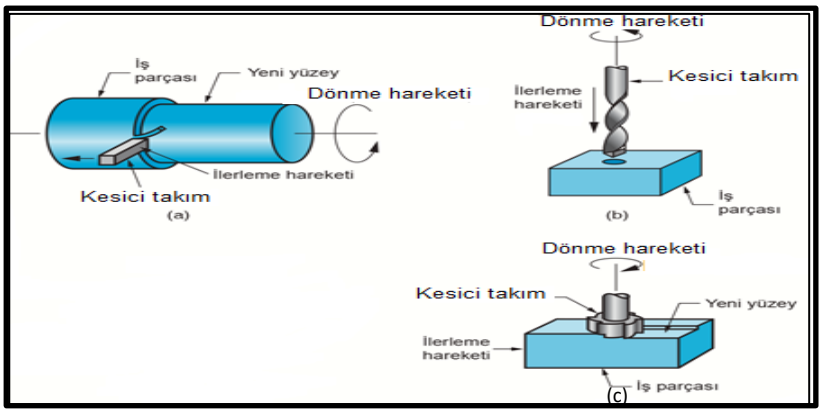
Talaşlı imalatta temel olarak frezeleme, tornalama, delme gibi farklı işlemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerde iş parçasını istenilen şekle, ölçüye ve yüzey kalitesine getirmek için parça üzerindeki fazla olan kısımların uygun bir kesici takım ile alınması (kesilmesi) gerekmektedir.

## 5.1. Talaşlı İmalat Yöntemleri

Talaş kaldırma işlemi yapılırken üretilen malzemenin geometrisine, boyutsal toleranslara ve istenilen yüzey kalitesine göre farklı yöntemler bulunmaktadır. Talaşlı imalatta yaygın kullanılan yöntemler:
Tornalama: Dairesel parçaların işlenmesinde kullanılan bir metottur (Şekil 5.1.a).

Frezeleme: Frezeleme, kendi ekseni etrafında dönen kesici bir takım ile iş parçasının doğrusal hareketi sonucunda gerçekleştirilen bir talaş kaldırma işlemidir. Frezeleme yöntemi ile genellikle silindirik formda olmayan düzgün geometride parçalar işlenmektedir (Şekil 5.1.c).

Delik delme: Delme, kendi ekseni etrafında dönen matkabın iş parçası üzerinden talaş kaldırması yöntemine dayanmaktadır (Şekil 5.1.b).




Şekil 5.1. Talaşlı imalat yöntemleri: a) Tornalama, b) Delik delme, c) Frezeleme (Yurdakul ve İç, 2021)

## 5.2. Talaşlı İmalatı Etkileyen Faktörler

Talaşlı imalat işlemi gerçekleşirken iş parçası üzerinde ilk olarak elastik deformasyon daha sonra ise plastik deformasyon oluşmaktadır. Bununla beraber malzeme üzerinde akma başlarken iş parçası üzerinden talaş kaldırma işlemi de gerçekleşmektedir. Talaş kaldırma işlemini etkileyen bazı etkenler bulunmaktadır. Bu faktörler aşağıda belirtilmiştir. (Şahin, 2000)

- Kesici takım,
- İlerleme,
- Kesme hızı,
- İş parçası,
- Kesme (Talaş) derinliği
- Soğutma sıvısı,

Talaşlı imalat yapılacak iş parçasının yüzey kalitesi, kullanılan kesici takımın ömrü, parçanın ölçü ve toleranslara uygunluğu ve en uygun maliyet için bu parametrelerin doğru seçilmesi çok önemlidir.

### 5.2.1. Kesici takım

Kesici takımlar tek uçlu takımlar ve çoklu kesici kenarlı takımlar olmak üzere ikiye ayrılır. Tek uçlu takımlar tornalamada kullanılırken çoklu kesici kenarlı takımlar ise delme ve frezeleme işlemlerinde kullanılmaktadır.

### 5.2.2. İlerleme miktarı

İlerleme miktarı kesici takımın iş parçası yüzeyinde her bir devirdeki hareket ettiği mesafeyi göstermekte olup f sembolü ile ifade edilmektedir. İlerlemenin birimi mm/dev' dir. İlerleme talaş kaldırılan yüzeylerin kalitesini, kesici takımın aşınma miktarını, çıkan talaşın geometrisini etkilemektedir. İlerleme miktarı, takım üreticisinin belirlediği aralığa ve işlem yapılacak malzemenin metalürjik yapısına uygun olarak seçilmelidir. İlerleme değeri arttırıldığında kesme kuvvetleri artmakta ve buna paralel olarak da üretilen ürünün maliyeti azalmaktadır (Kandemir, 1998). Tezgâhın ilerleme hızı hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılmaktadır. Formülde f ilerleme hızı (mm/dk), $f_n$ ilerleme miktarı (mm/dev), N devir sayısı olarak ifade edilmektedir.

$$f = f_n * N \tag{5.1}$$

### 5.2.3. Kesme hızı

Kesme hızı, yapılan talaşlı imalat yöntemine göre iş parçası veya kesici takımın dönme hareketi olup dakikada metre cinsinden alınan yol olup V ile gösterilmektedir. Kesme hızının birimi m/dk'dır. Kesme hızı hesaplanırken aşağıda belirtilen formül kullanılmaktadır. Bu formülde D ile gösterilen sembol, frezeleme ve delik delme işleminde kesici takımın çapı, tornalama işleminde ise iş parçasının çapını ifade etmekte ve birimi mm olarak gösterilmektedir. N ile gösterilen sembol ise devir sayısıdır ve birimi devir/dk'dir.

$$V=\frac{\pi DN}{1000} \tag{5.2}$$

Kesme hızının değeri, üretim maliyetine doğrudan etki etmektedir. Kesme hızının yüksek seçilmesi zaman açısından ürünün hızlı üretilmesini sağlamakta fakat bu esnada sıcaklığın

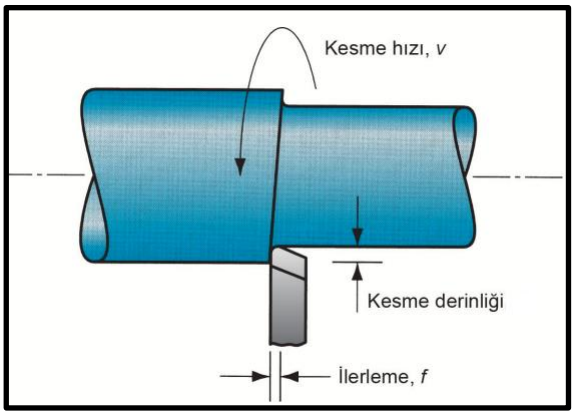
artması ile kesici takımın ucu aşınarak ek maliyet ortaya çıkabilmektedir. Kesici takım malzemesi, kesici takımın kaplama özelliği ve kesici takımın kullanıldığı tezgâhın özellikleri kesme hızını etkileyen parametrelerden bazılarıdır (Mendi, 1999).

### 5.2.4. İş parçası

İş parçası talaşlı imalat yönteminde işlem yapılacak parçalara verilen isimdir. İş parçası malzemesinin kimyasal bileşimleri, mikro yapıları, üretim yöntemleri, ısıl işlemi ve mekanik özellikleri işleme kabiliyetini yüksek oranda etkilemektedir. Talaşlı imalatta kullanılan iş parçası döküm, hadde ve dövme gibi üretim yöntemleriyle üretilen hammadde olabileceği gibi, bu yöntemlerle yarı mamul olarak üretilen bir malzeme de olabilmektedir (Batman, 2019).

### 5.2.5. Kesme (talaş) derinliği

Talaş kaldırma işleminde kesici takımın iş parçası üzerinden bir seferde kaldırdığı malzeme tabakasının derinliğine talaş derinliği veya paso denilmektedir (Şekil 5.2). Kesme derinliğinin birimi mm'dir. Kesme derinliği diğer bir ifadeyle iş parçası üzerinden kaldırılan talaşın kalınlığı olarak da ifade edilebilmektedir. Tornalama işleminde ise iş parçasının ilk ve son çapının farkının yarısı kesme derinliği olarak tanımlanmaktadır. Kesme derinliğinin düşük veya yüksek olması talaşlı işlenebilme kabiliyetini etkilemektedir (Şahin, 2000).




Şekil 5.2 Bir tornalama işleminde, kesme derinliği, ilerleme ve kesme hızı (Yurdakul ve İç, 2021)

### 5.2.6. Soğutma sıvısı

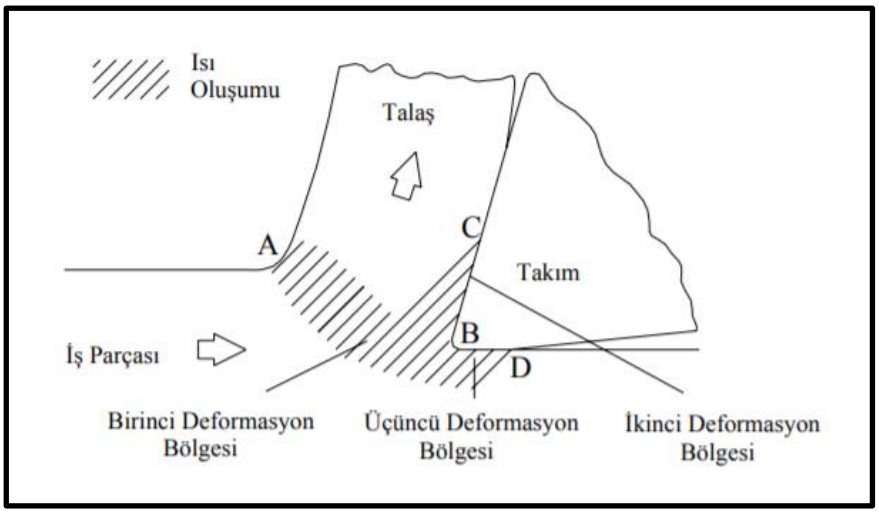
Kesici takım iş parçası üzerinden talaş kaldırma işlemi gerçekleşirken hem iş parçası hem de kesici takım üzerinde ısınmalar oluşmaktadır. Soğutma sıvılarının kullanılmasının temel amacı ise talaş kaldırma sırasında soğutma ve yağlama yaparak ısı dengesini kontrol altında tutmaktır.

Soğutma sıvılarının başka görevleri de bulunmaktadır. Bunlar:

- Kesici takımı ve iş parçasını soğutarak ısının uzaklaştırılması,
- Ortaya çıkan talaşı uzaklaştırarak çapaklarının iş parçası üzerine yapışmasını engellemek,
- Kesici takım üzerinde yüksek sıcaklıkla YT oluşmasını önleyerek takımın ömrünün arttırılması,
- Kesme kuvvetlerini azaltarak harcanan enerji miktarının azaltılması,
- İş parçasında korozyon oluşumunu engellemek,
- Kesici takım, talaş ve iş parçası yüzeylerini yağlayarak kayganlık sağlamaktır (Akkurt, 1998).

## 5.3. Talaş Oluşumu

Talaş birinci deformasyon bölgesi içerisinde kayma bölgesinde oluşmaktadır. Kayma bölgesine kadar iş parçası üzerinde elastik şekil değişimi oluşmaktadır. Kesici takım ve iş parçasının birbiri ile temas ettiği yerde ilk olarak elastik şekil değişimi daha sonra ise plastik şekil değişimi olmaktadır. Bu temas yüzeyinde oluşan gerilme kuvvetlerinin iş parçası malzemesinin kopma sınırını aşması ile belirtilen bölge üzerinde talaş ismi verilen parçalar ortaya çıkmaktadır (Çalışkan, 2014). Şekil 5.3’te deformasyon bölgeleri ve ısı oluşumu şematik olarak gösterilmiştir.




Şekil 5.3. Deformasyon bölgeleri ve ısı oluşumu (Gökkaya ve Nalbant, 2006)

### 5.3.1. Talaşlı imalatta ısı oluşumu

Talaşlı imalat esnasında Şekil 5.3'te gösterildiği gibi 3 farklı alanda ısı oluşmaktadır. Birinci deformasyon bölgesinde iş parçası büyük miktarda gerinmeye maruz kalmaktadır. Gerinme için kullanılan enerji, elastik gerinme için kullanılan enerjiden büyüktür. Bu sebeple enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüşmektedir. Bu ısı kesici takım ve iş parçasının birleştiği bölgede oluştuğu için iş parçasının yüzey kalitesini ve kesici takımın ömrünü etkilemektedir.

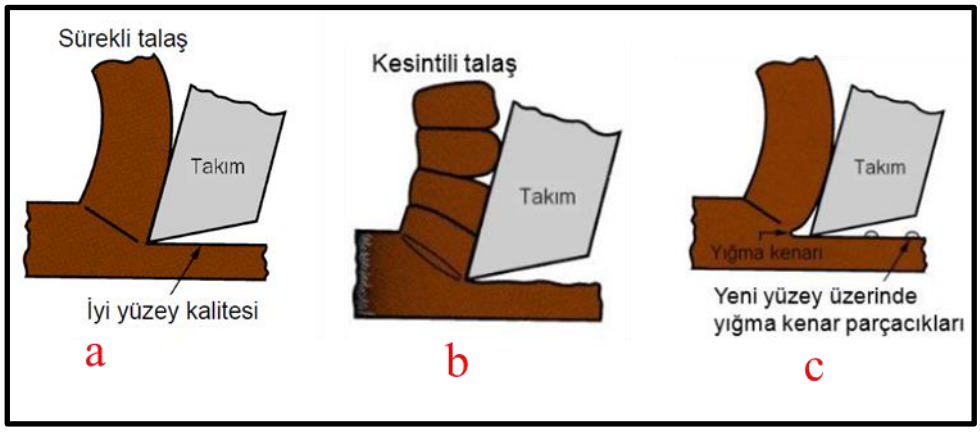
Dik kesme esnasında oluşan ısı bölgeleri aşağıdaki gibidir;

- AB olarak gösterilen birinci deformasyon bölgesinde ısı, plastik deformasyon sonucu oluşmaktadır. Belirtilen bölgedeki ısı talaş içinde kalmaktadır.
- BC olarak gösterilen ikinci deformasyon bölgesinde ısı, kesici takım ve talaş arasında oluşmaktadır. Bu bölgede kesici takım ve talaş sürekli birbiri ile temas halinde olduğundan sürtünme sonucu ısı meydana gelmektedir. Bu ısının bir miktarı kesici takım üzerinde kalmakta, diğer kısmı ise talaşla kesme bölgesinden uzaklaştırılmaktadır.
- BD olarak gösterilen üçüncü deformasyon bölgesinde ısı, kesici takım ile işlenmiş yüzey arasında oluşmaktadır. Bu ısının bir kısmı talaş, bir kısmı da iş parçası tarafından uzaklaştırılmaktadır (Gökkaya ve Nalbant, 2006).

## 5.4. Talaş Tipleri

Talaşlı imalat işlemlerinde belirlenen parametrelere göre oluşan talaş tipleri değişiklik göstermektedir. Talaşlı imalat esnasında meydana gelen talaşlar, malzemenin yüzey kalitesini ve kullanılan kesici takımın ömrünü büyük oranda etkilemektedir. Talaş tipleri 3'e ayrılmaktadır;

Sürekli Talaş: Sünek malzemeler yüksek kesme hızında işlenirken sürekli talaş adı verilen talaş çeşidi oluşmaktadır (Şekil 5.4.a)
Süreksiz (Kesintili) Talaş: Gevrek malzeme üzerinde talaşlı imalat işlemi yapılırken birinci deformasyon bölgesinde meydana gelen kırılmalara kesintili (süreksiz) talaş denir (Şekil 5.4.b).
Yığıntı Talaş: Yığıntı talaş, talaşlı imalat sırasında iş parçası üzerinden kesici takım üzerine yapışan talaşlar sonucu oluşmaktadır (Şekil 5.4.c).




Şekil 5.4. Sürekli talaş oluşumu (Gülmez, 2011)

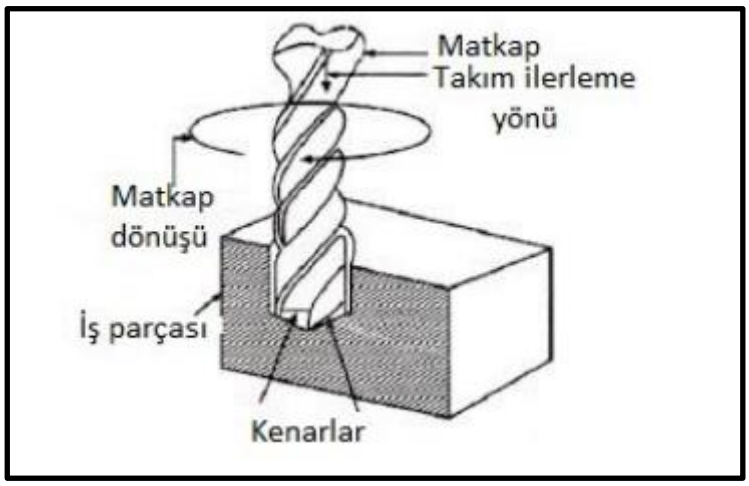
## 5.5. Delik Delme

Delik delme talaşlı imalat yöntemleri arasında önemi büyük olan bir talaş kaldırma yöntemidir. Talaşlı imalat yöntemleri içerisinde %33'lük kısım delik delme işlemlerinden oluşmaktadır. Delik delme işlemi yapılan ürünlerde delik içerisinde çapak oluşumu, yüzey pürüzlülüğü ve eksenel kaçıklık vb. istenmeyen durumlarla karşılaşılabilmektedir. Bu sebeple birbiri ile karşılıklı çalışan parçaların delik yüzeylerinde, delik çapında oluşan

sapmalar, dairesellik ve silindiriklik'te oluşabilecek sapmaların ölçülmesi üretilen ürünün delik kalitesi için gereklidir (Meral ve diğ., 2011).

### 5.5.1. Delik delme mekaniği

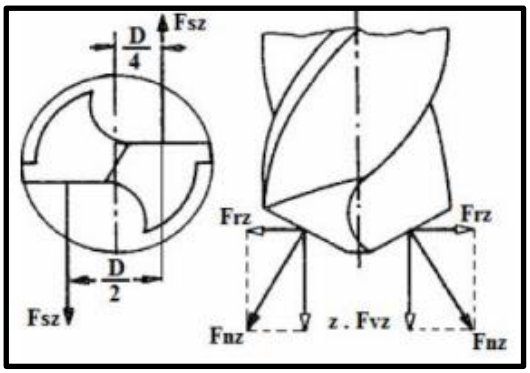
Delik delme işlemi yapılırken iş parçası üzerinden kesici takım (Matkap) ile talaş kaldırılarak silindirik bir yapı elde edilmektedir. Delik delme prosesinde etkili olan faktörler, kesici takım, iş parçası ve ilerleme hareketidir. Şekil 5.5'te delik delme işlemi şematik olarak gösterilmiştir.




Şekil 5.5. Delik delme şematik gösterimi (Batman, 2019)

### 5.5.2. Delik delme işleminde kuvvetler

Delik delme işlemi yapılırken kesici takım, delinecek delik boyunca ilerleyerek enerji tüketmektedir. Matkap iş parçası üzerinden talaş kaldırmaya başladığında kesme kuvvetleri tarafından matkap kesici kenarlarında bir etki başlamaktadır. Bu işlemin gerçekleşmesi için de belirli miktarda güç gerekmektedir. İş parçası malzemesinin özelliklerine göre ihtiyaç duyulan güç farklı olduğu için moment, ilerleme kuvveti ve gücün hesaplanmasında özgül kesme kuvvetlerine($k_s$-N/$mm^2$) ihtiyaç bulunmaktadır (Batman, 2019). Delik delme esnasında matkap ucunda oluşan kuvvetler Şekil 5.6' da şematik olarak gösterilmiştir.




Şekil 5.6. Matkap ucunu etkileyen faktörler (Batman, 2019)

Kesici takımın (matkap) bir kesici ağzı incelendiğinde bu noktada ilerleme kuvveti ($F_{vz}$), radyal kuvvet ($F_{rz}$) ve kesme kuvveti ($F_{sz}$) oluştuğu görülmektedir. Matkap uçları yapısı itibariyle ağızlarda oluşan radyal kuvvetlerin birbirini dengelendiği bilinmektedir. Bu nedenle delik delme işlemlerinde $F_{vz}$ ve $F_{sz}$ kuvvetlerinin etkisi olmaktadır. (Bayraktar, Siyambaş, & Turgut, 2017) Örnek olarak iki ağızlı bir matkap ucunda oluşan kesme kuvvetleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

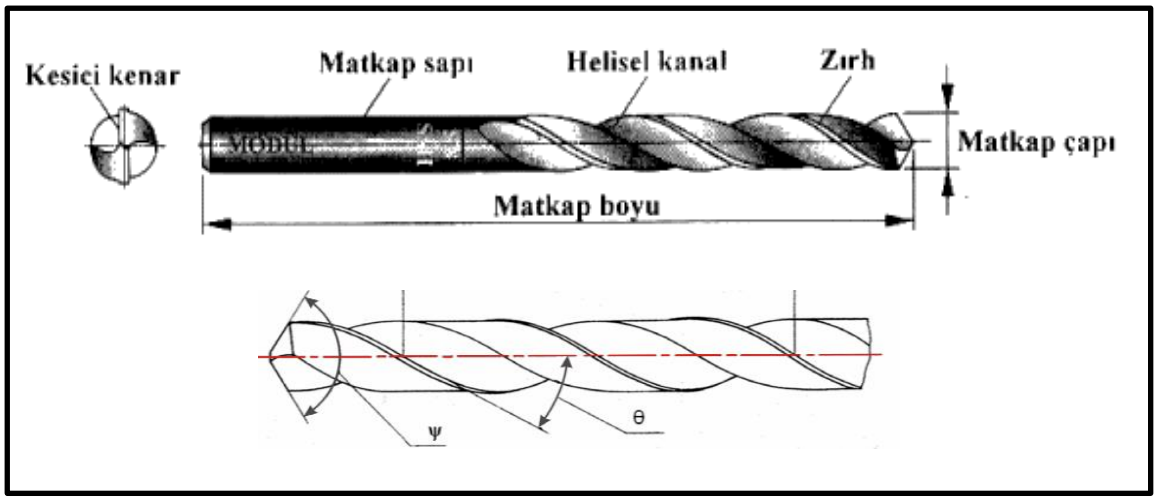
$$F_s = z\, F_{sz} = 2\, F_{sz} = \mathrm{D}\, s_z\, k_s = \frac{d\, s}{2} k_s (\mathrm{Nm}) \tag{5.3}$$

Denklemdeki $k_s$ özgül kesme kuvvetini belirtmek için, s mm/dev cinsinden ilerleme miktarını, $F_s$ ise delik delme kuvveti kuvvetinin belirtmek için kullanılmaktadır. İki ağızlı matkap ucunda kesme momentini ($M_s$) hesaplamak için ise aşağıdaki formülasyon kullanılabilir. Burada z kesici takımın ağız sayısını, D mm cinsinden matkap çapını belirtmektedir.

$$M_s = z\, F_{sz} \frac{D}{4} = 2\, F_{sz} \frac{D}{4} = F_s \frac{D}{4} \tag{5.4}$$

### 5.5.3. Delik delme işleminde kesici takım (matkap)

Delik delme işleminin en temel araçlarından biri kullanılan matkaplardır. Matkaplar, üretilen malzemesine, kesme yönüne, kaplama türüne, uç ve helis açısına göre farklı tiplerde olabilmektedir. Şekil 5.7'de örnek bir matkap ve kısımları gösterilmiştir. Matkap uç açısı ψ, matkap helis açısı θ ile gösterilmiştir.




Şekil 5.7. Matkap ucu (Kara, 2015)

Matkap uçları üretim malzemesine göre üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar:

- Yüksek Hız çeliği (HSS)
- Kobaltlı Yüksek Hız Çeliği (HSS-E)
- Komple Sert Metal (KSM) (Batman, 2019)

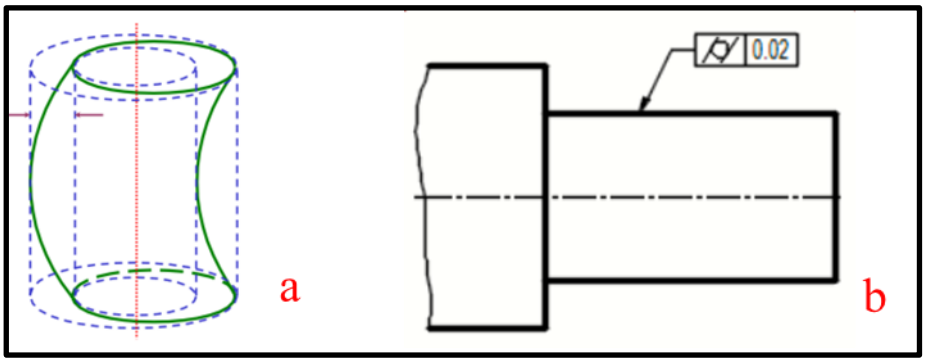
### 5.5.4. Delik delme kalitesi

Delik delme kalitesine etki eden faktörlerden bazıları iş parçasının metalurjik yapısı, kesici takım özellikleri, kesme parametreleri, çalışma yapılan tezgâh vb.'dir. Delik delme işleminde deliğin kalitesi belirlenirken delik çap ölçüsünün boyutsal değeri, delik geometrisi, delik yüzeyi vb. kriterler dikkate alınmaktadır. Bu kriterler genellikle üç boyutlu ölçme tezgâhları (CMM) vb. makineler kullanılarak ölçülebilmekte ve ölçüm sonuçlarının değerleri istatistiki olarak analiz edilebilmektedir. Bunun neticesinde delik delme parametrelerinin iyileştirilmesi için fırsat ortamı oluşmaktadır (Batman, 2019).

Silindiriklik

Silindiriklik tanım olarak bir deliğin veya nesnenin silindir şekline benzerlik oranının ne kadar olduğunun ifade edilmesidir. Silindirin ekseni doğrultusunda, bir deliğin istenildiği kadar yuvarlak olup olmadığının üç boyutlu olarak ölçülmesi ile silindiriklik değeri

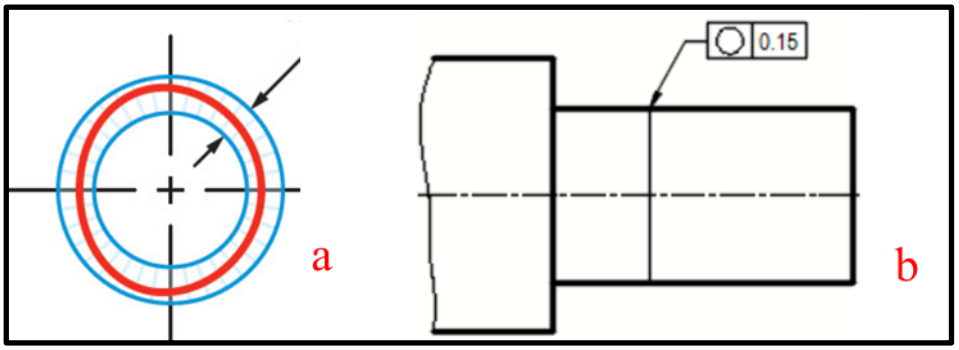
bulunabilmektedir. Şekil 5.8'de silindiriklik şematik olarak gösterilmektedir (Akyıl ve Bican, 2022). Teknik resimde silindiriklik için "⌭"sembolü kullanılmaktadır.




Şekil 5.8. Silindiriklik: a) Şematik gösterimi, b) Kullanımı (Makine Teknolojisi Delme ve Vida işlemleri, 2011)

Dairesellik

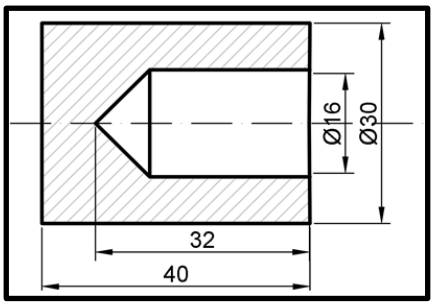
Dairesellik tanım olarak eş merkezli olan iki çap arasındaki dairesel sapma olarak ifade edilebilmektedir (Akyıl ve Bican, 2022). Teknik resimde dairesellik için "**O**" sembolü kullanılmaktadır.




Şekil 5.9. Dairesellik a) Şematik gösterimi b) Kullanımı

Boyutsal ölçüler

Çap ve delik derinliği/boyu gibi bilgiler delik tanımlanmasında kullanılan boyutsal ölçülerdir (Şekil 5.10).



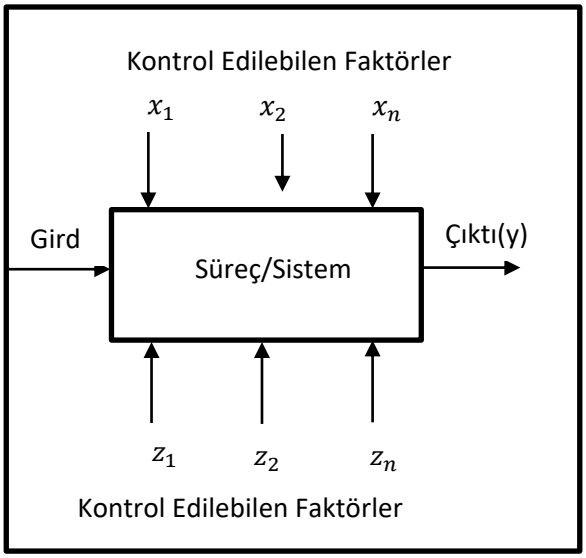

Şekil 5.10. Delik boyutlandırma (Makine Eğitimi, 2023)

# 6. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen çıktılar (veriler) üzerinde değerlendirme yapabilmek için birçok yöntem kullanılmaktadır. İstatiksel analizler bu yöntemlerden biridir. İstatistiksel analizler, deney yapan araştırmacılara elde edilen veriler hakkında daha doğru sonuca ulaşma ve deney sonuçlarını doğru olarak yorumlayabilme konusunda yardımcı olmaktadır (Özçomak ve diğ., 2017).

## 6.1. Deney Tasarım Yöntemleri (Design Of Experiments: DOE)

Deney tasarımı bir sistemde girdi ve çıktıların birbirleri ile arasındaki ilişkinin araştırılmasına yönelik yapılan sistematik bir yaklaşımdır. Deney tasarımında girdiler üzerinde yapılan değişikliklerin çıktılara olan etkisi analiz edilmektedir (Montgomery, 2008). Bir sistemin genel modeli Şekil 6.1'de belirtilmektedir.




Şekil 6.1. Genel sistem modeli (Montgomery, 2008)

Klasik deney tasarımında her deneyde bir faktör değiştirilip diğer faktörler sabit tutularak değiştirilen faktörlerin çıktı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu sebeple yapılan deneysel çalışmalar maliyeti arttırmakta ve deneylerin tamamlanma süresi uzamaktadır. Ayrıca klasik deney tasarımında faktörlerin birbirleri ile etkileşimleri dikkate alınmadığı için bu yöntem yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, deneylerin yapılırken doğru planlanması gerekmektedir. Geliştirilen istatiksel deney tasarım yöntemleri (DOE) ile birden fazla faktörün daha az

deney yapılarak çıktı üzerindeki etkileri analiz edilebilmektedir (Sefacı ve diğ., 2022). En yaygın kullanılan istatiksel deney tasarım metotları, Faktöriyel tasarım, Taguchi tasarım, şeklinde sıralanmaktadır.

### 6.1.1. Faktöriyel Tasarım

Birden çok faktörün ve faktörlerin etkilerinin çıktı üzerindeki etkileşimlerinin analiz edildiği deney tasarım yöntemine faktöriyel deney tasarımı denir (Mihailescu ve diğ., 2021). Bu yöntemde, varyans (ANOVA) ve regresyon analizi gibi uygulamaların kullanılmasına da imkan verilmektedir. Faktöriyel deney tasarım yöntemi, çıktı üzerindeki ana etkileri tahmin etmek için etkili bir yöntemdir ve bu yöntemin uygulaması diğer tasarım yöntemlerine göre daha kolay ve bu yöntem optimizasyon gerektiren çalışmalar için oldukça uygun bir yöntemdir (Spanelis ve Walker, 2022). Faktöriyel deney tasarım yöntemi tam faktöriyel ve kesirli faktöriyel olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tam faktöriyel tasarımın en önemli özelliği tüm faktörlerin ve faktörlerin etkileşimlerinin çıktı üzerindeki etkisini incelemesidir (Mohammed ve diğ., 2017). Tam faktöriyel deney tasarım yönteminde deney sayısı Eş. 6.1'deki formül ile hesaplanmaktadır. Bu formülde n deney sayısını, a faktörlerin seviyesini, k ise faktörlerin sayısını belirtmektedir.

$$n = a^k \tag{6.1}$$

Deney sayısının hesaplanmasına örnek vermek gerekirse 2 seviyeli, 4 faktörlü bir tasarım için yapılması gereken deney sayısı faktör seviyelerinin çarpımı ile ($2^4$=16) bulunmaktadır.

Kesirli faktöriyel deney tasarımı ile ortogonal dizinler kullanılarak deney sayısının azaltılması amaçlanmaktadır. Deney sayısının hesaplanmasına örnek vermek gerekirse yine 2 seviyeli, 4 faktörlü bir tam faktöriyel deney tasarımı için 16 deney yapılması gerekmektedir. Bu deney $1/2$ kesirli olduğunda 8 deney ya da ¼ kesirli olduğunda ise 4 deney yapılabilmektedir. Burada hangi kesirli deneyin yapılacağını ise deneyi yapan araştırmacılar belirlemektedir (Şenoğlu ve Acıtaş, 2020).

### 6.1.2. Taguchi

Deneylerde meydana gelebilecek değişkenliklerin azaltılması ve parametrelerin optimize edilmesi için Taguchi yöntemi kullanılabilmektedir. Klasik deney tasarımlarında sistem üzerinde etkili olan faktörlerin artması, yapılması gereken deney sayısını arttırırken Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalarda deney sayısı büyük oranda azalabilmektedir. Bu yöntemde deney sonuçlarının analiz edilmesinde sinyal/gürültü (S/N) oranı grafikleri incelenmektedir (Savaşkan ve diğ., 2004). Buradaki S harfi deneyden elde edilen değeri, N harfi ise deney sonucuna etkisi olan gürültüdür. S/N oranı kullanım şekline göre üçe ayrılmaktadır. Bunlar;

- Ek küçük en iyidir (smaller is better)

$$\frac{S}{N} = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right] \tag{6.2}$$

Bu yöntemde hedef değerimiz sıfırdır. Örnek olarak, lastiklerin aşınması ve yüzey pürüzlülüğü verilebilir.

- En büyük en iyidir (larger is better)

$$\frac{S}{N} = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2}\right] \tag{6.3}$$

Bu yöntemin kullanımına örnek olarak güç veya verim kullanılabilir.

- Nominal en iyidir (nominal is better)

$$\frac{S}{N} = 10\log\left[\frac{\overline{y_i}^2}{s^2}\right] \tag{6.4}$$

Bu yöntemde alt ve üst toleransı olan bir karakteristiğin nominal değerinde olması amaçlanmaktadır. Formüllerdeki n sembolü bir deneyde yapılan test sayısını, $y_i$ çıktının i. gözlemlenen değerini, $\overline{y_i}$ deney verilerinin ortalamasını ve s ise y değerinin varyansını göstermektedir (Yılmaz ve Keskin, 2019).

### 6.1.3. Varyans Analizi (ANOVA)

ANOVA deneylerdeki bağımsız değişkenlerin kendi içlerindeki etkileşimlerini ve bu etkileşimlerin çıktı (bağımlı değişken) üzerindeki etkisini istatiksel olarak analiz etmekte kullanılmaktadır (Yılmaz ve Keskin, 2019).

### 6.1.4. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, bağımlı (çıktı) ve bağımsız değişkenler (girdi) arasındaki ilişkinin matematiksel olarak modellenmesi için uygulanmaktadır. Değişken sayısına göre tek değişkenli ve çok değişkenli regresyon analizi olarak isimlendirilmektedir. Regresyon eşitlik 6.5'teki gibi matematiksel bir ifadeyle modellenmektedir (Şap, 2023). Denklemde y bağımlı değişken, x bağımsız değişken, a ile gösterilen ifade beta katsayısı, b ifadesi ise sabit bir değeri göstermekte ve bu değerler katsayılar tablosunda yer almaktadır.

$$y = a.x + b \tag{6.5}$$

# 7. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İmalat sektöründe en sık kullanılan malzemelerden biri olan alüminyum ve alaşımları üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda malzemelerin mikro yapıları, malzemeler üzerine uygulanan talaşlı imalat yöntemlerinin çıktıya olan etkileri gibi konular araştırılmıştır.

Yalçın ve arkadaşları yaptıkları çalışmada alüminyum Etial-150 alaşımını kullanarak enjeksiyon parametrelerinin ve kalıp tasarımının üretilen ürünün mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Mekanik özellik olarak; darbe dayanımı, sertlik, akma ve kopma dayanımı değerlerini incelemişlerdir. Çalışmada basınçlı döküm parametreleri olarak, enjeksiyon hız oranı (%25-%100), enjeksiyon basıncı (100-150 bar) ve soğutma türü (sulu, normal) kullanılmıştır. Kalıp tasarımının üretilen ürün için çok önemli olduğunu, kalıp üzerinde yer alan hava cepleri, hava kanallarının, yolluk girişi ve besleyicilerin kalıp tasarım aşamasında doğru hesaplanması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu hesaplamalar uygun şekilde yapılmaz ise, kalıplanan ürünün içerisinde gözenek, döküm boşluğu, gibi sorunlar ile karşılaşılabileceğini belirtmişlerdir (Yalçın ve diğ., 2012).

Koru ve Serçe çalışmalarında yüksek basınçlı döküm yöntemi ile A380 alüminyum alaşım kullanarak dişli kutusu üretmişlerdir. Basınçlı döküm parametreleri olarak, kalıp sıcaklığı, ikinci faz enjeksiyon hızı ve ergimiş metal sıcaklığını kullanmışlardır. Belirledikleri parametrelerin döküm simülasyon programında porozite analizini yapmışlardır. Yaptıkları deney sonucunda, ergimiş metal sıcaklığının 953K'den (680 ℃) 1053K'e (780 ℃) çıkarıldığında porozite oluşumunun daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. İkinci faz enjeksiyon hızının 1 m/s olduğu durumda porozite açısından en iyi sonuç elde edilmiş fakat bu durumda da ergimiş metalin istenen akışkanlığı sağlanamamış bu sebeple alternatif olarak 2 m/s hızı kullanılmıştır. Enjeksiyon hızının 3 ve 5 m/s olduğu durumda porozite açısından daha kötü sonuç elde edilmiş ve yüksek dolum hızlarının kalıba zarar vereceği düşünülmüştür. Bunlara ek olarak ikinci fazın kalıbın yolluk başlangıcından başlatılması yerine dolum ağzından başlatılmasının porozite oluşumunu azalttığını da yaptıkları çalışmalarda gözlemlemişlerdir (Serçe ve Koru, 2015).

Işık ve arkadaşları çalışmalarında Alüminyum alaşımı olan Al$Si_9Cu_3$ kullanarak yüksek basınçlı döküm yöntemi kullanarak jant üretimini MagmaSoft 5.4. programında simüle etmişlerdir. Çalışmalarında ergimiş metal sıcaklığını 670 ℃, birinci faz enjeksiyon hızını maksimum 0,2 m/s, ikinci faz enjeksiyon hızının ise 4,0 m/s olarak belirlemişlerdir. Yaptıkları simülasyon çalışmasında yolluk tasarımlarını değiştirerek ergimiş metalin dolumunu incelemişlerdir. Burada yolluk tasarımının değiştirilmesi ile ergimiş metalin türbülans oluşturmadan daha düzenli bir dolum gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Simülasyon sonucunda jantın göbek bölgesinden yapılacak olan dolumun parça içerisine daha homojen dağılacağı gözlemlenmiş ve nihai yolluk tasarımı bu şekilde yapılmıştır (Işık ve diğ., 2020).

Dargusch ve arkadaşları yüksek basınçlı döküm yöntemiyle ile üretilen, telekomünikasyon sektöründe kullanılan bir parçanın kalitesine etki eden süreç değişkenlerini kalıp içerisine yerleştirdikleri basınç sensörü yardımıyla anlamaya çalışmışlardır. Çalışmalarını RF filtre kutusunu yüksek basınçlı döküm ile üreterek yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada enjeksiyon hızını 1; 1,8; 3,8 m/s olarak belirlemişler, alaşım olarak ise alüminyum DA 401 ve CA 313 alaşımlarını kullanmışlardır. Deneyin sonunda, kalıp boşluğunda bulunan basıncın artmasının üretilen üründe meydana gelebilecek gözenekliliği azalttığını görmüşlerdir. Buna ek olarak enjeksiyon hızının artması ile gözeneklilik oranının da arttığını gözlemlemişlerdir (Dargusch ve diğ., 2006)

Samtaş ve Korucu AlMg3 alüminyum alaşımı üzerinde kaplamalı ve kaplamasız kesici takım kullanarak yüzey frezeleme işlemi yapmışlardır. Frezeleme işlemi yaparken kesme hızını 310, 450, 600 m/dk, kesme derinliğini 0,5; 1; 1,5 mm ve ilerleme oranını 0,15; 0,25; 0,35 mm/diş olarak belirlemişler ve deney sonucunda çıktı olarak yüzey pürüzlülüğü ve S/N oranlarını incelemişlerdir. Yapılan deney sonucunda yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörün kesici takım, ikinci olarak ise kesme derinliği olduğunu ortaya koymuşlardır. Taguchi analizi sonucunda en iyi yüzey pürüzlülüğü elde etmek için kesme şartlarını: $Al_2O_3 - TiCN$-TiN kaplamalı kesici takım, kesme derinliği 1 mm, kesme hızı 600 m/dk ve ilerleme oranını 0,15 mm/diş olarak belirlemişlerdir (Samtaş ve Korucu, 2019).

Aydın yaptığı çalışmada, otomotiv sektöründe kullanılan bir parçanın basınçlı döküm ile üretiminde karşılaşılabilecek hatalarının önüne geçilebilmesine yönelik olarak enjeksiyon parametrelerinin analizini yapmıştır. Deneylerde hammadde olarak Zamak 5 malzeme

kullanmış ve enjeksiyon girdi parametreleri olarak üç farklı 1. Faz hızı (0,02 m/s- 0,06 m/s-0,1 m/s), üç farklı 2. Faz hızı (0,5 m/s-0,8 m/s-1,1 m/s) ve üç farklı 2. Faz hızı başlangıç mesafesi(25 mm-35 mm-45 mm) belirlemiştir. Deney numunelerinin üretimi için Taguchi L9 ortogonal dizisi seçilmiştir. Numuneler üzerinde sertlik (HB) ve çekme testleri (MPa) yapılmış ve elde edilen veriler üzerinde Taguchi ve ANOVA metotları ile istatiksel analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda üretilen ürünün mekanik özelliklerini en çok etkileyen girdi parametresinin 2. Faz hızı olduğu sonucuna varılmıştır (Aydın , 2020).

Dong ve arkadaşları yüksek mukavemette ve yüksek süneklikte alüminyum alaşımı geliştirmişlerdir. Alaşım 690 ℃'de eritilerek, soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinesinde kullanılmıştır. 6,35 mm çapında 50 mm uzunluğunda yuvarlak çekme çubukları dökülmüştür. Üretilen çekme çubuklarına ısıl işlem ve yaşlandırma işlemleri uygulanmıştır. Daha sonra numunelere çekme ve sertlik testleri yapılmış ve numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Geliştirilen AlSiCuMgMn alaşımı 170 ℃'de 12 saat yaşlandırıldıktan sonra 321 MPa akma dayanımı ve 425 MPa maksimum çekme dayanımına ve %11,3 oranında yüksek sünekliğe sahip olduğu görülmüştür. Alaşım, 6000 serisi dövme alüminyum alaşımlarıyla benzer özellikler göstermesinin yanında düşük üretim maliyetine de sahiptir (Dong ve diğ., 2019).

Meral ve arkadaşları yaptıkları çalışmada AISI 1050 malzemesi üzerine farklı özellikte HSS matkaplar kullanarak delik delmişler ve çıktı olarak delik çapındaki değişimler, dairesellik ve silindiriklik değerlerini ölçmüşlerdir. Deneylerinde girdi olarak, kaplamalı ve kaplamasız HSS matkap kullanmışlardır. Buna ilave olarak kesme hızı değerlerini 20, 30, 40 m/dk, ilerleme değerlerini ise 0,05; 0,1; 0,15 olarak belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda delik çapını etkileyen en önemli faktörün, matkap türü olduğu, delik dairesellik sapmasını etkileyen en önemli faktörün ise kesme hızı olduğu sonucuna varmışlardır. Delik silindiriklik sapmasını en çok etkileyen faktörlerin ise kesme hızı, matkap çapı ve kullanılan matkabın kalitesi olduğunu ileri sürmüşlerdir (Meral ve diğ., 2011).

Özmen yaptığı çalışmada alüminyum A360 malzemesi kullanarak belirlenen enjeksiyon parametrelerine göre basınçlı döküm yöntemi ile numune üretimi yapmıştır. Çalışmada girdi parametreleri olarak iki farklı döküm sıcaklığı (983 K- 1053 K) (710 ℃-780 ℃), dört farklı kalıp sıcaklığı (373 K-433 K-493 K -553 K) (100 ℃, 160 ℃, 220 ℃, 280 ℃), iki farklı

enjeksiyon basıncı (100 bar -200 bar) ve iki farklı enjeksiyon hızı (1,7 m/s-2,5 m/s) seçilmiş ve ayrıca deneyler vakumlu-vakumsuz ortamlarda da yapılmıştır. Üretilen yarı mamul ürünlere çekme testleri yapılmış ve en uygun enjeksiyon parametreleri belirlenmiştir. Bunlar, 553 K (280 ℃) kalıp sıcaklığı, 983 K-1053 K (710 ℃-780 ℃) döküm sıcaklığı, 1,7 m/s ikinci faz hızı, 200 bar enjeksiyon basıncı ve vakumlu durumda basınçlı döküm işlemi yapılmasıdır (Özmen, 2015).

Gökçe yaptığı çalışmada alüminyum 1050-H14 alaşımı üzerinde HSS matkap kullanarak delik delme deneyleri yapmıştır. Yaptığı çalışmada girdi parametresi olarak, kesme hızı, ilerleme miktarı, matkap uç açısı ve matkap kaplama durumunu dikkate alınmıştır. Deneyde çıktı olarak kesme kuvvetleri ve kesici takım sıcaklığı kullanmıştır. Deney sonuçları ANOVA ve Taguchi metodu ile analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada kesme kuvvetleri üzerinde en etkili girdi parametresinin ilerleme miktarı olduğu, kesici takım sıcaklığı üzerinde en etkili girdi parametresinin ise kesme hızı olduğu belirlenmiştir (Gökçe, 2021).

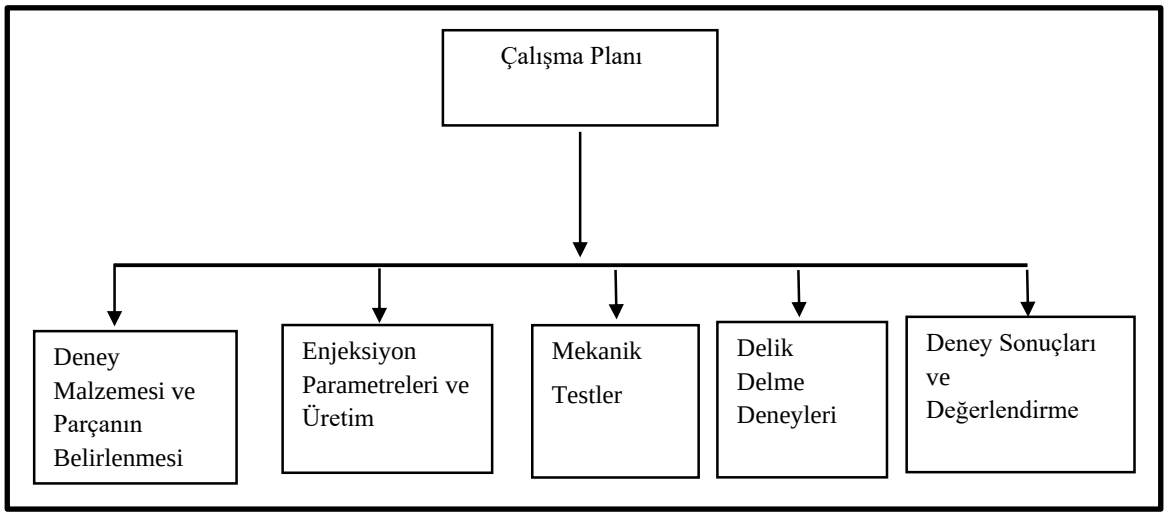
### 7.1. Literatürün Değerlendirilmesi

Literatürde Etial 150, Etial 160 gibi alaşımların YBD yöntemi ile ilgili üretim parametrelerinin ürünün mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili bazı çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca literatür taraması yapılırken alüminyum alaşımlarının talaşlı işlenebilme kabiliyetleri ve delik delme mekaniği ile ilgili çalışmalar da incelenmiştir.

Bu bağlamda, Etial-141($\mathrm{Al}Si_{12}Cu$) malzemesi kullanılarak deneysel bir çalışma amaçlanmıştır. Belirlenen enjeksiyon parametrelerine göre üretilen numuneler üzerinde mekanik deneyler ve belirlenen kesme parametrelerine göre de delik delme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler, faktöriyel tasarım, taguchi, ANOVA gibi istatiksel yöntemler ile değerlendirilmiştir. Hangi faktörlerin çıktılar üzerinde ne kadar etkisinin olduğunun ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

# 8. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada YBD prosesinde kullanılan enjeksiyon hızı, ergimiş metal sıcaklığı ve kalıp açılma zamanı parametreleri kullanılarak 27 farklı özellikte parçanın basınçlı dökümü gerçekleştirilmiştir. Döküm yapılırken kalıp sıcaklığı 250℃ 'de sabit tutulmuştur. Hammadde olarak alüminyum alaşımlarından Etial 141 ($AlSi_{12}Fe$) malzemesi kullanılmıştır. Dökümü gerçekleştirilen ürünlere ilk olarak mekanik testler yapılarak enjeksiyon parametrelerinin malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin görülmesi hedeflenmiştir. Üretilen test numunelerinden örnek olarak mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Çalışmada ikinci aşama olarak, Taguchi L27 deney tasarımı yapılmış ve belirlenen parametrelere göre CNC Freze tezgahında, soğutma sıvısı kullanılmadan delik delinmiştir. Delik delme işleminde, her delik için ayrı (sıfır) bir kesici takım kullanılmıştır. Şekil 8.1'de yapılan çalışmanın şematik gösterimi yer almaktadır. Çalışma planı içerisindeki her bir başlık aşağıda açıklanmıştır.




Şekil 8.1. Çalışma planı

## 8.1. Deney malzemesi ve Parçasının Belirlenmesi

İlk olarak tez çalışmasında kullanılacak olan ürün belirlenmiştir. Ürün belirlenirken bu ürünün YBD yöntemine uygun olup olmadığını anlamak için Döküm Simülasyon (NovaFlow) programında dolum simülasyonu yapılmıştır. YBD ile üretilecek ürünler için hammadde olarak alüminyum alaşımlarından Etial 141 ($AlSi_{12}Fe$) malzemesi seçilmiştir.

Etial 141, amerikan normunda 413 olarak'ta ifade edilmektedir. Etial 141 malzemesinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 8.1'de yüzde oran şeklinde gösterilmiştir.

Çizelge 8.1. Etial 141 Kimyasal özellikleri (Eti Alüminyum, 2023)

| Al | Fe | Si | Cu | Mn | Mg | Zn | Ni | Ti | Pb | Sn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kalan | 1,00 | 11,50-13,50 | 0,2 | 0,30 | 0,20 | 0,10 | 0,10 | 0,15 | 0,10 | 0,05 |

## 8.2. Enjeksiyon Parametreleri ve Üretim

Enjeksiyon makinası

Basınçlı döküm için Hidroteknik marka HTME 300 serisi soğuk kamaralı döküm makinesi kullanılmıştır. Şekil 8.2'de döküm yapılan makine gösterilmektedir. Çizelge 8.2'de ise kullanılan basınçlı döküm makinesinin teknik özellikleri gösterilmektedir.




Şekil 8.2. Yüksek basınçlı döküm makinesi

Çizelge 8.2. Basınçlı döküm makinesi teknik özellikleri

| | |
|---|---|
| Mengene Kilitleme Kuvveti | $300.10^3$ kg |
| İtici kuvveti | 200 kN |
| Maksimum Kalıp Yüksekliği | 600 mm |
| Minimum Kalıp Yüksekliği | 200 mm |
| Plaka Ölçüleri | 900 ×1000 mm |
| Motor Gücü | 18,5 kW |
| Maksimum Parça Ağırlığı | 3,5 kg |
| 3. Faz Basıncı | 300 Bar |
| Enjeksiyon Kuvveti | 55 Ton |
| Azot Basıncı | 80 Bar |

Enjeksiyon parametreleri

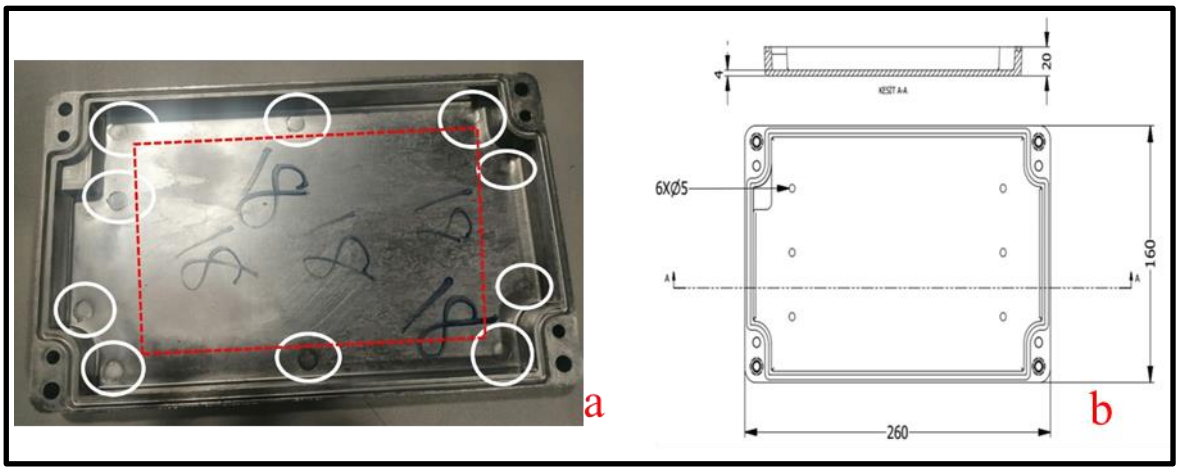
Üretilecek deney numunesi için belirlenen enjeksiyon parametreleri Çizelge 8.3'te gösterilmiştir. Enjeksiyon parametreleri belirlenirken sektör verilerinden ve literatür çalışmalarından yararlanılmıştır. Serçe ve korunun yaptıkları çalışmada ikinci faz enjeksiyon hızını 1-3-5 m/s, ergimiş metal sıcaklığını ise 680-780 °C olarak belirledikleri görülmüştür (Serçe ve Koru, 2015).

Çizelge 8.3. Enjeksiyon Parametreleri

| Faktörler | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 |
|---|---|---|---|
| Enjeksiyon Hızı (m/s) | 1,3 | 2,6 | 4 |
| Kalıp Açılma Zamanı (s) | 10 | 12 | 15 |
| Ergimiş Metal Sıcaklığı (°C) | 700 | 725 | 750 |

Deney parçalarının üretimi için, ekonomik ve hızlı olması açısından bir işletmede hâlihazırda kullanılan kalıplardan biri tercih edilmiştir. Boyutları 260 x 160 x 20 mm olan parça (Şekil 8.3), bu çalışmada kullanılmıştır. Kalıplanacak olan parça sayısı, Çizelge 8.3'te belirlenen faktörlere göre belirlenmiştir. Klasik deneyler için toplamda: 3*3*3 = 27 adet parçanın kalıplanması gerekmektedir. Fakat bu çalışmada, parça kalıplama deneyleri için ve elde edilecek olan deney sonuçlarının analizi için faktöriyel deney tasarımı yöntemi tercih edilmiştir. Minitab istatistiki değerlendirme programında, deney tasarımı (DOE) başlığı altında verilen yöntemlerden tam faktöriyel bu çalışmada kullanılmıştır. Seçilen tam faktöriyel yöntemi, ekonomik deney tasarımı için 27 farklı enjeksiyon parametresini 2

tekrarlı olarak önermiştir. Dolayısı ile deney parçalarından 54 adet üretilmiştir. Test numunelerinin üretimi esnasında artan kalıp sıcaklığının, belirlenen kalıp sıcaklığında (250 ℃ ) olmasına dikkat edilmiştir. Kalıp sıcaklığı arttığında, üretime ara verilerek kalıbın istenen sıcaklığa (250 ℃ ) düşmesi sağlanmıştır. Parçalar kalıp içerisinden çıkarıldığında da oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Üretilen test numuneleri üzerinde mekanik deneyler yapılırken, enjeksiyon prosesinde üretilen parçanın kalıp içerisinden çıkarılması için kullanılan iticilerin izlerinin bulunduğu bölgeler (beyaz yuvarlak) dikkate alınarak bu bölgeler haricinde kalan bölgelerden (kırmızı kesikli çizgi) testler yapılmıştır.




Şekil 8.3. Deney parçası: a) Kalıptan çıkmış hali, b) Teknik resmi

## 8.3. Mekanik Testler

Faktöriyel tasarım

Bu çalışmada, mekanik testler için enjeksiyon üretim parametrelerine (Çizelge 8.3) göre üretilmiş deney parçaları kullanılmıştır. Çizelge 8.3'te belirtilen deney parametrelerinden ergimiş metal sıcaklığı "Sıcaklık", enjeksiyon hızı "Hız", kalıp açılma zamanı "Zaman" kısaltmaları ile kullanılacaktır.

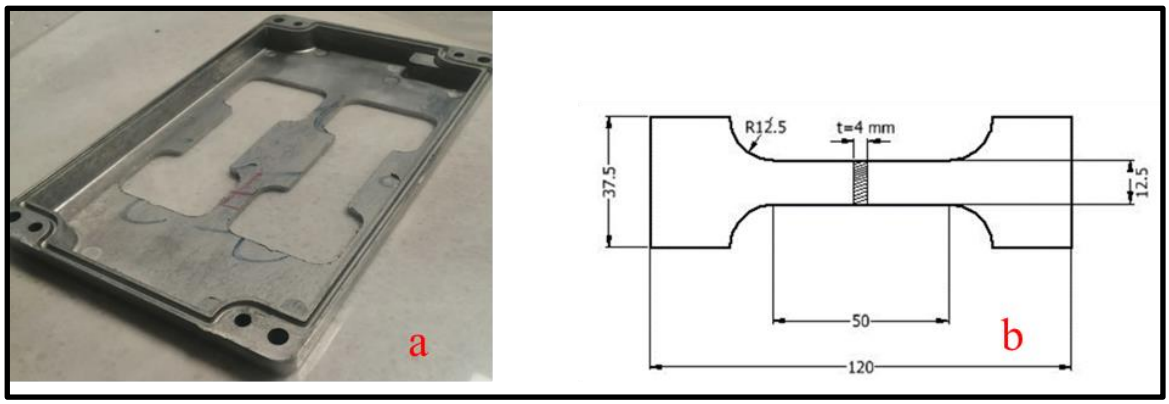
Çizelge 8.4. Enjeksiyon üretim faktörleri

| Faktör | Seviye | Değer |
|---|---|---|
| Sıcaklık (°C) | 3 | 700; 725; 750 |
| Hız (m/s) | 3 | 1,3; 2,6; 4,0 |
| Zaman (s) | 3 | 10; 12; 15 |

Sertlik ve çekme testlerinin deneysel çalışması için belirlenen tam faktöriyel deneylerin ortogonal dizini Çizelge 8.5' te gösterilmiştir. Basınçlı döküm işleminden sonra ilk olarak çekme ve sertlik deneyleri yapılmıştır.

Çekme testi

Farklı enjeksiyon parametrelerine göre üretilen parçalardan Şekil 8.4.a'da görüldüğü gibi çekme numuneleri çıkarılıp iki tekrarlı şekilde çekme deneyi yapılmıştır.
TS EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanan çekme numunesinin teknik resmi Şekil 8.4.b'de gösterilmiştir.




Şekil 8.4. Çekme numunesi: a) Parçadan çıkarılmış hali, b) Teknik resmi

Çekme deneyi için MITECH marka WDW-100 serisi çekme cihazı (Şekil 4.1.b) kullanılmıştır. Çekme deneylerinin tamamı oda sıcaklığında ve 1 mm/dk çekme hızıyla yapılmıştır.

Çizelge 8.5. Tam faktöriyel deney tasarım modeli

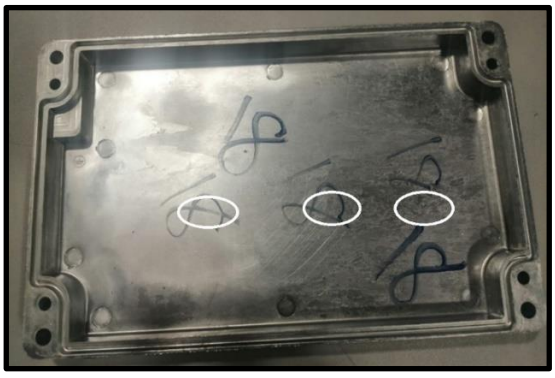
| Numune | Sıcaklık (℃) | Hız (m/s) | Zaman (s) |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 1 |
| 5 | 1 | 2 | 2 |
| 6 | 1 | 2 | 3 |
| 7 | 1 | 3 | 1 |
| 8 | 1 | 3 | 2 |
| 9 | 1 | 3 | 3 |
| 10 | 2 | 1 | 1 |
| 11 | 2 | 1 | 2 |
| 12 | 2 | 1 | 3 |
| 13 | 2 | 2 | 1 |
| 14 | 2 | 2 | 2 |
| 15 | 2 | 2 | 3 |
| 16 | 2 | 3 | 1 |
| 17 | 2 | 3 | 2 |
| 18 | 2 | 3 | 3 |
| 19 | 3 | 1 | 1 |
| 20 | 3 | 1 | 2 |
| 21 | 3 | 1 | 3 |
| 22 | 3 | 2 | 1 |
| 23 | 3 | 2 | 2 |
| 24 | 3 | 2 | 3 |
| 25 | 3 | 3 | 1 |
| 26 | 3 | 3 | 2 |
| 27 | 3 | 3 | 3 |
| 28 | 1 | 1 | 1 |
| 29 | 1 | 1 | 2 |
| 30 | 1 | 1 | 3 |
| 31 | 1 | 2 | 1 |
| 32 | 1 | 2 | 2 |
| 33 | 1 | 2 | 3 |
| 34 | 1 | 3 | 1 |
| 35 | 1 | 3 | 2 |
| 36 | 1 | 3 | 3 |
| 37 | 2 | 1 | 1 |
| 38 | 2 | 1 | 2 |
| 39 | 2 | 1 | 3 |
| 40 | 2 | 2 | 1 |
| 41 | 2 | 2 | 2 |
| 42 | 2 | 2 | 3 |
| 43 | 2 | 3 | 1 |
| 44 | 2 | 3 | 2 |
| 45 | 2 | 3 | 3 |

Çizelge 8.5. (Devam) Tam faktöriyel deney tasarım modeli

| Numune | Sıcaklık (℃) | Hız (m/s) | Zaman (s) |
|---|---|---|---|
| 46 | 3 | 1 | 1 |
| 47 | 3 | 1 | 2 |
| 48 | 3 | 1 | 3 |
| 49 | 3 | 2 | 1 |
| 50 | 3 | 2 | 2 |
| 51 | 3 | 2 | 3 |
| 52 | 3 | 3 | 1 |
| 53 | 3 | 3 | 2 |
| 54 | 3 | 3 | 3 |

Sertlik testi

Üretilen parçaların iki tekrarlı olacak şekilde sertlikleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümü yapılırken parçanın üzerinden üç farklı bölgeden alınan değerlerin ortalaması alınmıştır. Sertlik deneyleri, Galileo Ergotest Digi 25R cihazıyla (Şekil 4.1.a) yapılmıştır. Sertlik deneyi yapılırken deney parçası üzerine çap değeri 2,5 mm olan küresel çelik bilye ile yük uygulanmıştır. Deney sonucunda ise sertlik değerleri Brinell olarak hesaplanmıştır. Sertlik deneyi yapılırken parça üzerindeki üç farklı noktadan sertlik değerleri elde edilmiş ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Şekil 8.5'de sertlik testi yapılan bölgeler işaretlenmiştir.



Şekil 8.5. Sertlik testi yapılan bölgeler

## 8.4. Delik Delme Deneyleri

Tezgah

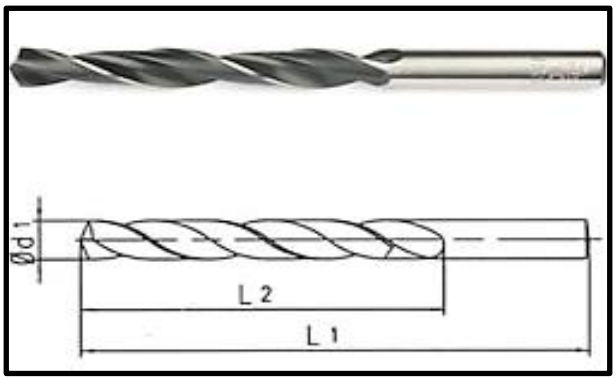
Belirlenen enjeksiyon parametrelerine göre üretilen parçalara delik delme işlemi yapılması için Şekil 8.6'da görülen 3 eksen CNC freze tezgâhı kullanılmıştır. Johnford marka WMC-550 isimli bu tezgâh 0.001 mm hassasiyete sahiptir.




Şekil 8.6. Delik delme deneylerinin yapıldığı CNC freze tezgâhı

Kesici

Delik delme işlemi için Şekil 8.7'de kullanılan matkap gösterilmiştir. Matkap özellikleri ise Çizelge 8.6'da yer almaktadır.




Şekil 8.7. HSS Matkap ve boyutları

Çizelge 8.6. Delik delme işleminde kullanılan matkap özellikleri

| | |
|---|---|
| Matkap Türü | HSS |
| Kaplama Durumu | Kaplamasız |
| Marka | Makina Takım Endüstrisi |
| Uç Açısı | 118° |
| Helis Açısı | 30° |
| Çap (Ød1) | 5 mm |
| Boy (L1) | 86 mm |
| Kesme Boyu(L2) | 52 mm |

Delik Delme Deney Parametreleri:

CNC Freze tezgahında belirlenen parametrelere göre delik delme işlemi yapılmıştır. Belirlenen parametreler Çizelge 8.7'de gösterilmiştir. Kesme hızı (V) ve ilerleme (f) hesabı Şekil 8.7'de gösterilen kesici uca göre hesaplanmıştır. Kesici takım kataloğu içerisinde de önerilen değerler (kesme hızı 60 m/dk, ilerleme 0,15 mm/dev) belirtilmiştir. Ayrıca kesme hızı ve ilerleme parametrelerinin belirlenmesinde literatür çalışmaları da dikkate alınmıştır.

Çizelge 8.7. Delik delme parametreleri

| Faktörler | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 |
|---|---|---|---|
| Kesme Hızı (m/dk) | 40 | 60 | 90 |
| İlerleme (mm/dev) | 0,1 | 0,15 | 0,22 |

Taguchi deney tasarımı (DOE)

Bu çalışmada delik delme deneyleri için belirlenen parametreler çizelge 8.8'de gösterilmektedir. Eğer deneyler klasik olarak planlanmış olsaydı, 5 adet faktör ve her faktörün 3 seviyesi dikkate alındığında toplamda: 3*3*3*3*3 = 243 adet deney yapılması gerekecekti. Delme deneyleri için Taguchi L27'ye göre deney tasarımı yapılmıştır. Taguchi, toplamda 27 adet deney yapılamasını yeterli bulmaktadır. Fakat bu çalışmada deneyler iki tekrarlı yapılmıştır (54 deney). Her bir deney için yeni bir HSS matkap kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan matkaplar takım tutucusuna bağlanırken her deneyde aynı uzunlukta matkap bağlanması sağlanmıştır. Bu deney tasarımında amaç en küçük en iyidir yaklaşımı olduğu için Eş.8.1'deki formül ile S/N oranı hesaplanmaktadır.

Çizelge 8.8. Delik delme faktörleri

| Faktör | Seviye | Değer |
|---|---|---|
| Sıcaklık (°C) | 3 | 700; 725; 750 |
| Hız (m/s) | 3 | 1,3; 2,6; 4,0 |
| Zaman (s) | 3 | 10; 12; 15 |
| Kesme Hızı (m/dk) | 3 | 40; 60; 90 |
| İlerleme (mm/dev) | 3 | 0,10; 0,15; 0,22 |

$$\frac{S}{N} = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right] \quad (8.1)$$

Eş. 8.1'de n sembolü bir deneyde yapılan test sayısını $y_i$ ise çıktının i. gözlemlenen değerini belirtmektedir. Deneysel çalışma için belirlenen Taguchi L27 ortogonal dizini Çizelge 8.9'da gösterilmektedir.

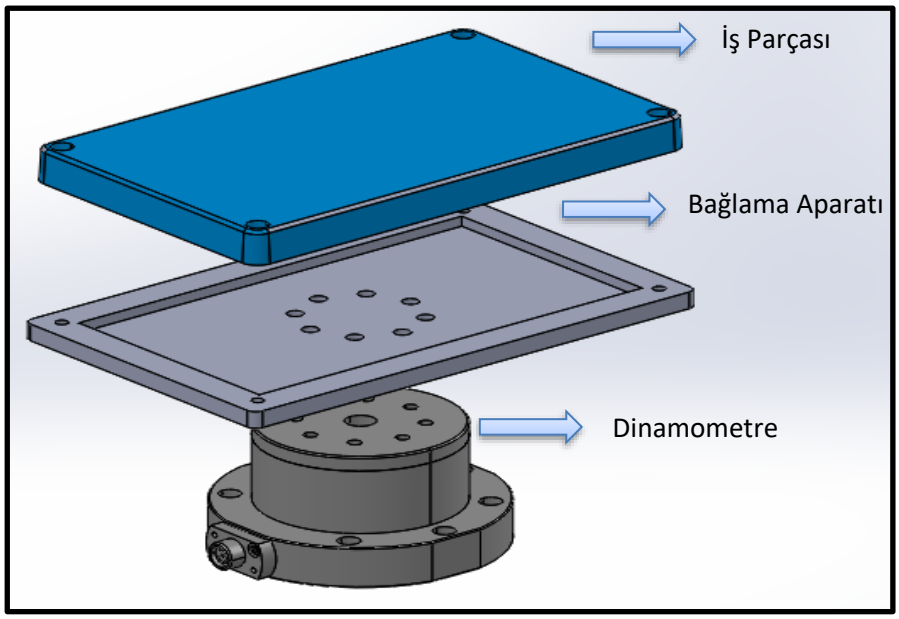
Çizelge 8.9. Taguchi L27 deney tasarım modeli

| Deney No | Sıcaklık (°C) | Hız (m/s) | Zaman (s) | Kesme Hızı (m/dk) | İlerleme (mm/dev) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 6 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 7 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| 8 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 10 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 |
| 12 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| 13 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| 14 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 17 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 |
| 18 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 19 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| 20 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 |
| 21 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| 22 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 23 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| 24 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 |
| 25 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 26 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 27 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 |

Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi:

Matkap ile delik delme işlemi sırasında iki büyük kuvvetin etkisi bulunmaktadır. Bunlar, kesici takımın ilerleme yönüne zıt yönde olan $F_z$ ve kesici takımın dönüş yönüne ters yönde olan moment ($M_z$)'tir (Gökçe, Yavuz, & Karayel , 2017).

Delik delme işlemi sırasında dinamometre ile kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Şekil 8.8'de dinamometre, üretilen ürün ve bu ürünün dinamometreye bağlanması için tasarlanan bağlama aparatının üç boyutlu katı model görüntüleri gösterilmiştir.




Şekil 8.8. Test parçası dinamometre bağlantısı şematik gösterimi

## 8.5. Deney Sonuçları ve Değerlendirme

Delik delme işlemi yapıldıktan sonra deliklerin çapları ve silindiriklikleri koordinat ölçüm cihazı CMM ile ölçülmüştür. Çekme ve sertlik deneyleri iki tekrarlı (27*2= 54) olarak yapılmış ve deney sonuçları tam faktöriyel analiz yöntemiyle analiz edilmiştir. Taguchi L27 deney tasarımına göre iki tekrarlı yapılan (27*2=54) delik delme deneyleri sırasında Kesme kuvvetleri ve sonrasında da elde edilen deliklerin çap ve silindiriklik değerleri Taguchi ve ANOVA yöntemleriyle istatiksel olarak analiz edilmiştir.

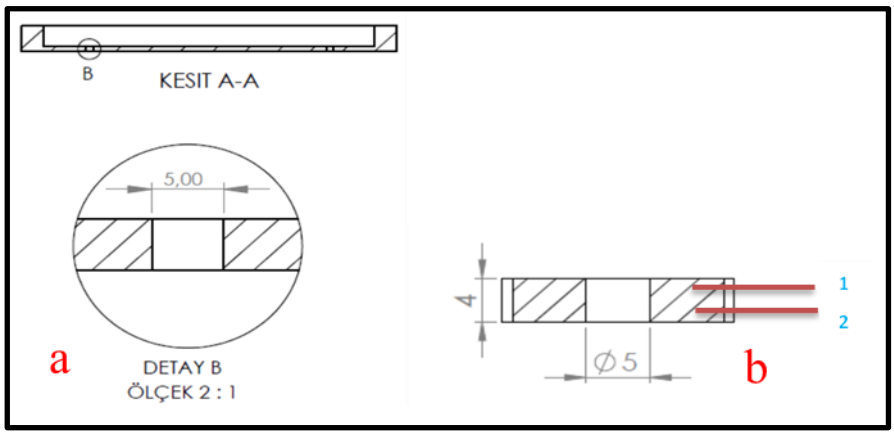
Deliklerin CMM ile ölçümü

Test numuneleri üzerine delinen delikler Şekil 8.9'da görülen DEA Global CMM cihazı ile ölçülmüştür.



Şekil 8.9. Ölçüm yapılan CMM cihazı

Delikler CMM'de, 1 mm'lik çapta prob ile altı nokta alınarak, üst yüzeyden 1 mm aşağı seviyeden ve alt yüzeyden 1 mm yukarıdan silindir oluşturularak 20℃ ortam sıcaklığında ölçülmüştür. Deliklerin ölçümünün yüzeyden 1 mm aşağıdan yapılmasının sebebi ise deliğin üst kısımlarında olabilecek muhtemel çapaklardan dolayıdır. Şekil 8.10'da iş parçasının teknik resmi (bkz. Şekil 8.3.b) üzerinden alınan bir deliğin kesit görünümü yer gösterilmektedir. Şekilde detay B olarak alınan örnek deliğin CMM'de ölçüm yapılan yerlerinin şematik olarak gösterimi yer almaktadır. Şekilde 1 ve 2 ile gösterilen çizgiler delik girişi (yüzeyden 1 mm aşağıda) ve çıkışı (yüzeyden 3 mm aşağıda) kısımlarını göstermektedir. CMM ile yapılan ölçümler bu çizgiler arasında kalan alandan yapılmıştır.




Şekil 8.10. a) Bir deliğin kesit görünümü b) CMM ile delik ölçümü

# 9. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME

## 9.1. Mekanik Deney Sonuçları İstatiksel Analizi

Bu çalışmada, ilk olarak üretilen numunelere mekanik testler (sertlik ve çekme) yapılmış ve elde edilen sonuçlar istatistiki olarak analiz edilmiştir.

### 9.1.1. Sertlik deneyi için istatiksel analiz

Basınçlı döküm ile farklı enjeksiyon parametrelerine göre üretilen parçaların üzerinden farklı farklı üç yerden sertlik ölçülmüş ve bu değerlerin ortalaması alınarak elde edilen sertlik değerleri Çizelge 9.1 de gösterilmiştir. Bu işlem iki tekrarlı olarak yapılmıştır.

Çizelge 9.1. Enjeksiyon parametrelerine göre sertlik değerleri

| Numune | Sıcaklık (°C) | Hız(m/s) | Zaman(s) | Sertlik (HB) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 700 | 4 | 10 | 74,8 |
| 2 | 700 | 4 | 12 | 74,9 |
| 3 | 700 | 4 | 15 | 75,4 |
| 4 | 700 | 2,6 | 10 | 73,4 |
| 5 | 700 | 2,6 | 12 | 69,6 |
| 6 | 700 | 2,6 | 15 | 72,3 |
| 7 | 700 | 1,3 | 10 | 77,9 |
| 8 | 700 | 1,3 | 12 | 62,3 |
| 9 | 700 | 1,3 | 15 | 71,2 |
| 10 | 725 | 4 | 10 | 77,8 |
| 11 | 725 | 4 | 12 | 82,6 |
| 12 | 725 | 4 | 15 | 80,4 |
| 13 | 725 | 2,6 | 10 | 79,5 |
| 14 | 725 | 2,6 | 12 | 78,7 |
| 15 | 725 | 2,6 | 15 | 80,3 |
| 16 | 725 | 1,3 | 10 | 79,2 |
| 17 | 725 | 1,3 | 12 | 77,7 |
| 18 | 725 | 1,3 | 15 | 79,8 |
| 19 | 750 | 4 | 10 | 76,4 |
| 20 | 750 | 4 | 12 | 69,5 |
| 21 | 750 | 4 | 15 | 70,4 |
| 22 | 750 | 2,6 | 10 | 71,8 |
| 23 | 750 | 2,6 | 12 | 70,1 |
| 24 | 750 | 2,6 | 15 | 74,1 |
| 25 | 750 | 1,3 | 10 | 79,1 |

Çizelge 9.1. (Devam) Enjeksiyon parametrelerine göre sertlik değerleri

| Numune | Sıcaklık (°C) | Hız(m/s) | Zaman(s) | Sertlik (HB) |
|---|---|---|---|---|
| 26 | 750 | 1,3 | 12 | 69,9 |
| 27 | 750 | 1,3 | 15 | 71,7 |
| 28 | 700 | 4 | 10 | 78 |
| 29 | 700 | 4 | 12 | 80,6 |
| 30 | 700 | 4 | 15 | 80,5 |
| 31 | 700 | 2,6 | 10 | 78,45 |
| 32 | 700 | 2,6 | 12 | 72,75 |
| 33 | 700 | 2,6 | 15 | 75,1 |
| 34 | 700 | 1,3 | 10 | 79,25 |
| 35 | 700 | 1,3 | 12 | 66,495 |
| 36 | 700 | 1,3 | 15 | 71,05 |
| 37 | 725 | 4 | 10 | 82,1 |
| 38 | 725 | 4 | 12 | 81,3 |
| 39 | 725 | 4 | 15 | 82,6 |
| 40 | 725 | 2,6 | 10 | 82,75 |
| 41 | 725 | 2,6 | 12 | 79,55 |
| 42 | 725 | 2,6 | 15 | 84,15 |
| 43 | 725 | 1,3 | 10 | 80,65 |
| 44 | 725 | 1,3 | 12 | 80,6 |
| 45 | 725 | 1,3 | 15 | 79,65 |
| 46 | 750 | 4 | 10 | 77,15 |
| 47 | 750 | 4 | 12 | 71 |
| 48 | 750 | 4 | 15 | 76,25 |
| 49 | 750 | 2,6 | 10 | 76,2 |
| 50 | 750 | 2,6 | 12 | 72,05 |
| 51 | 750 | 2,6 | 15 | 79,2 |
| 52 | 750 | 1,3 | 10 | 85,05 |
| 53 | 750 | 1,3 | 12 | 72,85 |
| 54 | 750 | 1,3 | 15 | 75,6 |

Daha sonra Çizelge 9.1.'de belirtilen sertlik deney sonuçları Minitab 18 paket programında tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi ile analiz edilmiştir. Faktöriyel deney tasarımı ile analiz yapılmasındaki amaç faktörlerin etkileşimli olarak yanıt değişkeni üzerindeki etkisini belirlemek içindir.

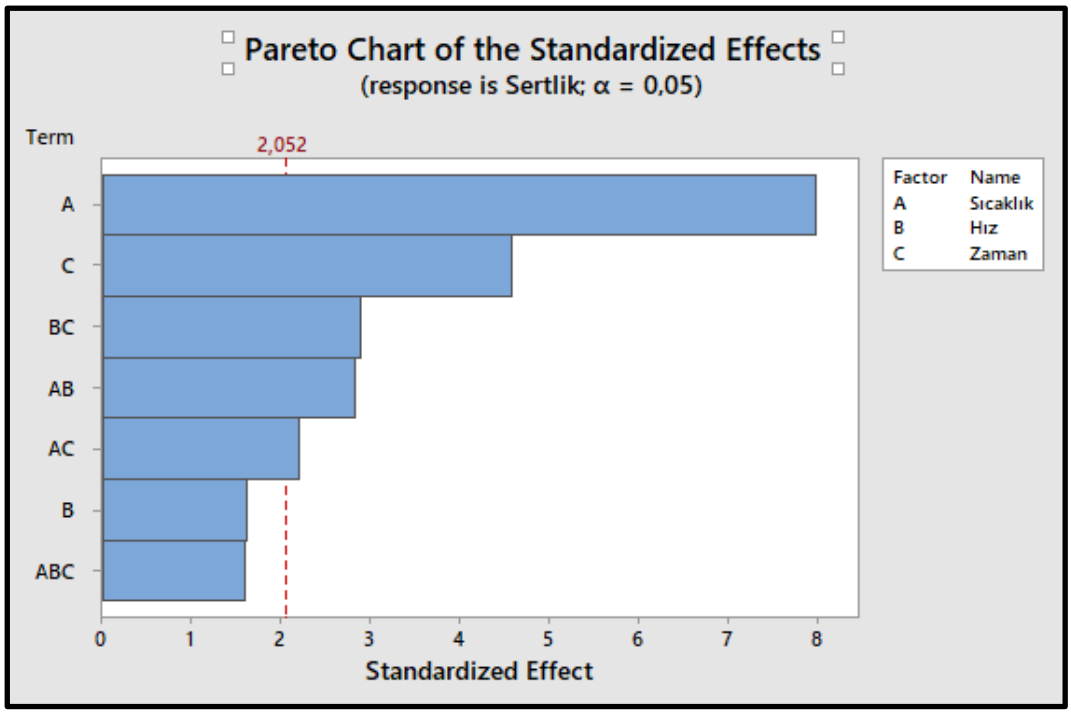
Çizelge 9.2. Sertlik testi için varyans analizi (ANOVA)

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Model | 26 | 1052,55 | 40,483 | 6,46 | 0,000 |
| Linear | 6 | 671,65 | 111,942 | 17,85 | 0,000 |
| Sıcaklık | 2 | 474,94 | 237,470 | 37,87 | 0,000 |
| Hız | 2 | 29,19 | 14,594 | 2,33 | 0,117 |
| Zaman | 2 | 167,52 | 83,760 | 13,36 | 0,000 |
| 2-Way Interactions | 12 | 290,91 | 24,242 | 3,87 | 0,002 |
| Sıcaklık*Hız | 4 | 106,05 | 26,512 | 4,23 | 0,009 |
| Sıcaklık*Zaman | 4 | 75,11 | 18,776 | 2,99 | 0,036 |
| Hız*Zaman | 4 | 109,75 | 27,439 | 4,38 | 0,007 |
| 3-Way Interactions | 8 | 89,99 | 11,248 | 1,79 | 0,122 |
| Sıcaklık*Hız*Zaman | 8 | 89,99 | 11,248 | 1,79 | 0,122 |
| Error | 27 | 169,32 | 6,271 | | |
| Total | 53 | 1221,86 | | | |

Faktöriyel deney tasarımının analizi sonucunda Çizelge 9.2'de belirtilen varyans analizi sonuçları elde edilmiştir. Sertlik değerini etkileyen faktörler P değerine göre değerlendirilirken %5 anlamlılık ($\alpha$ 0,05) seviyesi dikkate alınmıştır. P değeri anlamlılık seviyesinin altında bulunan faktörler ve ikili etkileşimlerin istatistiki açıdan sertlik değerini etkilediği sonucuna varılmıştır. P değerlerine göre sıcaklık, zaman, hız*zaman, sıcaklık*hız, sıcaklık*zaman faktörlerinin malzemenin sertliğini etkilediği görülmektedir. Çizelge 9.3'te parametrelerin sertlik değerleri üzerinde % katkı oranları yer almaktadır.

Çizelge 9.3. Sertlik testi için faktörlerin etki oranları

| Faktörler ve Etkileşimleri | % Katkı Oranları |
|---|---|
| Sıcaklık | %38,87 |
| Hız | %2,37 |
| Zaman | %13,71 |
| Sıcaklık*Hız | %8,67 |
| Sıcaklık*Zaman | %6,14 |
| Hız*Zaman | %8,98 |
| Sıcaklık*Hız*Zaman | %7,36 |
| Hata | %13,9 |

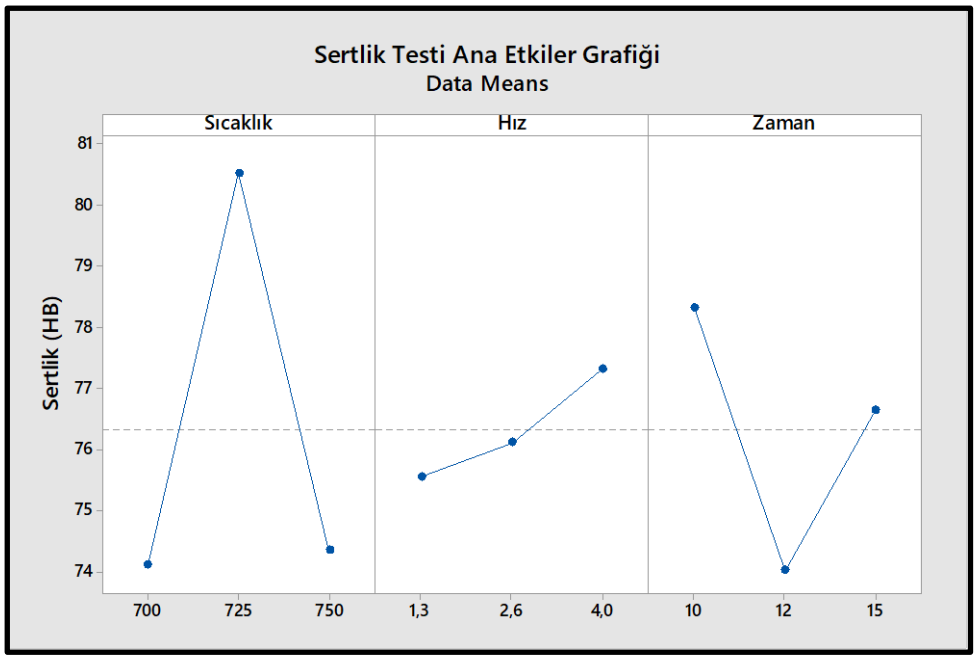



Şekil 9.1. Sertlik için Pareto Grafiği

Standartlaştırılmış etkiler, etkinin sıfır olduğu 0 hipotezini test eden t istatistikleridir. Sıfır hipotez, istatistikte kullanılan ve veri üretme sürecinin belirli özellikleri arasında fark olmadığını öne süren bir varsayımdır (Korkmaz ve diğ., 2021).

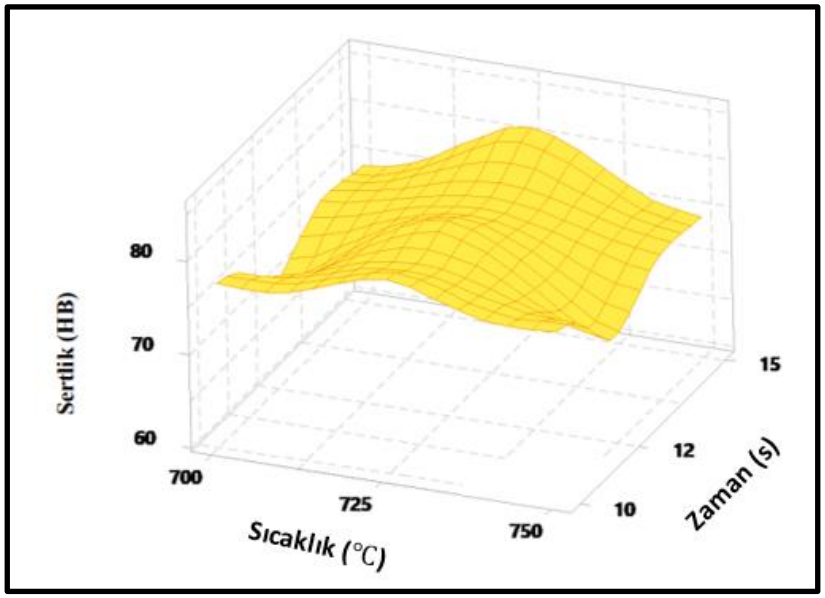
Pareto grafiğinde de eşik değerini geçen faktörler ve etkileşimlerin yanıt değişkenini etkilediği Şekil 9.1'de gösterilmektedir. Faktörlerin serbestlik derecesi belirlendikten sonra eşik değerinin belirlenmesi için t tablosuna bakılmaktadır. Pareto grafiğine göre yanıt değişkenini etkileyen en önemli faktörün sıcaklık olduğu görülmektedir.
Deney tasarım modeline göre R-sq değerinin %86,14, R-sq(adj) değerinin ise %72,80 olduğu görülmüştür. Ortaya çıkan R-sq değerinin yüksek olması elde edilen verilerin deney tasarım modelini açıkladığını göstermektedir.

Sertlik değerine etkisi olan faktörlerin belirlenmesi için Şekil 9.2'de gösterilen ana etkiler grafiği istatiksel analiz programında elde edilmiştir. Grafiğe göre ergimiş metal sıcaklığı 725℃, enjeksiyon hızı 4 m/s, kalıp açılma zamanı 10 s olduğunda en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir.




Şekil 9.2. Sertlik deneyi ana etkiler grafiği

Çizelge 9.3'te ANOVA sonuçlarına göre hesaplanan katkı oranlarına göre sertlik değerini en çok etkileyen iki faktörün ergimiş metal sıcaklığı ve kalıp açılma zamanı olduğu görülmektedir. Bu iki faktörün sertlik üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması için Şekil 9.3'te yer alan üç boyutlu grafik çizilmiştir. Grafiğe göre en iyi sertlik değerleri ergimiş metal sıcaklığı 725℃ ve kalıp açılma zamanı 10 s olduğu durumda elde edilmektedir.




Şekil 9.3. Sertlik değeri üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü

### 9.1.2. Çekme deneyi için İstatiksel Analiz

27 farklı enjeksiyon parametresine göre üretilen deney numunelerinden ikişer adet çekme numunesi çıkarılmıştır. Çekme testleri incelendiğinde parçalarda kayda değer bir uzama olmadığı ve çekme numunelerinin, enjeksiyon prosesinden kaynaklı hava boşluklarının olduğu bölgelerden koptuğu gözlemlenmiştir. Şekil 9.4'te çekme testi yapılan bir deney numunesi yer almaktadır.



Şekil 9.4. Örnek çekme testi numunesi

Çekme testi sonucunda malzemelerin kopma mukavemeti değerleri Çizelge 9.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 9.4. Enjeksiyon parametrelerine göre numunelerin kopma mukavemeti

| Numune | Sıcaklık (℃) | Hız (m/s) | Zaman(s) | Kopma Mukavemeti (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 700 | 4 | 10 | 224 |
| 2 | 700 | 4 | 12 | 186 |
| 3 | 700 | 4 | 15 | 232 |
| 4 | 700 | 2,6 | 10 | 192 |
| 5 | 700 | 2,6 | 12 | 209 |
| 6 | 700 | 2,6 | 15 | 247 |
| 7 | 700 | 1,3 | 10 | 233 |
| 8 | 700 | 1,3 | 12 | 197 |
| 9 | 700 | 1,3 | 15 | 188 |
| 10 | 725 | 4 | 10 | 219 |
| 11 | 725 | 4 | 12 | 264 |
| 12 | 725 | 4 | 15 | 245 |
| 13 | 725 | 2,6 | 10 | 251 |

Çizelge 9.4. (Devam) Enjeksiyon parametrelerine göre numunelerin kopma mukavemeti

| Numune | Sıcaklık (℃) | Hız (m/s) | Zaman(s) | Kopma Mukavemeti (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 14 | 725 | 2,6 | 12 | 248 |
| 15 | 725 | 2,6 | 15 | 235 |
| 16 | 725 | 1,3 | 10 | 233 |
| 17 | 725 | 1,3 | 12 | 223 |
| 18 | 725 | 1,3 | 15 | 258 |
| 19 | 750 | 4 | 10 | 199 |
| 20 | 750 | 4 | 12 | 203 |
| 21 | 750 | 4 | 15 | 219 |
| 22 | 750 | 2,6 | 10 | 228 |
| 23 | 750 | 2,6 | 12 | 227 |
| 24 | 750 | 2,6 | 15 | 231 |
| 25 | 750 | 1,3 | 10 | 242 |
| 26 | 750 | 1,3 | 12 | 180 |
| 27 | 750 | 1,3 | 15 | 256 |
| 28 | 700 | 4 | 10 | 237 |
| 29 | 700 | 4 | 12 | 185 |
| 30 | 700 | 4 | 15 | 222 |
| 31 | 700 | 2,6 | 10 | 195 |
| 32 | 700 | 2,6 | 12 | 219 |
| 33 | 700 | 2,6 | 15 | 245 |
| 34 | 700 | 1,3 | 10 | 223 |
| 35 | 700 | 1,3 | 12 | 209 |
| 36 | 700 | 1,3 | 15 | 177 |
| 37 | 725 | 4 | 10 | 232 |
| 38 | 725 | 4 | 12 | 252 |
| 39 | 725 | 4 | 15 | 254 |
| 40 | 725 | 2,6 | 10 | 245 |
| 41 | 725 | 2,6 | 12 | 260 |
| 42 | 725 | 2,6 | 15 | 232 |
| 43 | 725 | 1,3 | 10 | 242 |
| 44 | 725 | 1,3 | 12 | 242 |
| 45 | 725 | 1,3 | 15 | 250 |
| 46 | 750 | 4 | 10 | 210 |
| 47 | 750 | 4 | 12 | 221 |
| 48 | 750 | 4 | 15 | 223 |
| 49 | 750 | 2,6 | 10 | 230 |
| 50 | 750 | 2,6 | 12 | 230 |

Çizelge 9.4. (Devam) Enjeksiyon parametrelerine göre numunelerin kopma mukavemeti

| Numune | Sıcaklık (℃) | Hız (m/s) | Zaman(s) | Kopma Mukavemeti (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 51 | 750 | 2,6 | 15 | 230 |
| 52 | 750 | 1,3 | 10 | 239 |
| 53 | 750 | 1,3 | 12 | 202 |
| 54 | 750 | 1,3 | 15 | 255 |

Çizelge 9.4'te elde edilen değerler Minitab paket programı kullanılarak tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda Çizelge 9.5'te gösterilen varyans analizi sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 9.5. Kopma mukavemeti için varyans analizi

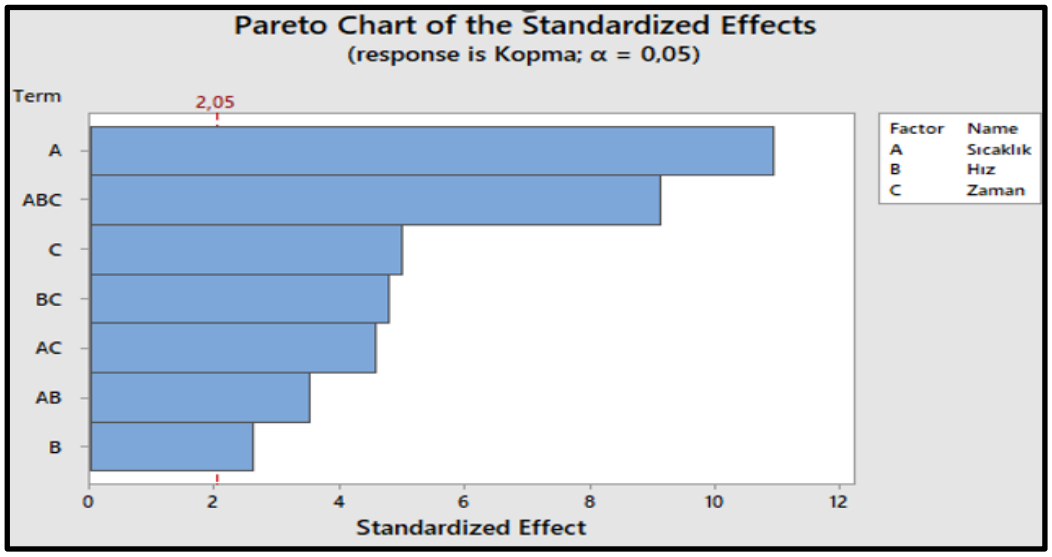
| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Model | 26 | 25128,5 | 966,48 | 18,60 | 0,000 |
| Linear | 6 | 11229,0 | 1871,50 | 36,02 | 0,000 |
| Sıcaklık | 2 | 9089,8 | 4544,91 | 87,46 | 0,000 |
| Hız | 2 | 511,8 | 255,91 | 4,92 | 0,015 |
| Zaman | 2 | 1627,4 | 813,69 | 15,66 | 0,000 |
| 2-Way Interactions | 12 | 5101,4 | 425,12 | 8,18 | 0,000 |
| Sıcaklık*Hız | 4 | 1221,9 | 305,46 | 5,88 | 0,002 |
| Sıcaklık*Zaman | 4 | 1866,3 | 466,57 | 8,98 | 0,000 |
| Hız*Zaman | 4 | 2013,3 | 503,32 | 9,69 | 0,000 |
| 3-Way Interactions | 8 | 8798,0 | 1099,75 | 21,16 | 0,000 |
| Sıcaklık*Hız*Zaman | 8 | 8798,0 | 1099,75 | 21,16 | 0,000 |
| Error | 27 | 1403,0 | 51,96 | | |
| Total | 53 | 26531,5 | | | |

Kopma mukavemeti değerini etkileyen faktörler P değerine göre değerlendirilirken %5 anlamlılık ($\alpha$ 0,05) seviyesi dikkate alınmıştır. P değeri anlamlılık seviyesinin altında bulunan faktörler ve etkileşimlerin istatistiki açıdan kopma mukavemeti değerini etkilediği sonucuna varılmıştır. P değerlerine göre tüm faktörlerin ve etkileşimlerin malzemenin kopma mukavemetini etkilediği görülmektedir. Çizelge 9.6'da parametrelerin kopma mukavemeti değerleri üzerindeki % katkı oranları yer almaktadır.

Çizelge 9.6. Kopma mukavemeti için faktörlerin etki oranları

| Faktörler ve Etkileşimleri | % Katkı Oranları |
|---|---|
| Sıcaklık | %34,26 |
| Hız | %1,92 |
| Zaman | %6,13 |
| Sıcaklık*Hız | %4,60 |
| Sıcaklık*Zaman | %7,03 |
| Hız*Zaman | %7,58 |
| Sıcaklık*Hız*Zaman | %33,16 |
| Hata | %5,32 |

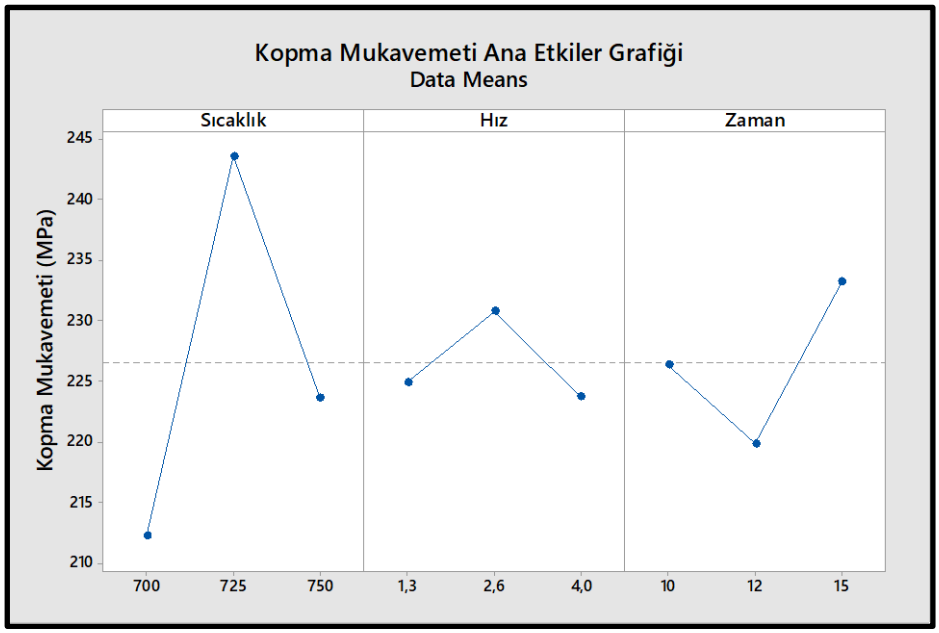
Kopma mukavemeti F değerine göre değerlendirildiğinde etki olarak büyükten küçüğe sıcaklık, zaman ve hız olarak görülmüştür. Şekil 9.5'te gösterilen Pareto grafiğine göre sıcaklık faktörünün kopma mukavemetini en çok etkileyen parametre olduğu görülmektedir. Pareto grafiğinde eşik değerini geçen faktörler ve etkileşimlerin yanıt değişkenini etkilediği Şekil 9.5'te gösterilmektedir. Faktörlerin serbestlik derecesi belirlendikten sonra eşik değerinin belirlenmesi için t tablosuna bakılmaktadır.




Şekil 9.5. Kopma mukavemeti için pareto analizi

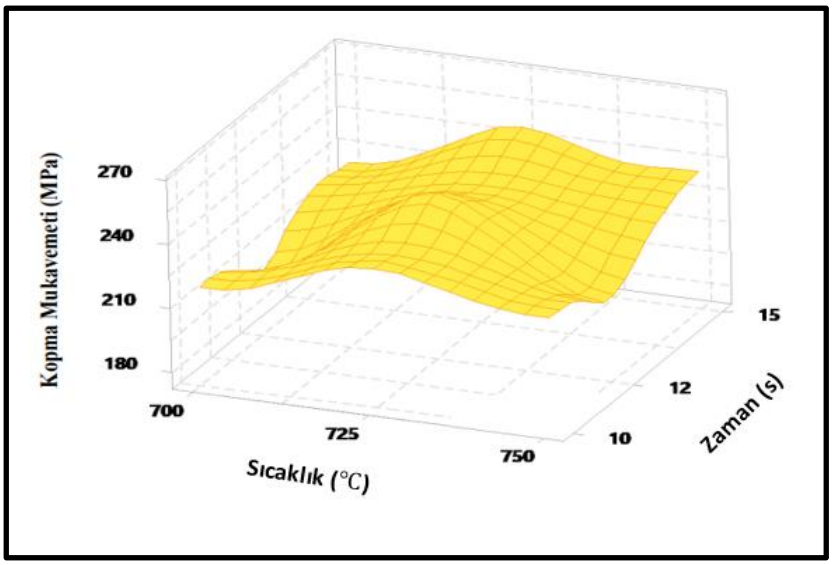
Deney tasarım modeline göre R-sq değerinin %94,71, R-sq(adj) değerinin ise %89,62 olduğu görülmüştür. Ortaya çıkan R-sq değerinin yüksek olması elde edilen verilerin çekme deneyi tasarım modelini açıkladığını görülmektedir.

Kopma mukavemeti değerine etkisi olan faktörlerin belirlenmesi için Şekil 9.6'da gösterilen ana etkiler grafiği istatiksel analiz programında elde edilmiştir. Grafiğe göre ergimiş metal sıcaklığı 725℃, enjeksiyon hızı 2,6 m/s, kalıp açılma zamanı 15 s olduğunda en yüksek kopma mukavemeti değerleri elde edilmiştir.




Şekil 9.6. Çekme deneyi ana etkiler grafiği

Çizelge 9.6'da ANOVA sonuçlarına göre hesaplanan katkı oranlarına göre kopma mukavemet değerlerini en çok etkileyen iki faktör ergimiş metal sıcaklığı ve kalıp açılma zamanı'dır. Bu iki faktörün sertlik üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması için Şekil 9.7'de yer alan üç boyutlu grafik çizilmiştir. Grafiğe göre en iyi mukavemet değerleri ergimiş metal sıcaklığı 725℃ ve kalıp açılma zamanı 15 s olduğu durumda elde edilmektedir.

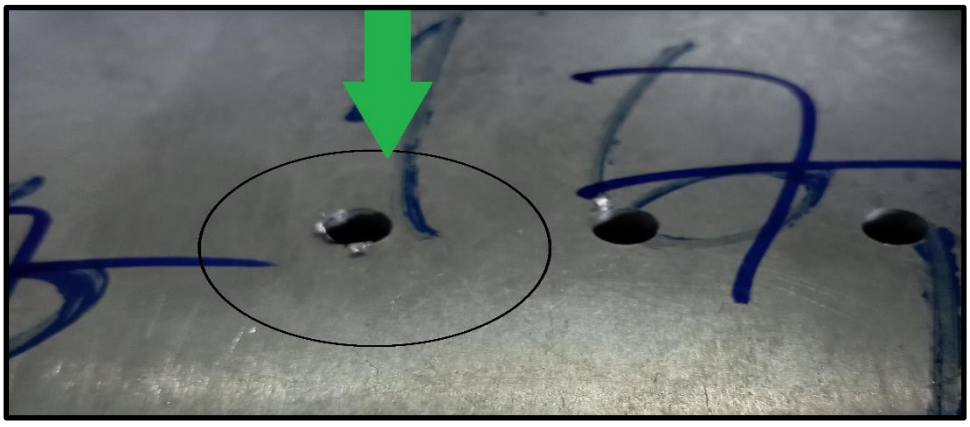



Şekil 9.7. Kopma mukavemeti üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü

## 9.2. Delik Delme Deneyleri Analiz

Çizelge 8.8'de belirlenen parametrelere göre 27 adet delik iki tekrarlı olacak şekilde CNC dik işlem merkezinde delinmiştir.

Delik delme işlemi yapılırken matkabın ucunun parça içerisinden tam olarak çıkması yani deliği tam olarak patlatması dikkate alınarak deneyler yapılmıştır. Şekil 9.8'de örnek bir deliğin arka yüzeyden patlatılmış fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 9.8. Deliklerin arka taraftan patlatılmış görüntüsü

### 9.2.1. Kesme kuvvetleri ve moment ölçüm sonuçları için istatiksel analiz

Delik delme işlemi sırasında kesici takım(matkap) üzerinde etkili olan kuvvet ($F_z$) ve moment ($M_z$) değerleri kistler dinamometresi ile kayıt altına alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Taguchi L27 deney tasarımı yapılarak Minitab 18 paket programında analiz edilmiştir. Bu çalışmada amaç en küçük kesme kuvvetleri ve boyutsal ölçülerden en az sapma olduğu için, Taguchi yöntemiyle değerlendirme yapılırken ölçülen değerlerin "*en küçük en iyidir*" prensibi kullanılmıştır. Elde edilen veriler için sinyal/gürültü (S/N) oranları incelenerek analiz yapılmaktadır. Yapılan deney tasarımına göre toplam 27 farklı parametreye göre iki tekrarlı olarak şekilde 54 adet delik delinmiştir. Tekrarlı yapılan deneylerde kuvvet değerleri birbirine yakın olduğu için ortalama alınarak değerler tabloya aktarılmıştır. Çizelge 9.7'de deney sonucunda elde edilen kesme kuvvet değerleri yer almaktadır.

Çizelge 9.7. Kesme kuvvetleri ölçüm sonuçları

| Numune | Sıcaklık(℃) | Hız(m/s) | Zaman (s) | Kesme Hızı (m/dk) | İlerleme (mm/dev) | $F_z$(N) | $M_z$(N.cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 700 | 1,3 | 10 | 40 | 0,1 | 229 | 37 |
| 2 | 700 | 1,3 | 10 | 40 | 0,15 | 325 | 58 |
| 3 | 700 | 1,3 | 10 | 40 | 0,22 | 463,5 | 81,5 |
| 4 | 700 | 2,6 | 12 | 60 | 0,1 | 233 | 43,5 |
| 5 | 700 | 2,6 | 12 | 60 | 0,15 | 301,5 | 53 |
| 6 | 700 | 2,6 | 12 | 60 | 0,22 | 426 | 80 |
| 7 | 700 | 4 | 15 | 90 | 0,1 | 244 | 42,5 |
| 8 | 700 | 4 | 15 | 90 | 0,15 | 324,5 | 63,5 |
| 9 | 700 | 4 | 15 | 90 | 0,22 | 535 | 75 |
| 10 | 725 | 1,3 | 12 | 90 | 0,1 | 246,5 | 45 |
| 11 | 725 | 1,3 | 12 | 90 | 0,15 | 331 | 57,5 |
| 12 | 725 | 1,3 | 12 | 90 | 0,22 | 550 | 96,5 |
| 13 | 725 | 2,6 | 15 | 40 | 0,1 | 222,5 | 41 |
| 14 | 725 | 2,6 | 15 | 40 | 0,15 | 318,5 | 63,5 |
| 15 | 725 | 2,6 | 15 | 40 | 0,22 | 476,5 | 77,5 |
| 16 | 725 | 4 | 10 | 60 | 0,1 | 238,5 | 51,5 |
| 17 | 725 | 4 | 10 | 60 | 0,15 | 316 | 55,5 |
| 18 | 725 | 4 | 10 | 60 | 0,22 | 462,5 | 87,5 |
| 19 | 750 | 1,3 | 15 | 60 | 0,1 | 219 | 43 |
| 20 | 750 | 1,3 | 15 | 60 | 0,15 | 325 | 58,5 |
| 21 | 750 | 1,3 | 15 | 60 | 0,22 | 461,5 | 87,5 |
| 22 | 750 | 2,6 | 10 | 90 | 0,1 | 258,5 | 46 |
| 23 | 750 | 2,6 | 10 | 90 | 0,15 | 387,5 | 70,5 |
| 24 | 750 | 2,6 | 10 | 90 | 0,22 | 503,5 | 77,5 |
| 25 | 750 | 4 | 12 | 40 | 0,1 | 197,5 | 43 |

Çizelge 9.7. (Devam) Kesme kuvvetleri ölçüm sonuçları

| Numune | Sıcaklık(℃) | Hız(m/s) | Zaman (s) | Kesme Hızı (m/dk) | İlerleme (mm/dev) | $F_z$(N) | $M_z$(N.cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 26 | 750 | 4 | 12 | 40 | 0,15 | 286 | 58,5 |
| 27 | 750 | 4 | 12 | 40 | 0,22 | 363,5 | 79 |

Çizelge 9.7'de elde edilen değerler Minitab 18 programı içerisinde Taguchi ve ANOVA yöntemleriyle analiz edilmiştir. S/N oranlarına göre $F_z$ ve $M_z$ için elde edilen delta (maksimum-minimum) ve sıralama sonuçları Çizelge 9.8 ve 9.9'da gösterilmektedir.

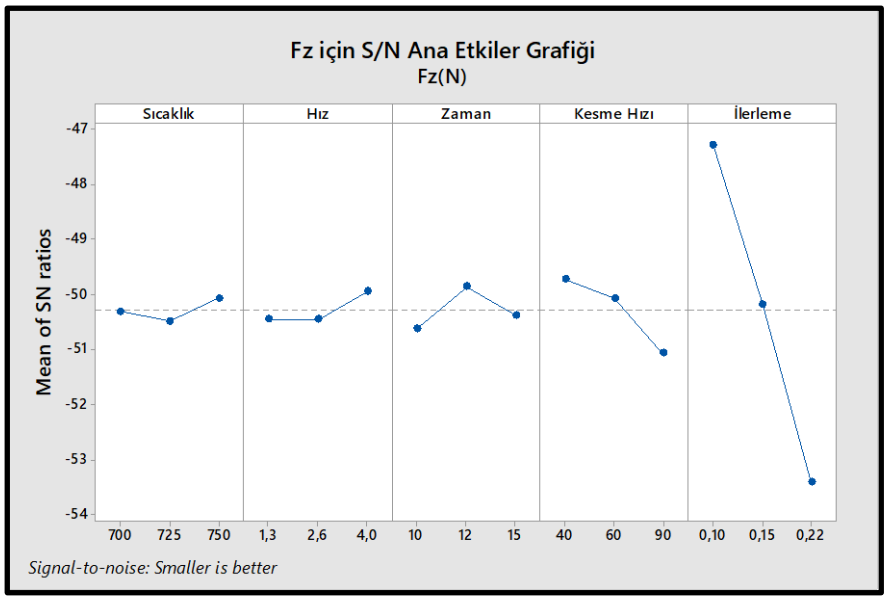
Çizelge 9.8. $F_z$ değeri için S/N oranları

| Level | Sıcaklık | Hız | Zaman | Kesme Hızı | İlerleme |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -50,31 | -50,46 | -50,63 | -49,73 | -47,29 |
| 2 | -50,50 | -50,46 | -49,87 | -50,08 | -50,18 |
| 3 | -50,07 | -49,96 | -50,38 | -51,07 | -53,41 |
| Delta | 0,42 | 0,50 | 0,76 | 1,34 | 6,12 |
| Rank | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |

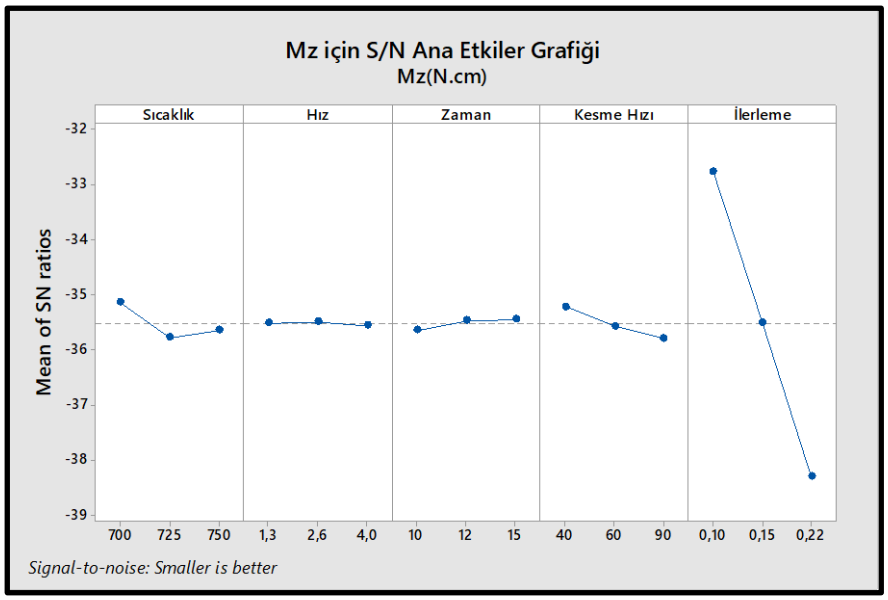
Çizelge 9.9. $M_z$ değeri için S/N oranları

| Level | Sıcaklık | Hız | Zaman | Kesme Hızı | İlerleme |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -35,14 | -35,52 | -35,65 | -35,21 | -32,76 |
| 2 | -35,78 | -35,49 | -35,47 | -35,57 | -35,51 |
| 3 | -35,65 | -35,56 | -35,45 | -35,79 | -38,30 |
| Delta | 0,63 | 0,07 | 0,19 | 0,57 | 5,54 |
| Rank | 2 | 5 | 4 | 3 | 1 |

$F_z$ ve $M_z$ sonuçlarına göre S/N oranı ana etkiler grafikleri sırasıyla Şekil 9.9 ve şekil 9.10'da da gösterilmektedir.




Şekil 9.9. $F_z$ S/N ana etkiler grafiği




Şekil 9.10. $M_z$ S/N ana etkiler grafiği

En küçük en iyidir yaklaşımına göre yapılan kesme kuvvetleri analizlere göre S/N oranları incelenerek Çizelge 9.8, Çizelge 9.9, Şekil 9.9 ve Şekil 9.10'da görüldüğü gibi ilerleme oranı faktörünün $F_z$ ve $M_z$ kuvvetlerini en çok etkileyen parametre olarak görülmektedir.

$F_z$ ve $M_z$ değerleri üzerinde deney girdilerin ne kadar etkili olduğunun anlaşılabilmesi için varyans analizi (ANOVA) yöntemiyle istatiksel analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda $F_z$ için Çizelge 9.10'da görülen sonuçlar, $M_z$ için ise Çizelge 9.11'de görülen sonuçlar

bulunmuştur. Çizelge 9.12'de ise ANOVA sonuçlarına göre hesaplanan kareler toplamı değerlerinin $F_z$ ve $M_z$ üzerindeki % katkıları verilmiştir.

Çizelge 9.10. $F_z$ değerleri için varyans analizi

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Sıcaklık | 2 | 1422 | 711 | 1,03 | 0,380 |
| Hız | 2 | 2208 | 1104 | 1,60 | 0,233 |
| Zaman | 2 | 3777 | 1889 | 2,73 | 0,095 |
| Kesme Hızı | 2 | 15434 | 7717 | 11,16 | 0,001 |
| İlerleme | 2 | 262281 | 131141 | 189,59 | 0,000 |
| Error | 16 | 11068 | 692 | | |
| Total | 26 | 296190 | | | |

Çizelge 9.11. $M_z$ değerleri için varyans analizi

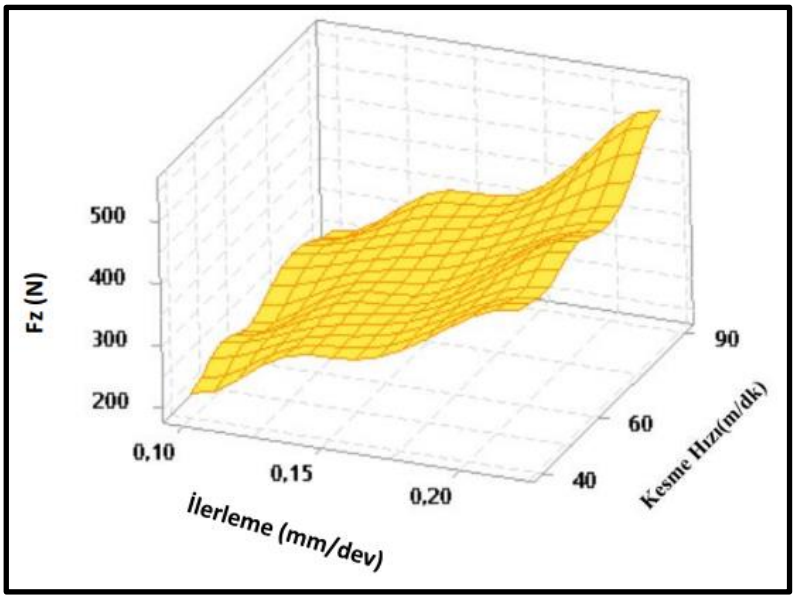
| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Sıcaklık | 2 | 101,35 | 50,68 | 1,55 | 0,243 |
| Hız | 2 | 8,46 | 4,23 | 0,13 | 0,880 |
| Zaman | 2 | 9,85 | 4,93 | 0,15 | 0,862 |
| Kesme Hızı | 2 | 68,96 | 34,48 | 1,05 | 0,372 |
| İlerleme | 2 | 6847,35 | 3423,68 | 104,54 | 0,000 |
| Error | 16 | 523,98 | 32,75 | | |
| Total | 26 | 7559,96 | | | |

Varyans analizi sonuçları incelendiğinde hem $F_z$ hem de $M_z$ değerlerini en çok etkileyen girdi parametresinin %88,55 ve %90,57 ile ilerleme oranı faktörü olduğu sonucuna varılmıştır (Bkz. Çizelge 9.12). $F_z$ ve $M_z$ değerlerini etkileyen faktörler P değerine göre değerlendirilirken %5 anlamlılık ($\alpha$ 0,05) seviyesi dikkate alınmıştır. P değeri anlamlılık seviyesinin altında bulunan faktörlerin istatistiki açıdan çıktı değerlerini etkilediği sonucuna varılmıştır. $F_z$ ve $M_z$ değerleri için R-sq değerleri sırasıyla %96,26 ve %93,07 olarak bulunmuş ve bu değerlerin yüksek çıkması da elde edilen verilerin deney tasarım modelini açıkladığını göstermektedir.

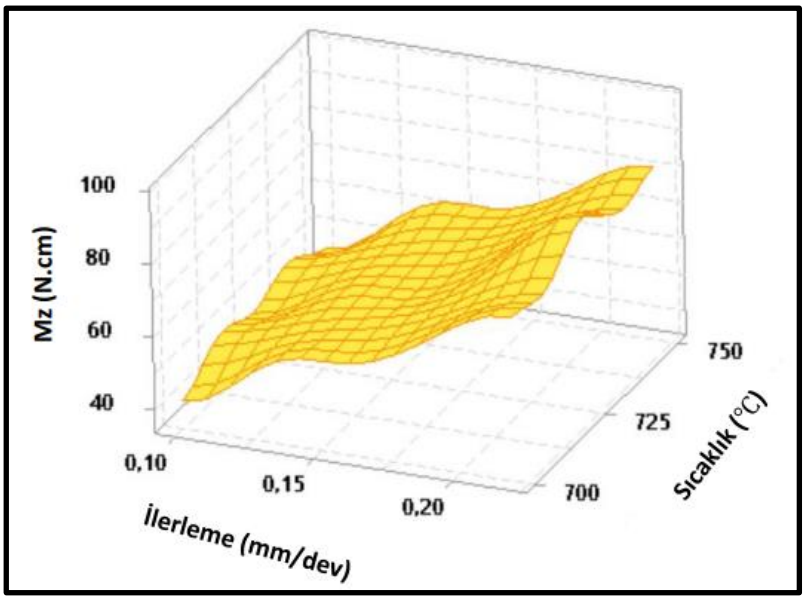
Çizelge 9.12. Kesme kuvvetleri için faktörlerin etki oranları

| Faktörler | $F_z$ | $M_z$ |
|---|---|---|
| Sıcaklık | % 0,5 | %1,34 |
| Hız | % 0,75 | % 0,1 |
| Zaman | %1,27 | % 0,13 |
| Kesme Hızı | % 5,21 | % 0,91 |
| İlerleme Miktarı | % 88,55 | % 90,57 |
| Hata | % 3,72 | % 6,95 |

Çizelge 9.12'de $F_z$ değerlerini en çok etkileyen iki faktör ilerleme miktarı ve kesme hızı, $M_z$ değerlerini en çok etkileyen iki faktör ise ilerleme miktarı ve ergimiş metal sıcaklığıdır. Bu faktörlerin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması için Şekil 9.11 ve Şekil 9.12'de yer alan üç boyutlu grafikler çizilmiştir. Grafiklere göre en iyi (en düşük) $F_z$ değerleri ilerleme oranı 0,1 mm/dev, kesme hızı 40 m/dk olduğunda, en iyi (en düşük) $M_z$ değerleri ise ilerleme oranı 0,1 mm/dev, ergimiş metal sıcaklığı 700 ℃ olduğunda görülmektedir.



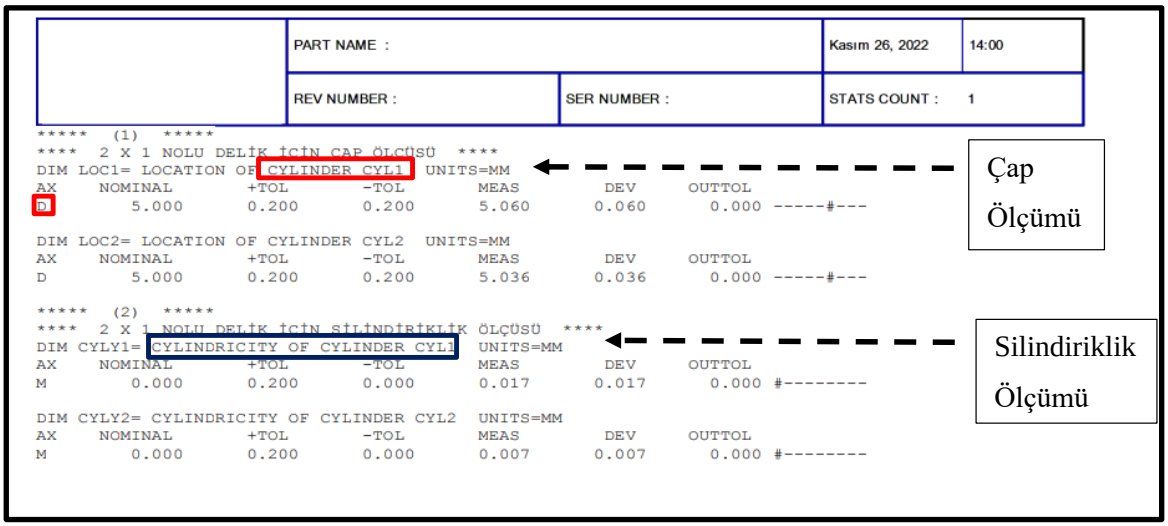

Şekil 9.11. $F_z$ değeri üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü




Şekil 9.12. $M_z$ değeri üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü

### 9.2.2. Delik çapları ve silindiriklik ölçüm sonuçları için istatiksel analiz

Delik delme işlemlerinden sonra, Hexagon marka CMM ile her delikten toplam 12 noktadan ve 2 mm uzunluğunda silindirler ölçülmüştür. Şekil 9.13'teki CMM ölçüm raporu örneğinde görüldüğü gibi tüm deliklerin çap ve silindiriklik değerleri ölçülmüş ve raporlanmıştır.




Şekil 9.13. Deliklerin CMM ile çap ve silindiriklik ölçümü

CMM ölçümü sonrasında Çizelge 9.13'te yer alan çaptan sapma ve silindiriklik değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 9.13. Deliklerin çaptan sapma ve silindiriklik ölçüm sonuçları

| Numune | Sıcaklık (℃) | Hız (m/s) | Zaman (s) | Kesme Hızı (m/dk) | İlerleme (mm/dev) | Çaptan Sapma Miktarı (mm) | Silindirikli k(mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 700 | 1,3 | 10 | 40 | 0,1 | 0,048 | 0,012 |
| 2 | 700 | 1,3 | 10 | 40 | 0,15 | 0,034 | 0,023 |
| 3 | 700 | 1,3 | 10 | 40 | 0,22 | 0,022 | 0,027 |
| 4 | 700 | 2,6 | 12 | 60 | 0,1 | 0,025 | 0,020 |
| 5 | 700 | 2,6 | 12 | 60 | 0,15 | 0,034 | 0,022 |
| 6 | 700 | 2,6 | 12 | 60 | 0,22 | 0,022 | 0,023 |
| 7 | 700 | 4 | 15 | 90 | 0,1 | 0,017 | 0,008 |
| 8 | 700 | 4 | 15 | 90 | 0,15 | 0,020 | 0,011 |
| 9 | 700 | 4 | 15 | 90 | 0,22 | 0,018 | 0,012 |
| 10 | 725 | 1,3 | 12 | 90 | 0,1 | 0,019 | 0,015 |
| 11 | 725 | 1,3 | 12 | 90 | 0,15 | 0,023 | 0,005 |
| 12 | 725 | 1,3 | 12 | 90 | 0,22 | 0,011 | 0,009 |
| 13 | 725 | 2,6 | 15 | 40 | 0,1 | 0,043 | 0,015 |
| 14 | 725 | 2,6 | 15 | 40 | 0,15 | 0,046 | 0,025 |
| 15 | 725 | 2,6 | 15 | 40 | 0,22 | 0,038 | 0,027 |
| 16 | 725 | 4 | 10 | 60 | 0,1 | 0,034 | 0,024 |
| 17 | 725 | 4 | 10 | 60 | 0,15 | 0,029 | 0,030 |
| 18 | 725 | 4 | 10 | 60 | 0,22 | 0,024 | 0,016 |
| 19 | 750 | 1,3 | 15 | 60 | 0,1 | 0,036 | 0,010 |
| 20 | 750 | 1,3 | 15 | 60 | 0,15 | 0,034 | 0,016 |
| 21 | 750 | 1,3 | 15 | 60 | 0,22 | 0,038 | 0,022 |
| 22 | 750 | 2,6 | 10 | 90 | 0,1 | 0,007 | 0,005 |
| 23 | 750 | 2,6 | 10 | 90 | 0,15 | 0,010 | 0,009 |
| 24 | 750 | 2,6 | 10 | 90 | 0,22 | 0,014 | 0,010 |
| 25 | 750 | 4 | 12 | 40 | 0,1 | 0,033 | 0,028 |
| 26 | 750 | 4 | 12 | 40 | 0,15 | 0,034 | 0,027 |
| 27 | 750 | 4 | 12 | 40 | 0,22 | 0,030 | 0,020 |

Taguchi L27 deney tasarımına göre her delik iki defa delinmiş ve ölçümler de iki defa yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirine yakın olduğu için Minitab 18 paket programında istatiksel analiz yapılırken çaptan sapma ve silindiriklik değerlerinin ortalaması alınarak hesaplama yapılmıştır. Bu çalışmada amaç çap değerinden en az sapma ve en düşük silindiriklik değerlerini elde etmek olduğu için, Taguchi yöntemiyle sinyal/gürültü (S/N) oranına göre değerlendirme yapılırken ölçülen değerlerin en küçük en iyidir prensibi kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre en iyi (en düşük) çaptan sapma değeri 0,007 mm ile 22 numaralı delikte, en iyi (en düşük) silindiriklik değeri ise 0,005 mm ile 11 ve 22 numaralı deliklerde elde edilmiştir. En kötü çaptan sapma ve silindiriklik değerleri ise sırasıyla 0,048 mm ve 0,030 mm olarak 1 ve 17 numaralı deliklerde görülmüştür (Bkz. Çizelge 9.13).

Çizelge 9.13'te elde edilen değerler Minitab 18 programı içerisinde Taguchi ve ANOVA yöntemleriyle analiz edilmiştir. S/N oranlarına göre çaptan sapma ve silindiriklik karakteristikleri için elde edilen delta (maksimum-minimum) ve sıralama sonuçları Çizelge 9.14 ve Çizelge 9.15'te gösterilmektedir.

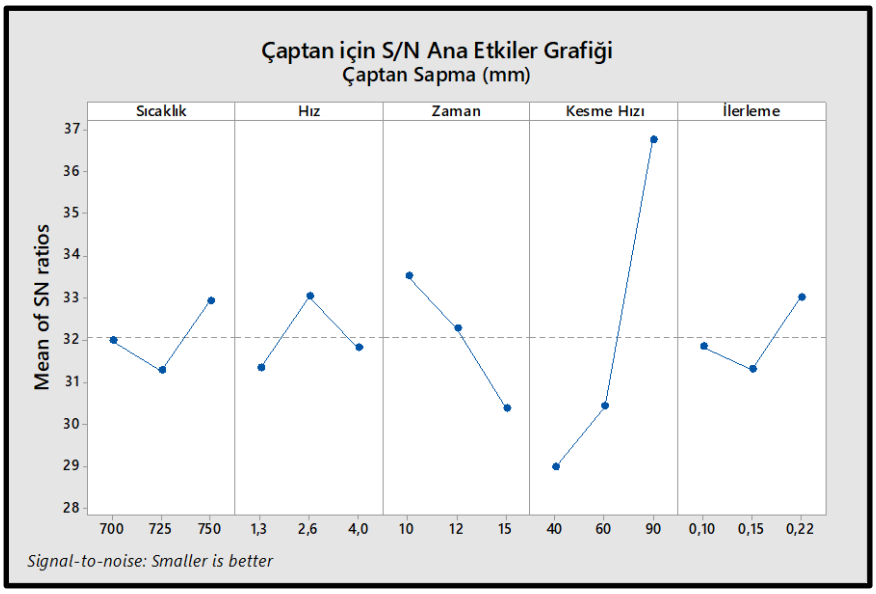
Çizelge 9.14. Çaptan sapma için S/N oranları

| Level | Sıcaklık | Hız | Zaman | Kesme Hızı | İlerleme |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 31,97 | 31,32 | 33,51 | 28,98 | 31,84 |
| 2 | 31,26 | 33,02 | 32,26 | 30,41 | 31,30 |
| 3 | 32,92 | 31,80 | 30,38 | 36,76 | 33,01 |
| Delta | 1,66 | 1,70 | 3,13 | 7,77 | 1,71 |
| Rank | 5 | 4 | 2 | 1 | 3 |

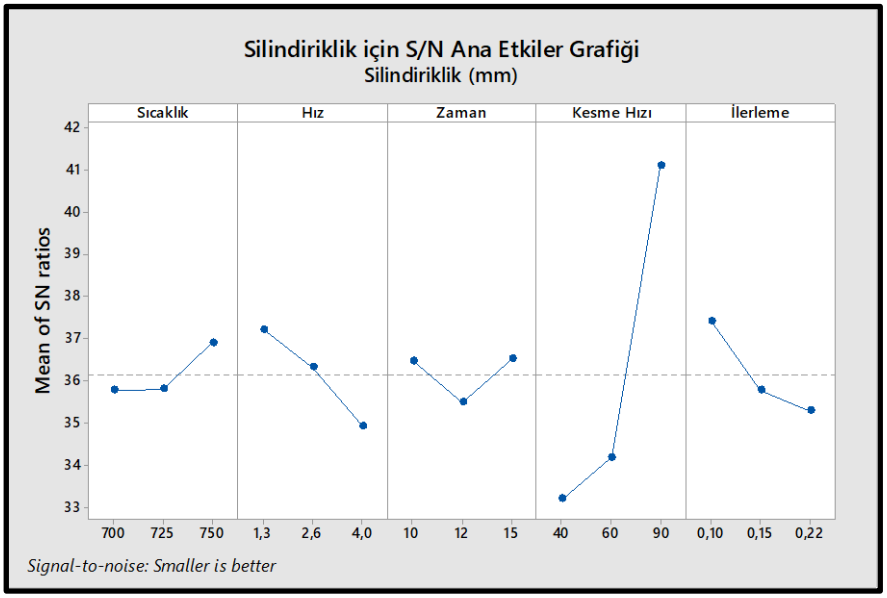
Çizelge 9.15. Silindiriklik için S/N oranları

| Level | Sıcaklık | Hız | Zaman | Kesme Hızı | İlerleme |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 35,78 | 37,23 | 36,47 | 33,20 | 37,42 |
| 2 | 35,81 | 36,32 | 35,50 | 34,19 | 35,78 |
| 3 | 36,91 | 34,94 | 36,52 | 41,10 | 35,30 |
| Delta | 1,14 | 2,28 | 1,02 | 7,90 | 2,12 |
| Rank | 4 | 2 | 5 | 1 | 3 |

Çaptan sapma ve silindiriklik için S/N oranları için ana etkiler grafiği Şekil 9.14 ve 9.15'te yer almaktadır.




Şekil 9.14. Çaptan sapma S/N ana etkiler grafiği




Şekil 9.15. Silindiriklik S/N ana etkiler grafiği

En küçük en iyidir yaklaşımına göre çap ve silindiriklik ölçümlerinin S/N oranları incelendiğinde Çizelge 9.14, Çizelge 9.15, Şekil 9.14 ve Şekil 9.15'te görüldüğü gibi kesme hızı faktörünün çaptan sapma ve silindiriklik değerlerini en çok etkileyen parametre olarak görülmektedir.

Çap ve silindiriklik değerleri üzerinde deney girdilerin ne kadar etkili olduğunun anlaşılabilmesi için varyans analizi (ANOVA) yöntemiyle istatiksel analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda Çizelge 9.16 ve Çizelge 9.17'te görülen sonuçlar bulunmuştur.

Çizelge 9.18'de ise kareler toplamı değerlerine göre faktörlerin silindiriklik ve çaptan sapma üzerindeki % katkıları verilmiştir.

Çizelge 9.16. Çaptan sapma değerleri için varyans analizi

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Sıcaklık | 2 | 0,000063 | 0,000032 | 1,09 | 0,359 |
| Hız | 2 | 0,000050 | 0,000025 | 0,87 | 0,440 |
| Zaman | 2 | 0,000303 | 0,000152 | 5,24 | 0,018 |
| Kesme Hızı | 2 | 0,002118 | 0,001059 | 36,60 | 0,000 |
| İlerleme | 2 | 0,000157 | 0,000078 | 2,71 | 0,097 |
| Hata | 16 | 0,000463 | 0,000029 | | |
| Total | 26 | 0,003155 | | | |

Çizelge 9.17. Silindiriklik değerleri için varyans analizi

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Sıcaklık | 2 | 0,000018 | 0,000009 | 0,35 | 0,710 |
| Hız | 2 | 0,000079 | 0,000039 | 1,51 | 0,251 |
| Zaman | 2 | 0,000032 | 0,000016 | 0,62 | 0,551 |
| Kesme Hızı | 2 | 0,000913 | 0,000456 | 17,55 | 0,000 |
| İlerleme | 2 | 0,000067 | 0,000033 | 1,28 | 0,304 |
| Hata | 16 | 0,000416 | 0,000026 | | |
| Total | 26 | 0,001524 | | | |

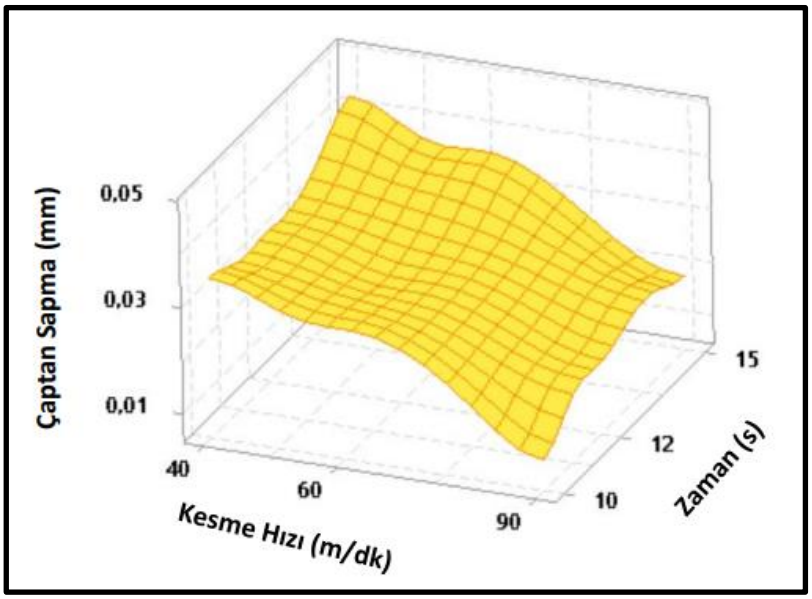
Varyans analizi sonuçları incelendiğinde hem çaptan sapma hem de silindiriklik değerlerini en çok etkileyen girdi parametresinin kesme hızı faktörü olduğu sonucuna varılmıştır. Çıktı sonuçlarını etkileyen faktörler P değerine göre değerlendirilirken %5 anlamlılık ($\alpha$ 0,05) seviyesi dikkate alınmıştır. P değeri anlamlılık seviyesinin altında bulunan faktörlerin istatistiki açıdan çıktı değerlerini etkilediği sonucuna varılmıştır. Çaptan sapma ve silindiriklik değerleri için R-sq değerleri sırasıyla %85,32 ve %71,71 olarak bulunmuş ve bu değerlerin yüksek çıkması da elde edilen verilerin deney tasarım modelini açıkladığını göstermektedir.

Çizelge 9.18. Çaptan sapma ve silindiriklik için faktörlerin etki oranları

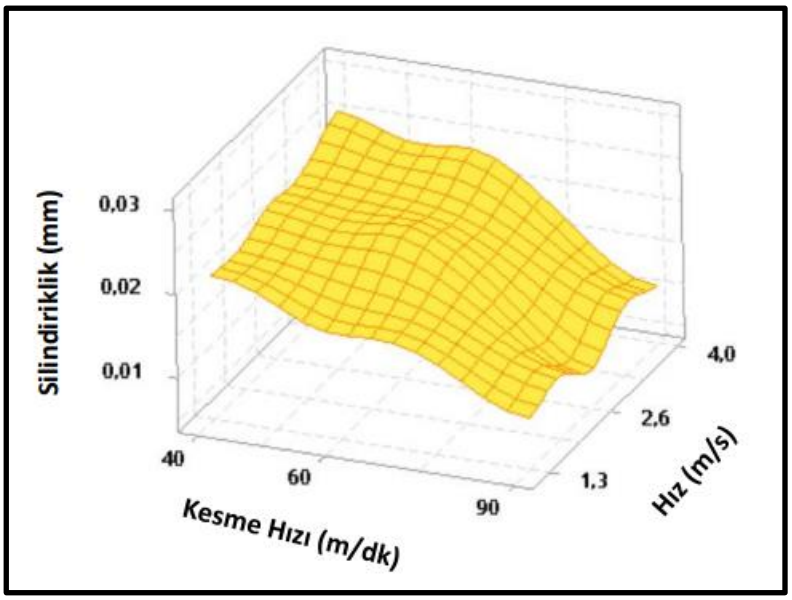
| Faktörler | Çaptan Sapma | Silindiriklik |
|---|---|---|
| Sıcaklık | % 2,00 | % 1,18 |
| Hız | % 1,58 | % 5,18 |
| Zaman | % 9,60 | % 2,10 |
| Kesme Hızı | % 67,13 | %59,91 |
| İlerleme Miktarı | % 4,98 | % 4,40 |
| Hata | % 14,71 | % 27,23 |

Etki oranları incelendiğinde çaptan sapmayı en çok etkileyen iki faktörün kesme hızı ve kalıp açılma zamanı olduğu, silindiriklik değerini en çok etkileyen iki faktörün ise kesme hızı ve enjeksiyon hızı parametreleri olduğu görülmüştür (Bkz. Çizelge 9.18).

Bu faktörlerin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması için Şekil 9.16 ve Şekil 9.17'de yer alan üç boyutlu grafikler çizilmiştir. Grafiklere göre en iyi (en düşük) çaptan sapma kesme hızı 90 m/dk, kalıp açılma zamanı 10 s olduğunda, en iyi (en düşük) silindiriklik değerleri ise kesme hızı 90 m/dk , enjeksiyon hızı 1,3 m/s olduğunda elde edilmektedir.



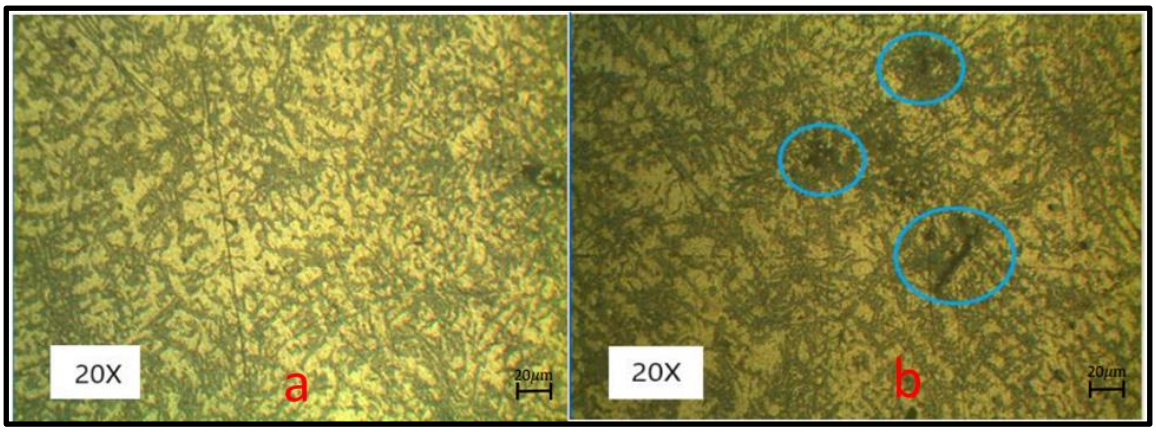

Şekil 9.16. Çaptan değeri üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü




Şekil 9.17. Silindiriklik değeri üzerinde en etkili faktörlerin üç boyutlu görünümü

### 9.3. Mikroyapı İncelemesi

Üretilen tüm numuneler için mikroyapı incelemesi yapılmamış olup çekme dayanımı en az ve en çok olan numunelerin (Bkz. Çizelge 9.4.) mikroyapıları metal mikroskop ile incelenmiştir. Şekil 9.18'de 9 ve 11 numaralı enjeksiyon numunelerin mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Burada mikroyapı analizi yapılmasının amacı, en iyi ve en kötü dayanım elde edilen numuneler arasında farklılık olup olmadığının görülmesi amaçlıdır. Mikroyapı sonuçları incelendiğinde mavi renk ile işaretlenen bölgelerin gaz boşlukları olduğu düşünülmektedir. Bu durum 9 numaralı numunenin daha düşük mukavemetini de açıklamaktadır (Şekil 9.18-b). Mikroyapılar arasındaki bu farklılıkların malzemelerin mekanik özelliklerini etkilediği yapılan deney sonuçlarında da görülmektedir




Şekil 9.18. a) 11 numaralı enjeksiyon test numunesi mikroyapısı b) 9 numaralı enjeksiyon test numunesi mikroyapısı

# 10. TARTIŞMA

Mekanik deneyler sonucunda, malzemelerin mukavemeti üzerinde en büyük etkisi olan parametrenin ergimiş metal sıcaklığı (725 ℃) olduğu görülmüştür. Literatür incelendiğinde, magnezyum alaşımları kullanılarak yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen ürünün, mukavemetini en çok etkileyen parametrenin döküm sıcaklığı olduğu daha önce yapılmış bir çalışmada görülmüştür (Mert ve diğ., 2010). Başka bir çalışmada, döküm sıcaklığı çok düşük olduğunda üretilen numunelerde gaz gözenekliliği olma olasılığının arttığı gözlenmiştir. Gaz gözenekliliğinin artması ile üretilen malzemenin mukavemeti de azalmaktadır (Wang ve diğ., 2022).

Sertlik ve çekme testi deney sonuçları için de bazı çıkarımlar yapılabilir. Çekme deney numuneleri incelendiğinde numunenin koptuğu bölgelerin iç kısımlarında gözenekliliğin olduğu görülmüştür. Çekme testi ana etkiler grafiği incelendiğinde en kötü mukavemetin enjeksiyon hızı 4 m/s olduğunda, en iyi mukavemetin ise 2,6 m/s olduğunda elde edilmiştir (Bkz. Şekil 9.6). Porozite oluşumu malzemelerin mukavemetini doğrudan etkilemektedir. Bu sonuçlar Koru ve Serçe'nin çalışmasının sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Çalışmalarında 3 ve 5 m/s enjeksiyon hızı parametrelerinin porozite oluşumunu arttırdığını ve bunun yerine 2 m/s enjeksiyon hızı değerinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Serçe ve Koru, 2015).

Ergimiş metalin sıcaklığının arttırılması, malzemenin akışkanlığını da arttırdığı için gözenek oluşumunu azaltır ve buna bağlı olarak malzemenin mekanik özellikleri (sertlik, çekme mukavemeti vb.) olumlu yönde etkilemektedir. Hem sertlik hem de kopma mukavemeti değerlerinde en iyi mukavemet 725 derece ergimiş metal sıcaklığında elde edilmiştir. 750 derecelik ergimiş metal sıcaklığında ise malzemenin mekanik özelliklerinde bir düşüş gözlenmiştir. Bu duruma sıcaklığın artmasıyla taneler arasına giren oksijen miktarının artması ve buna bağlı olarak porozite oluşmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Mikroyapı sonuçları incelendiğinde siyah renkli şekillerin gaz/döküm boşluğu olduğu düşünülmektedir (Bkz. Şekil 9.18.b). Bu durum 9 numaralı enjeksiyon numunesinin neden daha düşük mukavemete sahip olduğunu da açıklamaktadır (Bkz. Çizelge 9.4).

Delik delme deneylerinde ise ilk olarak kesme kuvvetleri ölçülmüş ve elde edilen veriler S/N ve ANOVA yöntemleriyle analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre kesme kuvvetlerini en çok etkileyen parametrenin ilerleme kuvveti olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 9.11. ve Şekil 9.12.). Elde edilen bu sonuçlar Gökçe tarafından yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. Yaptığı çalışmada 1050-H14 alüminyum alaşımı kullanarak HSS matkap ile delik delme deneyleri yapmış ve deneyler sonucunda kesme kuvvetleri üzerinde en önemli faktörün ilerleme miktarı olduğu sonucuna varılmıştır (Gökçe, 2021).

Daha sonra deliklerin çapları CMM'de ölçülmüş ve çapın nominal değerden sapma miktarları ve silindiriklik değerleri S/N ve ANOVA yöntemleriyle analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre deliklerin çap ve silindiriklik değerlerini en çok etkileyen faktörün kesme hızı olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 9.16. ve Şekil 9.17.). Elde edilen bu sonuç Meral ve arkadaşlarının yaptıkları çalışma ile örtüşmektedir. Çalışmalarında AISI 1050 malzemesi üzerine HSS matkap kullanarak delik delmişler ve deney sonucunda çap, dairesellik ve silindiriklik ölçümleri yapmışlardır. Analizleri sonucunda silindiriklik değerini en çok etkileyen faktörün kesme hızı ve matkap çapı olduğu sonucuna varmışlardır (Meral ve diğ., 2011).

# 11. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Alüminyum Etial 141 ($AlSi_{12}Fe$) alaşımı kullanılarak yüksek basınçlı döküm makinasında belirlenen parametrelere göre deney parçaları kalıplanmıştır. Elde edilen parçalar üzerinde mekanik testler ve delik delme deneyleri yapılmıştır. Parçaların kalıplanmasında kullanılan parametreler için faktöriyel deney tasarım yönteminden faydalanılmıştır. Delik delme deneylerinin yapılmasında ise Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılmıştır. Belirlenen enjeksiyon parametrelerinin kalıplanan parçaların mekanik özelliklerine ve delinebilirliğine etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar iki başlık altında toplanmıştır.

Enjeksiyon parametrelerinin kalıplanan ürünün mekanik özelliklerine etkisi

Numuneler üzerinde yapılan sertlik ölçümleri ve çekme testlerinin tam faktöriyel yöntemi ile yapılan analiz sonuçları şu şekildedir:

Pareto grafiklerinde sıcaklık değişkeninin üretilen malzemenin hem çekme mukavemetini hem de sertlik değerini en çok etkileyen parametre olduğu görülmektedir. Faktöriyel analiz sonuçlarında en yüksek çekme gerilmesinin sıcaklık değişkenine bağlı olduğu ortaya çıkmıştır.

Elde edilen sertlik testi sonuçları için yapılan faktöriyel analiz sonucunda en yüksek sertlik değerlerinin erimiş metal sıcaklığı 725 °C, enjeksiyon hızı 4 m/s ve kalıp açılma süresi 10 s olduğu zaman elde edildiği ortaya çıkmıştır.

Elde edilen çekme testi sonuçları için faktöriyel analiz yapıldığında, ergimiş metal sıcaklığı 725 °C, enjeksiyon hızı 2,6 m/s, kalıbın açılma süresi 15 s iken, en yüksek çekme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır.

Enjeksiyon parametrelerinin kalıplanan ürünün delinebilirliğine etkisi

Taguchi L27 deney tasarımına göre delik delme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda kesme kuvvetleri ölçümü, delik çap ve silindiriklik ölçümleri yapılmıştır. Deney sonuçları S/N ve ANOVA ile analiz edilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

$F_z$ Kuvveti için minimal kuvvetlerin, ergimiş metal sıcaklığı 750℃, enjeksiyon hızı 4 m/s, kalıp açılma zamanı 12 s, kesme hızı 40 m/dk ve ilerleme oranı 0,1 mm/dev olduğunda elde edilmektedir.

$M_z$ Momenti için minimal kuvvetlerin, ergimiş metal sıcaklığı 700℃, enjeksiyon hızı 2,6 m/s, kalıp açılma zamanı 15 s, kesme hızı 40 m/dk ve ilerleme oranı 0,1 mm/dev parametre değerleri ile sağlanmıştır.

Çap değeri için en iyi değerin (nominale en yakın) 0.007 mm ile 22 numaralı delikte elde edildiği görülmektedir. S/N oranları grafiğine göre en düşük çaptan sapma değerlerinin, ergimiş metal sıcaklığı 750℃, enjeksiyon hızı 2,6 m/s, kalıp açılma zamanı 10 s, kesme hızı 90 m/dk ve ilerleme oranı 0,22 mm/dev deney parametreleri ile elde edildiği görülmüştür.

Silindirik değeri için en iyi değerin (nominale en yakın) 0.005 mm ile 11 ve 22 numaralı deliklerde elde edildiği görülmektedir. S/N oranları grafiğine göre en düşük silindiriklik değerleri, ergimiş metal sıcaklığı 750℃, enjeksiyon hızı 1,3 m/s, kalıp açılma zamanı 15 s, kesme hızı 90 m/dk ve ilerleme oranı 0,10 mm/dev olduğunda ortaya çıkmaktadır.

Tüm analiz sonuçları ele alındığında, Etial 141 ($\mathrm{Al}Si_{12}\mathrm{Fe}$) alüminyum alaşımının YBD yöntemi ile şekillendirilmesiyle elde edilecek ürünün, sertliğin ve çekme/kopma mukavemetinin arttırılması için ergimiş metal sıcaklığının 725℃ olarak kullanılması önerilmektedir. Üretilen malzemeler üzerinde delik delme işlemi yapılacaksa kesme hızı ve ilerleme oranı parametrelerinin sırasıyla 40 m/dk ve 0,1 mm/dev olarak kullanılması en düşük kesme kuvvetlerinin elde edilmesini, kesme hızının 90 m/dk olarak kullanılması ise en az çaptan sapma ve silindiriklik değerlerinin elde edilmesini sağlayacaktır.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler ele alındığında bu veya benzer konularda yapılabilecek çalışmalar için aşağıda öneriler yer almaktadır

- Belirlenen enjeksiyon parametrelerine göre üretilen numuneler üzerinde ısıl işlem çalışmaları yapılabilir.
- Değişen kalıp sıcaklığı ile üretilen parçaların mekanik özellikleri arasındaki ilişki incelenebilir.

# KAYNAKLAR


Akkurt, M. (1998). *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları.* İstanbul: Birsen Yayınevi, 85-130.

Akman, G. ve Özkan, C. (2011). Sac İmalatında Karşılaşılan Yapışma Probleminin Deney Tasarımı İle Çözümü. *Doğuş University Journal*, 187-199.

Akyıl, H. H., ve Bican, O. (2022). Talaşlı İmalatta Kesme Parametrelerinin Geometrik Toleranslar Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Aksaray University Journal of Science and Engineeering, 6*(2), 107-122.

Aydın, A. (2020). *Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinde Ürün Kalitesine Etki Eden Parametrelerin Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 10-22.

Balcı, B. (2008). *AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Malzemenin İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi*. Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 30-43.

Batman, Ö. (2019). *2011-T6 Alüminyum Alaşımının Delik Delme İşleminde Kesme Parametrelerinin Delik Kalitesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 11-38.

Bayraktar, Ş., Siyambaş, Y., ve Turgut, Y. (2017). Delik Delme Prosesi: Bir Araştırma. *Sakarya University Journal of Science*, 21(2), 120-130.

Bican, O., ve Pul, M. (2021). Farklı Alüminyum Alaşımlarının Tornalanmasında Alaşım Cinsinin Kesici Takım Davranışı, Talaş Biçimi Ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 9-17.

Bonollo, F., ve Timelli, G. (2014). *Aluminium Alloy Castings: The Eu Stacast Guide To Defects Classification, Mechanical Potential And Design Issues* (First Edition). Milano: AIM - Associazione Italiana di Metallurgia, 119-130.

Çağan, S. Ç., Uğurlu, M., Buldum, B. B., Sevim, İ. (2017). *Alüminyum ve alaşımlarının asker araçlarda kullanımı*. II Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu. Kırıkkale.

Çalışkan, O. (2014). *Tornalamada Talaş Kaldırma Parametrelerinin Takım Ömrüne Etkilerinin Taguchi Yaklaşımıyla İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 12-21.

Çetin, A. (2017). *Alüminyum Döküm Alaşımları El Kitabı* (Birinci Baskı). İstanbul: Dökümhane Akademi, 17-34.

Dadic, Z., Zivkovic, D., ve Catipovic, N. (2017). *High Pressure Die Casting Mould Repair Technologies*. International Conference "Mechanical Technologies and Structural Materials," Split. 1847-7917.

Dargusch, M., Dour, G., Schauer, N., Dinnis, C., ve Savage, G. (2006). The influence of pressure during solidification of high pressure die cast aluminium telecommunications components. *Journal of Materials Processing Technology*, 37-43.

Dong, X., Yang, H., Zhu , X. ve Ji, S. (2019). High strength and ductility aluminium alloy processed by high pressure die casting. *Journal of Alloys and Compounds*, 773, 86-96.

Ensarioğlu, C. (2007). *Talaşlı İmalat İşlemlerinde Kesme Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Bir Uzman Sistem Yaklaşımı*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 10-39.

Gökçe, A., Fındık, F., Kurt, A. (2017). Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri. *Mühendis ve Makina* , 58 (686) , 21-47.

Gökçe, H. (2021). Yüksek Sünekliğe Sahip Al 1050-H14 Alaşımının Delinme Performansının İncelenmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 39 (1), 179-209.

Gökçe, H., Yavuz, M., ve Karayel , M. (2017). İmalat Süreçlerinde Kesme Kuvvetlerinin Belirlenmesi Amaçlı Dinomometre Tasarımı ve İmalatı. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(2), 27-32.

Gökkaya, H., ve Nalbant, M. (2006). Talaş Kaldırma Sırasında Isı Oluşumu ve Dağılımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 33-44.

Güven, O. (2006). *Alüminyum Silisyum Magnezyum Döküm Alaşımlarının Yapı* İncelenmesi.Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 5-29.

Humphreys, F., ve Hatherly, M. (2004). *Recrystallization and Related Annealing Phenomena.* Amsterdam: Elsevier, 250-305.

İnternet: Eti Alüminyum (2020). URL: https://www.etialuminyum.com/urunler/ham-aluminyum-urunler/dokumhane-urunleri/ Son Erişim Tarihi: 01.01.2023.

İnternet: Gülmez, T. (2018). İstanbul Teknik Üniversitesi URL: https://web.itu.edu.tr/gulmezt/ Son Erişim Tarihi: 10.01.2023.

İnternet: Makine Eğitimi (2018). URL: https://www.makinaegitimi.com/ Son Erişim Tarihi: 17.12.2022.

İnternet: Güray Alüminyum (2020). URL: https://www.gurayaluminyum.com.tr/ Son Erişim Tarihi: 05.10.2022.

İnternet: Makine Teknolojisi Delme ve Vida işlemleri (2007). Milli Eğitim Bakanlığı. URL: http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller/Delme%20ve%20Vida%20%C4%B0%C5%9Flemleri.pdf Son Erişim Tarihi: 05.01.2023

İnternet: RUTAŞ (2017). URL: http://www.rutas.com.tr/dokum.html Son Erişim Tarihi: 25.11.2022.

İpek, S. (2018). *Termomekanik Prosesler ile Üretilen Yassı Alüminyum Ürünlerin Mukavemet Diyagramlarının Oluşturulması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 20-30.

Işık, S. B., Zeren, M., ve Atamay, K. (2020). Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi İle Alüminyum Alaşımlı Otomobil Jant Üretiminin Simülasyonu. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 125-132.

Kandemir, K. (1998). *Kesici Takım Malzemesi Olarak Kullanılan Seramikler*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 15-38.

Kara, Y. (2015). *TİAIN ve TİN Kaplamalı Matkaplarla C38 Dövme Çelik Malzemesinin Derin Delik Delme İşleminin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 27-40.

Korkmaz, M., Özmetin, C., Özmetin, E., Çalgan, E. ve Süzen, Y. (2021). Boron Removal by Aluminum Modified Pumice and Aluminum Hydroxide from Boron Mine Wastewater-Full Factorial Experimental Design. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(1), 1-13.

Mendi, F. (1999). *Takım Tezgahları Tasarımı.* Ankara: Gazi Kitabevi, 45-90.

Meral, G., Dilipak, H., ve Sarıkaya, M. (2011). AISI 1050 Malzemenin Delinmesinde Delme Parametrelerinin Delik Kalitesi Üzerindeki Etkisinin Çoklu Regresyon Metoduyla Modellenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 37-46.

Mert, F., Özdemir, A., ve Karataş, Ç. (2010). Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Döküm Yöntemiyle Kalıplanabilirliğinin Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 13(3), 165-176.

Mihailescu, M., Negrea, A., Ciopec, M., Negrea, P., Duteanu, N., Grozav, I. ve Dumitriu, C. (2021). Full Factorial Design Gold Recovery from Industrial Solutions. *Toxics*, 9(5), 1-17.

Mohammed, I., Bankole, M., Abdulkareem, A., Ochigbo, S., Afolabi, A., ve Abubakre, O. (2017). Full factorial design approach to carbon nanotubes synthesis by CVD method in argon environment. *South African Journal of Chemical Engineering*, 24, 17-42.

Montgomery, D. (2008). *Design and Analysis of Experiments* (Vol. 7th). New York: John Wiley & Sons, 65-183 .

Özay, Ç. (2009). *Teğetsel Tornalama-Frezeleme Yönteminde İşleme Parametrelerinin Teorik ve Deneysel Olarak Araştırılması*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 47-58.

Özcömert, M. (2006). İ*stanbul Ticaret Odası Otomotiv Endüstrisinde Alüminyum*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 36-59.

Özçatalbaş, Y. (2020). Çeliklerin İşlenebilirliği: Kimyasal Bileşim,Mikroyapı,Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik İlişkisi. *Politeknik Dergisi*, 2(23), 457-482.

Özmen, T. (2015). *A360 Alüminyum Alaşımının Basınçlı Dökümünde Enjeksiyon Parametrelerinin Teorik ve Deneysel İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 40-62.

Rai, J., Lajimi, A., ve Xirouchakis, P. (2008). An Intelligent System for Predicting HPDC Process Variables in Interactive Environment. *Journal of Materials Processing Technology*, 203, 72-79.

Samtaş, G., ve Korucu, S. (2019). Kriyojenik İşlem Görmüş EN AW 5754 (AlMg3) Alüminyum Alaşımının Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü İçin Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 22(3), 665-673.

Savaşkan, M., Taptık, Y., ve Ürgen, M. (2004). Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *İTÜ Dergisi*, 3(6), 117-128.

Sefacı, S., Babayiğit, O., ve Koçak, S. (2022). Deneysel Tasarım Yöntemleri ile bir Santrifüj Pompa Çarkında Dengeleme Deliği Tasarım Optimizasyonu. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 436-448.

Sekmen, M., Günay, M., ve Şeker, U. (2015). Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesme Hızı ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 18(3), 141-148.

Serçe, O., ve Koru, M. (2015). Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinde Enjeksiyon Parametrelerine Bağlı Olarak Döküm Simülasyonu. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 36(5), 10-23.

Soy, U. (2009). *SiC/*$B_4C$ *Takviyeli Metal Matriks Kompozit üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 23-49.

Spanelis, A., ve Walker, A. (2022). A Multi-Objective Factorial Design Methodology for Aerodynamic Off-Takes and Ducts. *Aerospace*, 9(3), 1-32.

Suphi Özçomak, M., ve Çebi, K. (2017). İstatiksel Güç Analizi: Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi Üzerine Bir Uygulama. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 31(2), 413-431.

Şahin, Y. (2000). *Talaş Kaldırma Prensipleri 1.* Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 120-250.

Şap, S. (2023). AISI 5140 Çeliğinin Farklı Soğutma Teknikleri Kullanılarak Frezelenmesinin Güç Tüketimi Üzerine Etkileri. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 35(1), 313-320.

Şenoğlu, B., ve Acıtaş, Ş. (2020). *İstatiksel Deney Tasarımı* (4. Baskı). Ankara: Nobel Yayınları, 113-210.

Toptaş, V. (2014). *Bir Alüminyum Alaşımı ile Basınçlı Döküm Yöntemi Kullanılarak Tabanca Gövdesi Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 23-30.

Vinarcik, E. J. (2003). *High Integrity Die Casting Processes*. New York : John Wıley and Sons, 90-200 .

Wang, T., Huang, J., Fu, H., Yu, K., ve Yao, S. (2022). Influence of Process Parameters on Filling and Feeding Capacity during High Pressure Die-Casting Process. *Applied Sciences*, 12(9), 1-13.

Yalçın, B., İpek, O., Koru, M., ve Gültekin, N. (2012). *Basınçlı Döküm Yöntemiyle İmal Edilen Etial 150 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri ve Mikroyapısına Kalıp Tasarımı ve Enjeksiyon Parametrelerin Etkisi*. 14. International Materials Symposium. Denizli: Pamukkale University.

Yılmaz, M., ve Keskin, M. (2019). Determination of Optimal Reading Conditions by Taguchi Method. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 25-32.

Yurdakul, M., ve İç, Y. (2021). *Modern İmalatın Prensipleri* (4. Baskı). Ankara: Nobel Akademi Yayıncılık, 95-200.



*Gazili olmak ayrıcalıktır*