



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TAKIM ÇELİĞİYLE İMAL EDİLMİŞ ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON KALIBINDA
OLUŞAN HASARIN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERVE DÜZELTEN

DANIŞMAN: PROF. DR. İBRAHİM SEVİM

**YALOVA
AĞUSTOS 2024**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TAKIM ÇELİĞİYLE İMAL EDİLMİŞ ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON KALIBINDA
OLUŞAN HASARIN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERVE DÜZELTEN
218113029

DANIŞMAN: PROF. DR. İBRAHİM SEVİM

YALOVA
AĞUSTOS 2024

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “**TAKIM ÇELİĞİYLE İMAL EDİLMİŞ ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON KALIBINDA OLUŞAN HASARIN ANALİZİ**” başlıklı bu tez çalışmada; 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 çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Merve DÜZELTEN



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Prof. Dr. İbrahim Sevim'e; her zaman yanımda oldukları ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri için başta sevgili annem olmak üzere, aileme ve değerli arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam konusunda büyük destekler veren çalışma arkadaşım ve canım dostum Burcu Gizem Özmen'e, meslektaşım Baran Öncan'a ve sayın Doç. Dr. Önder Ayer'e müteşekkirim.

Bu tez çalışmasına kendi imalathanelerini açarak çalışma yapmamı sağlayan ve tüm bilgi ve birikimlerini paylaşarak destek veren, başta ilk çalışma deneyimimi en güzel şekilde yaşadığım sevgili Eksenal Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojileri A.Ş. ekibine, Uddeholm, TRI Metalurji ve Altım Alüminyum firmalarına teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmamı, en büyük destekçim olan, yüksek lisans eğitimim sırasında kaybettiğim, çok özlediğim babama ithaf ederim.

Ağustos – 2024

Merve DÜZELTEN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON VE KALIBI	4
2.1. Ekstrüzyon İşleminin Sınıflandırılması	4
2.1.1. İleri ekstrüzyon	4
2.1.2. Geri (indirekt) ekstrüzyon.....	5
2.1.3. Hidrostatik ekstrüzyon.....	6
2.2. Ekstrüzyonu Etkileyen Faktörler	7
2.2.1. Ekstrüzyon türü.....	7
2.2.2. Ekstrüzyon oranı	7
2.2.3. Proses sıcaklıkları	8
2.2.4. Ekstrüzyon hızı	9
2.2.5. Biyet malzemesi özellikleri	10
2.2.6. Kalıp tasarımı.....	10
2.3. Direkt Ekstrüzyon Elemanları	11
2.3.1. Ekstrüzyon presi	11
2.3.2. Alüminyum alaşımlı biyet	13
2.3.2.1. 6xxx (6000) serisi ve 6063 alaşımı	15
2.3.3. Ekstrüzyon kalıbı	19
3. HASAR ANALİZİ	25
3.1. Hasarın Nedenleri	25
3.2. Hasar Tipleri.....	26
3.2.1. Kırılma	26
3.2.2. Yorulma	29
3.2.3. Sürünme	30
3.2.4. Aşınma	32
3.2.5. Korozyon	33

3.3. Hasar Analizi Aşamaları.....	35
4. MATERYAL VE METOD	36
4.1. Zıvana Parçasının Tasarım ve Üretim Bilgileri.....	36
4.2. Numune Alımı ve Mikroyapı İncelemeleri	39
4.3. 1.2344 Çeliğinden Alınan Numunelerin Çekme Deneyi.....	44
4.4. Kalıp Üzerindeki Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi	49
4.4.1. Zıvana tasarımının Altair Inspire Extrude Metal programı ile analizi.....	49
4.5. Zıvana Parçasının Tasarım İyileştirmesi ve Yeniden Analizi	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ	70
TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER.....	70

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

A_B	: Biyet kesit alanı (mm^2)
A_E	: Profil kesit alanı (mm^2)
n	: Kalıptaki figür sayısı
V	: Ekstrüzyon hızı (m/s)
V_s	: İstampa hızı (m/s)
ER	: Ekstrüzyon oranı
Δ_l	: Uzama miktarı (mm)
σ	: Hook yasasındaki gerilme ifadesi (MPa)
E	: Elastisite modülü (MPa)
ε	: Birim uzama
σ_a	: Akma gerilmesi (MPa)
F_a	: Akma kuvveti (N)
A_0	: Çekme deneyindeki numunenin ilk kesit alanı (mm^2)
$\sigma_{\text{ç}}$	: Çekme dayanımı (MPa)
F_{maks}	: Çekme deneyinde en yüksek gerilmenin belirlendiği maksimum kuvvet (N)
$\varepsilon_{\text{plastik}}$	: Gerilme-birim uzama grafiğinde 0,002 noktasındaki plastik uzama
$R_{p0,2}$	: Çekme deneyinde $\varepsilon_{\text{plastik}}$ uzamasına karşılık gelen akma noktası (MPa)
l_k	: Çekme deneyinde kopma anındaki numune boyu (mm)
l_0	: Çekme deneyinde test cihazının çeneleri arasındaki uzunluk (mm)
A_c	: Konteynır alanı (mm^2)
d_{Al}	: Alüminyum alaşımının özgül ağırlığı (g/cm^3)
m_p	: Üretilecek profilin 1 metresine düşen gramajı (g/m)
f	: Kalıp üzerinde profilin çıkacağı boşluk (figür) sayısı

KISALTMALAR

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
Al_2O_3	: Alümina
AMS	: Havacılık ve Uzay Malzeme Spesifikasyonu
ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
CAM	: Bilgisayar Destekli Üretim
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
DIN	: Türk Standartları Enstitüsü
E38K	: Elektro cüruf yeniden ergitilmiş (ESR), modifiye edilmiş H-11 kalıp çeliği
EDX	: Enerji Dağılımlı X-ışını
ER	: Ekstrüzyon Oranı
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
H13	: AISI tarafından H grubu olarak sınıflandırılan DIN 1.2344 çelik
HRC	: Rockwell C Sertliği
HSP	: Hegzagonal Sıkı Paket Kristal Yapı
HSR-14	: Mikroyapı analizinde kullanılan numune numarası
HV	: Vickers Sertliği
NADCA	: Kuzey Amerika Dökümcüler Birliği
SAE	: Otomotiv Mühendisleri Topluluğu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SiC	: Silisyum Karbür

S-N : Malzemenin stres seviyesi (S) - yükleme döngüsü (N) grafiği
YMK : Yüzey Merkezli Kübik Kristal Yapı
 γ' -Fe₄N : Yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahip bir demir nitrür fazı
 ϵ -Fe₂₋₃N : Demir (Fe) ve azot (N) elementlerinden oluşan bir demir nitrür fazı



TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Bazı 6xxx serisi alaşımların kimyasal bileşim aralıkları	17
Tablo 2.2. 1.2367 malzemesinin kimyasal bileşimi	21
Tablo 2.3. 1.2343 malzemesinin kimyasal bileşimi	22
Tablo 2.4. 1.2344 malzemesinin bir çalışmada kullanılan kimyasal bileşimi.....	22
Tablo 3.1. Çeşitli endüstrilerde karşılaşılan hasarların nedenleri ve yüzde oranları.....	26
Tablo 4.1. Kullanılan 1.2344 takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	37
Tablo 4.2. Zıvana sertleştirme işlemi sonucu sertlik değerleri	38
Tablo 4.3. Alüminyum ekstrüzyon prosesi sırasındaki parametreler	38
Tablo 4.4. Numunelerin sertlik ölçümlerinin sayısal verileri.....	43
Tablo 4.5. Numunelerinin çekme deneyi sonucunda elde edilen değerleri	47
Tablo 5.1. EK 58445E ve EK 58445Y tasarımlarının simülasyon ve üretim sonuçları	64

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Ekstrüzyon işleminin temel şematik gösterimi	4
Şekil 2.1. Direkt (ileri) ekstrüzyon.....	5
Şekil 2.2. İndirekt (geri) ekstrüzyon.....	6
Şekil 2.3. Hidrostatik ekstrüzyon	6
Şekil 2.4. Döküm yöntemiyle üretilmiş ingot 6063 alaşımının mikroyapısı	18
Şekil 2.5. a. İçi dolu profil örnekleri b. Açık (içi boşluklu) profil örnekleri c. Yarı açık profil örnekleri	19
Şekil 2.6. Bir solid kalıp örneği.....	20
Şekil 2.7. Bir köprülü kalıp örneği.....	21
Şekil 2.8. Nitrüleme tabakaları	24
Şekil 3.1. Hasar türleri.....	26
Şekil 3.2. a. Atomik seviyede ilerleyen çatlak ucu, b. Çatlakların taneler üzerinden ilerlemesi, c. Çatlakların tane sınırları boyunca ilerlemesi.....	27
Şekil 3.3. Gerilme-gerinim eğrisi	27
Şekil 3.4. Sünek kırılma mekanizması	28
Şekil 3.5. a. Orta derece sünek malzeme kırılma mekanizması b. Gevrek malzeme kırılma mekanizması.....	28
Şekil 3.6. Gevrek ve sünek kırılmaların mikroyapı görüntüleri.....	29
Şekil 3.7. Yorulma kırılma yüzeyinin şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.8. Çelik ve alüminyum yorulma davranışının karşılaştırılması	30
Şekil 3.9. Sürünme eğrisi	31
Şekil 3.10. a. 550 C'de yüksek gerilimde test edilen bir çelik düz çubuğun sünek kırılması (kopma süresi 100 saat) ve b. 650 C'de düşük gerilimde aynı çeliğin gevrek kırılması (kopma süresi 20.014 saat).....	32
Şekil 3.11. Genel korozyona uğramış boru hattının cidar incelmesi nedeniyle hasarlanması	34
Şekil 4.1. Kalıp takımının AutoCad tasarımı	36
Şekil 4.2. Kalıp takımının SolidWorks ile modellenmesi	37
Şekil 4.3. Zıvana parçasının ayak kısmındaki çatlakları	38
Şekil 4.4. a. Hasarlı bölgeden alınan ana numune b. Çatlağa dik doğrultuda HSR- 14'ten alınan numune c. Çatlağa yatay doğrultuda HSR-14'ten alınan numune	39
Şekil 4.5. a. Bakalit işlemi b. Bakalite alınmış numuneler (solda çatlağa dikey doğrultuda alınan numune, sağda çatlağa yatay doğrultuda alınan numune).....	40
Şekil 4.6. a. Dikey kesit numunenin dağlama öncesi mikroyapı görüntüsü b. Yatay kesit numunenin dağlama öncesi mikroyapı görüntüsü c. LV150N Nikon optik mikroskop.....	40

Şekil 4.7. a. Dikey kesit numunenin dağlama sonrası mikroyapı görüntüsü b. Yatay kesit numunenin dağlama sonrası mikroyapı görüntüsü	41
Şekil 4.8. Dikey kesit numunenin difüzyon bölgesi ve beyaz tabaka bölgesi	41
Şekil 4.9. Yatay kesit numunenin difüzyon bölgesi ve beyaz tabaka bölgesi.....	42
Şekil 4.10. a. Dikey kesit numunenin mikrosertlik ölçümleri b. Yatay kesit numunenin mikrosertlik ölçümleri c. DURASCAN 50G5 EMCO-TEST marka sertlik cihazı	42
Şekil 4.11. Her iki numune için yapılan sertlik ölçüm değerleri-test noktası grafiği	43
Şekil 4.12. NADCA #207-2018 ısıtılma işlem mikroyapı kalitesi tablosu	44
Şekil 4.13. a. Çekme deneyi numunesi ölçümleri b. Çelik üzerinden alınan numuneler.....	45
Şekil 4.15. Numunelerin çekme deneyinde elde edilen gerilme-birim uzama grafikleri.....	46
Şekil 4.16. Deney sonucunda kopan numuneler	48
Şekil 4.17. Kalıp takımının ekstrüzyon analizi modellemesi.....	50
Şekil 4.18. Kalıp takımının kalıp deformasyon analizi modellemesi	50
Şekil 4.19. Kalıp takımındaki parçaların tanımlanması	51
Şekil 4.20. Kalıp takımının orjine taşınması	51
Şekil 4.21. Yük uygulanan yüzeylerin seçimi.....	52
Şekil 4.22. Gereksiz seçilmiş yüzeylerin temizlenmesi	52
Şekil 4.23. Cıvata bağlantı deliklerinin mesnetlenmesi işlemi	53
Şekil 4.24. Pim deliklerinin mesnetlenmesi işlemi	53
Şekil 4.25. Temas yüzeylerinin tanımlanması	54
Şekil 4.26. Malzeme tanımlama işlemi	55
Şekil 4.27. ‘Pressure type’ kısmına veri girilmesi	55
Şekil 4.28. Mesh uygulaması	56
Şekil 4.29. Kalıp takımının ‘Tool Deflection’ analizi sonuçları	57
Şekil 4.30. Üretilecek olan köprülü profil.....	57
Şekil 4.31. Kalıp hamili.....	58
Şekil 4.32. EK 58445E zıvana alan tasarımı	59
Şekil 4.33. a. EK 58445E zıvanasının yan görünüşte ayak yapısı b. EK 58445Y zıvanasının yan görünüşte ayak yapısı	60
Şekil 4.34. EK 58445Y zıvana alan tasarımı	61
Şekil 4.35. EK 58445E ve EK 58445Y zıvanalarının yan görünüşleri	61
Şekil 4.36. 3 boyutlu modellenmiş EK 58445E ve EK 58445Y zıvanaların giriş bölümleri	62
Şekil 4.37. EK 58445Y zıvana deformasyon analizi	62
Şekil 5.1. a. Tasarımı iyileştirilen zıvana parçası b. Yeniden tasarlanmış zıvananın bulunduğu kalıp takımının profil üretimi	63

Şekil 5.2. EK 58445Y kodlu zıvana içeren kalıp takımının profil üretim bilgileri..... 64



TAKIM ÇELİĞİYLE İMAL EDİLMİŞ ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON KALIBINDA OLUŞAN HASARIN ANALİZİ

ÖZET

Alüminyum profil üretimi, günümüzde hızla gelişmekte olan bir alandır ve bu alanda en popüler üretim yöntemlerinden biri olarak ekstrüzyon öne çıkmaktadır. Ekstrüzyon süreçlerinin bu hızlı gelişimi ile birlikte, ekstrüzyon kalıplarının tasarımı ve üretiminin de benzer şekilde iyileştirilmeye çalışıldığı gözlemlenmektedir. Fire oranlarını düşürmek, ekstrüzyon ürününün ve ekstrüzyon kalıbının kalitesini artırmak gibi hedefler doğrultusunda birçok araştırma ve geliştirme çalışması yürütülmektedir. Ekstrüzyon süreci ve kalıp üretimi, olası hasarları önceden simülasyon araçları ve dijital ortamlar aracılığıyla tespit edilerek önemli ölçüde iyileştirilebilir.

Bu tez çalışmasında, sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş ve alüminyum ekstrüzyon kalıp takımı için kullanılan bir zıvanada meydana gelen hasarın nedenleri araştırılmıştır. Mikroyapı analizleri ve mekanik testler yardımıyla, zıvanada meydana gelen hasarın nedeninin tasarım eksiklikleri olduğu belirlenmiştir. Bu eksikliklerin giderilmesi ve hasarın tekrarlanmasını önlemek amacıyla, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak zıvana parçasının tasarımı yeniden değerlendirilmiş ve iyileştirilmiştir.

İyileştirilmiş tasarım, Altair Inspire Extrude Metal modülü ile simülasyon analizlerine tabi tutulmuş ve yeni tasarımın performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ardından, iyileştirilmiş zıvana tasarımı üretim ortamına dahil edilerek, alüminyum ekstrüzyon tesisinde yeniden ekstrüzyon sürecine dahil edilmiştir. Bu süreçte, zıvananın performansı ve dayanıklılığı gözlemlenmiş, gerçek üretim koşullarında yapılan testlerle sonuçlar doğrulanmıştır. Tez kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmalar, alüminyum ekstrüzyon endüstrisinde karşılaşılan hasarların kaynağını anlamak ve bu tür hasarları önlemek için uygulanabilecek etkin yöntemlerin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca, FEM analizlerinin ve simülasyon tekniklerinin kalıp tasarımında nasıl etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermekte ve endüstriyel uygulamalarda kaliteyi artırmak, maliyetleri düşürmek ve operasyonel verimliliği artırmak için pratik öneriler sunmaktadır. Bu çalışma, alüminyum ekstrüzyon sektöründeki mühendisler ve araştırmacılar için değerli bir kaynak oluşturmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ekstrüzyon, Zıvana, Hasar, Tasarım

FAILURE ANALYSIS OF AN ALUMINUM EXTRUSION DIE MANUFACTURED WITH TOOL STEEL

ABSTRACT

Aluminum profile production is a rapidly developing field today, with extrusion being one of the most popular manufacturing methods. Along with the rapid advancement of extrusion processes, it is also observed that the design and production of extrusion dies are being similarly improved. Numerous research and development efforts are conducted to achieve goals such as reducing scrap rates, enhancing the quality of the extrusion product, and improving the quality of the extrusion die. The extrusion process and die production can be significantly improved by identifying potential damages in advance through simulation tools and digital environments.

In this thesis, the causes of damage occurring in a mandrel, made of hot-work tool steel and used for aluminum extrusion die sets, have been investigated. Through microstructural analyses and mechanical tests, it has been determined that the cause of the damage in the mandrel is due to design deficiencies. To address these deficiencies and prevent the recurrence of damage, the design of the mandrel component was reassessed and optimized using the finite element method (FEM).

The optimized design was subjected to simulation analyses using the Altair Inspire Extrude Metal module, and the performance of the new design was examined in detail. Subsequently, the improved mandrel design was integrated into the production environment and included in the aluminum extrusion process at an extrusion facility. During this process, the performance and durability of the mandrel were observed, and results were validated through tests conducted under actual production conditions.

The studies carried out within the scope of this thesis make significant contributions to understanding the sources of damage encountered in the aluminum extrusion industry and developing effective methods that can be implemented to prevent such damages. Moreover, this research demonstrates how FEM analyses and simulation techniques can be effectively utilized in die design and provides practical recommendations for enhancing quality, reducing costs, and increasing operational efficiency in industrial applications. This study aims to serve as a valuable resource for engineers and researchers in the aluminum extrusion sector.

Keywords: Extrusion, Mandrel, Failure, Design

1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında en çok tercih edilen malzeme biri olmasıyla, hafifliği ve kolay işlenebilirliğiyle gözde metallerden biri olan alüminyum, bugün otomotiv sektöründen inşaat sektörüne, savunma sanayiinden kapı pencere sistemlerine bir çok alanda kendine yer bulmakta hiç zorlanmamıştır. Ek olarak dayanıklılığı itibariyle havacılık ve uzay sanayiinde ve robot üretiminde de kullanılabilen alüminyum malzemesi, hayatımızın hemen hemen her alanında karşımıza çıkmaktadır.

Doğada en çok bulunan elementlerden biri olan alüminyum, düşük yoğunluğa sahip bir metaldir, bu da onu diğer metallerden daha hafif yapar. Bu özellik bir çok endüstriyel uygulama için tercih edilmesini sağlar. Elektriği iyi ileten bir metaldir, bu nedenle elektrik kabloları, iletkenler ve elektrikli cihazlar için yaygın olarak kullanılır. Isı iletkenliği iyi olması sebebiyle mutfak eşyaları, ısı değişim ekipmanları ve benzeri uygulamalarda kullanılır. Oksijenle reaksiyona girerek koruyucu bir oksit tabakası oluşturur, bu nedenle korozyona dirençlidir. Geri dönüşüm süreçlerinde kullanılabilir ve tekrar tekrar eritilebilir, dolayısıyla çevre dostudur.

Alüminyum, $2,79 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğu ile çeliğe göre oldukça hafif bir malzemedir. 70 GPa elastik modülü ile oldukça esnek bir yapısı bulunmaktadır ve uygun elementlerle alaşımlandığında ise çekme dayanımı 49 MPa'dan 700 MPa'a kadar çıkabilir. Ergime sıcaklığı $660,32 \text{ }^\circ\text{C}$ olup, kaynama noktası $2519 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dedir.

Alüminyum malzemeler, değişik prosesler ile işlenebilir ve kolayca şekillendirilebilir. Kristal yapısının yüzey merkezli kübik olması sebebiyle şekil vermesi ve işlemesi kolay bir metaldir [1]. Bu nedenle alüminyumun şekillendirilmesinde en çok tercih edilen yöntemlerden biri alüminyum ekstrüzyondur. Ekstrüzyon işlemi temelde alüminyum hammadde (biyet), ekstrüzyon kalıbı ve ekstrüzyon presi ile gerçekleştirilir. Alüminyum malzemesinin kalıp içerisine akışı, ekstrüzyon prosesini ve üretilecek profili doğrudan etkiler. Kalıp tasarımı, ekstrüzyon işleminde alüminyumun akışını etkileyen sıcaklık, ekstrüzyon basıncı gibi parametrelerden biri olması nedeniyle önemli bir noktadadır. Kalıp tasarımı hatalı yapıldığı takdirde, kalıp üzerinde sıcaklık ve gerilim değerlerinin üniform olmaması ve kalıp üzerinde hasar görmek olasıdır. Bu olası hasarın önüne geçme amacıyla yapılan, literatürde bir çok çalışma bulunmaktadır.

Qamar ve diğ. [2], metal ekstrüzyonunda onarılabilir tüm önemli kalıp kusurlarının detaylı açıklamalarla tanımlamasını yapmışlardır. Bu kusurlar için gerekli düzeltme işlemleri açıklanmış ve alınacak önlemleri belirlemişlerdir.

Arif ve diğ. [3], profil ve hasar modları arasındaki ilişkiyi araştırabilmek için, 17 adet birbirinden farklı 1.2344 kalite sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş ekstrüzyon kalıbı ve biyet olarak ise Al-6063 alüminyum alaşımını kullanarak hasar çalışması yapmış ve 616 adet kalıp hasarı elde etmiştir. Çalışma, genel ve sınıflandırma bazında hasar modları, farklı karmaşıklıkta kalıpların hasar analizleri ve her hasar modundaki şekle bağlı bozulmalar olarak 3 farklı perspektifi yansıtmaktadır.

Kalıp hasarının oluşmasında bir çok parametreden bahsetmek mümkündür. Bunlardan biri de kalıp hammadidesidir ve genelde üretilecek profile göre sıcak iş takım çeliklerinden biri seçilir. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalardan biri olan Albaraz'ın yüksek lisans tezinde, DIN 1.2344, DIN 1.2712 ve E38K (patent) sıcak iş takım çeliklerini konvansiyonel ısıtma işlemi tabii tutularak, sonrasında bu çeliklere darbe, aşınma ve sertlik deneyleri uygulanmış, bulunan değerler kıyaslamıştır [4]. Bakdemir ve diğ. [5] ise yaptıkları çalışmada, SEM EDX, X ışını difraksiyonu, atomik kuvvet mikroskopu ve 3D optik profilometre kullanarak, gaz nitrasyon işleminin DIN 1.2344 sıcak iş takım çeliğinin mekanik özelliklerine ve aşınma direncine etkisini incelemiştir.

Ekstrüzyon kalıbı imalatı alanında ürün geliştirme yaparak kalıp kalitesini arttırmak ve hurda kalıp oranını azaltmak için çeşitli metotlar ve analizler uygulamak önemlidir. Hasar oluşumunu engellemek, mevcut hasarı inceleyebilmek, prosesi simüle etmek, alüminyum akışını analiz etmek veya tasarımı iyileştirmek gibi geliştirmeler ve incelemeler yapabilmek için günümüz teknolojisi kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmektedir. Akhtar ve Arif [6], yorulmanın baskın hasar modu olması durumunda, kritik proses parametrelerinin ve kalıp tasarım özelliklerinin tanımlanması için ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla hasar modellerini uygulama çalışması yapmıştır. Ekstrüzyon prosesi simüle edilmiş ve öncelikle kalıptaki potansiyel yorulma konumu belirlenerek dinamik gerilim ve gerinim değerleri elde edilmiştir.

Ayer ve diğ. [7], köprülü bir alüminyum ekstrüzyon kalıbı ve AA6063 alaşımlı alüminyum biyet kullanarak, belirli parametrelerle Hyper Extrude sonlu elemanlar yazılımında simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda sıcaklık dağılımı, basınç dağılımı, biyet arayüzü ve bağlı kalıp çıkış hızı sonuçları analiz edilmiştir.

Tong ve diğ. [8], metal yorulma teorisi ve FEM tekniğini kullanarak kalıp yorulma ömrünün analizi ve iyileştirmesine yönelik bir metodolojinin geliştirme çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada kalıp yorulma analizi için S-N (Gerilme-Çevrim Sayısı) yaklaşımı kullanılmıştır.

Giarmas ve Tzetzis [9], 2021 yılında yaptıkları çalışmada, 6xxx serisi alüminyum alaşımları için sonlu elemanlar analizi yoluyla kalıp tasarımının optimizasyonundaki son gelişmelere genel bir bakışı ele almıştır.

Ayer [10], ekstrüzyon oranı aynı olan kalıplar ile gerçekleştirilen ekstrüzyon işlemlerinde, kalıp giriş açısı, kalıp açısı ve kalıp kanal uzunluğu gibi parametrelerin ekstrüzyon kuvvetine olan etkisini Taguchi L9 Ortogonal Deney Tasarımı kullanarak incelemiştir.

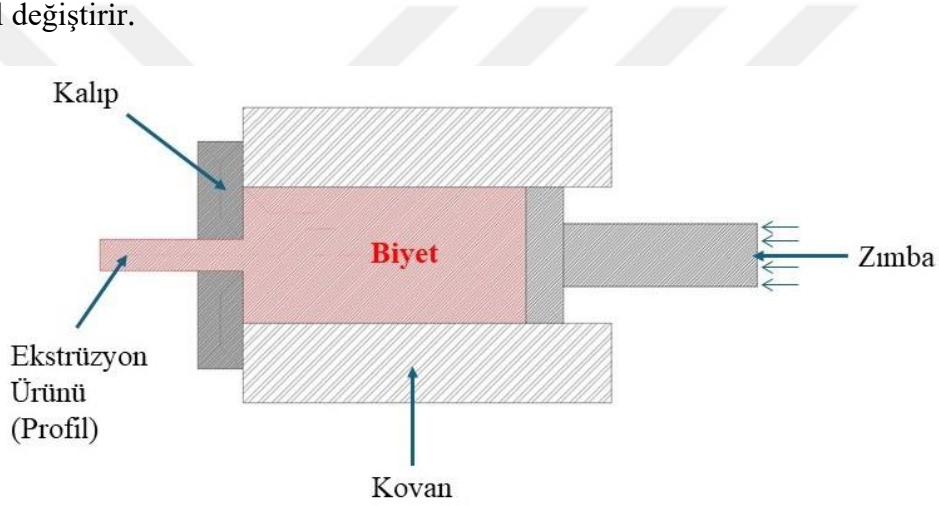
Alüminyum ekstrüzyon sürecinde kullanılan kalıp tasarımı ve kalıp malzemesi, üretim verimliliği ve ürün kalitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olan konulardandır. Bu bağlamda, çelik malzemenin kullanımı ve kalıp tasarımının doğru şekilde yapılması, alüminyum ekstrüzyon sürecinde karşılaşılan hasarları en aza indirme ve üretim süreçlerini optimize etme potansiyeli taşımaktadır.

Bu çalışmada, ekstrüzyon prosesi sırasında hasar meydana gelen bir zıvanada öncelikle çelik hammadde mikroyapı analizi yapılarak hammadde yapısı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ardından, hasarın kaynağını belirlemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak kalıp tasarımının uygunluğu analiz edilmiştir. Bu tezde, alüminyum ekstrüzyon sürecinin temel prensiplerine ve kalıp hasarlarının türleri ile nedenlerine odaklanılmış; çelik malzemenin avantajları ve doğru kalıp tasarımının önemine dair kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, alüminyum ekstrüzyon endüstrisinde kalite ve verimliliği artırmak için çelik malzeme seçimi ve kalıp tasarımında iyileştirme yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Tasarımı iyileştirilen kalıp, Altair Inspire Extrude Metal modülü ile simülasyon analizlerine tabi tutulmuş ve sonrasında Altın Alüminyum tesisinde pratik olarak yeniden ekstrüzyon sürecine dahil edilmiştir. Bu süreçte kalıp durumu dikkatle gözlemlenmiştir. Tezde yapılan bu yenilikçi çalışmalar, alüminyum ekstrüzyon endüstrisinde karşılaşılan hasarların önceden tespit edilmesini ve önlenmesini sağlayarak, mühendisler, profesyoneller ve araştırmacılar için değerli bir kaynak olma potansiyeli taşımaktadır.

2. ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON VE KALIBI

Ekstrüzyon, alaşımlı alüminyum bir bloğun (biyet), bir pres zımbasının basma kuvvetiyle plastik deformasyona uğrayıp kalıp malzemesinin içindeki daha küçük kesitli boşluklardan geçerek arzu edilen şekle sahip bir profil haline gelmesidir. Ekstrüzyon prosesinde biyet, kovan ve kalıp direkt olarak yüksek sıcaklıklardan etkilendikleri gibi dolaylı olarak da oldukça yüksek bası kuvvetlerine maruz kalırlar. Biyetin maruz kaldığı sadece bu bası gerilmesi ile biyetin döküm yapısı değişir, bu da ekstrüzyonu alüminyum alaşımları için en uygun proseslerden biri yapar.

Ekstrüzyon, biyetin alaşımına ve işlemin yapılış şekline göre farklı sıcaklıklarda yapılabilir. Yüksek sıcaklıklardaki ekstrüzyon işleminde biyet ön ısıtmaya tabi tutulur, böylece biyet daha kolay şekil değiştirir.



Şekil 1.1. Ekstrüzyon işleminin temel şematik gösterimi

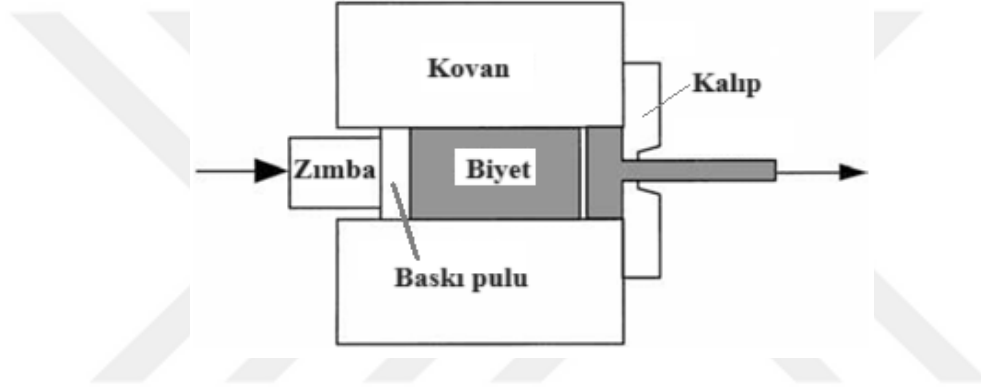
2.1. Ekstrüzyon İşleminin Sınıflandırılması

Endüstride en çok kullanılan iki temel ekstrüzyon türü, ileri (direkt) ekstrüzyon ve geri (indirekt) ekstrüzyon işlemleridir. Bunların yanında prosesin verimliliği, alüminyum biyet akışı, ürün kalitesi gibi parametreler üzerinde çalışmalar yapıldığında farklı ekstrüzyon yöntemlerinin de uygulanabildiği görülmüştür. Temel olarak ekstrüzyon yöntemleri, kalıbın sabit veya hareketli olması, ürünün ekstrüzyon yönü gibi faktörlere göre ileri ekstrüzyon, geri ekstrüzyon ve hidrostatik ekstrüzyon olarak sınıflara ayrılır.

2.1.1. İleri ekstrüzyon

İleri ekstrüzyon en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Pres kovanına yerleştirilen biyetin zımba (ıstampa) adı verilen pres elemanı tarafından pres çıkış kısmına konulan kalıp elemanının içindeki boşluklara itilmesine ileri ekstrüzyon yöntemi adı verilir.

İleri ekstrüzyonda kalıp, kovan dışında, ürün çıkış yönünde genellikle gerekli destek elemanlarıyla bir ring içinde yataklanmak suretiyle sabittir. Biyet, pres kovanının içine alınır ve zımba, kalıp girişine dayanmış biyetin arka yüzeyinden presin tonajı kadar basınç uygulamaya başlar. Kovan biyet arasındaki sürtünmeler, proses kaynaklı yüksek sıcaklıklar ve zımba basıncı sonucunda alüminyum biyet, plastik deformasyona uğrar ve yarı akışkan şekilde kalıp boşluklarından geçerek nihai şeklini alır. Direkt ekstrüzyonda kuvvetin uygulandığı yön ile ürünün presten çıkış yönü aynıdır.



Şekil 2.1. Direkt (ileri) ekstrüzyon [11]

Direkt ekstrüzyon, dikkat edilmesi gereken hassas parametreleri olması sebebiyle bazen dezavantajlı olmasına rağmen, seri üretim için oldukça verimli bir yöntemdir. Birçok parça, tek bir kalıp kullanılarak hızla ve maliyet etkin bir şekilde üretilebilir. Bu, üretim maliyetlerini düşürür ve son kullanıcılar için daha uygun fiyatlarla ürün sağlar. İstenen tasarımda ve boyutta çeşitli içi boşluklu veya dolu profiller üretilebilir.

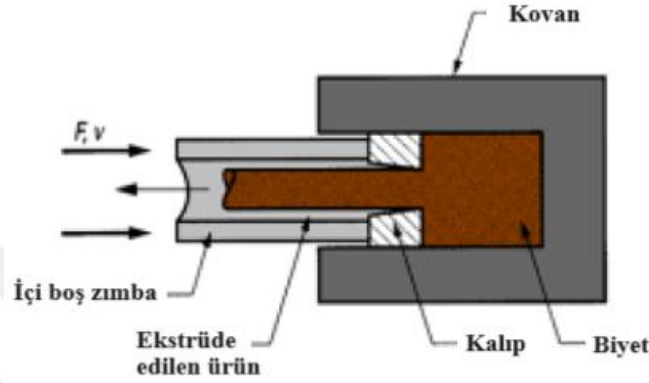
2.1.2. Geri (indirekt) ekstrüzyon

Bu ekstrüzyon yönteminde kalıp içi boş olan zımba ucuna monte edilir ve kovan içinde duran sabit biyet üzerine itilir. Alüminyum biyet kenarlardan hareket edemeyeceği için yüksek basınç kuvvetiyle kalıp boşluğundan çıkmaya başlar ve neticede de içi boş zımbanın içinden uzayarak devam eder.

Biyet bu ekstrüzyon yönteminde kovan içinde sabit olduğu için, biyet ve kovan yüzeyi arasında sürtünme olmamaktadır. Dolayısıyla direkt ekstrüzyondaki gibi, bir biyetin merkezindeki hareketinin, çeperlerine göre bağıl hareket değişiminden söz edilemez. Daha büyük ekstrüzyon

oranlarıyla daha hızlı ekstrüzyon prosesleri gerçekleştirilebilir ve nispeten düşük biyet sıcaklıklarında çalışılabilmektedir. Fakat karmaşık profiller için uygun bir yöntem değildir.

İndirekt ekstrüzyonda zımbanın ilk hareketiyle yükselen basınç kısa bir süre sonra stabil kalır. Direkt ekstrüzyonda bu durum ilk basıncın ani bir şekilde artıp sürekli azalmasıyla gözlemlenebilir. Her iki durumda ekstrüzyonun son adımlarındaki basınç artışı, alüminyum biyetin artık son kalınlığına ulaşmasından kaynaklanmaktadır.

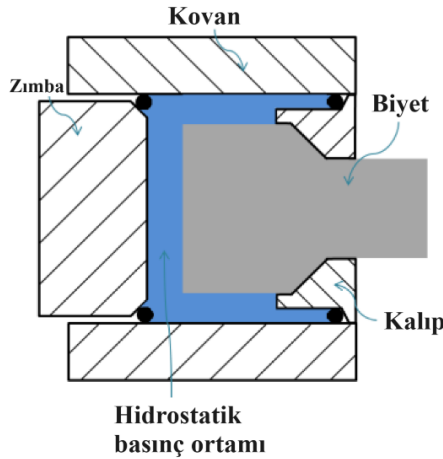


Şekil 2.2. İndirekt (geri) ekstrüzyon

2.1.3. Hidrostatik ekstrüzyon

Hidrostatik ekstrüzyon, bir malzemenin belirli bir şekle sahip bir kalıp veya matris içinden basınç altında itilerek geçirilmesi işlemidir. Bu işlem, genellikle metal, plastik veya seramik gibi malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılır.

Hidrostatik ekstrüzyon işlemi, malzemenin kalıp içine basınçlı bir sıvı yardımıyla zorlanmasıyla gerçekleşir. Bu işlem sırasında malzeme, kalıba uygulanan basınç altında şekil alır ve istenilen profil veya şekle sahip çıkıntılı olan bir çubuk veya boru haline gelir.



Şekil 2.3. Hidrostatik ekstrüzyon [12]

Hidrostatik ekstrüzyon işlemi genellikle bir hidrolik pres veya hidrolik bir basınç sistemi kullanılarak gerçekleştirilir. Malzeme, bir kalıp içine yerleştirilir ve ardından kalıp içine yüksek basınç altında sıvı pompalanır. Bu basınç altında, malzeme kalıba itilir ve kalıbın içindeki boşluğu doldurarak istenen şekli alır. Hidrostatik ekstrüzyon işlemi genellikle yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda tercih edilir, çünkü sıvı basıncı malzemenin homojen bir şekilde dağılmasını sağlar.

Bu yöntemin avantajları arasında, diğer ekstrüzyon yöntemlerine kıyasla daha karmaşık geometrilerin ve ince duvar kalınlıklarının üretilmesi bulunur. Ayrıca, malzemenin eşit bir şekilde dağılması ve daha homojen bir yapı elde edilmesi gibi özellikler de bu yöntemi tercih edilebilir kılar. Ancak, hidrostatik ekstrüzyon işlemi genellikle diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek maliyetlidir ve daha uzun üretim süreleri gerektirebilir.

2.2. Ekstrüzyonu Etkileyen Faktörler

Alüminyum ekstrüzyon prosesi, alüminyum profillerin endüstriyel üretim süreçlerinde en yaygın kullanılan yöntem olmasıyla birlikte, gerekli parametreler dikkate alınmadan üretim yapıldığında yüksek maliyetlere ve kayıplara neden olabilen hassas bir prosestir. Ekstrüzyon oranı, ekstrüzyon sıcaklığı, kalıp tasarımı, alüminyum biyet özellikleri gibi ana parametreler ekstrüzyon işlemini ilk etapta gözle görülür bir şekilde etkileyebilmektedir. Bu faktörlerin, ekstrüzyon sonrası fire oranını ve üretim maliyetlerini arttırmadan verimli bir proses gerçekleştirilmesi için iyi bilinmesi ve uygulanması gerekmektedir.

2.2.1. Ekstrüzyon türü

Temel olarak ileri ve geri ekstrüzyondan bahsedilse de seçilen malzemeye veya son ürünün kullanım yerine göre darbeli, radyal veya soğuk ekstrüzyon gibi farklı ekstrüzyon çeşitleri de bulunmaktadır.

Her bir yöntem ve tür, endüstriyel üretimdeki çeşitli uygulamalara uygun avantajlar veya dezavantajlar sunar, bu da üretim süreçlerinin etkinliğini ve son ürün kalitesini etkiler.

2.2.2. Ekstrüzyon oranı

Ekstrüzyon oranı, malzemenin giriş kesit alanı ile çıkış kesit alanı arasındaki oranı ifade eder. Bu oran, ekstrüzyon sırasında malzemenin ne kadar şekillendirildiğini ve sıkıştırıldığını belirler.

$$ER = \frac{A_B}{A_E * n} \quad (2.1)$$

Burada, A_B biyet kesit alanını, A_E profil kesit alanını (ekstrüdat alanı) ve n ise profilin kalıp üzerinde çıktığı boşluklar olarak adlandırılan figür sayısını temsil etmektedir. Uygun ekstrüzyon oranının belirlenebilmesi için n figür sayısı arttırılıp azaltılabilir. Endüstride optimum ekstrüzyon oranı aralığı, yumuşak alaşımlarda 10 ile 35, sert alaşımlarda 10 ile 100 olarak uygulanmaktadır [13].

Ekstrüzyon oranı, alüminyum profilin mekanik özelliklerini ve alüminyum profilin yüzey kalitesini etkiler. Yüksek ekstrüzyon oranları, malzemenin daha fazla şekillendirilmesi anlamına gelirken, düşük oranlar daha az şekillendirme ile sonuçlanır.

Yüksek ekstrüzyon oranları genellikle daha karmaşık şekiller elde etmek için kullanılırken, düşük ekstrüzyon oranları daha basit şekiller ve daha iyi yüzey kalitesi sağlayabilir. Fakat, ekstrüzyon oranı belirtilen aralıktan düşük olduğunda gerekli plastik gerinim sağlanamadığı için yapılan mekanik iş az olacak ve profil yapısı mekanik olarak zayıflayacaktır. Aksi durumda, oran, belirtilen aralıktan yüksek olduğunda ise plastik gerinimdeki artıştan dolayı ekstrüzyon basıncı yüksek olacaktır [14]. Yüksek basınç durumunda, yüksek sıcaklık farkları ve gerilimleri görüleceğinden, bu durumda kalıbın hasar görmesi kuvvetle muhtemeldir.

Ekstrüzyon oranı, üretim maliyetlerini etkiler. Daha yüksek ekstrüzyon oranları genellikle daha fazla işleme gerektirir ve bu da maliyetleri arttırabilir.

2.2.3. Proses sıcaklıkları

Ekstrüzyonla üretim yöntemi genel olarak sıcak şekillendirme prosesi olarak değerlendirilir. Sıcak şekillendirme, genellikle metalin plastik deformasyona uğradığı bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilen, malzemenin daha kolay şekillendirilmesini, daha karmaşık geometrilerin elde edilmesini ve iç yapının iyileştirilmesini sağlayan proses olarak tanımlanır. Dolayısıyla sıcaklık faktörü, ekstrüzyon için en önemli parametrelerden biridir. Ekstrüzyon işlemi, oda sıcaklığında kolayca şekil verilemeyen malzemelerin yüksek sıcaklık ile şekillendirildiği bir proses olması sebebiyle, şekillendirme için gerekli fazla kuvvetleri azaltabilmektedir.

Proses öncesinde, işlem sırasında sıcaklık değişimlerinin sağlıklı bir şekilde gerçekleşebilmesi ve dengesiz gerinimlerin hasara sebep olmamasını sağlamak için kovan, biyet ve kalıp ön ısıtmaya tabi tutulur. Biyetlere yaklaşık 420-470 °C'de ön ısıtma yapılır, kalıplar da yine ön

ısıtma için 450 °C'ye ısıtılmış olmalıdır ve ekstrüzyon sırasında presten çıkan profil sıcaklığının 500 °C'nin üzerinde olması gereklidir [15].

Yüksek sıcaklık ile akma gerilmesi düşerek daha kolay plastik şekil değişimi gerçekleşir. Bununla beraber yüksek sıcaklıklarda bölgesel olarak ortaya çıkan ergimeler nedeniyle ekstrüzyon hızı düşebilir. Bu sıcaklıkların oluşumu ve değişimi ile biyet sıcaklığı, biyetten kovana ısı transferi, ekstrüzyon sırasında biyet-kovan ve profil çıkışı sırasında kalıp-biyet sürtünmeleri ve deformasyon, birbirleriyle temelden ilişkilidir.

2.2.4. Ekstrüzyon hızı

Alüminyum ekstrüzyon hızı, önemli bir parametredir ve doğrudan ekstrüzyon işleminin sonuçlarına etki eder.

Ekstrüzyon hızı, malzeme akışının kontrol edilmesinde kritik bir rol oynar ve son ürünün mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Ekstrüzyon hızının artması, ekstrüzyon basıncının artmasına, malzeme akışının hızlanmasına ve dolayısıyla malzemenin şekillendirme sürecindeki deformasyon oranlarının artmasına neden olur. Aynı zamanda artan ıstampa hızıyla artan sıcaklık, gerinim miktarıyla doğru orantılıdır. İstampa ne kadar hızlıysa biyet üzerindeki gerinimin arttığı görülecektir. Bu durum, ekstrüde edilen alüminyum profilin özelliklerini etkileyerek, özellikle mukavemet ve yüzey pürüzlülüğü gibi önemli özelliklerde değişikliklere yol açabilir.

Öte yandan, ekstrüzyon hızının düşük olması, malzeme akışının yavaşlamasına ve daha kontrollü bir şekillenmeye olanak tanır. Bu durumda, ekstrüde edilen alüminyum profilin iç yapı ve yüzey kalitesi daha homojen olur. Ancak, aşırı düşük hızlar işlem verimliliğini azaltabilir ve ekstrüzyon sürecini maliyetli hale getirebilir.

Ekstrüzyon hızı, malzemenin kalıptan geçiş hızı olarak da düşünülebilir. Bu durumda, ekstrüzyon hızı, ıstampa hızı (zımba) ve malzeme akışının gerçekleştiği oran (ekstrüzyon oranı) arasındaki ilişkiye dayanır;

$$V = V_s * ER \quad (2.2)$$

Burada,

- V , ekstrüzyon hızını (m/s)
- V_s , ıstampa hızını (m/s)
- ER , ekstrüzyon oranını ifade etmektedir.

Bu bağlamda, ekstrüzyon hızının dengeli bir şekilde ayarlanması, istenen mekanik özelliklerin ve yüzey kalitesinin elde edilmesi için önemlidir. Optimum ekstrüzyon hızı, malzeme akışını kontrol altında tutarak, istenilen profilin boyutsal toleranslarını korurken, aynı zamanda işlem verimliliğini de artırabilir. Bu nedenle, alüminyum ekstrüzyonunda hız parametresinin dikkatlice belirlenmesi ve optimize edilmesi, kaliteli ve ekonomik ürünlerin üretilmesi için hayati bir öneme sahiptir.

2.2.5. Biyet malzemesi özellikleri

Ekstrüzyonda hammadde olarak kullanılacak biyetin malzeme özellikleri ekstrüzyon prosesi için temel parametrelerin başında gelir. Öyle ki, kullanılacak biyetin alaşım özelliklerine bakılarak proseste değişiklikler yapılabilir.

Kullanılacak malzemenin akma gerilmesi değeri ve plastik deformasyon görülmeye başlanan noktası, ekstrüzyon kuvvetlerinin belirlenmesinde büyük bir öneme sahiptir. Akma gerilmesi sıcaklık arttıkça azalır fakat gerinin hızı yükseldiğinde artar. Kullanılmak istenen biyet malzemeleri, gerçek çalışma şartlarında, çekme, basma, burulma gibi testlere tabi tutulduğunda akma gerilmeleri belirlenebilir.

Malzemenin akış özellikleri, ekstrüzyon sırasında malzemenin şekillenme ve akışını belirler. Malzemenin viskozitesi, akma sıcaklığı ve sıvılaşma davranışı gibi faktörler, ekstrüzyon işlemi sırasında malzeme akışını etkiler.

Sertlik, dayanıklılık ve aşınma direnci, ekstrüzyon kalıplarının ömrünü etkiler. Düşük sertlikteki biyet malzemeleri, kalıpların aşınmasına ve daha sık değiştirilmesine neden olur. Ayrıca malzemenin mukavemeti, tokluk ve diğer mekanik özellikleri, ekstrüde edilen ürünün mekanik performansını belirler. Bu özellikler, son ürünün dayanıklılığı ve uygulama alanını etkiler.

Malzemenin mikroyapısı ve tane boyutu, ekstrüzyon sırasında malzemenin deformasyon davranışını etkiler. Daha homojen bir mikroyapı, daha homojen bir ekstrüzyon sonucu sağlar.

Bu faktörler, alüminyum ekstrüzyonun gerektiği şekilde tamamlanması ve istenen ürün kalitesinin elde edilmesi için dikkate alınmalıdır. Biyet malzemesinin özelliklerinin doğru bir şekilde anlaşılması ve kontrol edilmesi, ekstrüzyon prosesinin başarılı bir şekilde yürütülmesine yardımcı olur.

2.2.6. Kalıp tasarımı

Alüminyum ekstrüzyon prosesinin temel aktörlerinden biri olan kalıbın tasarımı, ekstrüzyon prosesini direkt olarak etkileyen bir diğer unsurdur. Kalıp tasarımı, son ürünün boyutu, şekli, toleransları ve mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.

Kalıp tasarımı, alüminyum ekstrüzyonunun uygun şekilde gerçekleştirilmesi ve istenen ürün kalitesinin elde edilmesi için kritik bir rol oynar. Doğru bir kalıp tasarımı, malzemenin akışını yönlendirir, iç yapıyı şekillendirir; profilin boyutunu, şeklini ve yüzey kalitesini belirler. Ayrıca, malzemenin stres dağılımını ve deformasyonu kontrol ederek, istenen mekanik özelliklerin elde edilmesine yardımcı olur.

Kalıp tasarımı, alüminyumun kalıptan uygun ve homojen dağılarak geçmesini sağlayacak şekilde yapılmış olmalıdır. Dolayısıyla kalıp tasarımında akış kontrolünün sağlanması önemlidir ve hesaplamalar buna göre yapılır. Kalıp tasarımı, üretim sürecinin verimliliğini etkiler. Optimize edilmiş bir kalıp tasarımı, daha hızlı ve daha verimli bir ekstrüzyon işlemi sağlar.

Kalıbın nasıl tasarlandığı, üretim maliyetlerini etkiler. İyi tasarlanmış bir kalıp, işlem süresini ve malzeme kayıplarını azaltarak maliyetleri düşürebilirken, eksik veya yanlış tasarlanmış bir kalıp, proses sırasında hasar görebilir ve üretim maliyetlerinin artmasına sebep olur. Bu nedenle, kalıp tasarımı, alüminyum ekstrüzyonunda dikkatle ve profesyonelce ele alınmalıdır.

2.3. Direkt Ekstrüzyon Elemanları

Temel ekstrüzyon prosesinde olduğu gibi direkt ekstrüzyon işleminde de 3 temel eleman vardır. Herhangi bir elemanın eksikliğinde ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilemez. Bunlar; ekstrüzyon presi, alüminyum alaşımlı biyet (hammadde/kütük) ve ekstrüzyon kalıbıdır. Bunların yanında proses öncesinde ısıtma fırınları ve proses sonrasında soğutma tankları gibi ek teçhizatlar da ekstrüzyon tesislerinde kullanılmaktadır.

2.3.1. Ekstrüzyon presi

Ekstrüzyon presleri, endüstriyel üretim süreçlerinde yaygın olarak kullanılan önemli ekipmanlardan biridir. Bu presler, ısıtılmış bir metal kütüğünü belirli bir şekil veya profilde kalıplara dönüştürmek için yüksek basınç altında çalışır.

Ekstrüzyon preslerinin standart özellikleri arasında pres basıncı, pres hızı, kalıp boyutu ve malzeme akışkanlığı yer alır. Pres basıncı, presin metal kütüğü kalıba itme yeteneğini belirlerken, pres hızı üretim verimliliğini etkiler. Kalıp boyutu ve tasarımı, ürünün son şeklini belirlerken, malzeme akışkanlığı ise homojen ve kusursuz son ürün elde etmek için önemlidir.

Ekstrüzyon preslerinin çalışma prensibi, metal kütüğünün ısıtılması ve yüksek basınç altında kalıba zorlanması esasına dayanır. İlk olarak, ısıtılmış metal kütük presin besleme bölgesine yerleştirilir. Daha sonra, presin bir ucundaki hidrolik veya mekanik sistemler, metal kütüğü kalıba doğru iterek şeklini almasını sağlar. Metal kütük kalıptan geçerken şekil verilir ve istenilen profil elde edilir.

Ekstrüzyon presinin avantajları:

- Yüksek verimlilik ve üretim hızı sağlar.
- Çeşitli metal alaşımları için uygundur.
- Kalıp değişimi kolaydır ve hızlı üretimi destekler.
- Düşük işçilik maliyetleri ve yüksek hassasiyet sağlar.

Dezavantajları:

- Yüksek enerji tüketimi ve sürtünme kaybı.
- Yağlama gereksinimi ve kalite sorunları.
- Sıcaklık kontrolünün zorluğu ve malzeme homojenliği.

Ekstrüzyon presinin önemli bileşenleri aşağıdaki gibidir;

1. Ana Gövde veya Çerçeve: Ekstrüzyon presinin temel yapısal bileşenidir. Genellikle sağlam bir çelik yapıya sahiptir ve presin tüm diğer parçalarını destekler.
2. Ana Silindir: Hidrolik ya da mekanik olarak hareket ettirilen ana silindir, presin çalışması için gerekli olan basıncı sağlar. Bu basınç, alüminyum kütüğünü kalıba itmekte kullanılır.
3. Ram (Zimba/Koç): Ram, alüminyum kütüğünü kalıba iter ve istenen şekli almasını sağlar. Konteynere giren ve biyete basınç uygulayan, ucunda kuvveti iletmekte yardımcı olan dummy block olarak adlandırılan bir parça bulunan, ana silindire bağlı çelik bir çubuktur.
4. Dummy Block: Bir pres üzerinde koç gövdesine tutturulmuş, proses sırasında konteynirdaki biyeti kapatan ve metalin geriye doğru sızmasını önleyen, sıkı oturan bir çelik bloktur.
5. Kovan (Konteynir): Alüminyum kütüğünün yerleştirildiği ve kalıba doğru itildiği bir bölümdür. Ekstrüzyon presinin iç kısmında bulunur ve genellikle sağlam bir çelik

yapıya sahiptir. Alüminyum biyet, kovanın bir ucuna yerleştirilir ve presin diğer tarafından itilerek kalıba doğru hareket ettirilir. Bu sırada, biyet kovan içinde basınç altına alınır ve kalıba şekil vermek için zımba tarafından itilir. Kovan, alüminyumun kalıba doğru akmasını sağlayan bir astarla kaplanmıştır. Bu astar, alüminyumun kovan içinde istenen yönde hareket etmesini sağlar ve istenmeyen deformasyonları önler.

2.3.2. Alüminyum alaşımlı biyet

Alüminyum ekstrüzyonunda kullanılan alüminyum biyetler, genellikle özel alaşımlar içeren çubuklar veya bloklardır. Bu biyetler, ekstrüzyon işlemi sırasında istenilen şekli alacak şekilde ısıtılarak ve basınç altında kalıplara sıkıştırılarak şekillendirilir. Alüminyum ekstrüzyonunda kullanılan biyetler, çeşitli endüstriyel uygulamalara uygun özelliklere sahip olmalıdır. Bu özellikler arasında mukavemet, işlenebilirlik, korozyon direnci ve yüzey kalitesi bulunur.

Alüminyum alaşımlı biyetlerin özellikleri, kullanılacakları belirli uygulamalara bağlı olarak değişebilir. Örneğin, otomotiv sektöründe kullanılacak biyetler genellikle yüksek mukavemetli ve hafif olmalıdır. Bununla birlikte, inşaat sektöründe kullanılacak biyetlerin daha fazla korozyon direncine sahip olması ve estetik açıdan daha çekici olması istenebilir.

Ekstrüzyon işleminde kullanılacak biyetlerin üretiminde, genellikle 6000 serisi alüminyum alaşımları tercih edilir. Bu alaşımlar, magnezyum, silikon, ve bazen de diğer elementlerle alaşımlanmış alüminyum içerir. 6000 serisi alaşımlar, yüksek mukavemet, iyi işlenebilirlik ve korozyon direnci gibi özellikler sunar ve bu nedenle alüminyum ekstrüzyonunda yaygın olarak kullanılırlar.

Alüminyum ekstrüzyon biyetlerinin kalitesi ve özellikleri, üretim sürecinde kullanılan alüminyum alaşımının yanı sıra işleme ve işleme sonrası işlemlerle de belirlenir. İyi bir kalite kontrol ve uygun işleme süreçleri, istenen sonuçları elde etmek için önemlidir. Bu nedenle, alüminyum ekstrüzyonunda kullanılan biyetlerin seçimi ve işlenmesi dikkatlice yapılmalıdır.

Alüminyum alaşımı serileri, genellikle dört basit rakamdan oluşan bir kodlama sistemiyle belirtilir. Bu kodlama sistemi, alaşımın bileşimine, özelliklerine ve kullanım amaçlarına göre belirli bir alfanümerik kod sağlar. Yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımı serileri ve bunların genel özellikleri aşağıdaki gibidir:

1. 1xxx Serisi:

- Bu serideki alaşımlar saf alüminyumu temsil eder ve genellikle ticari olarak saflaştırılmış alüminyum olarak bilinir.

- Diğer alaşımlarla karşılaştırıldığında düşük mukavemete sahiptirler ancak mükemmel işlenebilirlikleri vardır.
- Genellikle soğutma ve ısıtma sistemlerinde, endüstriyel ürünlerde ve elektrik kablolarında kullanılır.

2. 2xxx Serisi:

- Bu serideki alaşımlar genellikle alüminyum ve bakır karışımlarından oluşur.
- İyi mukavemete sahiptirler, ancak korozyona karşı dirençleri düşüktür.
- Hava ve uzay endüstrisinde, özellikle uçak ve uzay araçlarının yapısal parçalarında kullanılırlar.

3. 3xxx Serisi:

- Bu serideki alaşımlar, manganez içeren alüminyum alaşımlarıdır.
- İyi işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik sunarlar.
- Genellikle sıcaklık değişimlerine karşı dirençli olarak, soğutma sistemlerinde, alüminyum tencerelerde ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar.

4. 4xxx Serisi:

- Genellikle alüminyum ve silisyumun bir kombinasyonunu içeren alaşımları temsil eder. Bu serideki alaşımlar, 4Axx şeklinde kodlanır, burada "A" harfi, alaşımın spesifik özelliklerini belirtmek için kullanılan bir harftir.
- 4xxx serisi alaşımlar, genellikle kaynak işlemleri için özel olarak tasarlanmıştır ve yüksek sıcaklık performansı, düşük erime noktası ve mükemmel kaynaklanabilirlik gibi özellikler sunarlar.

5. 5xxx Serisi:

- Bu serideki alaşımlar magnezyum içerir ve genellikle mukavemet ve korozyon direnci kombinasyonu için kullanılır.
- Denizcilik, otomotiv ve yapı endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar.

6. 6xxx Serisi:

- Bu serideki alaşımlar magnezyum ve silikon içerir.
- Yüksek mukavemet, iyi işlenebilirlik ve korozyon direnci sunarlar.

- Otomotiv parçaları, yapısal bileşenler, boru hatları ve çeşitli yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar.

7. 7xxx Serisi:

- Bu serideki alaşımlar genellikle çinko içerir ve yüksek mukavemet ve tokluk sunarlar.
- Havacılık ve uzay endüstrisinde, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılırlar.

8. 8xxx Serisi:

- Bu serideki alaşımlar diğer elementlerle karıştırılmış alaşımları temsil eder.
- Genellikle özel uygulamalarda veya deneme amaçlı olarak kullanılırlar.

2.3.2.1. 6xxx (6000) serisi ve 6063 alaşımı

Endüstride çeşitli sektörlerin hafiflik, düşük maliyet, mukavemet, korozyon direnci, boyanabilirlik, kolay şekil verilebilme, yorulma direnci gibi isteklerini çeşitli geometrilere yerine getirebilen alaşım serisi 6xxx serisi alaşımlardır.

6xxx serisi alaşımlarında, Magnezyum ve Silisyum temel elementlerdir. Bu elementlere ek olarak bakır (Cu), mangan (Mn), vanadyum (V), bor (B), bizmut (Bi), zirkonyum (Zr) ve kalay (Sn) kullanılarak alaşımın çeşitli özelliklere sahip olması sağlanır.

Alüminyum alaşımlarında, %20'ye kadar ilave edilebilen ve hiper ötektik özellik gösteren Si (silisyum), bir miktar Mg ile birlikte ısıtılma tabi tutulduğunda Al-Si alaşımlarını oluşturur. Bu alaşımların korozyon dirençleri yüksektir ve ısıtılma ile elektrik iletkenlikleri de oldukça iyidir. Genleşmeleri düşük olup, mekanik dayanıklılıkları da yüksektir. Al-Si alaşımlarının korozyon direnci yüksek olsa da, işlenebilirlikleri zor olabilir. Özellikle, silisyum miktarının artması işleme kabiliyetini azaltabilir. Döküm alaşımlarında ise, %12'ye kadar Si eklenmesi ötektik yapıyı oluşturur ve bu da alaşımın akıcılığını artırırken, yüksek sıcaklık dayanımını sağlar. Bu nedenle, Al-Si alaşımları özellikle korozyon direnci ve mekanik dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Ancak, işleme zorluğu göz önünde bulundurularak uygun proseslerle işlenmeleri önemlidir.

Magnezyum, cürufişma adı verilen bir fenomeni tetikleyerek döküm sürecini zorlaştırır. Bu durumu önlemek için, alaşıma berilyum (Be) gibi katkı maddeleri eklenir. Özellikle özel parça dökümlerinde, tekrar ergitme aşamasında dikkatli olunmalıdır çünkü malzeme oksidasyona ve magnezyum kaybına meyilli olabilir. Oksitlerin oluşumunu engellemek için, sisteme klor gazı

verilmesi gibi yöntemler kullanılabilir. Ancak, bu yöntemler sağlık ve çevre açısından olumsuz etkilere neden olabilirler. %8 magnezyum içeren alüminyum alaşımları genellikle yüksek korozyon direncine sahiptir ve anodik oksidasyon (eloksal kaplama) işlemine uygun özelliklere sahiptirler. Bu özellikler, alaşımların çeşitli uygulamalarda kullanılmasını sağlar ve dayanıklılıklarını artırır.

Bakır, alaşıma katkı sağlamak için eklenen temel elementlerden biridir. Bakır miktarı arttıkça, alaşımın akıcılığı, çekme dayanımı ve sertliği artar. Bakır, iç büzülmeleri azaltarak işlenebilme kabiliyetini artırırken, aynı zamanda döküm sürecini zorlaştırabilir, özellikle sıcak yırtılma direncini azaltabilir. Dövme alaşımlarda genellikle %3 ile %5 arasında bakır kullanılırken, bu oran %5'in üzerine çıktığında malzemenin mekanik işlenebilme özellikleri olumsuz etkilenebilir. Ayrıca, yüksek bakır içeriği korozyon direncini azaltabilir ve elektrik iletkenliğini düşürebilir. Döküm alaşımlarında ise, bakır oranı %12'ye kadar çıkabilir, ancak genellikle %10'un üzerinde kullanılması tavsiye edilmez.

Mangan, alüminyum alaşımlarında önemli bir role sahiptir. Öncelikle, tane küçültücü bir etkiye sahiptir, bu da alaşımın yapısal homojenliğini artırır. Ayrıca, alaşımın korozyon direncini etkilemeden çekme mukavemetini artırır. Bakır ve silisyum içeren alaşımlara eklenmesi durumunda, yüksek sıcaklıklarda dökülen parçaların mukavemetini artırabilir. Isıl işlemde bir etkisi olmamakla birlikte, alüminyum-mangan alaşımlarına ısıl işlem uygulanamaz. Ayrıca, mangan alaşımının ergime noktasını yükseltir. Bu nedenle, manganın dikkatlice kontrol edilmesi ve alaşımın istenilen özelliklerini korumak için uygun prosedürlerin uygulanması önemlidir.

Isıl işlem ile sertleşebilmesi, bu serinin en önemli özelliğidir. Bu sebeple, 6xxx serisinin temper gösterimleri “H” yerine, daha çok “T” ile yapılır.

Genel özellikleri:

- 6000 serisi alaşımlar, genellikle yüksek mukavemet özelliklerine sahiptir. Bu özellikleri, çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılmalarını sağlar.
- Genellikle korozyona karşı dirençlidirler. Bu özellikleri, açık hava koşullarına veya nemli ortamlara maruz kalan uygulamalarda kullanılmalarını uygun hale getirir.
- Alüminyumun doğal olarak iyi işlenebilir özelliği, 6000 serisi alaşımların da işlenebilirliğini artırır. Bu, farklı şekil ve boyutlarda ürünlerin üretilmesini kolaylaştırır. Yassı parçalarda deformasyon ile şekil verilebilir olmaları avantajlarından biridir. Ayrıca, ekstrüzyon işlemi ile bu alaşımlar tek seferde mükemmel şekil alabilirler.

- Bazı 6000 serisi alaşımlar, ısıtıl işlemlere uygun özelliklere sahiptir. Bu, alaşımın mukavemetini ve diğer mekanik özelliklerini istenen değerlere getirmek için çeşitli ısıtıl işlem yöntemlerinin kullanılmasını sağlar.
- 6000 serisi alaşımlar genellikle iyi bir kaynak edilebilirliğe sahiptir. Bu özellik, farklı parçaların birleştirilmesi gereken uygulamalarda kullanılmalarını sağlar.
- Alüminyumun doğal olarak düşük yoğunluğu, 6000 serisi alaşımların da hafif olmasını sağlar. Bu özellikler nedeniyle, özellikle taşıma ve ulaşım uygulamalarında tercih edilirler.
- Genellikle iyi yüzey işlem özelliklerine sahiptir. Bu, alaşımların boyanması, kaplanması veya diğer yüzey işlemlerine tabi tutulması gereken uygulamalarda kullanılmalarını kolaylaştırır.

Tablo 2.1. Bazı 6xxx serisi alaşımların kimyasal bileşim aralıkları [16]

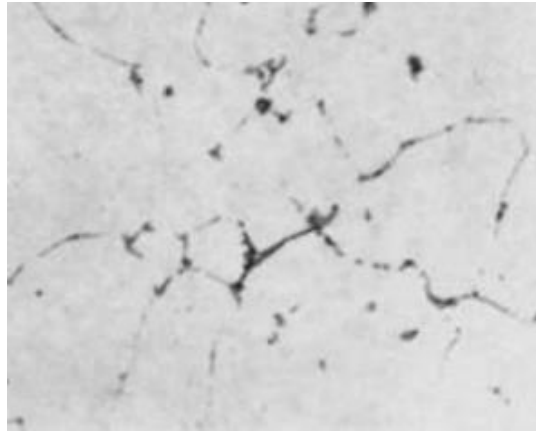
Alaşım gösterimi				Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
Sayısal gösterim	Kimyasal semboller ile gösterim														
EN 6061	AW- EN AW-Al Mg1SiCu			0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	-	0,25	0,15	-	-	Kalan
EN 6063	AW- EN AW-Al Mg0,7Si			0,20-0,6	0,35	0,10	0,10	0,45-0,9	0,10	-	0,10	0,10	-	-	Kalan
EN 6082	AW- EN AW-Al Si1MgMn			0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,20	0,10	-		Kalan

6000 serisi alaşımlarında magnezyum ve silisyum gibi ana alaşım elementlerinin yanı sıra yukarıda anlatılan diğer bazı elementlerin eklenmesiyle farklı amaçlarla kullanılan seri alaşımlar oluşturulur. Örneğin, serinin önemli alaşımlarından biri olan 6061 alaşımı, yapısında silisyumun ağırlıkça %0,4-0,8 ve magnezyumun yine ağırlıkça %0,8-0,12 bulunduğu, mükemmel kaynaklanabilirlik ve işlenebilirlik özelliklerine sahip olan alaşımdır. Ayrıca yüksek mukavemet ve korozyon direnci sunar. Yapısal çerçeveler, otomotiv parçaları, gemi parçaları, bisiklet çerçeveleri ve havacılık bileşenleri gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılır. Yine önemli alaşım örneklerinden biri olan 6082 alaşımı ise iyi işlenebilirlik

özelliklerine sahiptir ve sıcaklık değışikliklerine karşı dayanıklıdır. Özellikle havacılık, otomotiv ve denizcilik endüstrilerinde yapısal parçalar, şasi bileşenleri ve borular gibi uygulamalarda kullanılır.

Bu çalışmada kullanılacak olan 6063 alaşımı ise alüminyum ekstrüzyon için ideal alaşımlar arasındadır. Bu alaşımlar ile içi boş, yarı dolu veya tam dolu profiller üretilebilmektedir. Ekstrüzyon sektöründe sıkça üretilen raylı sistemler, merdiven korkulukları, pencere ve kapı çerçeveleri, alüminyum profiller gibi uygulamalarda kullanılır.

Üretim süreci, uygun kalitede alüminyum hurda veya ham alüminyum içeren hammadde ile başlar. Bu malzemeler, geri dönüşümlü alüminyum hurda, alüminyum külçeleri veya ham alüminyum olarak temin edilebilir. Hammadde, uygun oranlarda magnezyum (Mg), silisyum (Si) ve diğer alaşım elementleri ile karıştırılarak 6063 alaşımının istenilen bileşimini elde etmek için bir alaşım yapma işlemine tabi tutulur. Bu adım, alüminyumun istenilen mekanik ve kimyasal özelliklere sahip bir alaşım haline getirilmesini sağlar. 6063 alaşımının üretiminde genellikle döküm veya ekstrüzyon işlemleri kullanılır. Döküm yöntemi, erimiş alüminyumun bir kalıp içine dökülerek istenilen şekillerde parçaların üretilmesini sağlar. Ekstrüzyon ise ham alüminyumun ısıtılması ve yüksek basınç altında kalıptan geçirilerek istenilen boyutta üretilmesini sağlar. Döküm veya ekstrüzyon işleminden sonra, alaşımın soğutulması ve sertleştirilmesi için bir tavlama işlemi uygulanır. Bu işlem, alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirir ve istenilen sertlik ve dayanıklılığı sağlar.

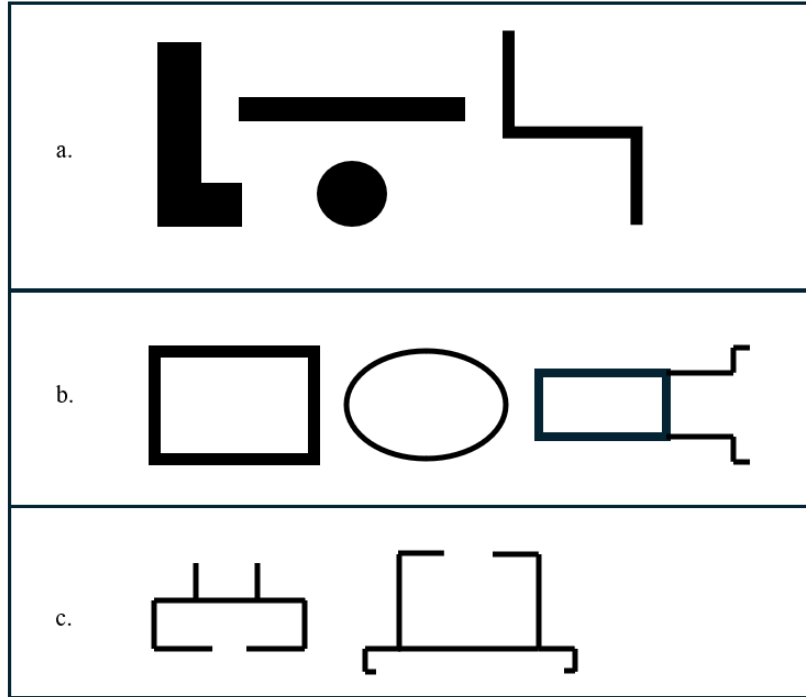


Şekil 2.4. Döküm yöntemiyle üretilmiş ingot 6063 alaşımının mikroyapısı [17]

6063 alaşımının mikroyapısı, işleme yöntemlerine, sıcaklık ve soğuk deformasyon gibi faktörlere bağlı olarak değışebilir. Örneğin, ekstrüzyon işlemi sırasında, alaşımın mikroyapısında yöneldiği bir düzene sahip olabilir. Isıl işlem uygulandığında, ikincil fazların boyutu, dağılımı ve şekli değışebilir, bu da alaşımın mekanik özelliklerini etkiler.

2.3.3. Ekstrüzyon kalıbı

Alüminyum ekstrüzyon kalıpları, alüminyum alaşımlarının belirli bir şekil veya profil kazanması için kullanılan özel kalıplardır ve profillerin üretiminde kritik bir rol oynarlar. Alüminyumun istenilen şekli almasını sağlayacak şekilde optimize edilmesi ise kalıp tasarımı ile sağlanır. Profilin karmaşıklığına ve ürünün kullanım amacına bağlı olarak, kalıp tasarımı farklılık gösterebilir. İstenilen profil şekline göre kalıplar solid ve köprülü kalıplar olarak adlandırılır. Boşluksuz ve bir çerçevesi olmayan profiller solid kalıplar ile üretilirken, içi boş profiller köprülü (zıvanası olan) kalıplar ile üretilirler.



Şekil 2.5. a. İçerisi dolu profil örnekleri b. Açık (içerisi boşluklu) profil örnekleri c. Yarı açık profil örnekleri

Solid kalıp takımları, alüminyumla ilk temas halinde uygulanan yükü azaltmak ve alüminyum akışının kalıba iletilmesine yardımcı olan ön hazne parçası, ekstrüzyon sırasında çıkan profili desteklemek için kullanılan arka parça ve profilin nihai şekle bürünmesini sağlayan havuzlu yapıdaki kalıp (dişi) parçadan oluşur. Ek olarak, ekstrüzyon hattında, kalıplara yataklık eden mühre ve mührenin destek parçası olan bolster adlı pres elemanları bulunur.

Solid kalıplarda, alüminyum sadece tek kalıptan geçerek şekil aldığı için üzerindeki basınç nispeten azdır. Havuzlu tasarlanabilmeleri sebebi ile de alüminyum akış basıncının dengeli etkimesini sağlar. Hem solid kalıplarda hem de köprülü kalıplarda sürtünme bölgesi olarak da bilinen, alüminyumun akış hızını optimize ederek yüksek yüzey kalitesine sahip profiller

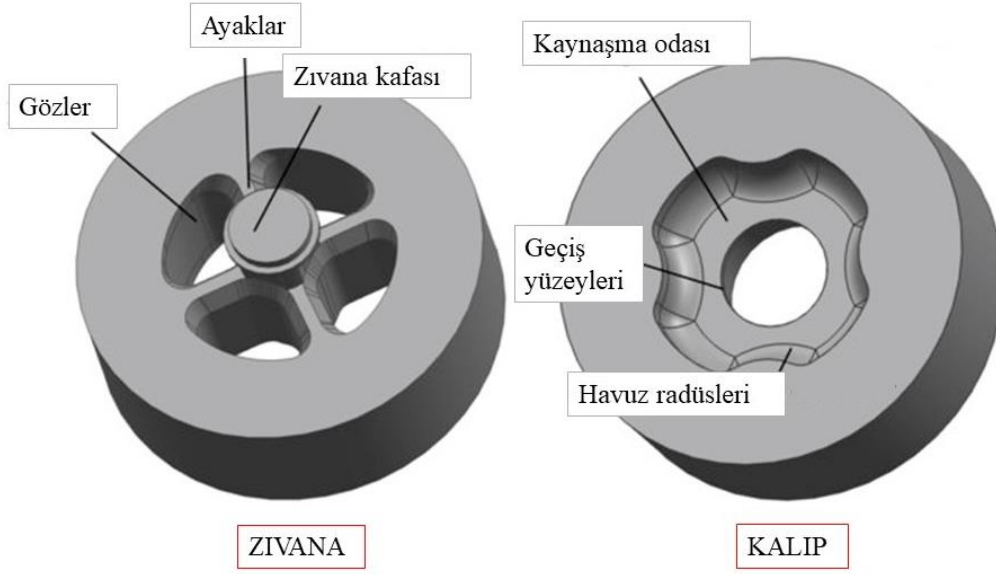
1.havuz

2.havuz

Figür

Profil boşluğu

Köprülül kalıp takımlarında ise solid kalıp takımlarına ek olarak zıvana parçası bulunur. Zıvana (erkek), kalıp (dişi) ve arka parça şeklinde monte edilerek ekstrüzyon üretimi yapılır. Zıvana parçasının erkek (kafa) kısmını ayakta tutmaya yarayan bölümlerine ‘ayak’ adı verilir ve ekstrüzyon sırasında ilk baskı yükünü karşılayan bölümlerden biri olduğu için kalıp tasarımında kritik bir rol oynar. Ayak kısımları, zıvana gövdesi ve zıvana kafası ile arasında bir köprü görevi görür. Bu nedenle zıvana barındıran bu tür kalıplara sıkça ‘köprülül kalıplar’ denmektedir.



Şekil 2.7. Bir köprülü kalıp örneği [18]

Ekstrüzyon kalıpları yüksek sıcaklık ve basınç altında alüminyumun istenilen formu almasını sağlar. Bu nedenle kalıp malzemesi seçimi çok büyük önem taşımaktadır ve genellikle yüksek sıcaklıkta dayanıklı çelikler tercih edilirler. Bu çelikler sıcak iş takım çelikleri olarak bilinir ve 540 °C gibi yüksek sıcaklıktaki aşınma direncine, basınçlara ve aşınmaya dayanıklı özelliklere sahiptir. Özellikle, DIN 1.2367, DIN 1.2343 (AISI H11), DIN 1.2344 (AISI H13) gibi sıcak iş takım çelikleri, alüminyum ekstrüzyon kalıplarında sıkça kullanılan malzemelerdir. Isıl işlem ve nitrasyon gibi işlemler ile yüzeyleri iyileştirilebilir.

1.2367 çeliği, genellikle metal enjeksiyon kalıplarında, preslerde gömlek olarak veya cıvata ve somun gibi elemanların imalatında kullanılır. Yüksek aşınma direnci sunar ve ayrıca yüksek derecede parlatılabilir. Krom-molibden içeriği yüksektir ve iyi bir sertleşebilirlik sergiler. Otomotiv, beyaz eşya-elektronik, demir çelik gibi endüstrilerde tercih edilir.

Tablo 2.2. 1.2367 malzemesinin kimyasal bileşimi [19]

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V
0.40	0.50	0.40	0.02	0.01	5.10	3.10	0.50

1.2343 çeliği, yüksek oranda sıcak işleme direnci sağlayan sıcak iş takım çeliği olarak bilinir. Bu çelik, sıcak işleme kalıpları, dövme kalıpları ve büyük çaptaki ekstrüzyon kalıpları gibi uygulamalarda kullanılır. Krom oranı yüksektir, 1.2367 sıcak iş takım çeliğine benzer olarak otomotiv ve demir-çelik endüstrisinde kullanılır. 54 HRC'ye kadar sertleştirilebilir.

Tablo 2.3. 1.2343 malzemesinin kimyasal bileşimi [20]

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.33-0.41	0.80-1.20	0.25-0.50	4.80-5.50	1.10-1.50	0.30-0.50

Alüminyum ekstrüzyon endüstrisinde en çok tercih edilen kalıp malzemesi olarak bilinen 1.2344 çeliği ise, yüksek performanslı, aşınma dayanımı yüksek, iyi tokluğa sahip bir sıcak iş takım çeliğidir. Yüksek basınçlı dökümde ve metal enjeksiyon preslerinde kullanılan kalıp, piston, yolluk, gömlek, matris ve zimba gibi bileşenlerde, aynı şekilde plastik enjeksiyon makinelerinde salyangoz, silindir ve gömlek olarak nitrasyon işleminden geçirilerek kullanılır. Aşındırıcı plastik kalıplar ve küçük dövme kalıplar gibi özel uygulamalarda da bu kalite standartları tercih edilir. Nitrasyon işlemine uygun bir çelik malzemesidir. Molibden ve Vanadyum elementleri 1.2344 çeliğini daha dayanıklı ve güçlü bir hale getirir. Krom elementi, çeliğin yüksek sıcaklıklarda kullanıldığı işlemlerde yumuşamasına karşı bir direnç sergiler.

Tablo 2.4. 1.2344 malzemesinin bir çalışmada kullanılan kimyasal bileşimi [21]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0.405	0.87	0.31	0.021	0.002	4.90	1.25	0.89

Ekstrüzyon işlemi sırasında gözlenen 570 °C gibi yüksek sıcaklıklara karşı direnç gösterebilmek ve çalışma ömrünü arttırabilmek için kalıp çeliğine sertleştirme, nitrasyon gibi yüzey işlemleri uygulanabilmektedir. Isıl işlem prosesi, malzemelerin veya ürünlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmek ve güçlendirmek için uygulanan ısı bir prosestir.

Metalik malzemelerin ısı işlemi, malzemenin ergime noktasına bağlı olarak değişen yüksek sıcaklıklara ısıtılması ve ardından kontrollü bir şekilde soğutulmasıyla gerçekleşir. Bu işlem sonucunda malzeme hem sertleşebilir hem de yumuşayabilir, bu da malzemenin özelliklerinde değişikliklere neden olur. Isıl işlem ile sertlik, mukavemet, aşınma direnci, korozyona dayanımı gibi mekanik özellikler geliştirilebilir. Sertlik değeri arttığında doğru orantılı olarak malzemenin kırılabilirliği de artar. Bu nedenle ısı işlem prosesi sırasında zaman, sıcaklık ve atmosferin kontrollü bir şekilde prosese dahil edilerek istenilen sertlik değeri elde edilir.

Standartlara uygun ve ısı işleme elverişli kompozisyonlara sahip çeliklere ısı işlem prosesi ile istenilen mekanik özellikler kazandırılabilir. Isıl işlemin ve sonrasında elde edilen mikroyapının, bir çeliğin mekanik ve termal özelliklerine olan etkisi, çeliğin kalitesi kadar önemlidir ve son derece belirleyicidir.

Özellikleri detaylıca bilinen malzemeyi geliştirmek için uygulanması gereken ısıtım işlem türü belirlenebilir.

Temel ısıtım işlem türleri şu şekilde sıralanabilir:

- Sertleştirme: Malzemenin yüksek sıcaklıklarda ısıtılmasının ardından ani bir şekilde soğutularak sertlik ve dayanıklılık kazandırma işlemidir.
- Temperleme (Meneviş): Malzemeyi yavaşça soğutarak iç gerilmeleri gidermek ve daha yumuşak bir yapı elde etmek amacıyla uygulanan bir işlemdir.
- Normalleştirme: Malzemenin homojen bir şekilde ısıtılmasının ardından havada yavaş soğutmaya tabi tutulması ve bunun sonucunda yapısal bir denge sağlanan bir işlemdir.
- Tavlama: Sert bir malzemeyi belirli bir sıcaklığa kadar ısıtıp bu sıcaklıkta bir süre beklettikten sonra yavaşça soğutma işlemine denir.

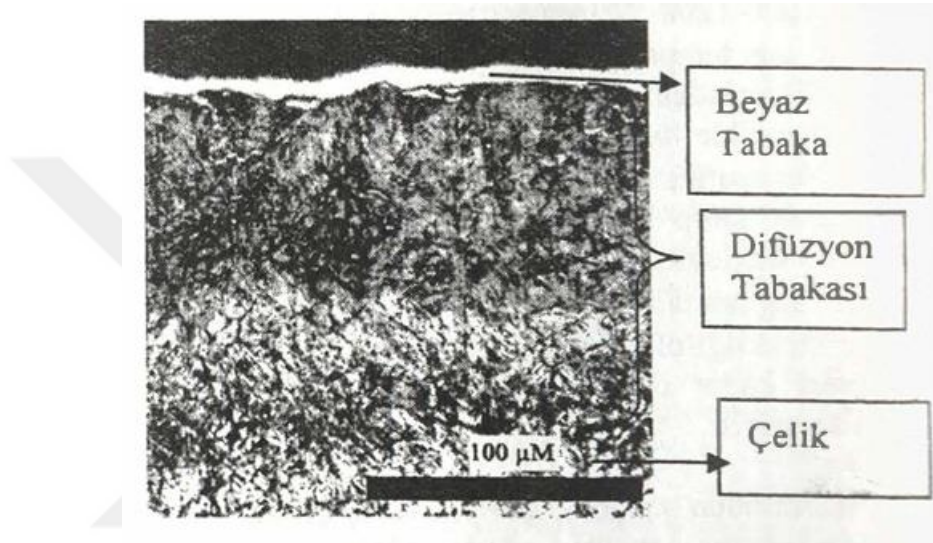
1.2344 çeliğinin ısıtım işlem fırınlarında sertliği 52-54 HRC değerlerine ulaşabilir. Sertleştirilmiş 1.2344 çeliğinin mikroyapısı martenzitik bir yapıya sahiptir [22]. Isıtım genleşme katsayısı 10,8 ve 13,5 arasında değişirken, ısıtım iletkenliği 25,6 ile 29,4 değerleri arasındadır. Endüstride ısıtım işlem prosesinde yumuşak tavlama 750-800°C arasında, gerilim giderme tavlama 600-650°C arasında ve sertleştirme işlemi ise 1020-1060°C arasındaki sıcaklıklarda yapılmaktadır [23].

Ekstrüzyon kalıp endüstrisinde, pres hattındaki sıcaklık döngülerinin kalıbın çalışma yüzeyindeki çatlama ve kırılmaların en belirleyici faktörü olduğu bölgelerde; malzeme özelliklerinin optimize edilmesi son derece kritik bir husustur. Sıcak iş takım çeliklerinde, çelik kalitesi kadar ısıtım işlemin ve bu proses sonrasında elde edilen mikroyapının mekanik ve termal özelliklere etkisi son derece önemlidir.

Ekstrüzyon kalıbının aşınmaya direncini arttıran ve yüzey özelliklerini geliştiren proseslerin en önemlilerinden biri nitrasyon işlemidir. Nitrasyon, üretimi tamamlanmış veya yarı mamul malzemelerin yüzey özelliklerinin gelişmesini sağlayan termokimyasal işlemlerdir. Diğer yüzey sertleştirme işlemlerinden nispeten düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 500-570°C) gerçekleştirildiği için çelik malzemelerin yapısı faz dönüşümü geçirmez ve çarpılma riski düşer [24].

Temelde nitrasyon işlemi, çeliğe azot difüzyon etmektir. Azotun çelik yüzeyine difüzyon edilmesiyle birlikte, yüzeyde mikron seviyesinde sert ve beyaz bir tabaka oluşur ve bu tabaka aşınmaya karşı yüksek mukavemete sahiptir. Beyaz tabakanın altında nitrürleme işleme sonucu nispeten daha kalın bir difüzyon (geçiş) tabakası oluşur ve difüzyon tabakasının altında da

malzemenin çekirdek yapısı bulunur. En üst yüzeydeki beyaz tabakada azot oranı maksimum olması nedeniyle, bu tabaka gevrek ve kırılgandır. Nitrasyon prosesi sırasında en dış tabakada oluşan beyaz tabakada, ϵ -Fe₂₋₃N (hegzagonal sıkı paket, HSP) ve γ' -Fe₄N (yüzey merkezli, YMK) demir nitür fazları iki farklı kristal kafes yapısına sahiptir. Bu farklı yapılar gerilim alanlarının oluşmasına neden olabilir ve herhangi bir yüklenme durumunda mikro çatlakların oluşumuna ve ilerlemesine zemin hazırlayabilir [25]. Alt tabakalara (malzemenin iç kısımlarına) doğru azot oranı azalır, dolayısıyla malzemenin çekirdek sertliği beyaz tabaka sertliğinden oldukça düşüktür.



Şekil 2.8. Nitrürleme tabakaları [26]

Çeliklere uygulanan nitrasyon işlemi genellikle üç ana türe ayrılabilir:

- Gaz nitrasyonu: Bu yöntemde, çelik parçaları özel bir nitrasyon fırınında belirli bir sıcaklıkta tutulur ve azot gazı ile temas ettirilir. Bu işlem sırasında, çelik yüzeyinde azotun difüzyonu gerçekleşir ve nitrürlenme oluşur. Gaz nitrasyonu, yüksek yüzey sertliği ve aşınma direnci sağlar.
- Tuz banyosu (sıvı nitrürleme): Bu yöntemde, çelik parçaları belirli bir sıcaklıkta erimiş tuz banyosuna daldırılır. Bu tuz banyosu, genellikle nitritler ve nitratlar içerir. Metal parçalar bu ortamda belirli bir süre bekletildikten sonra çıkarılır ve soğutulur. Bu işlem sırasında, çelik yüzeyi nitrürleme ile kuvvetlendirilir.
- İyon nitrasyonu: Bu yöntemde, çelik yüzeyi, bir plazma veya iyonize gaz ortamında yüksek enerjili iyon bombardımanına maruz bırakılarak işlenir. Bu işlem sırasında, yüzeyde istenilen nitür tabakası oluşturulur. İyon nitrasyonu, yüksek sertlik ve aşınma direnci sağlar ve gaz veya sıvı nitrasyonuna kıyasla daha kısa sürede gerçekleştirilebilir.

3. HASAR ANALİZİ

3.1. Hasarın Nedenleri

Belirli bir malzemeden üretilmiş ürünler veya yarı mamullerin, proses tipine göre maruz kaldıkları yüksek sıcaklık, basınç, mekanik işlemler gibi etkiler sonucunda bütünlüğü bozulabilir veya işlevselliklerini kaybedebilirler. Bu durum malzeme üzerinde çatlama, kırılma, paslanma, aşınma gibi hasarların görülmesine neden olur.

Mühendislik dizaynlarında rastlanan hasar deformasyonlarının nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Tasarım hataları, karmaşık geometriye sahip parçaların tasarlanması sırasında hesaplanması çok mümkün olmayan gerçek gerilme değerlerinden kaynaklanan yüksek gerilmeler veya yüksek seviyede gerilme birikintileri nedeniyle oluşabilir. Ayrıca, uygun olmayan tasarım ve kullanım koşulları için malzeme seçimi de hasara yol açabilir. Örneğin, aşırı yüklemeler sonucunda ortaya çıkan statik kırılma, kırılma, kırılma ve yorgunluk hasarı gibi durumlar buna örnektir.
- Üretim yöntemi hataları, parçanın tasarımına son şeklinin verilmesinde kullanılan talaşlı imalat, döküm, kaynak gibi üretim süreçlerinde meydana gelen hasarı ifade eder. Bu hatalar genellikle kimyasal kompozisyonundan kaynaklanan hatalar, döküm hataları, mekanik işlem hataları, talaşlı imalat hataları, kaynak hataları, ısıtım işlem hataları, montaj hataları gibi örneklendirilebilir.
- Tasarımda planlanan çalışma şartları dışında çalışması sebebiyle, işletme süresi boyunca malzemenin hasar görmesi, orijinalliğini ve özelliğini yitirmesine neden olur. Bu tür hasarlara, korozyon, aşınma, radyasyon, kimyasal deformasyon gibi hasarlar örnek olarak verilebilir.

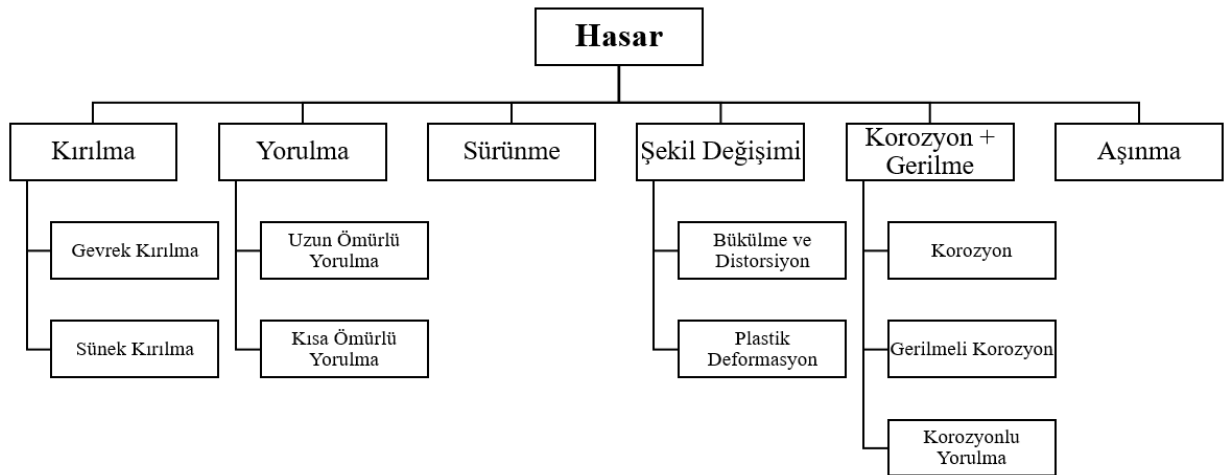
Hasarların nedenleri, farklı mühendislik çalışma alanlarına göre farklılık göstermektedir. Tablo 3’de maden, metalürji, kimya ve imalat sanayilerinde karşılaşılan hasarların nedenleri ve yüzde oranları görülebilir.

Tablo 3.1. Çeşitli endüstrilerde karşılaşılan hasarların nedenleri ve yüzde oranları [27]

Hasar sebepleri	%
Yanlış malzeme seçimi	38
Üretim hatası	15
Hatalı ısıtıl işlem	15
Tasarım hatası	11
Beklenmeyen çalışma koşulları	8
Uygun olmayan ortam koşulları	6
Kalite kontrol eksikliği	5
Malzeme karışması	2

3.2. Hasar Tipleri

Temel hasar tipleri Şekil 3.1’de gösterildiği gibidir.



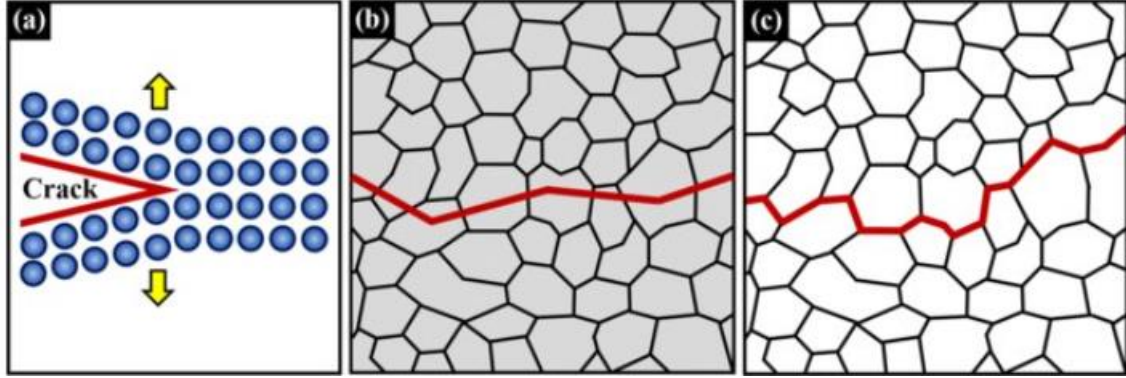
Şekil 3.1. Hasar türleri

Malzemede oluşan bir hasar başka hasarları tetikleyebilir, dolayısıyla birden fazla hasar tipine rastlanabilir. Bu sebeple, yükleme tipi, gerilme cinsi, sıcaklık, çalışma ortamı ve çalışma süresini analiz yapılırken göz önünde bulundurmak gereklidir.

3.2.1. Kırılma

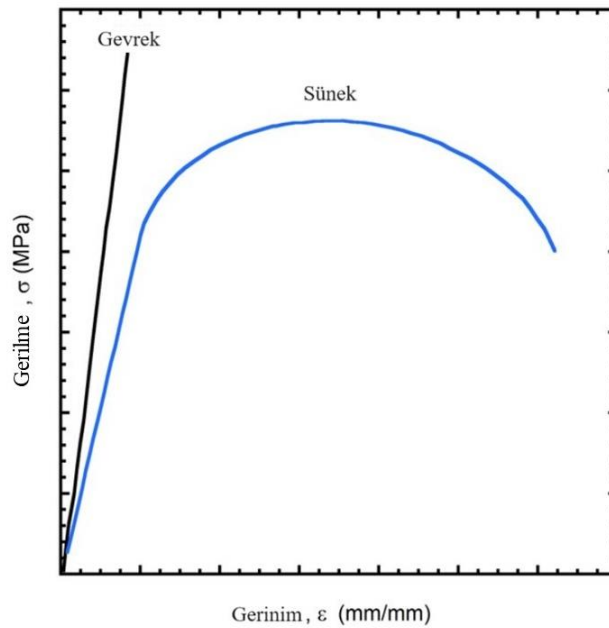
Malzemenin kendi akma sınırı değerinden fazla yüke maruz kalmasıyla iki parçaya ayrılacak şekilde plastik deformasyona uğramasına kırılma hasarı denir. Maruz bırakılan gerilme, sıcaklık ve deformasyon hızına göre kırılma karakteristikleri ortaya çıkar. Çatlağın

başlamasıyla kırılma başlar ve çatlakın kritik bir noktaya kadar ilerlemesiyle de kırılma gerçekleşir. Kırılmanın temelini oluşturan çatlak ilerlemesi ise ayrılma ile, mikro boşluk birleşmesiyle ve taneler arası olmak üzere 3 mekanizmadan oluşmaktadır.



Şekil 3.2. a. Atomik seviyede ilerleyen çatlak ucu, b. Çatlakların taneler üzerinden ilerlemesi, c. Çatlakların tane sınırları boyunca ilerlemesi [28]

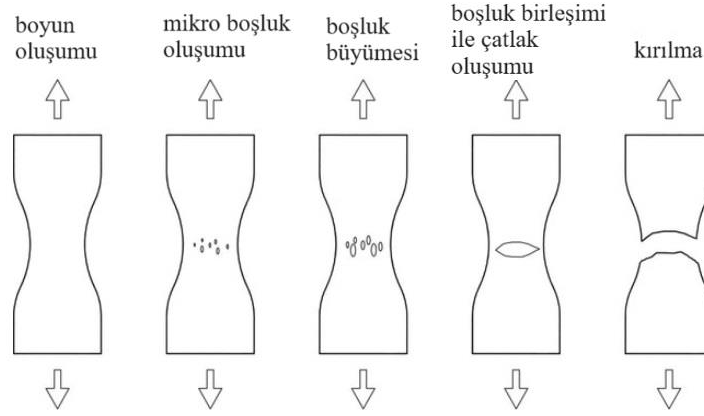
Kırılma, hasar oluşmasına kadar geçen sürede ne kadar plastik deformasyona uğradığına bağlı olarak gevrek ve sünek kırılma şeklinde görülür. Şekil 3.3’de sünek ve gevrek malzemeler için gerinim-gerilme diyagramı görülebilir.



Şekil 3.3. Gerilme-gerinim eğrisi [29]

Sünek kırılmada malzeme, esneklik gösterir ve büyük miktarda deformasyon altında bile şeklini koruyabilir. Bir malzeme çekilme, bükülme veya gerilme gibi kuvvetlere maruz kaldığında sünek kırılma, malzemenin bu kuvvetlere karşı dayanıklılığını ifade eder. Genelde malzemenin sünek kırılmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi oldukça büyük enerji gerektirir, dolayısıyla

sünek kırılma için gerilme-gerinim eğrisi altındaki alan büyük olacaktır. Kırılma gerçekleşmeden önce aşırı plastik deformasyon ve düşük hızda çatlak ilerlemesi ile o bölgede boyun verme gözlenir. Kırılma gerçekleştiğinde ise yırtılmaya benzer kopma yüzeyi gözlemlenebilir.



Şekil 3.4. Sünek kırılma mekanizması [30]

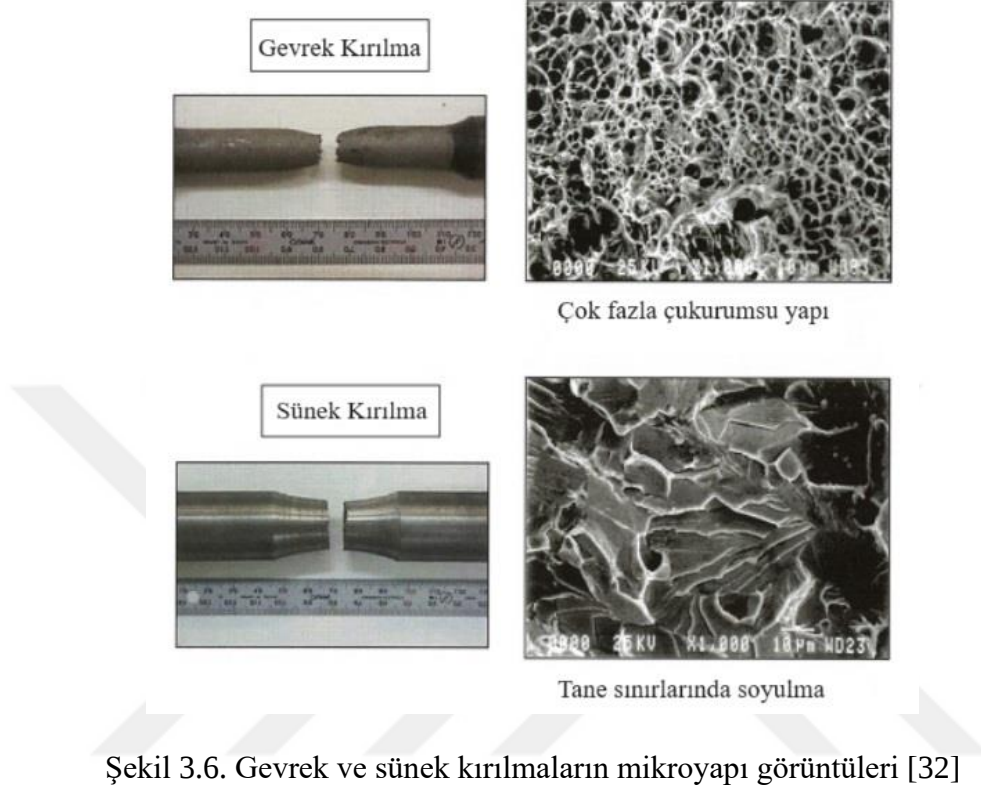
Gevrek kırılma, bir malzemenin ani ve belirgin bir şekilde kırılması veya çatlaması durumunu ifade eder. Bu kırılmada genellikle deformasyon veya enerji Emilimi çok azdır. Gevrek kırılmanın gerçekleştiği malzemeler genellikle düşük süneklik özelliklerine sahiptir ve kırılgan olarak tanımlanır.



Şekil 3.5. a. Orta derece sünek malzeme kırılma mekanizması b. Gevrek malzeme kırılma mekanizması [31]

Gevrek kırılma, malzemenin yapısına ve bileşimine bağlı olarak ortaya çıkar. Genellikle kristal yapıdaki düzensizlikler, çatlaklar veya mikroçatlaklar nedeniyle meydana gelir. Bu çatlaklar, malzeme üzerindeki stres konsantrasyonunu artırabilir ve küçük bir kuvvet uygulandığında

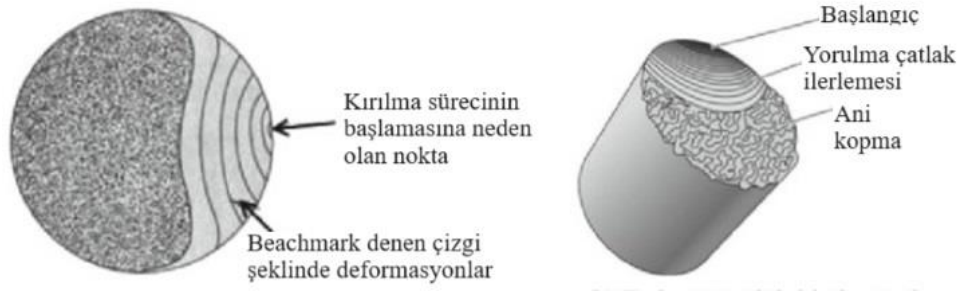
hızla yayılarak malzemenin kritik noktadan ani kırılmasına neden olabilir. Şekil 3.5'te gevrek kırılma mekanizmaları ve Şekil 3.6'da ise gevrek ve sünek kırılan malzemelerin mikroyapıları görülebilir.



3.2.2. Yorulma

Pratikte kullanılan birçok makine parçası ve yapı elemanı, tekrar eden yüklere ve titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu şartlar altında çalışan metal parçalarda, gerilmeler malzemenin statik dayanım sınırının altında olsa bile, belli bir döngü sayısından sonra yüzeyde çatlak oluşumu ve sonrasında kopma meydana gelmesine yorulma adı verilir.

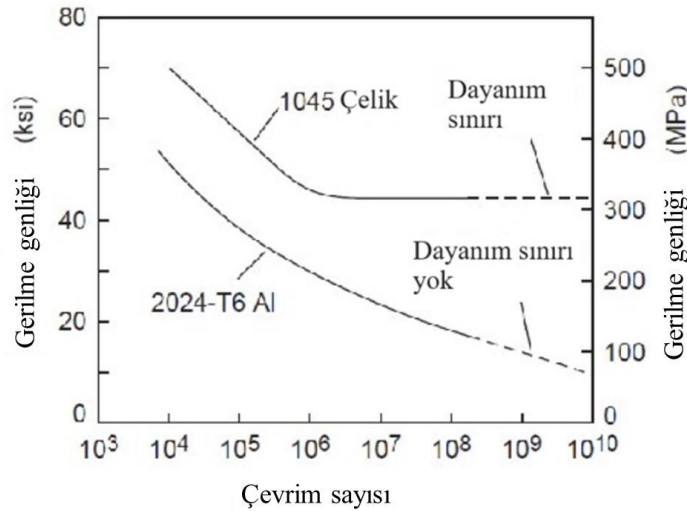
Yorulma nedeniyle oluşan hasar, gevrek kırılmadaki gibi ani gerçekleşir. Şekil 3.7'de yorulma nedeniyle oluşan hasar yüzeyi verilmiştir. Şekilde görüleceği gibi, hasar çoğunlukla yüzeyde bulunan veya oluşan kusurlu bir noktadan oluşmaya başlar, çatlak ilerlemesi ile devam eder ve sonuç olarak mevcut gerilme altında, kritik çatlak uzunluğu değerine ulaştığında ise oluşan çatlak hızlı bir şekilde ilerler ve ani kırılır.



Şekil 3.7. Yorulma kırılma yüzeyinin şematik gösterimi [33]

Malzemenin tekrar eden yüklemelere maruz kaldığında meydana gelen yorulma hasarını gösteren grafiklere gerilme-çevrim sayısı eğrileri denir. Bu eğriler genellikle gerilme-yük döngü sayısını (N) ve gerilme seviyesini (σ veya S) temsil eder. Yorulma çevrim eğrileri, malzemenin yorulma özelliklerini değerlendirmek ve tahmin etmek için kullanılır.

Gerilme-yaşam ($S-N$) eğrileri, belirli bir gerilme seviyesine (S) karşı malzemenin dayanıklılığını gösteren çevrim sayısı (N) verilir. Genellikle logaritmik ölçekte çizilen, malzemenin belirli bir gerilme seviyesinde ne kadar süre dayanabileceğini gösteren eğridir. Şekil 3.8’de bir alüminyum alaşımı ve bir çeliğin $S-N$ eğrisi verilmiştir.



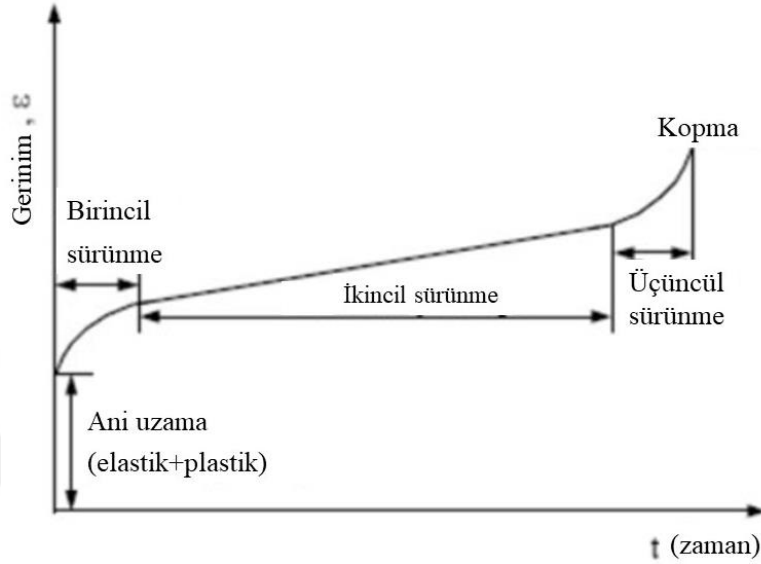
Şekil 3.8. Çelik ve alüminyum yorulma davranışının karşılaştırılması [34]

Yorulma dayanımını, gerilme, çentik etkisi, yüzey, tane boyutu, sıcaklık, korozyon, alaşım kompozisyonu gibi faktörler etkilemektedir.

3.2.3. Sürünme

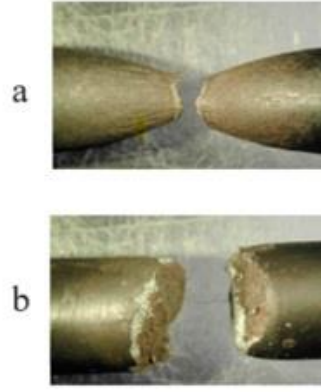
Bir metalin uzun süre boyunca belirli bir yük altında plastik deformasyona uğraması sürünme hasarına sebebiyet vermektedir. Metal, bu süreçte yavaş yavaş şekil değiştirir fakat yük

kaldırıldığında eski şekline geri dönmez. Sürünme genellikle yüksek sıcaklıkta çalışan metallerde gözlemlenir. Sürünme hasarında, tane sınırlarındaki boşluk oluşmasını, hasar gerçekleşen bölgede aşırı deformasyonu ve çatlakları, karakteristik olarak görmek mümkündür. Sürünme eğrisi Şekil 3.9’da görülebilir.



Şekil 3.9. Sürünme eğrisi [35]

Şekil 3.9’da görüldüğü üzere sürünme eğrisinin ilk bölgesi olan birincil sürünmede, uygulanan yük ile malzeme uzamaya başlar ve yoğun dislokasyon sebebiyle deformasyon sertleşmesi görülür ve sürünme hızı azalır. Yüksek sıcaklığın neden olduğu iç gerilim gidermeler ile de kendine gelme (toparlanma) gerçekleşmektedir. İkincil sürünme bölgesinde, sürünme oranı neredeyse sabittir. Dislokasyon kayması ve tırmanması ile dislokasyon yığılması dengelenir ve gerinim sabit bir şekilde artar. Bu bölgede pekleşme hızı ve kendine gelme hızı eşittir. Üçüncül sürünme bölgesinde ise sürünme hızında artış görülür ve iç yapıda boşluk oluşumundan dolayı malzeme boyun vermeye başlar ve gerilme artışı gerçekleşir. Artan plastik deformasyon hızı sonucu, bu bölgeden sonra kopma meydana gelir. Şekil 3.10’da sürünme şartları altında gevrek ve sünek kırılan çelik çubukların kırılma yüzeyleri verilmiştir.



Şekil 3.10. a. 550 C'de yüksek gerilimde test edilen bir çelik düz çubuğun sünek kırılması (kopma süresi 100 saat) ve b. 650 C'de düşük gerilimde aynı çeliğin gevrek kırılması (kopma süresi 20.014 saat) [36]

3.2.4. Aşınma

Metallerde aşınma, yüzeylerin teması ve sürtünmesi sonucunda malzemenin yüzeyinden parçacıkların kopması veya yüzey bozulmasıdır. Bu süreç, genellikle metal parçaların birbirine temas ettiği ve sürtündüğü mekanik sistemlerde meydana gelmektedir. Aşınmada malzeme kaybı, sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle malzeme yüzeyinin bölgesel erimeler sonucu erozyona uğraması, kimyasal reaksiyonlar sonucu yüzeyin aşınması veya yüzeyden küçük parçaların ayrılması şeklinde gerçekleşebilir.

Aşınma mekanizmaları türleri aşağıdaki gibidir:

- Adezyon (Yapışma) Aşınması: Birlikte çalışarak doğrudan temas eden iki metalin, bu temas sebebiyle bir yüzeyden diğerine metal parçaları transfer etmesine ve kaymasına adezyon aşınması denir. Adezyon aşınması daha çok dişli elemanlar, rulmanlar, birbirini tetikleyen motor bileşenleri gibi parçalarda görülür. Aşınmayı önlemek için bu parçaların sürekli yağlanması gerekir. Düz yüzeyli elemanlar kullanmak veya metallerin birbiri ile temaslarından kaçınmak için farklı yöntemlere başvurmak alınan alternatif tedbirlerdendir.
- Abrazif (Aşındırıcı) Aşınma: Metal yüzeylerden, metalin kendisinden daha yüksek sertliğe sahip malzemelerle temas etmesi veya basınç etkisinde olması nedeniyle parça kopartılmasına abrazif aşınma denmektedir. Bu aşınmayı önlemek için metal yüzey sertliği arttırılabilir ya da aşındırıcı malzeme ortamdan uzaklaştırılabilir.
- Korozyon Aşınması: Metalin kimyasal ortam veya yüzeyler ile reaksiyona girmesi ve sonrasında yüzeyde reaksiyon ürünlerinin oluşturduğu tabakanın çeşitli aşınmalar

sebebiyle hasara uğramasına korozyon aşınması denir. Deniz suyu, asidik veya bazik çözeltiler gibi agresif ortamlarda görüleceği gibi, açık havada veya nem ile görülen korozyonlar da mevcuttur. En bilinen korozyon aşınması, pas olarak da bilinen, demir malzemenin oksitlenmesidir. Endüstride korozif aşınmadan kaçınmak için yüzey kaplamaları yapmak, malzemeyi uygun ortamlarda stoklamak veya reaksiyon oluşturmeyen alaşımlarla çalışmak, alınan tedbirlerdendir.

- **Erozyon Aşınması:** Hızlı hareket eden sıvı veya gaz akışın içerisinde sert partiküllerin kayması sonucu metal yüzeyine çarparak parça koparması ile erozyon aşınması meydana gelir. Parçaların, akışın hızı geldiği bölgelerinin aşınması, kanal oluşumu görülmesi, çatlama veya yuvarlanmalar gözlenmesi erozyon aşınmasının meydana getirdiği hasarlanmalardır. Pompalar, boru tesisatları, türbinler gibi sistemlerde oldukça yaygındır.
- **Yorulma Aşınması:** Tekarlı yüklemeler veya titreşimler sonucunda malzemenin kayma gerilmesinin aşıldığı noktalarda deformasyon ve dislokasyona bağlı çok küçük boşluklar ortaya çıkar ve bu boşlukların ilerleyerek yüzeyde oluşturduğu çatlaklar sonrası mazleme kaybının oluşması malzemenin yorulma aşınmasına uğradığını gösterir. Dişli, rulman gibi döner parçalar, yay ve aksların yüzeylerinde görülür.
- **Kavitasyon Aşınması:** Sıvıların düşük basınç altında buharlaşması ve yüksek basıncın etkisiyle buharlaşan kabarcıklara süratle su dolması ve ardından büyük bir gürültüyle patlaması sonucu metal yüzeyinin hasar görmesi, kavitasyon aşınmasıdır. Genellikle, pompa, gemi pervaneleri ve türbinlerde gözlemlenir.

3.2.5. Korozyon

Metallerde korozyon hasarı, metal yüzeylerinin kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda bozularak dayanıklılığını yitirmesiyle meydana gelir. Korozyon, metallerin çevresel etkenler nedeniyle doğal olarak bozunması süreci olarak tanımlanır ve bu süreç genellikle oksijen, su, tuzlar ve asitler gibi maddelerin varlığıyla çok kısa sürede metal yüzeyinde kendini gösterir. Korozyon sonucu, yüzey bozulması, mekanik dayanımın azalması, arızalar, delik ve çatlak oluşumu gibi durumlar ortaya çıkabilir.

Korozyon hasarını önlemek için korozyona dirençli malzeme seçimi, koruyucu kaplamalar kullanmak, korozyon inhibitörleri, katodik koruma, düzenli bakım ve izleme gibi tedbirler alınabilir.

Korozyonun türleri ve neden olduğu hasar çeşitleri aşağıda detaylandırılmıştır:

- Genel (Homojen) Korozyon: Korozyonun tüm metal yüzeyini kaplayacak eşit bir şekilde meydana gelmesidir. Metal yüzeyde incelmeye neden olan ve geniş alan kaplayan bir hasarlanma şeklidir. Genellikle paslanma olarak gözlemlenir ve büyük hasarlara sebep olmazlar, fakat genel korozyon sonrası bir aşınmaya uğradığında nispeten büyük şekil değişimleri meydana gelebilir.



Şekil 3.11. Genel korozyona uğramış boru hattının cidar incilmesi nedeniyle hasarlanması [37]

- Lokal (Yerel) Korozyon: Metalin belirli bölgelerde korozyon yoğunluğu nedeniyle hasar görmesidir. Bu tür korozyonlar, yüzeyde derin oyuklar ve delikler oluşturmaları sebebiyle daha ciddi hasarlara neden olurlar.
- Çukurlaşma (Pitting) Korozyonu: Metal yüzeyinde küçük ama derin deliklere neden olan korozyon tipidir. Yüzeyin altındaki yapıyı zayıflatması ve hasar tespiti zor olması nedeniyle en problem yaşanan korozyon türüdür.
- Aralık (Crevice) Korozyonu: Metal-metal veya metal-metal olmayan yüzeyler arasında dar ve kapalı alanlarda meydana gelen korozyondur. Contalar, cıvatalar veya bağlantı noktaları arasında oluşur.
- Taneler Arası (Intergranular) Korozyon: Metalin tane sınırları boyunca meydana gelir. Özellikle kaynaklı bölgelerde yaygın görülür ve metalin mekanik özelliklerini ciddi bir şekilde zayıflamasına neden olur.
- Erozyon Korozyonu: Akış hızı yüksek sıvıların metal yüzeyine çarparak oluşturduğu korozyondur. Metalin mekanik aşınması ve kimyasal bozunmanın birlikte neden olduğu bir durumdur.

- Gerilim Korozyonu: Malzemenin korozyona maruz kaldığı süreçte dış gerilme olmadan düşük çekme gerilmesine sahip olması nedeniyle hasar görmesidir. Çatlak oluşumu ve sonrasında çatlak ilerlemesi ile kırılmalar görülebilir.

3.3. Hasar Analizi Aşamaları

Hasar analizi, malzeme, bileşen veya yapıdaki arızaların nedenlerini belirlemek ve benzer sorunların gelecekte tekrarlanmamasını sağlamak amacıyla uygulanan sistematik bir yöntemdir. Bu yöntem, arızaların anlaşılması ve önlenmesi için büyük önem taşır. Genellikle hasar analizi aşağıdaki aşamalar ile yapılır:

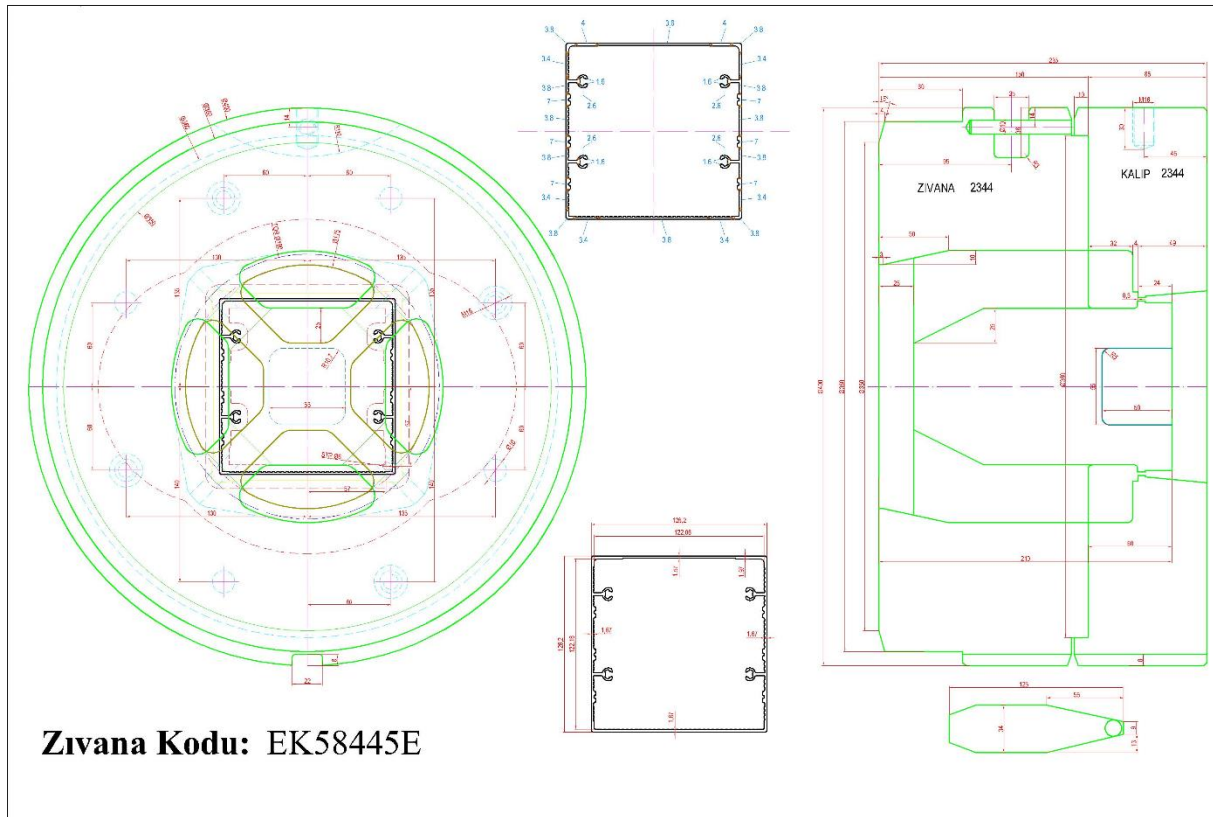
1. Hasarın gerçekleştiği durum ile ilgili ön bilgilerin toplanması
2. Hasarlı parçanın ön incelemesi
3. Numunelerin seçiminin yapılması ve parça üzerinden numune alınması
4. Mekanik kontroller (çekme, tokluk deneyi gibi)
5. Numunelerin kodlanması, gözle incelenmesi ve ön temizleme
6. Hasar analizi raporunun yazılması
 - a. Hasar hakkında gerekli bilgiler
 - b. Hasar anındaki servis şartları
 - c. Hasara uğrayan parçanın geçmişi ile ilgili servis bilgileri
 - d. Parçanın kimyasal kompozisyonu ve mekanik özelliği
 - e. Hasarlı parçanın mekanik ve metalurjik analiz sonuçları
 - f. Hasarın nedeninin ve mekanizmasının tespiti
 - g. Sonuçların ve tüm verilerin incelenmesi, önlem için tavsiye sunulması [27]

4. MATERYAL VE METOD

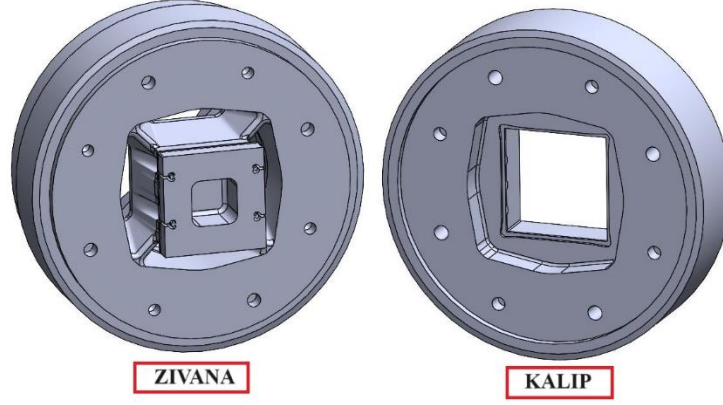
Çalışmada, zıvana parçasında ortaya çıkan hasarın analizine mikroyapı analizleri ile başlanmıştır. Öncesinde zıvananın tasarımı, üretim aşamaları, ısıl işlem prosesleri, alüminyum ekstrüzyon prosesi ve hasarın olduğu durumdaki servis şartları gibi, yapılacak incelemeler için önemli bilgiler edinilmiştir. Mikroyapı incelemelerinin ardından, parçanın tasarımını kontrol amacıyla, maruz kaldığı yükleri gözlemleyebilmek için sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme simülasyonuna tabi tutulmuştur. Bu metod ile hasarın kök nedeninin tespit edilebilmesi için, zıvananın ısıl ve mekanik proseslerinin kontrol edilmesi amaçlanmaktadır.

4.1. Zıvana Parçasının Tasarım ve Üretim Bilgileri

Zıvananın kullanıldığı kalıp takımı, ihtiyaç duyulan alüminyum profil için öncelikle AutoCAD programında iki boyutlu olarak tasarlanmış ve ardından bu tasarım, SolidWorks programı kullanılarak üç boyutlu modele dönüştürülmüştür (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2). Üretimin CNC makineleriyle gerçekleştirilebilmesi amacıyla, bu üç boyutlu model CAM programı yardımıyla programlanmış ve nihayetinde imalat süreci başlamıştır.



Şekil 4.1. Kalıp takımının AutoCad tasarımı



Şekil 4.2. Kalıp takımının SolidWorks ile modellenmesi

Zıvana imalatının ilk adımı, 400 mm çapındaki 1.2344 kalite sıcak iş takım çeliğinin, tasarımda belirtilen kalınlıkta ve paylı şekilde testere tezgahında kesilmesiyle başlamıştır. Bu takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu Tablo 4.1'te belirtilmiştir. Kesim işlemi sonrası, manuel torna tezgahında yüzey tormalanarak, malzeme imalat için hazır hale getirilmiştir. CNC makinelerinde zıvananın göz, ayak ve kafa kısımları işlenmiş, vinç ile taşınabilmesi için matkap tezgahında mapa deliği açılmıştır. Proses sırasında oluşan keskin kenarlar, yüzeyler ve çapaklar pnömatik zımpara ile temizlenip düzeltilmiştir.

Tablo 4.1. Kullanılan 1.2344 takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0.39	1.02	0.40	0.016	0.0005	5.15	1.29	0.93

Sonraki adım, mevcut sertliği 18-20 HRC olan zıvana parçasına ısıtım işlemi uygulayarak mukavemet kazandırmaktır. Isıtım işlemi sırasında, kalıp ısıtım fırınında öncelikle yumuşatma tavlama için 850°C'ye kadar ısıtılmış, ardından fırın içerisinde saatte 10°C hızla 650°C'ye soğutulmuştur. Daha sonra açık havada soğumaya bırakılmıştır. Gerilim giderme amacıyla, zıvana 650°C'ye yeniden ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 2 saat bekletilmiştir. Ardından yavaşça 500°C'ye soğutulmuş ve tekrar açık havada soğutulmuştur. Son aşama olan sertleştirme işleminde, parça 650°C'de birinci ve 850°C'de ikinci ön ısıtmaya tabi tutulmuş, ardından yaklaşık 1040°C'de 15 dakika östenitleme sıcaklığına maruz bırakılmış ve ardından ara ara su verme ile martemperleme yapılmıştır. Son olarak, optimum sertlik aralığı olan 47-50 HRC'ye ulaşmak için yaklaşık 600°C'de menevişleme yapılmıştır. Tüm ısıtım ve sertleştirme işlemleri sonucunda kalite kontrol kapsamındaki Proceq 550 Leeb marka bilya uçlu cihaz ile yapılan makro sertlik ölçümünde, zıvana parçasının ortalama sertlik değeri 48,13 HRC'ye ulaşmıştır (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. Zıvana sertleştirme işlemi sonucu sertlik değerleri

1.ölçüm	47,50 HRC
2ölçüm	48,10 HRC
3.ölçüm	48,79 HRC
Ortalama	48,13 HRC

Isıl işlem sonrasında, zıvanada meydana gelen çarpılmaların giderilmesi amacıyla yüzey tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. 3 eksenli CNC tezgahlarında işleme sınırlamaları nedeniyle, zıvana parçası ark erozyon yöntemiyle, kalıp parçası ise tel erozyon yöntemiyle hassas kesim işlemine tabi tutulmuştur. Son aşamada, tesviye bölümünde et kalınlığı ölçü kontrolü ve temizlik işlemleri tamamlanarak kalıp üretimi sonlandırılmıştır. Bu süreçte, ekstrüzyon işlemi sırasında daha uzun bir çalışma ömrü sağlamak için, zıvana ve kalıp parçası nitrasyon işlemine tabi tutulmuş ve 560°C’de amonyak gazında nitrüleme işlemi ile yüzey sertliği artırılmıştır.

Kalıp takımının pres hattında profil üretimi gerçekleştirildiğinde, yaklaşık 5 ton net üretim sonunda, zıvananın "ayak" olarak adlandırılan bölgelerinde Şekil 4.3’de görüldüğü gibi çatlaklar oluştuğu tespit edilmiştir. Bu çatlakların ortaya çıktığı ekstrüzyon prosesi sırasında kullanılan parametreler ise Tablo 4.3’te ayrıntılı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.3. Zıvana parçasının ayak kısmındaki çatlakları

Tablo 4.3. Alüminyum ekstrüzyon prosesi sırasında parametreler

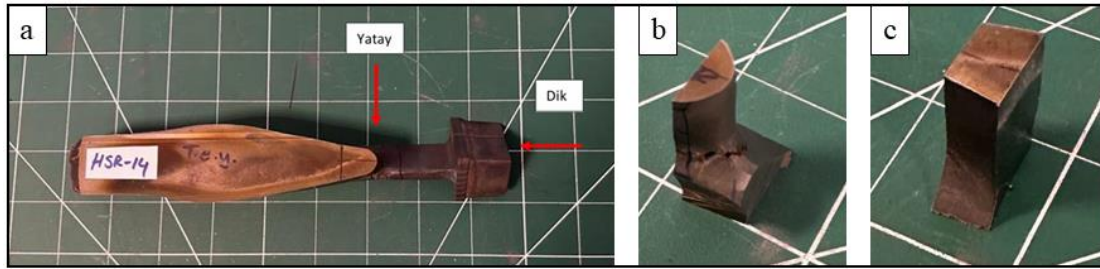
Dipçik Boy (mm)	Baskı Zamanı (m/sn)	Kovan Sıcaklık (°C)	Kalıp Sıcaklık (°C)	Biyet Sıcaklık (°C)	Profil Çıkış Sıcaklığı (°C)
25	3	430	430	430	501

Alüminyum ekstrüzyon işlemi sırasında biyetin tamamı ekstrüde edilmez. Zıvana girişinde mutlaka dipçik denen yaklaşık 20-30 mm kalınlığı kadar alüminyum biyet kalır. Bu biyet, presin üst kısmından giyotin mekanizmasıyla inerek bu biyeti kesen makas adında bir mekanizma ile zıvana girişinden uzaklaştırılır. Bu ince kalınlıktaki biyet kesilmediği takdirde, biyet üzerine gelen zımba basıncı ile kalıp üzerindeki basınç da artar ve hasar oluşumu gözlenir.

Baskı zamanı, pres zımbasının biyeti birim saniyede ittiği milimetre cinsinden mesafedir. Ani ısıl gerilimler nedeniyle hasarın ortaya çıkmasını engellemek amacıyla, kovan 430°C ve kalıp 430°C sıcaklığa ısıtılmışken, biyet sıcaklığı 430°C ve profilin prestan çıkış sıcaklığı 501°C olarak ölçülmüştür.

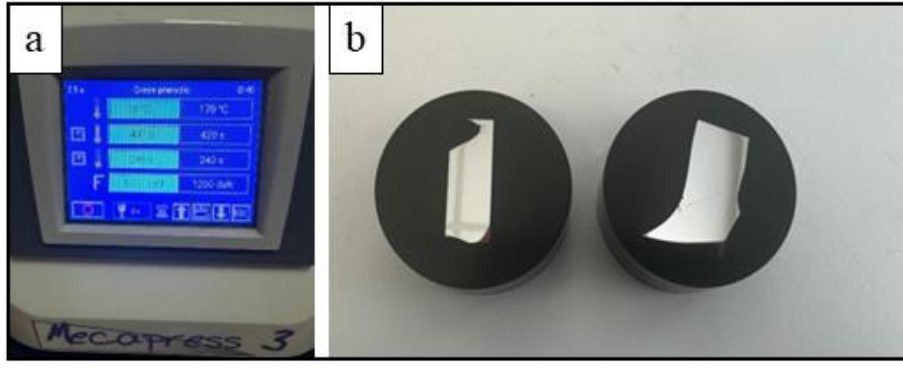
4.2. Numune Alımı ve Mikroyapı İncelemeleri

Hasarlı bölgeden örnek almak amacıyla Şekil 4.4.a'da gösterildiği gibi ana numune alınmış ve HSR-14 olarak adlandırılmıştır. Bu ana numuneden, çatlığa yatay ve dikey doğrultuda iki ek numune daha çıkarılmıştır (Şekil 4.4.b ve Şekil 4.4.c). Mikroyapı analizine hazırlanma aşamasının başlangıcı olarak, numunelerin genel yüzey temizliği için SiC aşındırıcı içeren dönen bir disk üzerinde zımparalama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra, bu numuneler bakalit tozu kullanılarak Presi marka Mecapress 3 model cihaz ile sıcak bakalite alınmış Şekil 4.5.a'da gösterildiği gibi işleme tabi tutulmuşlardır.



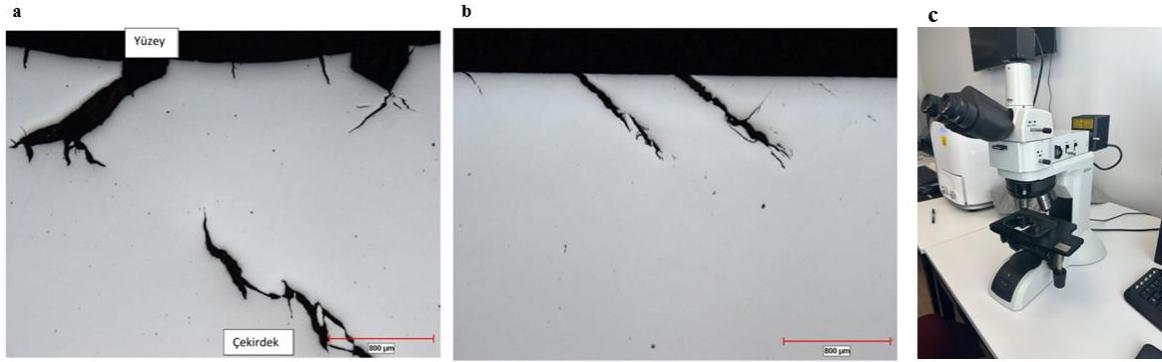
Şekil 4.4. a. Hasarlı bölgeden alınan ana numune b. Çatlığa dik doğrultuda HSR-14'ten alınan numune c. Çatlığa yatay doğrultuda HSR-14'ten alınan numune

Bakalite alınan numunelere daha etkili bir dağlama işlemi yapılabilmesi için önce zımparalama uygulanmış, ardından mikron boyutlarında (0,01-1 μm) alümina (Al_2O_3) tozu keçe üzerine serpilerek yüzeyleri parlatılmıştır (Şekil 4.5.b). Bu aşamada, dağlama işleminden önce çelik yapısında herhangi bir segregasyon veya deformasyon olup olmadığını kontrol etmek amacıyla analizör polarizör filtreli LV150N Nikon optik mikroskop kullanılarak mikroyapı görüntüleri incelenmiştir (Şekil 4.6.c). Tüm analizlerde CLEMEX Captiva görüntüleme yazılımı kullanılmıştır. Dağlama öncesi 800 μm 'deki mikroyapı segregasyon kontrolünde, her iki numunenin de malzeme yapısında uygunsuz bir yapıya veya impüriteye rastlanmamıştır (Şekil 4.6.a ve Şekil 4.6.b). Diğer yandan, yüzeyin çeşitli bölgelerinde çatlak ilerlemelerinin gözlemlenmesi mümkündür.



Şekil 4.5. a. Bakalit işlemi b. Bakalite alınmış numuneler (solda çatlağa dikey doğrultuda alınan numune, sağda çatlağa yatay doğrultuda alınan numune)

Mikroyapıyı daha ayrıntılı inceleyebilmek amacıyla uygulanan dağlama işlemi, %4'lük Nital çözeltisi kullanılarak 10 saniye boyunca yapılmış ve ardından her iki numune de optik mikroskop altında tekrar incelenmiştir (Şekil 4.7.a ve Şekil 4.7.b).

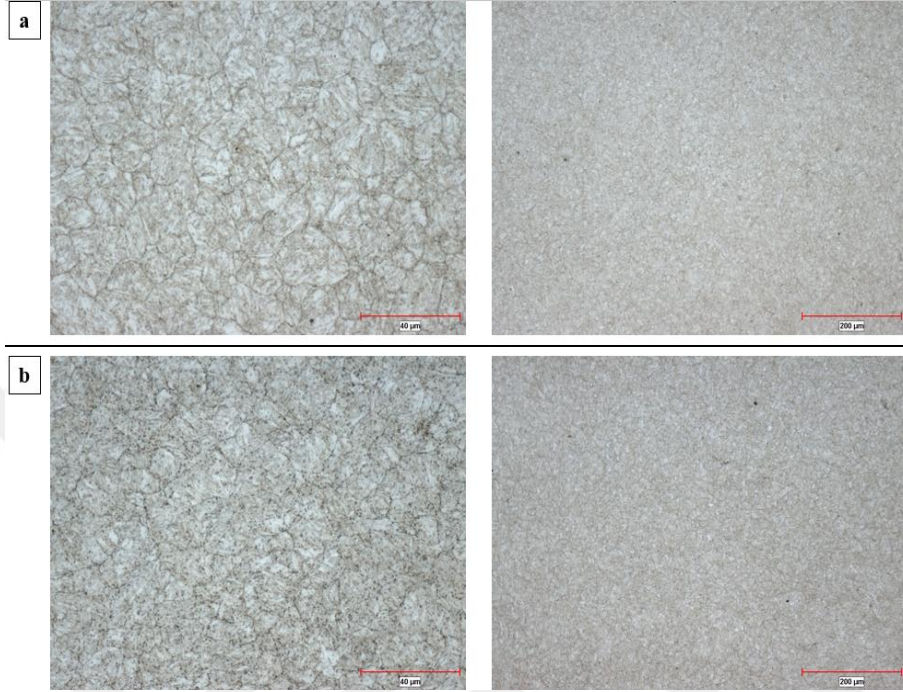


Şekil 4.6. a. Dikey kesit numunenin dağlama öncesi mikroyapı görüntüsü b. Yatay kesit numunenin dağlama öncesi mikroyapı görüntüsü c. LV150N Nikon optik mikroskop

Çelik mikroyapısında homojenlik beklenmesi esastır, ancak segregasyon olarak adlandırılan karışmama durumları, mikro veya makro katılaşmalara sebep olarak mikroçatlaklara ve bu çatlakların birleşmesiyle çatlak ilerlemesine neden olabilir. Blok segregasyonu, bantlaşma, karbür oluşumu ve katı faz kalıntısı gibi durumlar tane sınırlarında dislokasyon ve porozite oluşumuna yol açarak mikroyapıyı zayıflatır ve malzemenin hasar görmesine sebep olur.

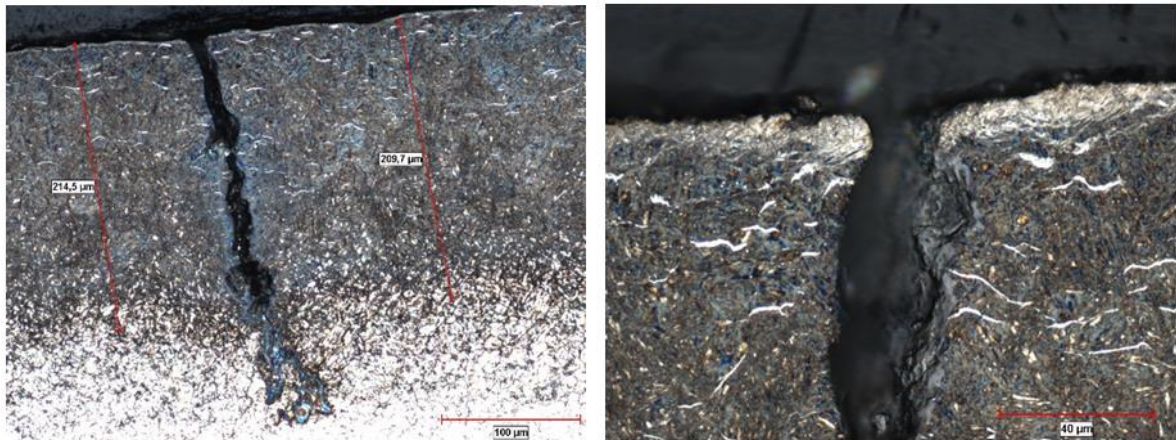
Dağlama işlemi sonrası her iki numunenin mikroyapısında görülen ince ve iğnemsî yapılar, çeliğin temperlenmiş martenzit fazında olduğunu doğrulamaktadır. Bu faz, çeliğin hızlı bir şekilde soğutulmasıyla su verme işlemi sırasında oluşur ve yüksek sertlik ve kırılganlık gibi özellikler taşır. Martenzit fazı, yüksek karbon içeriği nedeniyle kristal yapının ani bir değişim göstermesiyle meydana gelir. Soğuma hızı yüksek olduğunda, martenzit fazı, dönüşmemiş östenit fazı (beyaz bölgeler) içinde dağılmış ince iğnemsî tanecikler olarak kendini gösterir. Bu,

östenitin tamamen martenzite dönüşmediğini ve malzeme içinde kalan östenitik bölgelerin dağınık şekilde bulunduğunu gösterir. Östenit, yüksek sıcaklıklarda karardır ve oda sıcaklığına hızla soğutulduğunda tamamen martenzite dönüşmeyebilir; bu, mikroyapıda beyaz bölgeler olarak görünür.

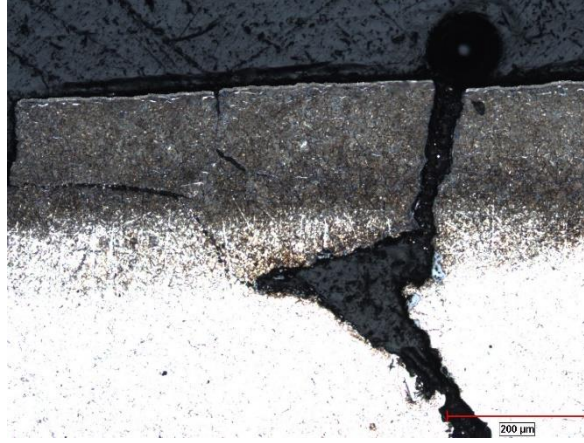


Şekil 4.7. a. Dikey kesit numunenin dağlama sonrası mikroyapı görüntüsü b. Yatay kesit numunenin dağlama sonrası mikroyapı görüntüsü

Nitrasyon işleminin çeliğe etkisi incelendiğinde, çelik üzerindeki difüzyon derinliği yaklaşık 200-215 μm , yüzeyde oluşan beyaz tabaka kalınlığı ise 5-6 μm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.8, ve Şekil 4.9). Nitrasyon işlemi sonrasında numune yüzeylerinden iç kısma doğru HV 0,2 metodu ile Vickers sertlik taraması yapılmıştır (Şekil 4.10.a, Şekil 4.10.b).

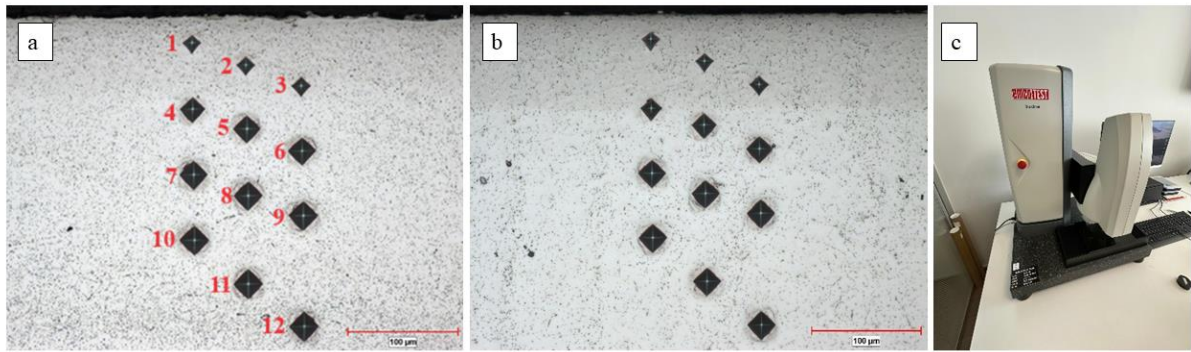


Şekil 4.8. Dikey kesit numunenin difüzyon bölgesi ve beyaz tabaka bölgesi



Şekil 4.9. Yatay kesit numunenin difüzyon bölgesi ve beyaz tabaka bölgesi

Vickers ve Brinell ölçüm yöntemlerine sahip DURASCAN 50G5 EMCO-TEST marka cihaz ile sertlik taraması, her iki numune için yüzeyin yaklaşık 25 µm altından başlanarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.10.c). Elmas ucun oluşturduğu diyagonal izlerin ortalama uzunluğunun karesi ve yaklaşık 1,98-2 N kuvvet yükü ile hesaplanan ilk Vickers sertliği, 1077 HV olarak ölçülen yüzeydeki beyaz tabaka sertliğidir. Daha sonra yüzeyden çekirdeğe doğru sertlik ölçümü yapılmıştır.

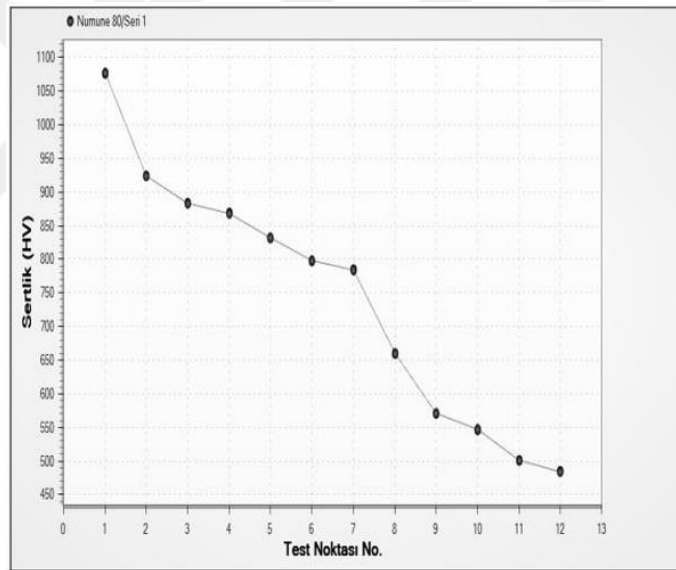


Şekil 4.10. a. Dikey kesit numunenin mikrosertlik ölçümleri b. Yatay kesit numunenin mikrosertlik ölçümleri c. DURASCAN 50G5 EMCO-TEST marka sertlik cihazı

Şekil 4.11 ve Tablo 4.4'te gösterildiği üzere, belirli aralıklarla yapılan 12 adet sertlik ölçümünün son değeri, zıvana parçasının çekirdek olarak adlandırılan nitrasyon bölgesinin altındaki çelik bölgesinin sertliği olan makrosertlikle eşittir ve 484 HV (yaklaşık 48 HRC) olarak ölçülmüş olup ısıtıl işlem sertleştirme değerini doğrulamaktadır.

Tablo 4.4. Numunelerin sertlik ölçümlerinin sayısal verileri

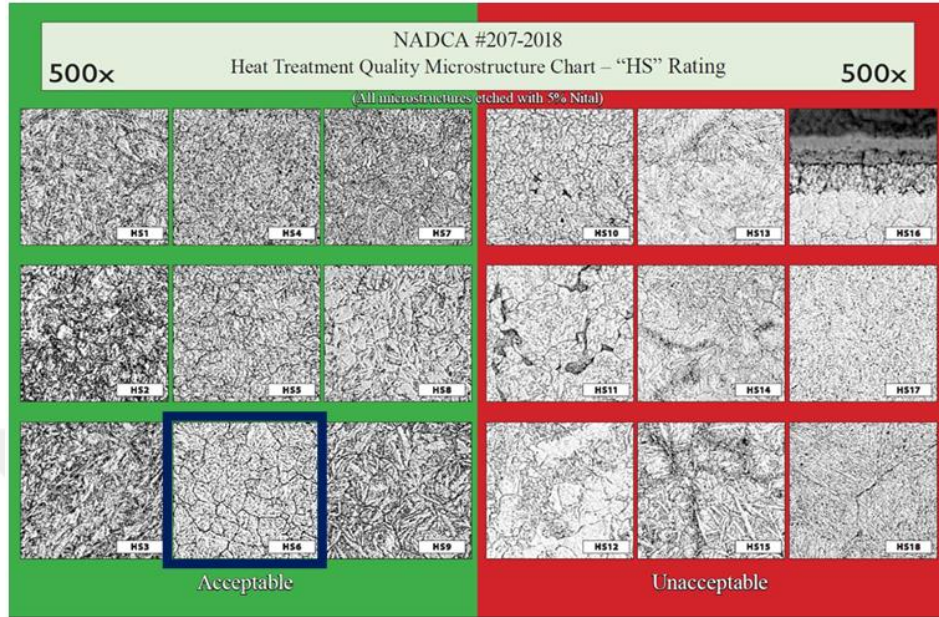
Ölçüm No	Yüzeye olan uzaklık (mm)	Sertlik (HV)	Metod	Diyagonal uzunluğu (μm)
1	0,025	1077	HV 0,2	18,560
2	0,045	924	HV 0,2	20,038
3	0,065	883	HV 0,2	20,490
4	0,085	868	HV 0,2	20,671
5	0,105	832	HV 0,2	21,116
6	0,125	798	HV 0,2	21,562
7	0,145	784	HV 0,2	21,753
8	0,165	660	HV 0,2	23,706
9	0,185	571	HV 0,2	25,492
10	0,205	547	HV 0,2	26,040
11	0,245	501	HV 0,2	27,197
12	0,285	484	HV 0,2	27,683



Şekil 4.11. Her iki numune için yapılan sertlik ölçüm değerleri-test noktası grafiği

Numunelerin optik mikroskop incelemelerinde görülen temperlenmiş martenzit görüntüsü ve mikroyapılarının, Şekil 4.12'de yer alan NADCA #207-2018 tablosundaki HS6 ısıtma işlem mikroyapısına göre kabul edilebilir nitelikte olması, zıvana parçasına uygulanan ısıtma işlem prosesinin ideal olduğunu göstermektedir. Çeliğin kimyasal bileşimi AISI H13 standartlarına uygundur ve mikroyapı görüntülerinde belirgin segregasyon veya inklüzyonlar gözlenmemiştir. Zıvananın makro sertlik ölçümü, ekstrüzyon işlemi için gerekli olan 47-50 HRC sertlik aralığındadır. Tek nitrasyon yapıldığı bilindiğine göre, ölçülen 5-6 μm beyaz tabaka kalınlığı ve 200-215 μm difüzyon bölgesi kalınlığı SAE AMS 2759/10 standardına uygundur ve

nitrasyon işleminin uygun şekilde gerçekleştirildiğini gösterir. Numunelerin mikroyapıdaki sertliği, yüzeyde 1077 HV sertlikten çekirdekte 484 HV sertliğe düşerek sertlik sürecine uygun bir profil sergilemektedir.



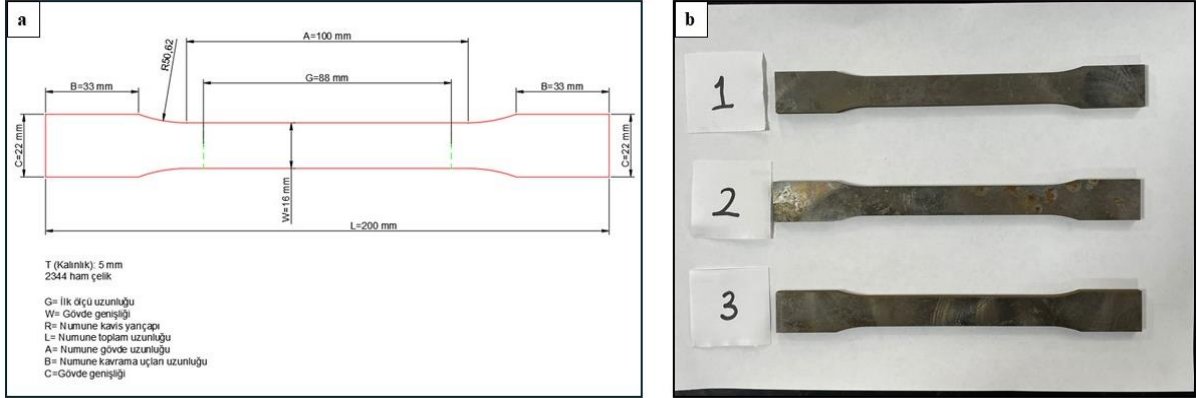
Şekil 4.12. NADCA #207-2018 ısıt işlemler mikroyapı kalitesi tablosu [38]

Çeliğin iç yapısının, zıvanada hasar meydana getirecek herhangi bir parametre içermediği tespit edilmiştir. Hasarın analizinde incelenmesi gereken diğer parametre ise zıvananın tasarımı ve buna bağlı olarak zıvana üzerinde oluşan gerilmelerdir. Bu nedenle sonraki adım, hasarın kök nedeninin belirlenmesi amacıyla çeşitli sonlu eleman yazılımı tabanlı programlar veya simülasyonlar kullanılarak, hasarın ekstrüzyon sürecindeki gerilmelerden mi yoksa zıvana tasarımından mı kaynaklandığını araştırmaktır. Öncesinde, 1.2344 çeliğinin mekanik özelliklerini inceleyebilmek için, zıvananın üretildiği ham çelikten 3 adet numune alınarak çekme testi uygulanacak ve çeliğin çekme ve akma dayanımı incelenecektir.

4.3. 1.2344 Çeliğinden Alınan Numunelerin Çekme Deneyi

Mühendislik malzemeleri rijit olmadığından kuvvet altında deforme olur, şekil ve boyut değişiklikleri gösterirler. Malzeme özelliklerini anlamak için mekanik testler yapılır. Bunlardan en önemlisi çekme testidir. Çekme testinin amacı, malzemelerin statik yük altında nasıl elastik ve plastik davrandığını belirlemektir. Bu amaçla, boyutları standartlara uygun daire veya dikdörtgen kesitli deney numunesi çekme cihazına bağlanarak, eksenel ve değişken kuvvetler uygulanır. Çalışmanın bu aşamasında, zıvana üretiminde kullanılan 1.2344 ısıt işlemsiz çeliğin mekanik özelliklerin uygunluğunu kontrol etmek amacıyla çekme deneyi yapabilmek için,

çeliğin farklı bölgelerinden ASTM E8:2016 standardına uygun ölçülerde 3 adet numune alınmıştır (Şekil 4.13.a ve Şekil 4.13.b). Numunelerin yüzeyindeki çapaklar pnömatik ekipman ile temizlenerek çekme testi cihazında test edilmeye hazır hale getirilmiştir.



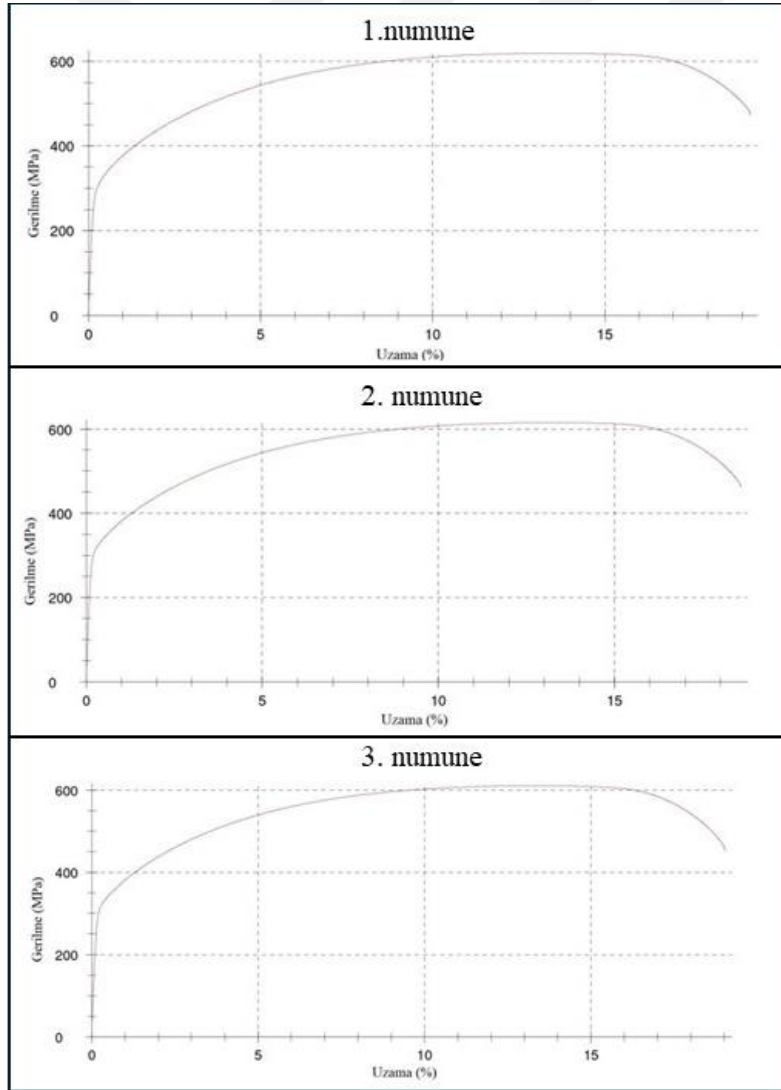
Şekil 4.13. a. Çekme deneyi numunesi ölçüleri b. Çelik üzerinden alınan numuneler

Zwick Roell Z250 model deney cihazı temelde; deney parçasının bağlandığı, birbirine göre yukarı ve aşağı hareket edebilen iki çene ve bu çenelere kuvvet veya hareket veren, aynı zamanda bu iki büyüklüğü ölçen ünitelerden oluşmaktadır (Şekil 4.14). Alt çene sabit olduğundan, çekme kuvveti, üst çenenin yukarı doğru hareketi ile deney numunesine uygulanır. Deney süresince, kuvvet değeri yük hücresinden alınırken, uzama değeri ise üst çenenin hareketini sağlayan vidanın adımına göre belirlenir. Deney sırasında numune sürekli artan bir çekme kuvvetine maruz kalır ve kırılma anına kadar hem uygulanan kuvvet hem de numunenin uzaması bilgisayara kaydedilir.



Şekil 4.14. Zwick Roell Z250 çekme testi cihazı [39]

Her bir numuneye, 3 MPa ön yük uygulanmış, 30 MPa/s E-Modülü hızı, 30 MPa/s akma tespit hızı ve 20 mm/dak test hızı ile çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Ön yük, çekme deneyi sırasında uygulanan sabit bir yüküdür. Bu yük, deney öncesi numunenin üzerine uygulanarak, numunenin boyutlarının sabit kalmasını ve deney sonuçlarının doğru elde edilmesini sağlar. Ön yük, numunenin gerilme ve deformasyon özelliklerini belirlemek için kullanılan bir ön koşuldur. E-Modülü hızı ise deneyde uygulanan gerilimin artış hızına bağlıdır. Genellikle standart olarak belirlenmiş bir hız kullanılır ve ölçülen elastisite modülü bu hızda geçerli olur. Akma tespit hızı, malzemenin çekme deneyinde belirli bir yük altında akması veya şekil değiştirmesi için gereken hızdır. Test hızı ise, numunenin çekme hızıdır. Bu hız, numunenin ne kadar hızlı veya yavaş çekildiğini belirler ve gerilme değerlerinin karakteristiğini değiştirebileceği için çekme deneyinin sonuçları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Test hızı, milimetre veya inç başına saniye veya dakika cinsinden ifade edilir.



Şekil 4.15. Numunelerin çekme deneyinde elde edilen gerilme-birim uzama grafikleri

Yapılan deneylerin sonucunda, kuvvet (F) ve uzama (Δl) arasındaki ilişkiyi gösteren bir eğri elde edilir. Ancak, bu eğrinin anlamlı olabilmesi için numunenin boyutlarının da belirtilmesi gereklidir. Bu nedenle, daha genel ve evrensel olan gerilme-şekil değiştirme (birim uzama) eğrisi kullanılır. Bu eğri, çekme diyagramı olarak adlandırılır. Şekil 4.15'te, test sonucunda her üç numune için gerilme-birim uzama grafikleri verilmiştir. Yine, deney sonucunda tüm numuneler için elde edilen elastisite modülleri, akma gerilmeleri, çekme gerilmeleri ve uzama miktarı değerleri Tablo 4.5'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Numunelerinin çekme deneyi sonucunda elde edilen değerleri

	Numune 1	Numune 2	Numune 3
Elastisite Modülü (MPa)	188.171	207.053	186.818
Akma $R_{p0,2}$ Gerilmesi (MPa)	318	325	329
Çekme Gerilmesi (MPa)	620	615	610
Uzama (%)	19,2	18,6	19

Gerilme-birim uzama diyagramında Hooke yasası, $\sigma = E \cdot \epsilon$ bağıntısının geçerli olduğu doğrusal bölgeyi belirleyen gerilme değeri, elastiklik sınırıdır. Bu bağıntıdaki orantı katsayısı (E) elastiklik modülüdür ve çekme diyagramının elastik kısmını oluşturan doğrunun eğimini ifade eder. Elastisite modülünün değeri arttıkça, malzemenin elastik deformasyona olan direnci de o kadar artar. Deney sonucunda birim saniyede uygulanan 30 MPa E-Modülü hızı ile çeliğin elastisite modülü, 3 numunenin ortalama değeri olan 194.014 MPa olarak bulunmuştur.

Bir malzeme çekme kuvvetine maruz kaldığında, kuvvet arttıkça boyu uzamaya başlar. Ancak, belirli bir noktaya ulaşıldığında, kuvvet artmasa bile malzemenin boyundaki uzama devam eder ve bu bahsedilen noktaya "akma noktası" denir. Akma noktasına kadar malzeme elastik olarak şekil değiştirir; yani üzerindeki kuvvet kaldırıldığında eski haline dönebilir. Ancak bu noktadan sonra malzeme plastik şekil değişimine uğrar ve uygulanan kuvvet kaldırıldığında eski haline dönemez. Bu nedenle, malzemelerin dayanma sınırı akma gerilmesi ile belirlenir.

Akma gerilmesi, çekme kuvvetinin sabit kaldığı, ancak plastik şekil değiştirmenin önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının düzgünlük gösterdiği noktaya karşılık gelir. Bu σ_a gerilme değeri, F_a olarak gösterilecek olan akma kuvvetinin numunenin ilk kesit alanına (A_0) bölünmesiyle ($\sigma_a = F_a / A_0$) hesaplanır. Düşük karbonlu yumuşak çeliklerde olduğu gibi, eğer malzemede belirgin bir akma gözlenmiyorsa, genellikle % uzama ekseninde % 0,2'lik bir öteleme yapıldığında, yani $\epsilon_{plastik} = 0,002$ noktasındaki plastik uzamaya karşılık gelen çekme

gerilmesi, akma sınırı veya akma dayanımı olarak kabul edilmektedir. Deneyde ise bu akma noktası çekme deneyi cihazında $R_{p0,2}$ şeklinde tanımlanmıştır ve 3 numunenin ortalaması olan 324 MPa değeri zıvana çeliğinin akma noktası olarak görülebilir. Deney sonuçlarına ve Şekil 4.15'teki grafikler göz önüne alındığında numunelerin kopma anındaki gerilme değeri ortalama 462,4 MPa'dır ve kopmuş numuneler Şekil 4.16'da görülebilir.



Şekil 4.16. Deney sonucunda kopan numuneler

Malzemenin kırılma veya kopma anına kadar dayanabildiği en yüksek gerilme değeri olan çekme dayanımı, deney sonucunda ortalama 615 MPa'dır. Çekme dayanımı, çekme testinde elde edilen diyagramdaki en yüksek gerilme değeridir ve uygulanan en yüksek kuvvetle belirlenir ($\sigma_{\text{ç}} = F_{\text{maks}} / A_0$). Tüm dayanım hesaplamalarında, malzemenin başlangıçtaki kesit alanı (A_0) kullanılır.

Deney sırasında numunenin toplam uzaması, malzemenin sünekliğini belirler. Malzeme ne kadar sünekse, deformasyon da o kadar fazla olur ve daha deformasyon kopma uzaması gözlenir. Sünek bir malzeme, yüksek oranda plastik deformasyona uğrar ve bu deformasyon, çekme numunesinin boyunda meydana gelen en yüksek yüzde plastik uzama oranı ile tanımlanır. Deneye tabi tutulan numunenin kopan kısımları biraraya getirilerek son boy bulunur. Uzama miktarı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$\Delta l = l_k - l_0 \quad (4.1)$$

Burada l_0 , test cihazının çeneleri arasındaki uzunluk olan 131 mm'dir. l_k ise kopma anındaki numune boyudur. Kopma uzaması ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir.

$$\% \text{ Uzama} = \frac{(l_k - l_0)}{l_0} * 100 \quad (4.2)$$

Deney sonucunda ölçülen % uzama ortalama 18,9 değeri ile birlikte, bu bağıntı yardımıyla numunelerin koptuğu uzunluk, ortalama yaklaşık 156 mm olarak bulunur.

4.4. Kalıp Üzerindeki Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi

Mühendislik çalışmalarında kullanılan yazılımlar, makine sistemleri ve bileşenlerinin performansını değerlendirmek için mühendislerin en büyük yardımcılarında biridir. Sonlu elemanlar tabanlı yazılıma sahip programlar, bilgisayar destekli teknolojileri sistematik bir biçimde organize ederek, tasarım sürecindeki ekiplerin büyük ölçüde kolaylaştırır ve zaman tasarrufu sağlar. Üç boyutlu katı modelleme tamamlandıktan sonra, bu modelin analiz edilmesi aşamasına geçilir. Analiz amacıyla kullanılan yazılımlar, çalışılan alana göre değişiklik gösterir ve genellikle her prosese veya şekillendirme yöntemine özel olarak uyarlanmış yazılımlar tercih edilir.

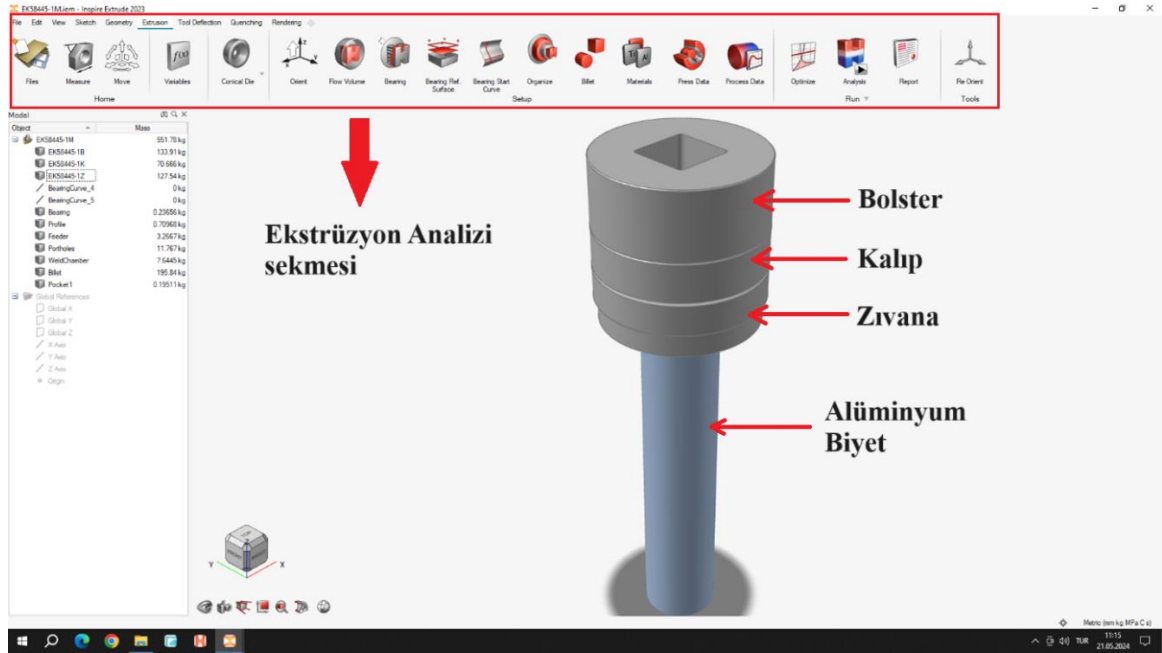
Bu yazılımlardan birine sahip olan ve bu çalışmadaki gerilme analizleri için de kullanılacak olan Altair firmasına ait Inspire Extrude Metal programı, kalıbın maruz kaldığı yükler, şekillendirme sırasında ortaya çıkan kuvvetler, sıcaklık, gerilme ve şekil değişiklikleri gibi çeşitli sonuçları analiz eder. Bu analizlerin yanında, pres çıkışında elde edilen profil geometrisi, çıkış sıcaklığı ve malzemenin akış özellikleri değerlendirilir. Bu değerlendirmeler, kalıp tasarımının gerektiğinde yeniden düzenlenmesini sağlayarak deneme-yanılma yöntemiyle ortaya çıkabilecek zaman, enerji ve malzeme kayıplarını önler. Bu şekilde, daha verimli ve maliyet etkin bir tasarım süreci elde edilir.

4.4.1. Zıvana tasarımının Altair Inspire Extrude Metal programı ile analizi

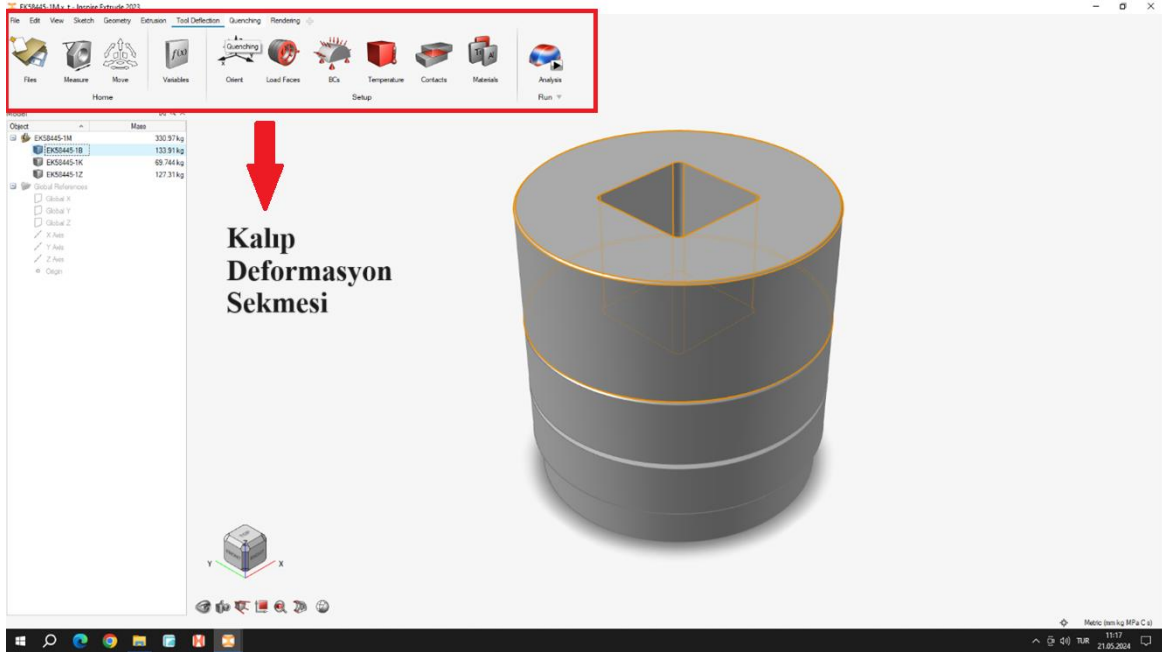
Isıl işlem, nitrasyon ve çelik mikroyapısı kontrolü için gerçekleştirilen mikroyapı analizi ve çelik mekanik özelliklerinin kontrolü için yapılan çekme testinin ardından, bir sonraki adım, zıvananın ekstrüzyon prosesi sırasında maruz kaldığı gerilmelerin sonlu elemanlar tabanlı Inspire Extrude Metal programı ile analize tabi tutularak tasarım performansının gözlenmesidir.

Inspire Extrude Metal programı temelde, alüminyumun akış analizi ile, fiziksel olarak üretilecek olan profilin ekstrüzyonu simüle edilerek sonuçların incelenebileceği bir programdır. Programın ‘Tool Deflection’ (kalıp deformasyon) modülünde kalıp için deformasyon analizi yapılmak istendiğinde, öncelikle profil ekstrüzyon analizinin yapılması gerekmektedir. Analiz için gerekli olan pres basıncı bilgisinin, profil ekstrüzyon analizinden aktarılması gerektiğinden kalıp takımı, Tool Deflection modülündeki analizi için programa, daha önce ekstrüzyon analizi yapılmış haliyle alınır. Ekstrüzyon analizi için de kullanılan model, EK 58445E imalat numaralı

kalıp takımının (bolster-kalıp-zıvana) Solid Works'te yapılan üç boyutlu modelinin parasolid versiyonudur (Şekil 4.17 ve Şekil 4.18).

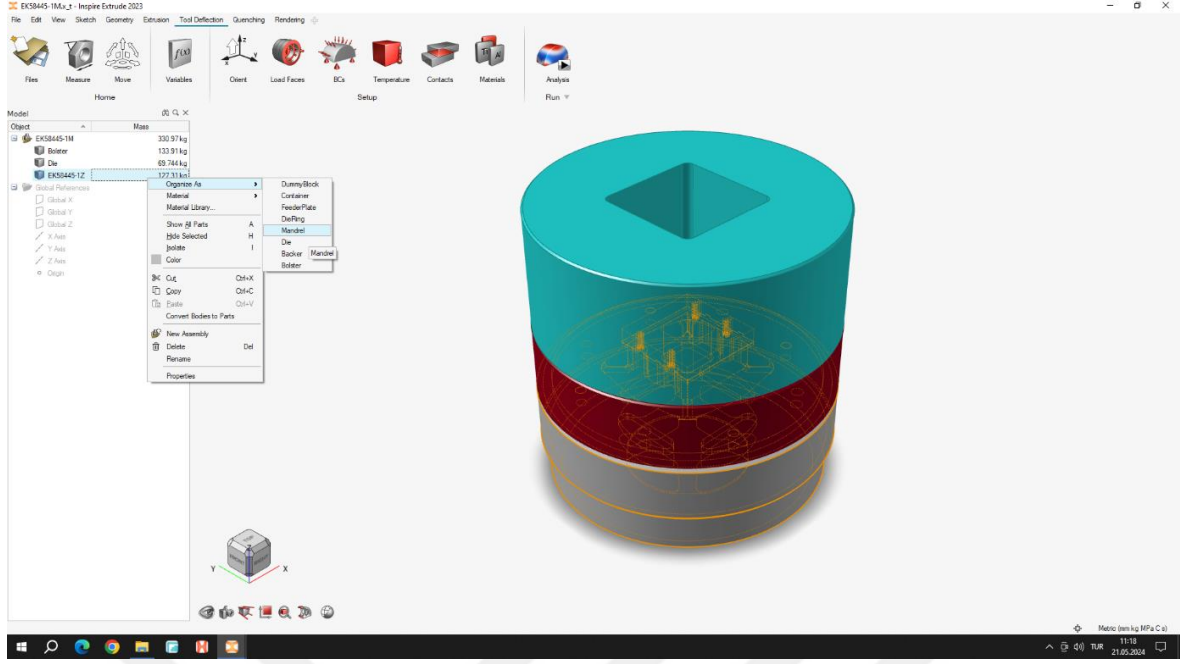


Şekil 4.17. Kalıp takımının ekstrüzyon analizi modellemesi



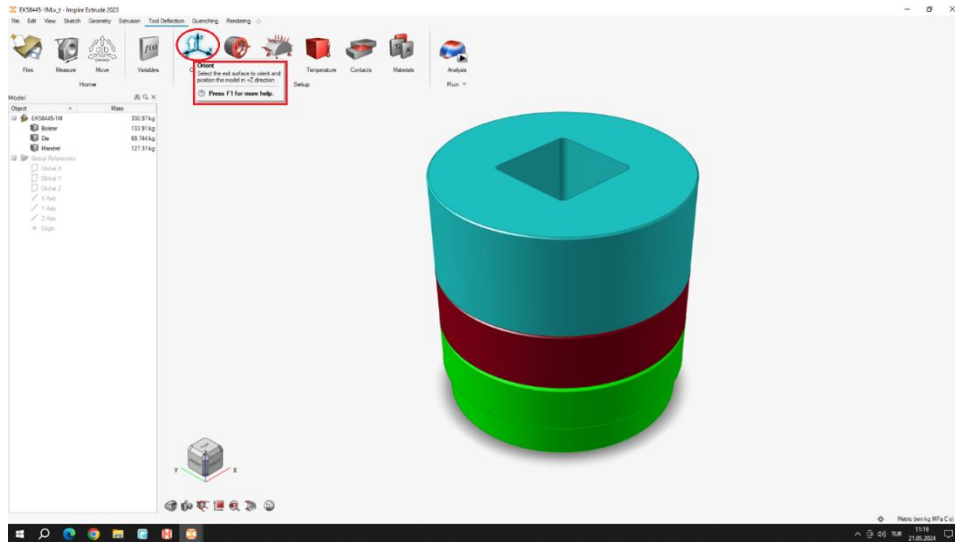
Şekil 4.18. Kalıp takımının kalıp deformasyon analizi modellemesi

Kalıp deformasyon analizi işlemi için montajlı kalıp takımı elemanlarının tek tek tekrar tanımlanması gerekir. Ekrandaki işlem ağacındaki 'Nesne' (Object) bölümünde parçalar tek tek seçilir, 'Organize Et' (Organize As) denir ve açılan menüden hangi parça olduğu belirlenir (Şekil 4.19)



Şekil 4.19. Kalıp takımındaki parçaların tanımlanması

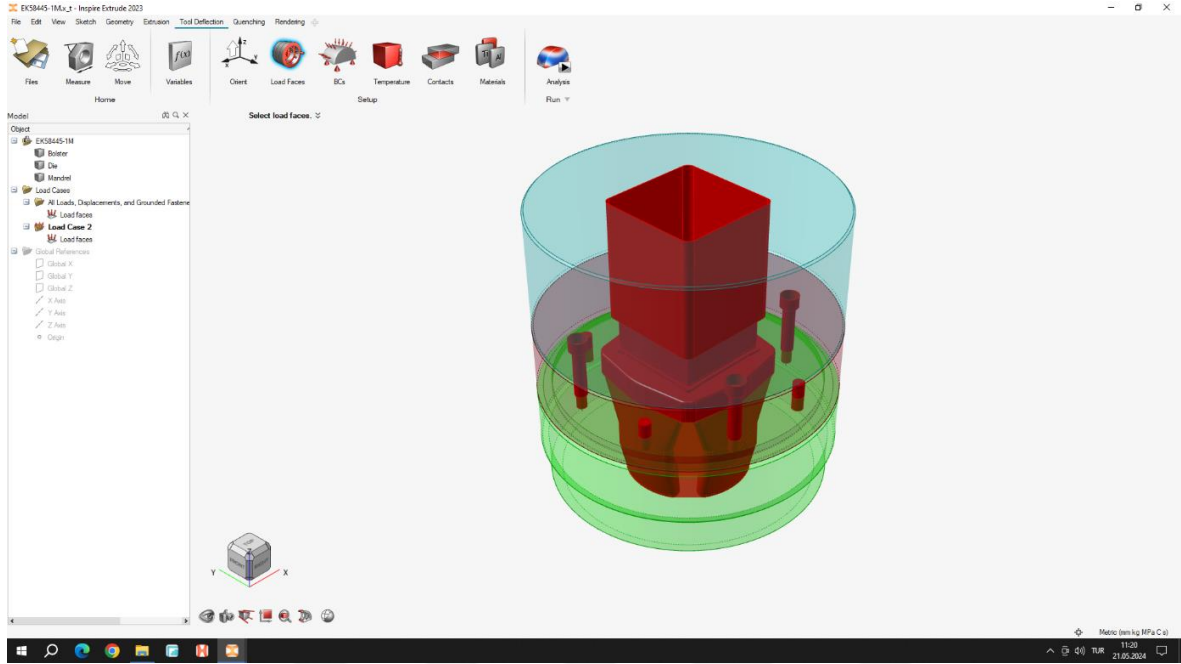
Hesaplamalar için standart bir referans noktası sağlaması amacıyla kalıp takımının orjine taşınması gereklidir. Böylelikle, farklı analizler arasında tutarlılık sağlanabilir. Orijinde yer alan parçalar ile simülasyonlar için gerekli matematiksel hesaplamalar basitleştirilmiş olur, sapma ve stres hesaplamalarında kullanılan denklemlerin karmaşıklığı azaltılır. Parçanın orijine yerleştirilmesi, hizalama hataları veya koordinat sistemi uyumsuzluklarından kaynaklanan hataları en aza indirir ve daha doğru simülasyon sonuçları elde edilmesini sağlar (Şekil 4.20).



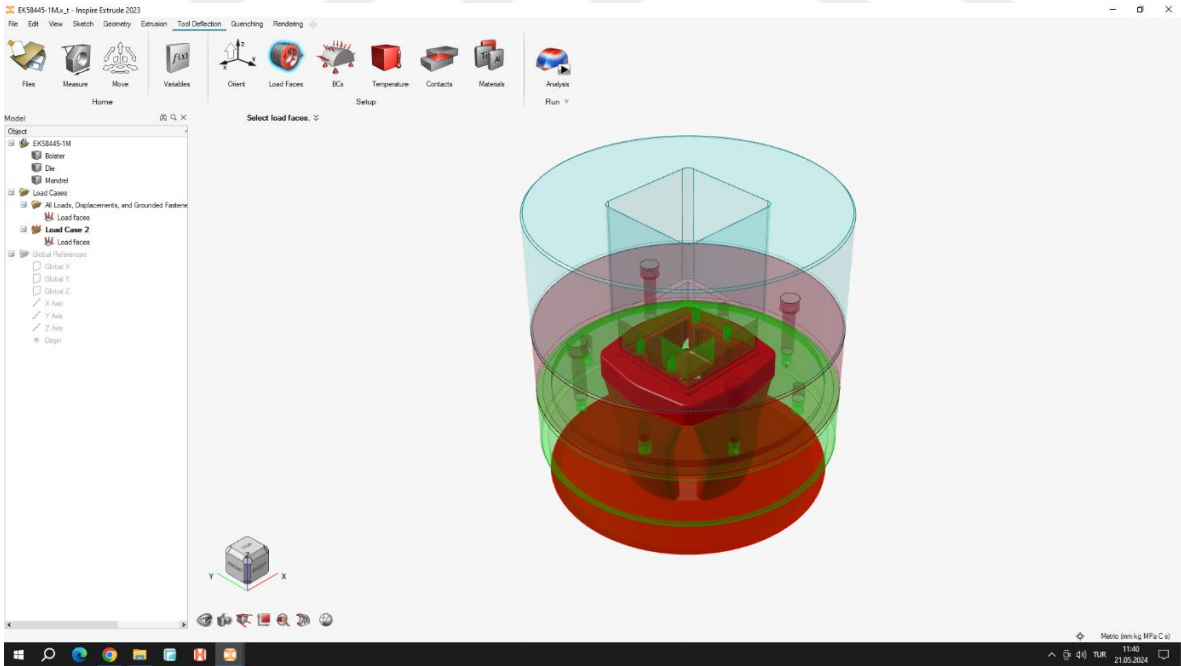
Şekil 4.20. Kalıp takımının orjine taşınması

Simülasyonda yüklerin kalıp takımı üzerinde doğru bir şekilde tanımlanmasını sağlamak için 'Load Faces' işlemi ile, yük altında kalacak yüzeyler seçilir. Bu yüzeyler, kritik kuvvetlerin

uygulandığı veya genellikle takımın iş parçasıyla temas ettiği yüzeylerdir. Dolayısıyla, alüminyumun direkt temas ettiği, direkt yük uygulanan yüzeyler seçilir (Şekil 4.21). Parça seçimi yapılırken otomatik olarak seçilmiş, gerekli olmayan kısımlar temizlenir (Şekil 4.22).



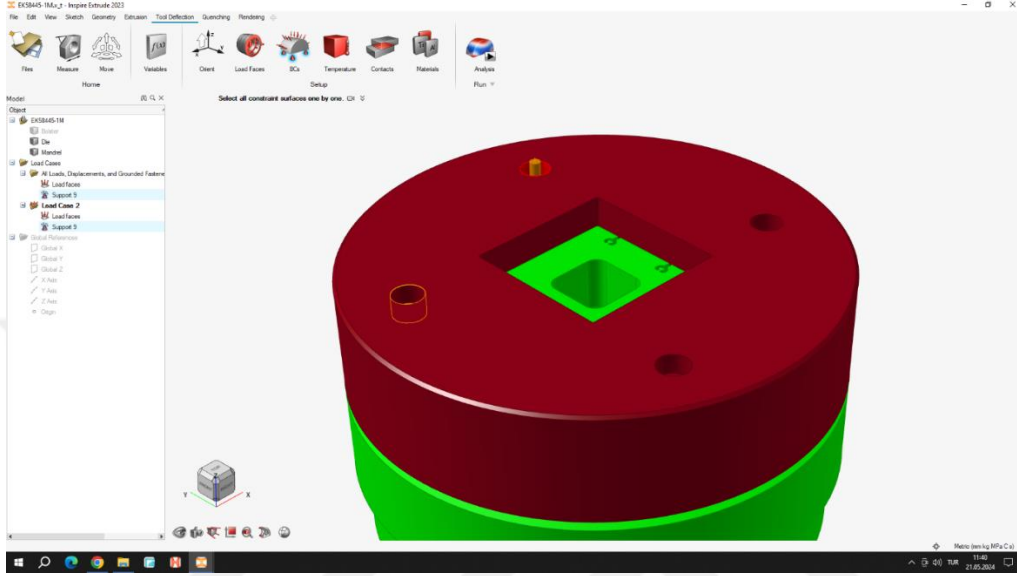
Şekil 4.21. Yük uygulanan yüzeylerin seçimi



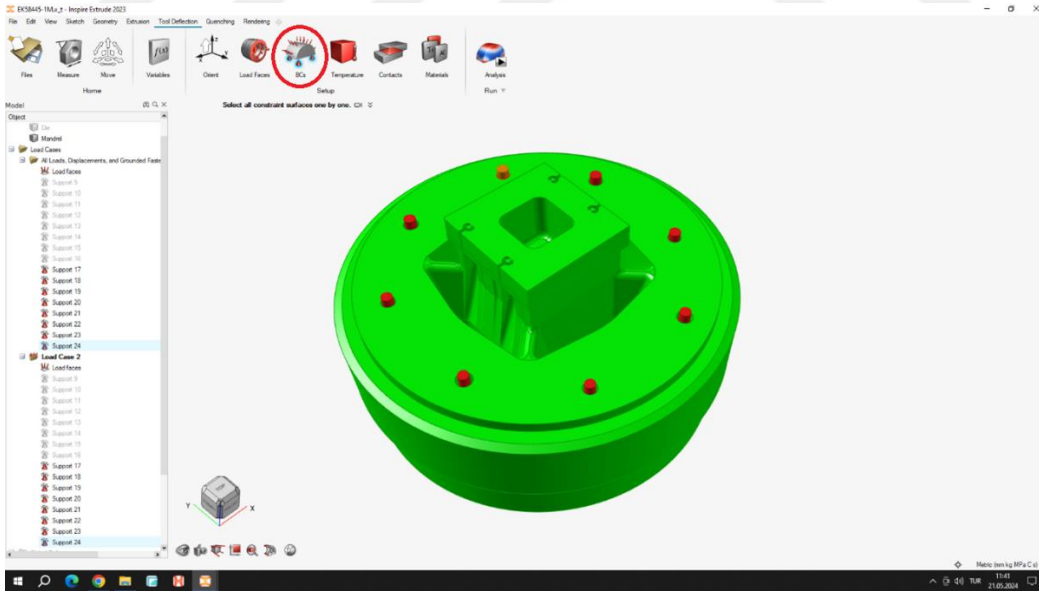
Şekil 4.22. Gereksiz seçilmiş yüzeylerin temizlenmesi

Kalıp takımındaki dişi parça ve zıvana parçasını birbirine cıvata elemanları ile monte edebilmek için bağlantı delikleri bulunur. Ek olarak yine zıvana parçasında, imalatı sırasındaki eksen sapmalarını önlemek için kullanılan pimlerin, delikleri bulunur. Cıvata ve pim bağlantı

deliklerine BCs butonu ile uygulanacak mesnet koşulları tanımlanır (Şekil 4.23 ve Şekil 4.24). Bu koşullar, deliklerin serbestçe hareket edemeyeceğini ve belirli bir şekilde sabitleneceğini belirtir. Mesnet koşullarının tanımlanmasının ardından, bu deliklere uygulanacak yükler simülasyona dahil edilir. Böylelikle, takımın üzerindeki kuvvetlerin ve momentlerin doğru bir şekilde analiz edilmesini sağlar.



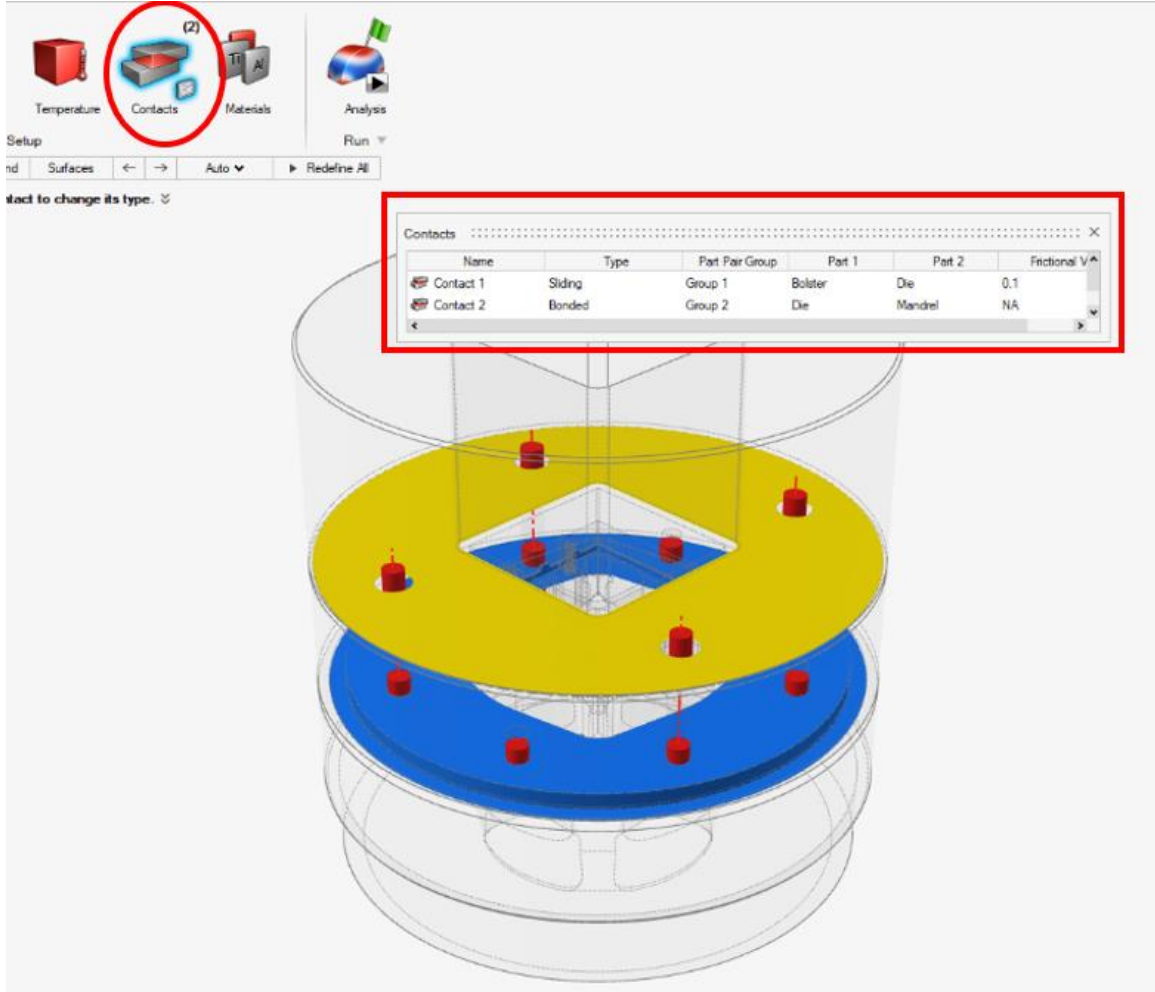
Şekil 4.23. Cıvata bağlantı deliklerinin mesnetlenmesi işlemi



Şekil 4.24. Pim deliklerinin mesnetlenmesi işlemi

Parçaların birbirine montajlı olması nedeniyle, temas yüzeylerinde oluşabilecek sürtünme kuvvetleri, yüzeylerin geometrik detayları ve hassasiyeti gibi konularda temas yüzeylerinin analizde belirtilmesi önemlidir. Küçük geometrik ayrıntılar bile yüzey temas bölgelerinde büyük stres yoğunluklarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, zıvana ve kalıp montaj yüzeyine

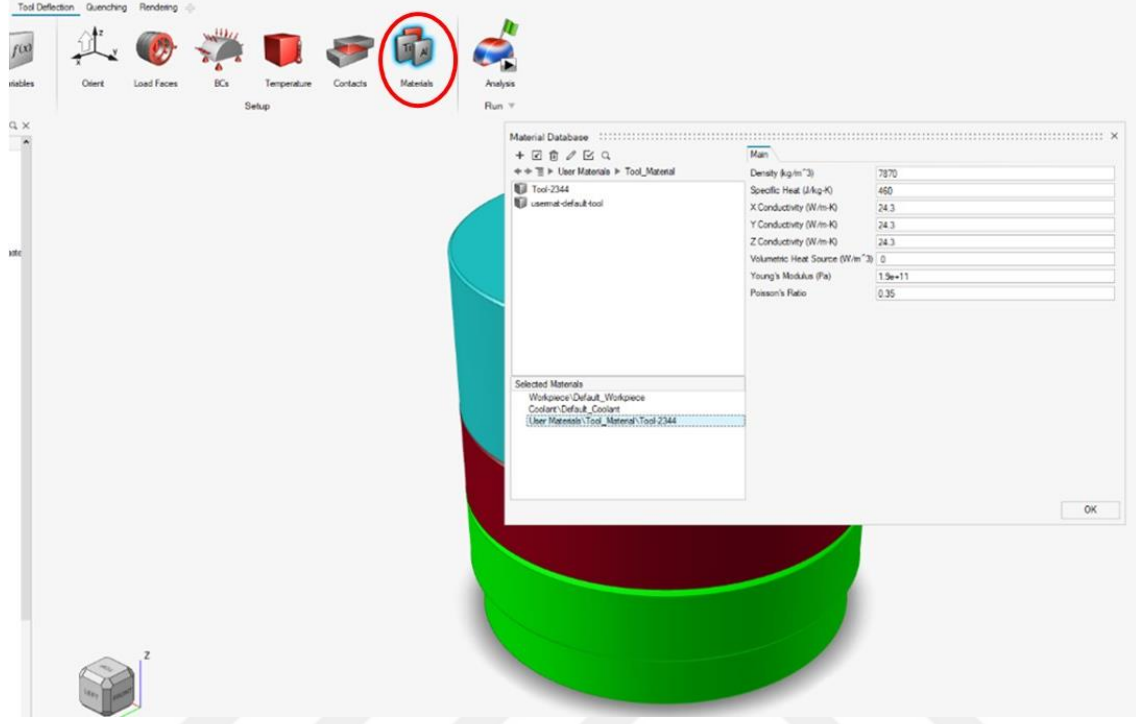
‘Contacts’ işlemi ile temas yüzeyi tanımlanır. Ek olarak bolster parçası ile kalıp arasında da bir bağlantı yoktur, sadece yüzey teması vardır ve bu yüzeyler arasında da tanımlama yapılır (Şekil 4.25).



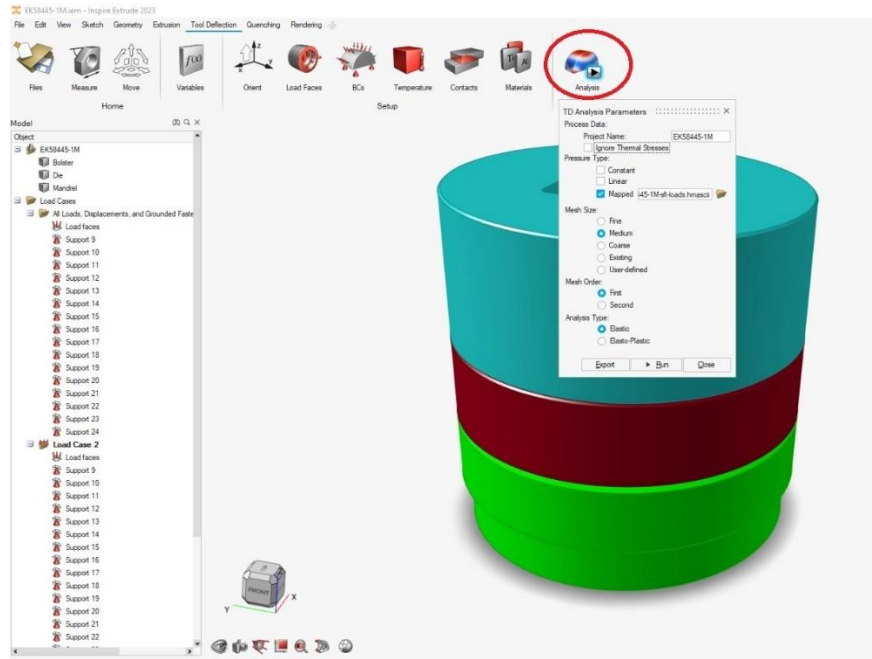
Şekil 4.25. Temas yüzeylerinin tanımlanması

Malzeme atama süreci, yüzey tanımlamaları ve konumlandırma işlemlerinin ardından gerçekleştirilir. Her bir parça için uygun malzeme ataması yapılırken, örneğin bir zıvana parçası seçildiğinde, 'Materials' ikonuna tıklanır. Bu işlem sonrasında Material Database kısmına gidilir ve programın kütüphanesinden uygun malzeme seçilir. Örneğin, Tool_2344 (1.2344) çeliği seçildiğinde, bu malzemeye ait özellikler otomatik olarak ekrana gelir ve kullanıcı tarafından analiz edilecek parçanın gereksinimlerine göre bu değerler değiştirilebilir (Şekil 4.26). 1.2344 çeliği için özkütle $7,87 \text{ kg/m}^3$, özgül ısı 460 J/kg.K , çekme deneyinde elde edilen elastisite (Young) modülü $1,94 \times 10^{11} \text{ Pa}$ (194.000 MPa), ve poisson oranı ise 0,35 olarak seçilmiştir. Bu özellikler, 1.2344 çeliğinin mekanik ve termal davranışlarını belirler ve yapılan analizlerde doğru sonuçlar elde etmek için önemlidir. Örneğin, elastisite modülü, malzemenin deformasyona karşı gösterdiği direnci tanımlar ve hesaplamalarda kullanılırken, poisson oranı,

malzemenin enine ve boyuna deformasyonları arasındaki ilişkiyi açıklar. Özkütle ve özgül ısı gibi termal özellikler ise, malzemenin termal analizlerinde ve ısısal işlem simülasyonlarında kullanılır.

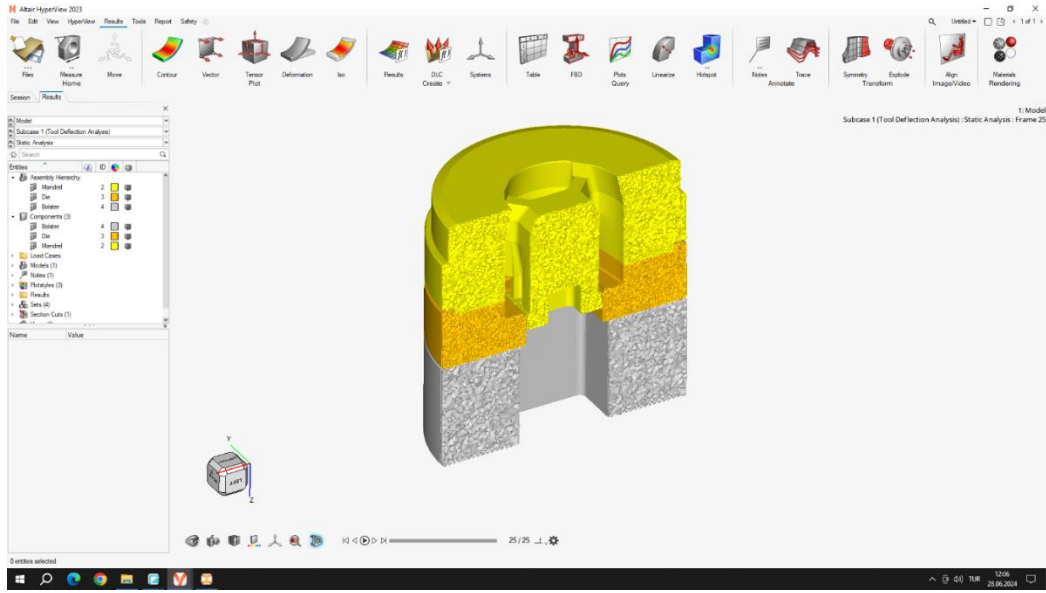


Şekil 4.26. Malzeme tanımlama işlemi



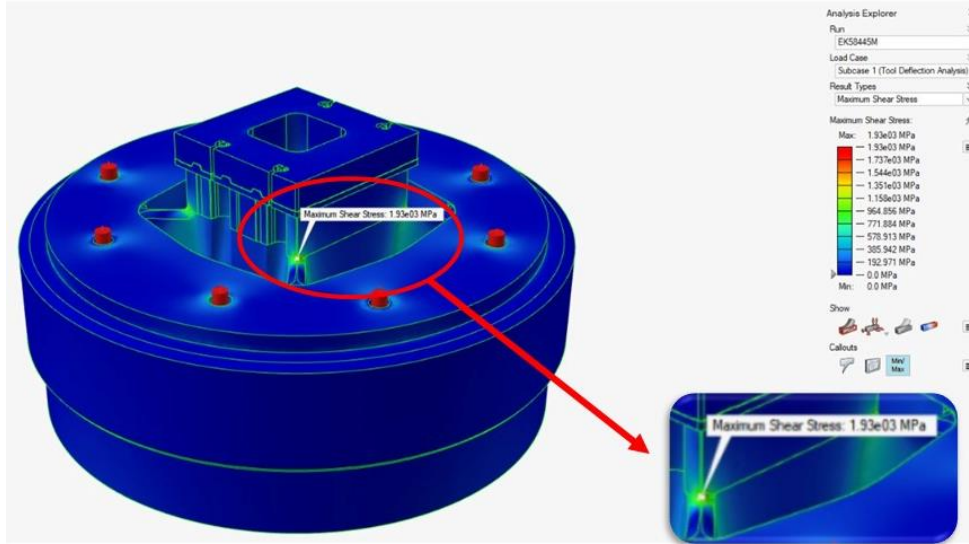
Şekil 4.27. 'Pressure type' kısmına veri verilmesi

Malzeme tanımlama adımının tamamlanmasının ardından, kalıp deformasyon analizine geçilmeden önce, son bir hazırlık aşaması daha vardır. Bu aşamada, ‘Pressure Type’ kısmına girilmesi gereken veri, kalıp takımının daha önce gerçekleştirilmiş olan ekstrüzyon analizinden elde edilir (Şekil 4.27). Bu veri, kalıp üzerindeki basınç dağılımını ve bu basıncın büyüklüğünü doğru bir şekilde tanımlamak için kritiktir. Ardından, kalıp takımı geometrisine uygun mesh işlemi yapılır (Şekil 4.28) ve analiz sürecini başlatmak için ‘Run’ seçeneğine tıklanır. Bu adım, tüm hazırlıkların tamamlandığını ve analiz yazılımının kalıp deformasyonunu simüle etmeye başlayacağını belirtir.



Şekil 4.28. Mesh uygulaması

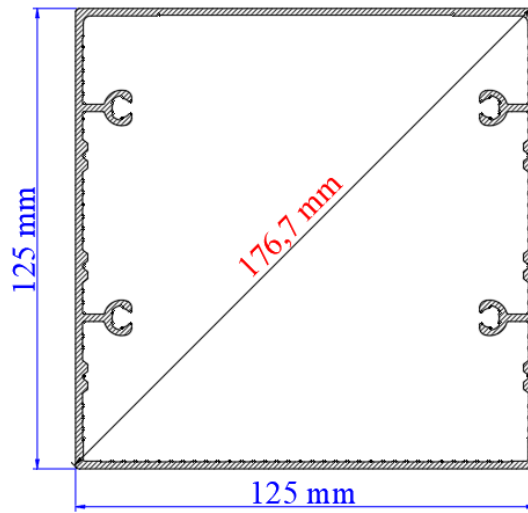
Elde edilen sonuçlarda, zıvana parçasının ayak dibi olarak adlandırılan, zıvana kafasını ayakta tutan ve gözleri birbirinden ayıran köprü kısımların köşe bölgelerinde, renk diyagramında ve parça üzerinde kırmızı renk ile gösterilmiş, kalıp dayanımını aşan kritik gerilmelerin varlığından söz etmek mümkündür (Şekil 4.29). Bu bölgelerin, zıvana üretiminde kullanılan Uddeholm marka Orvar 2 Microdized olarak isimlendirilmiş 1.2344 sıcak iş takım çeliği akma değeri olan 1520 MPa'dan yüksek olması (maksimum 1930 MPa) sebebiyle, sürekli pres basıncına maruz kalması halinde, deformasyona uğraması kuvvetle muhtemeldir [40]. AutoCad ve sonrasında Solid Works üzerinde öncelikle bu bölgelerin tasarımı ve modellemesi tekrar kontrol edilmelidir. Tasarım iyileştirilmesi sonucunda, ayak köşelerindeki gerilmenin akma değerinin altına düşmesi ve kritik bölgelerin renk diyagramında, toleranslı gerilmelerin içinde bulunduğunu belirten mavi renkte görülmesi beklenir.



Şekil 4.29. Kalıp takımının ‘Tool Deflection’ analizi sonuçları

4.5. Zıvana Parçasının Tasarım İyileştirmesi ve Yeniden Analizi

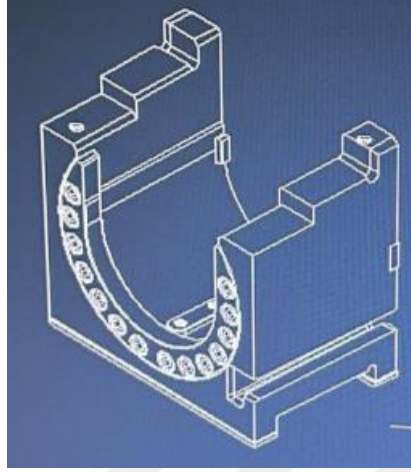
Şekil 4.30’daki profil için kalıp tasarım aşamasında, öncelikle üretilecek profilin yapısı incelenir ve profil eğer boşluklu bir yapıdaysa köprülü, boşluğu olmayan bir profil ise solid kalıp üretileceği kararlaştırılır. Bu profil yapısı kutu profil yapısına benzerdir, bu nedenle kalıp tasarımında zıvana parçası görülmektedir ve köprülü kalıp tasarımı yapılmasına karar verilerek kalıp tasarımına başlanmıştır.



Şekil 4.30. Üretilecek olan köprülü profil

Öncelikle kalıbın ana hatları olan çapı ve kalınlığının belirlenmesi gereklidir. Zıvana çapı, profilin kalıp üzerine yeterli alanda merkezlenebilmesi için geliştirilen ve uygulanan bir hesaplama ile, Şekil 4.30’daki profil köşegen uzunluğu ölçüsünün 2,2 sabitiyle çarpılması sonucu yaklaşık 388 mm olarak bulunur ve bu ölçü toleranslar dahilinde 400 mm olarak

seçilebilir. Kalıp takımının montaj halinin kalınlığı ise (paket boyu) ekstrüzyon preslerinde bulunan ve kalıp takımına yataklık yapan kalıp hamilinin boyuna göre belirlenmiştir (Şekil 4.31)



Şekil 4.31. Kalıp hamili

Alüminyum ekstrüzyon yapılacak tesisteki preslerin kapasitesi, ekstrüzyon sırasında kalıp üzerindeki gerilmeleri etkiler. Bu nedenle, bu yükleri ve gerilmeleri dengeli dağıtabilmek için, kalıp üzerinde birden fazla figüre yer verme durumu ortaya çıkabilmektedir. Bu durum, ekstrüzyon oranının optimum aralıkta olma gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bahsedilen pres ve yapılacak prosesin bilgileriyle ekstrüzyon oranı için aşağıdaki bağıntı bulunmaktadır:

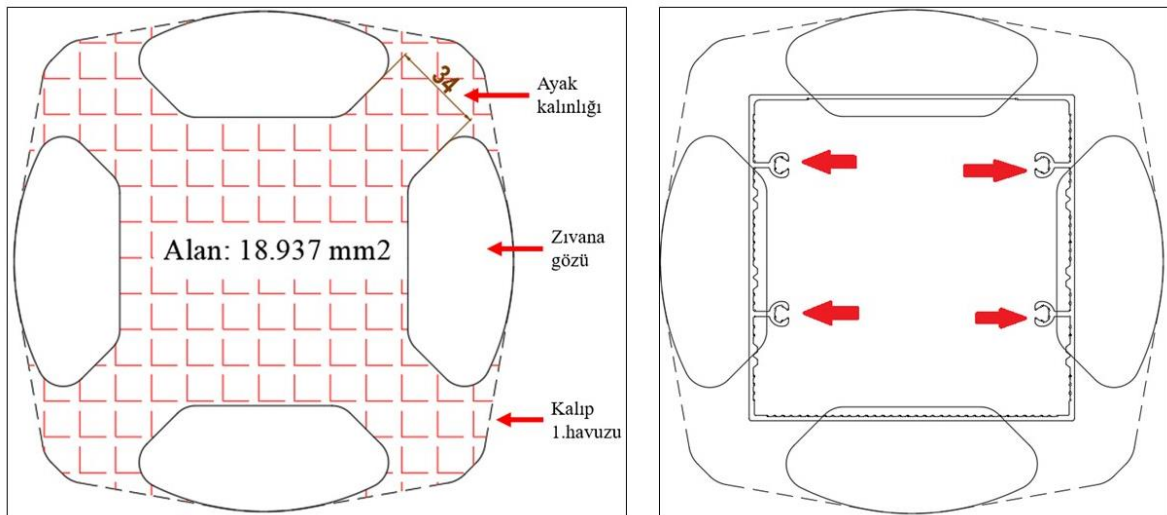
$$ER = A_c * \frac{d_{Al}}{m_p} * \frac{1}{f} \quad (4.3)$$

Burada, ER ekstrüzyon oranı, A_c konteynırın alanı (mm^2), d_{Al} alüminyumun özgül ağırlığı (g/cm^3), m_p üretilecek profilin 1 metresine düşen gramajı (g/m), f ise kalıp üzerinde profilin çıkacağı boşluk (figür) sayısıdır. Ekstrüzyon yapılan pres 2000 ton press kuvvetine sahiptir ve konteynır çapı 178 mm (17,8 cm)'dir. Dolayısıyla konteynır alanı yaklaşık 24.884 mm^2 ($248,84 \text{ cm}^2$) bulunur. Alüminyum özgül ağırlığı $2,73 \text{ g/cm}^3$ 'tür ve profilin 1 metresine düşen gramajı ise 3000 g/m (30 g/cm) olarak belirlenmiştir. Formülde figür sayısı, hem ekstrüzyon oranını uygun aralığa getirmekte yardımcı bir sabittir hem de kalıp üzerinde kaç profil çıkış (yürüme yüzeyi) boşluğu olması gerektiğini belirler. Bu formülde figür sayısı 1 alınmalıdır, aksi takdirde figür sayısı arttırıldığında ekstrüzyon oranı düşerek, olması gerektiği aralıktan çıkmaktadır. Hesaplamalar sonucunda ekstrüzyon oranı yaklaşık 23 bulunarak uygun aralıkta olduğu görülmüştür.

Ekstrüzyonda kullanılacak olan alüminyum alaşımının ısı genleşme katsayısına bağılı olarak profil için çekme payı belirlenir. Bu değer her iki kalıp için de, asıl profilin tüm ölçülerinin

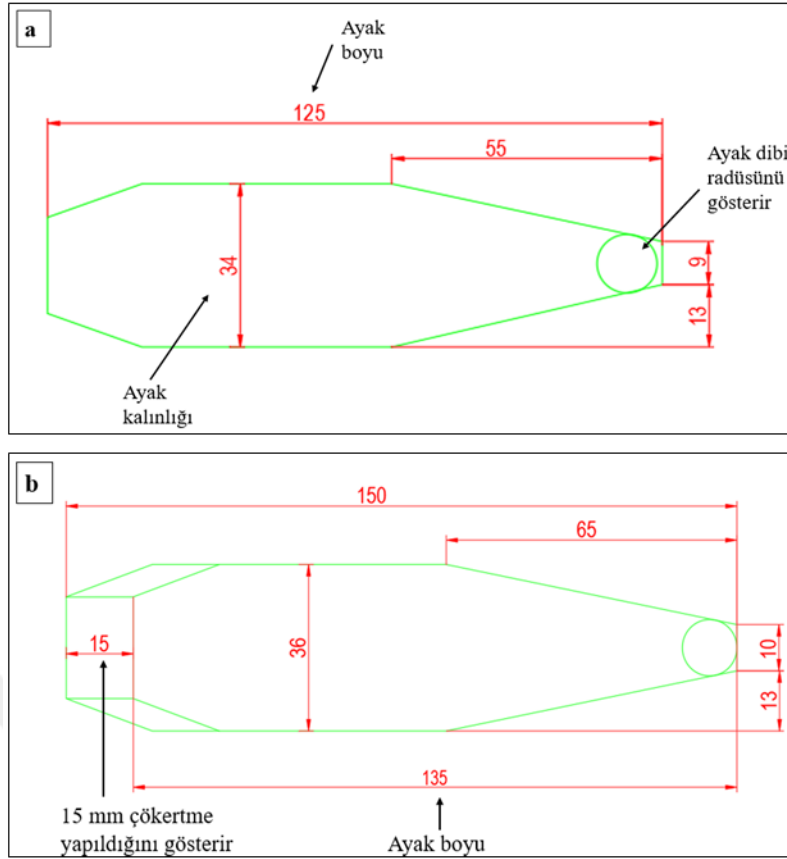
1,012 katıdır. Çekme paylı profilin ölçüsünün asıl profil ölçüsünden büyük olmasının nedeni, ekstrüzyon sonrasında yaşanan soğuma ile profil geometrisinin çok az miktarda küçülerek asıl ölçüsüne gelmesidir. Profilin çekme payı verilmiş hali, tasarlanacak kalıp takımı taslağının merkezine konur.

Alüminyum akışının uygun şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla dişi parçanın havuz bölümü için yükseklik ve kaç adet olacağı belirlenir. Bu kalıp takımı köprülü bir kalıp olduğu için zıvana tasarımında ise ayak sayısı ve kalınlıkları en önemli noktalardan biridir. Çünkü bu bölümler alüminyum akışıyla ilk karşılaşan, zıvana kafasını ayakta tutan ve uygun geometride olmaması durumunda prosesi büyük oranda etkileyen bölümlerdir. Ayak boyu ve kalınlığı hesabında alüminyum biyetin temas edeceği zıvana giriş yüzeyinin alanı esas alınır. Zıvananın, presin zıvana yüzeyine uygulamış olduğu kuvveti karşılayacak dayanıklılıkta olması gereklidir. Bu kuvveti karşılayabilmesi için de ayak boyu, ayak kalınlığı, ayak sayısı değerleri zıvana tasarımını etkiler.



Şekil 4.32. EK 58445E zıvana alan tasarımı

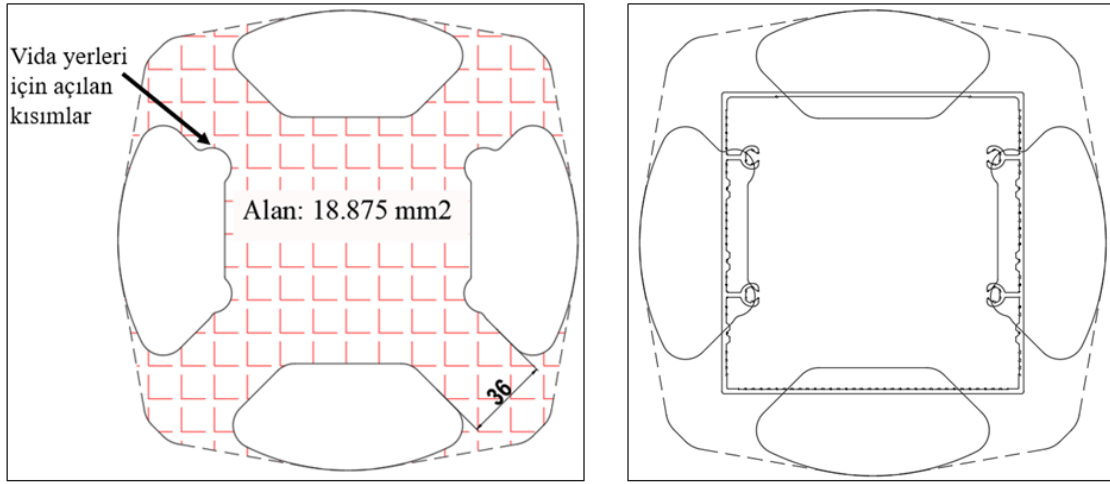
Zıvana ayak boyu (mm), zıvananın alüminyum biyet ile bulunduğu bölgenin alanı (mm^2), proste kullanılacak presin kalıba uygulamış olduğu mm^2 başına düşen kuvvet (N/mm^2), ayak sayısı, ayak kalınlıklarının ortalaması (mm), çeliğin ekstrüzyon sıcaklığındaki kopma değeri (N/mm^2), kalıp parçasının kalınlığı (mm) gibi parametrelere bağlıdır. Profil incelenerek hangi bölgelere ayak (köprü) geleceği kararlaştırılır. Kutu şeklinde olan bu profilin için uygun olan ayak sayısı her iki kalıp için de 4'tür. 4 adet ayak sayısı, aynı zamanda zıvana üzerinde 4 adet göz bölgesinin olacağını belirtir ve göz kısımlarının zıvana giriş bölgesine yerleştirilmesiyle ayak kalınlığı belirlenir.



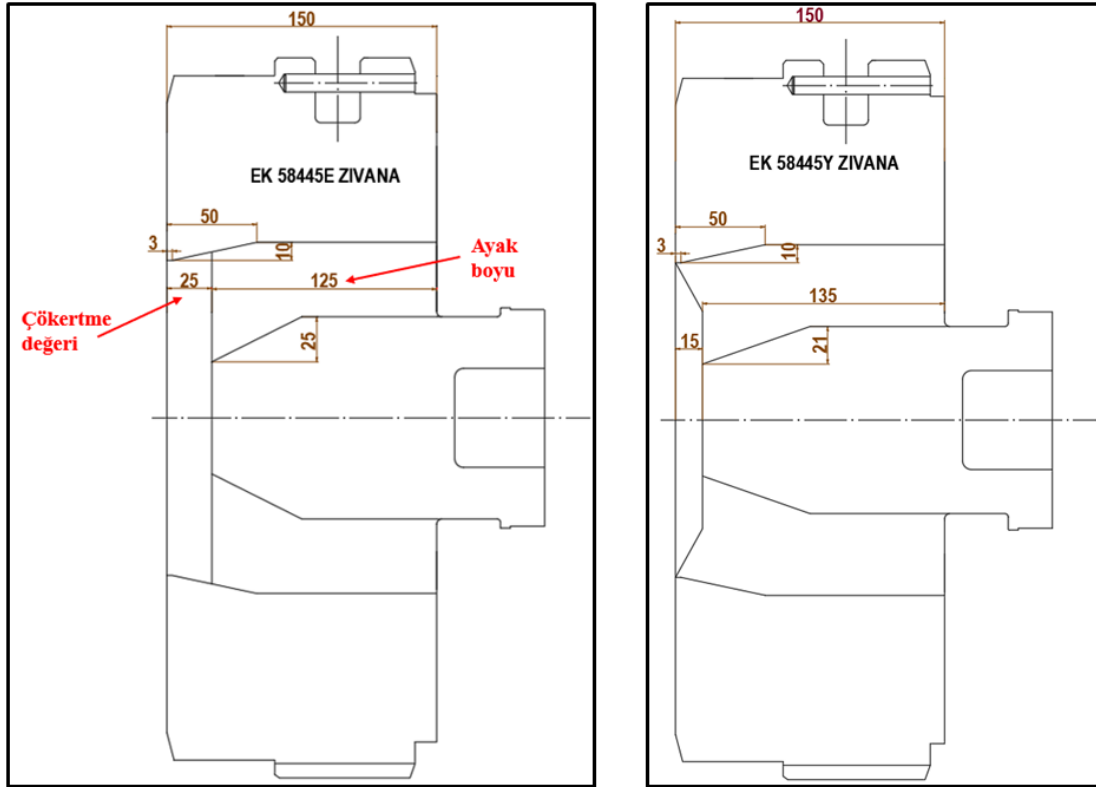
Şekil 4.33. a. EK 58445E zıvanasının yan görünüşte ayak yapısı b. EK 58445Y zıvanasının yan görünüşte ayak yapısı

Ayak kalınlığı ve ayak boyu değerleri ile EK 58445E zıvanası için Şekil 4.32’deki gibi bir zıvana giriş alanı tasarlanmıştır. İlk görsel incelemede, zıvana gözlerinde, alüminyum akışını profile bulunan vida yerlerine iletebileceği yeterli bölgenin bulunmadığı görülebilir. Ayrıca, EK 58445E zıvanasındaki 34 mm ayak kalınlığı ve 125 mm ayak boyu yetersiz olduğu tespit edilmiş, 36 mm ayak kalınlığı ve 135 mm ayak boyu şeklinde değiştirilerek EK 58445Y zıvanasına uygulanmıştır (Şekil 4.33.a ve Şekil 4.33.b). Böylelikle EK 58445Y zıvanasının giriş alanı Şekil 4.34’de belirtilen tasarıma dönüştürülmüştür.

‘Çökertme’ olarak adlandırılan ve alüminyum biyetin zıvana giriş kısmına yüksek gerilmelere sebebiyet vermeden akışını sağlamak amacıyla zıvana giriş yüzeyinden daha düşük olan kısmın EK 58445E zıvanasında 25 mm tasarlandığı için ayak boyunun küçüldüğü ve herhangi bir açı verilmeden keskin bir şekilde tasarlandığı tespit edilmiştir. EK 58445Y zıvanasında bu kısım 15 mm olarak tekrar tasarlanmıştır (Şekil 4.35).



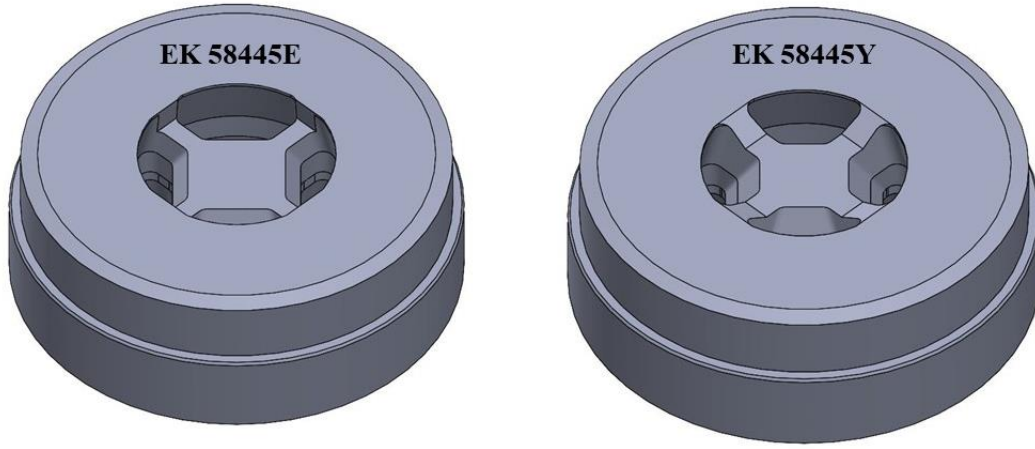
Şekil 4.34. EK 58445Y zıvana alan tasarımı



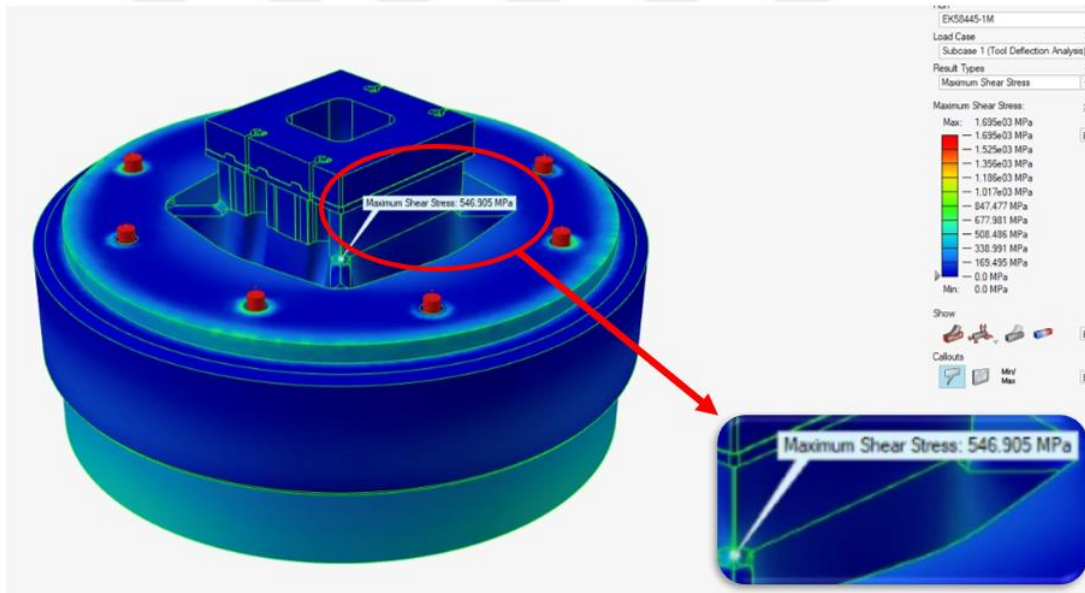
Şekil 4.35. EK 58445E ve EK 58445Y zıvanalarının yan görünüşleri

Diğer tüm zıvana ve kalıp tasarım ölçüleri uygun ve iki kalıp için aynı değere sahiptir. Tespit edilen hatalar düzeltildikten sonra EK 58445Y kalıp takımı Solid Works programıyla üç boyutlu modellenmiş (Şekil 4.36), tekrar aynı ekstrüzyon parametreleri ve aynı analiz hazırlık işlemleriyle Inspire Extrude Metal programında analize tabi tutulmuştur. EK 58445E kalıp takımının analizinde, 1930 MPa gerilme tespit edilen bölgenin, EK 58445Y kalıp takımının analizinde yaklaşık 547 MPa gerilme altında olduğu görülmüştür ve bu değer çelik akma değerinin oldukça altındadır (Şekil 4.37). Sonraki aşamada ise zıvanasına tasarım iyileştirmesi

yapılan EK 58445Y kalıp takımı, Altım Alüminyum firmasının alüminyum ekstrüzyon tesisinde deneme üretimine tabi tutulmuştur.



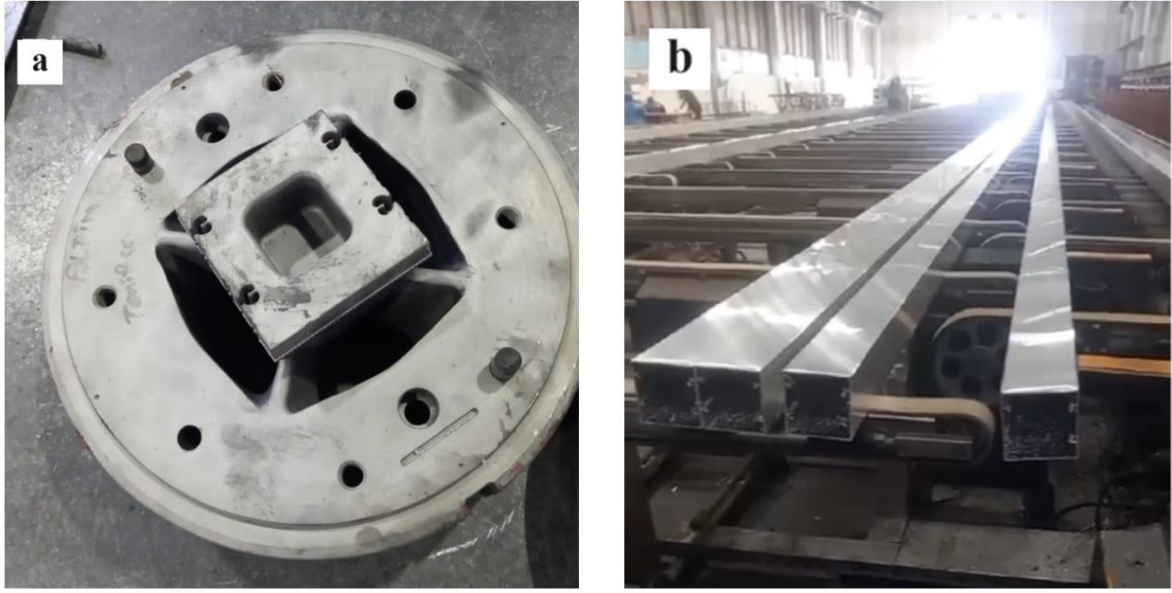
Şekil 4.36. 3 boyutlu modellenmiş EK 58445E ve EK 58445Y zıvanaların giriş bölümleri



Şekil 4.37. EK 58445Y zıvana deformasyon analizi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, AA6063 alüminyum alaşımlı biyet kullanılarak yapılan ekstrüzyon işleminde hasar gören Uddeholm çelik üretim firması tarafından Microdized Orvar olarak isimlendirilen 1.2344 sıcak iş takım çeliği ile üretilmiş ve ısıtıl işlem ile sertleştirilmiş zıvana parçasının ayak dipleri bölgesinden hasarlanması sonucu, ilk olarak ısıtıl işlem, nitrasyon ve çelik mikroyapıların incelendiği, sonrasında takım çeliğinin çekme deneyine tabi tutulduğu ve son olarak kalıp tasarımının Altair firmasının sonlu elemanlar tabanlı bir yazılımı olan Inspire Extrude Metal ile modellenerek kontrol edildiği bir metot uygulanmıştır.



Şekil 5.1. a. Tasarımı iyileştirilen zıvana parçası b. Yeniden tasarlanmış zıvananın bulunduğu kalıp takımının profil üretimi

Hasar tespit edilen zıvana kodu EK 58445E, tasarımı iyileştirilen zıvana kodu ise EK 58445Y olarak belirlenmiştir. 4.başlıkta, gerekli bilgiler girilerek yapılan hazırlıkların sonucunda gerçekleştirilen simülasyonda, çatlayan bölgelerin yüksek gerilim değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu noktaların hasara neden olabileceği düşünülmüş ve zıvana tasarımı kontrol edilmiştir. Yapılan kontroller sonucunda, zıvana parçasının belirli kısımlarında tasarım hataları yapıldığı tespit edilmiş, iyileştirme uygulanmış ve bu yeni tasarıma EK 58445Y kodu tanımlanmıştır. Yeni tasarlanan zıvananın Inspire Extrude Metal ile tekrar kalıp deformasyon analizi yapılmış ve hasarlı zıvana tasarım analizinde bulunan gerilim değerlerinden daha düşük gerilim değerleri gözlenmiştir. İki tasarıma ait simülasyon ve üretim sonuçlarının karşılaştırılması, Tablo 5.1’de görülebilir. Yeni tasarım modeli ile yeni bir zıvana parçası

üretilmiş ve Altım Alüminyum ekstrüzyon pres hattında üretime alınmıştır (Şekil 5.1.a ve Şekil 5.1.b).

Zıvana parçası hasar gören EK 58445E kodlu zıvanayı içeren kalıp takımı ile 4.1 numaralı başlıkta da bahsedilen 5 ton net alüminyum profil üretim yapılmıştır ve hasar gerçekleşikten sonra üretim durmuştur. Sadece zıvana tasarımının iyileştirilmesi sonrası, EK 58445E kodlu zıvanalı kalıp takımının Tablo 4.3'teki profil üretim parametrelerinin kullanıldığı EK 58445Y kodlu zıvanayı içeren kalıp takımı ile yapılan yaklaşık 8,2 ton net profil üretimi, üretim miktarının %64 arttığını göstermektedir ve kalıp takımı herhangi bir hasar gözlenmeden hala üretime devam etmektedir (Şekil 5.2).

PROFİL KODU	125*125 DİME PROFİLİ	TARİH	15.11.2023	YEDEK NO : 3
PROFİL ADI	125*125 DİME PROFİLİ	TENEFER NO : 1	ÖMÜR (M) : 1900	BASILAN (M) : 0
FİRMAYA ÖZEL	☒	KALAN (M) : 1900	TEST SAYISI	0 0 0
BİRİM AĞIRLIK (kg/m)	3,081	PROFİL GRUBU		
MAK. BR. AĞIRLIK	3,235	CEVRE (mm)	489,30C	
MIN. BR. AĞIRLIK	2,927	ALAN (mm²)	1.137,0	
KALIP ÇİNELİ	KÖPRÜLÜ TAKIM			
TOP. BRÜT : 10.601,31	TOP. NET : 8.248,05	TOP. METRE : 2.655,00	TOP. KULLANIM : 4	

Şekil 5.2. EK 58445Y kodlu zıvana içeren kalıp takımının profil üretim bilgileri

Tablo 5.1. EK 58445E ve EK 58445Y tasarımlarının simülasyon ve üretim sonuçları

Simülasyon	Tespit Edilen Maksimum Gerilme Değeri (MPa)	Profil Üretimi (ton)	Durum
İlk Simülasyon (EK 58445E)	1930	5	Hasar gözlemlendi.
İkinci Simülasyon (EK 58445Y)	547	8,2	Hasar yok, üretim devam ediyor.

Alüminyum ekstrüzyon prosesinde verimliliği etkileyen en büyük faktörlerden biri kalıp tasarımıdır. Proses sonucunda elde edilen profil şekillerinin genellikle detaylı olması nedeniyle ve ürün kalitesinin yüksek olması amaçlanması sebebiyle kalıp tasarımı da oldukça önemli bir çalışma alanıdır. Kalıp tasarımının, ekstrüzyon prosesindeki ısı gerilim, yüksek basınç, sürtünmeler, alüminyum akışı gibi parametreler göz önüne alınarak yapılmasıyla, ömür optimize edilebilir ve aynı zamanda ürün kalitesine de pozitif yönde etki etmektedir. Ekstrüzyon prosesi sırasında, kalıplarda deformasyonlar görülebilir. Bu deformasyonların kök nedeninin tespit edilebilmesi için hasarın mikro ve makro olarak incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu noktada, bu deformasyonları önleyebilmek için sonlu elemanlar yazılım tabanlı programlar kullanılarak kalıp tasarımı aşamasında potansiyel sorunlar tespit edilebilir. Hasarın

sebebi olduğu yüksek maliyetlerden kaçınabilmek adına, alüminyum ekstrüzyon kalıbı üretimi yapan tesislerin kalıp tasarımı aşamasında, ekstrüzyon pres ve proses bilgileri ile sonlu elemanlar yazılımı kullanarak bir ekstrüzyon simülasyonu gerçekleştirmelerinin ve optimizasyon süreçleri geliştirmelerinin faydalı olacağı gözlenmiştir.

İleriye yönelik araştırmalar için, mevcut sıcak iř takım çeliği yerine, daha yüksek sıcaklık ve basına dayanıklı, aşınma ve yorulma direnci daha yüksek yeni elik alaşımları veya kompozit malzemeler geliştirilmelidir. Bu malzemelerin ekstrüzyon sürecindeki performansları laboratuvar ortamında test edilmeli ve sonuçlar karşılaştırılmalıdır. Bu sayede, kalıp ömrü ve üretim verimliliği artırılabilir. Ek olarak, üretim sırasında anlık değişikliklere uyum sağlayabilen adaptif kalıp tasarımları üzerine araştırmalar yapılmalıdır. Akıllı malzemeler ve sensörler kullanılarak, kalıp içi gerilimler ve sıcaklık değişimleri anlık olarak izlenebilir ve bu veriler kalıp tasarımında geri besleme için kullanılabilir. Böylece, retim süreci daha dinamik ve kontrol edilebilir hale gelebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ö. Keleş, *Alüminyumun Seriüveni*. 1. Baskı, *Bilnet Matbaacılık ve Yayıncılık A.Ş.*, İstanbul, 2021.
- [2] S. Z. Qamar, T. Pervez and J. C. Chekotu, “Die Defects and Die Corrections in Metal Extrusion,” *Metals*, vol. 8, pp. 1-18, May 2018.
- [3] A. F. M. Arif, A. K. Sheikh, S. Z. Qamar, “A study of die failure mechanisms in aluminum extrusion,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 134, pp. 318-328, November 2002.
- [4] Z. Albaraz, “Isıl İşlem Parametrelerinin ve Kimyasal Kompozisyonun Sıcak İş Takım Çeliklerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 310400.
- [5] S. Bakdemir, D. Özkan, M. C. Türküz, E. Uzun, S. Salman, “Effect of the Nitriding Process in the Wear Behaviour of DIN 1.2344 Hot Work Steel,” *Journal of Naval Sciences and Engineering*, vol. 16, no.1, pp. 45-70, April 2020.
- [6] S. S. Akhtar, A. F. M. Arif, “Fatigue Failure of Extrusion Dies: Effect of Process Parameters and Design Features on Die Life,” *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 10, pp. 38-49, November 2009.
- [7] Ö. Ayer, S. Bingöl, İ. Karakaya, “An extrusion simulation of an aluminum profile by porthole die,” *Vibroengineering Procedia*, vol. 27, pp. 139-144, September 2019.
- [8] K. K. Tong, M. S. Yong, M. W. Fu, T. Muramatsu, C. S. Goh and S. X. Zhang, “CAE enabled methodology for die fatigue life analysis and improvement,” *International Journal of Production Research*, vol. 43, no. 1, pp. 131-146, January 2005.
- [9] E. Giarmas, D. Tzetzis, “Optimization of die design for extrusion of 6xxx series aluminum alloys through finite element analysis: a critical review,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, pp. 5529-5551, January 2022.
- [10] Ö. Ayer, “Kalıp parametrelerinin ekstrüzyon kuvveti üzerine etkisinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu,” *DÜMF Mühendislik Dergisi*, vol. 10, pp. 633-640, Kasım 2019.
- [11] P. K. Saha, *Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojisi*. 1. Baskı, *Ege Basım*, İstanbul, 2005.
- [12] S. Du, X. Zan, P. Li, L. Luo, X. Zhu and Y. Wu, “Comparison of Hydrostatic Extrusion between Pressure-Load and Displacement-Load Models,” *Metals*, vol. 7, pp. 1-9. March 2017.
- [13] İ. Karakaya, “Alüminyum Ekstrüzyonunda Kaynaşma Kalitesi Ve İç Uzama Probleminin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2023, 782155.
- [14] T. Sebiboğa, “Direkt Ekstrüzyon Metoduyla Üretilmiş En AW-ALSiMg Alüminyum Alaşımlarında Kimyasal Kompozisyonun Ürün Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi,”

- Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2019, 596613.
- [15] H. Aydın, M. Şendeniz, A. H. Demirci, “Ekstrüzyon Öncesi Ve Sonrası Uygulanan Isıl İşlemlerin AA6063 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt no. 14, 2009. DOI: 10.17482/uujfe.37612.
- [16] European Committee For Standardization, “*Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 3: Chemical composition and form of products*,” European Standard EN 573-3, Belgium, 2007.
- [17] M. Baruah, A. Borah, “Processing and Precipitation Strengthening of 6xxx Series Aluminium Alloys: A Review,” *International Journal of Material Science*, vol. 1, pp. 40-48, January 2020.
- [18] P. Yan, F. Li, Z. Liu, L. Li, “Sensitivity analysis of die structural and process parameters in porthole die extrusion of magnesium alloy tube using Taguchi method,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, pp. 1-18, April 2022.
- [19] N. Eren, F. Hayat, M. Günay, “Sertleştirilmiş 1.2367 Takım Çeliğinin İşlenmesinde Enerji Tüketiminin Analizi ve Modellenmesi,” *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, vol. 1, no. 3, pp. 41-49, Aralık 2020.
- [20] F. Huber, C. Bischof, O. Hentschel, J. Heberle, J. Zettl, K. Y. Nagulin, M. Schmidt, “Laser beam melting and heat-treatment of 1.2343 (AISI H11) tool steel – microstructure and mechanical properties,” *Materials Science and Engineering: A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, vol. 742, pp. 109-115, January 2019.
- [21] H. B. Ulaş, F. Mihmat, H. Demir, “DIN 1.2344 sıcak iş takım çeliğinin testere freze çakılarıyla işlenebilirliğinin araştırılması,” *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 26, pp. 170-178, Haziran 2010.
- [22] V. Karakurt, O. Zığındere, T. Çıtrak, F. Birol, T. Danışman, “1.2344 ve WP7V Sıcak İş Takım Çeliklerinin Aşınma Davranışına Sıcaklığın Etkisi,” *Karabük Üniversitesi Çelik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, vol. 4, pp. 10-16, Eylül 2023.
- [23] H. Koçak, *Takım Çelikleri El Kitabı*, 8. Baskı, Yonca Ajans-Ofset Matbaacılık Ltd. Şti. İstanbul, 2010.
- [24] M. G. Hocking, V. Vasantasree, P. S. Sidky, *Metallic and Ceramic Coatings: Production, High Temperature Properties, and Applications*. 1st ed., Longman Scientific & Technical, England, 1989.
- [25] Y. Yamada, E. Hirohito and K. Takahashi, “Influence of Crystal Structure of Nitride Compound Layer on Torsion Fatigue Strength of Alloy Steel,” *Metals*, vol. 9. December 2019. DOI: 10.3390/met9121352
- [26] H. Akbulut, E. Bengü, “İki Farklı Sıvı Ortamda Nitrülenmiş H13 Çeliğinin Aşınma Davranışı,” *Sakarya University Journal of Science*, cilt no.8, pp. 76-83, Haziran 2004.

- [27] A. Şelte, K. Arslan, S. Ülker, A. Hatman, “Hasar Analizi Örneği,” *TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası Metalurji Dergisi*, 165.sayı, pp. 35-38, Temmuz 2013.
- [28] D. Ashkenazi, “How can fracture mechanics and failure analysis assist in solving mysteries of ancient metal artifacts?,” *Archaeological and Anthropological Sciences*, vol. 12, January 2020. DOI: 10.1007/s12520-019-00970-w
- [29] R. P. Wilkerson, “Biomimetic ‘Nacre-Like’, Metal-Compliant-Phase Ceramics Produced via Coextrusion,” Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 2018.
- [30] P. G. Kossakowski, “Influence of Initial Porosity on Strength Properties of S235JR Steel at Low Stress Triaxiality,” *Archives of Civil Engineering*, vol. 58, pp. 293-308, September 2012.
- [31] E. R. Rangel, “Fracture Toughness Determinations by Means of Indentation Fracture,” in *Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry*, J. Cuppoletti, Ed. InTech, Cincinnati. August 2011, pp 21-38.
- [32] Y. Enomoto, “20 - Steam turbine retrofitting for the life extension of power plants,” in *Advances in Steam Turbines for Modern Power*, 2nd ed., T. Tanuma, Ed. Woodhead Publishing, Sawston, 2022, pp. 491-530.
- [33] M. Kumbhalkar, D. V. Bhope, A. V. Vanalkar, “Finite Element Analysis of Rail Vehicle Suspension Spring for Its Fatigue Life Improvement,” in *Advanced Manufacturing and Materials Science*, K. Antony, J. Davim, Eds. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering. Springer, Cham, 2018, pp. 39-53.
- [34] M. Samatham, R. P. Naik, B. R. H. Reddy, G. A. Kumar, “A Study on Improvement of Fatigue Life of materials by Surface Coatings,” *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 5-9, January 2018.
- [35] A. Chatterjee, “Effect of Microstructure and Crystallographic Texture on Mechanical Properties of Modified 9Cr-1Mo Steel,” Ph.D. thesis, Indian Institute of Technology, Kharagpur, 2018.
- [36] L. Cipolla, A. D. Gianfrancesco, D. Venditti, G. Cumino, S. Caminada, “Microstructural Evolution During Long Term Creep Tests of 9%Cr Steel Grades,” In Proc. ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference, Volume 9: Eighth International Conference on Creep and Fatigue at Elevated Temperatures, 2009, pp. 445-459.
- [37] S. Hiromoto, “4 - Corrosion of metallic biomaterials,” in *Metals for Biomedical Devices*, 1st ed., M. Niinomi Ed. Woodhead Publishing, Sawston, 2010, pp. 99-121.
- [38] North American Die Casting Association, “NADCA #207-2018 Special Quality Die Steel & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies”, USA, 2018.
- [39] Zwick Roell AllroundLine Z250: side test-area for greater flexibility, <https://www.zwickroell.com/news-events/news/allroundline-z250-with-side-test-area/>, (Erişim Tarihi: 17 Nisan 2023).
- [40] Voestalpine High Performance Metal A.Ş. Uddeholm Orvar 2 Microdized Technical Brochure,

https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/216/productdb/api/tech_uddeholm-orvar-2m_en.pdf, (Erişim Tarihi: 7 řubat 2021).



ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2012 yılında girdiği Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2017 yılında mezun oldu. 2020 yılında Yalova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2019-2023 yılları arasında alüminyum ekstrüzyon kalıp üretimi yapan bir firmada çalışma deneyimi bulunmaktadır. 2023 yılı Aralık ayından itibaren otomotiv sektöründe çalışma hayatına devam etmektedir.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

M. Düzelten, İ. Sevim, “Hasarlı Alüminyum Ekstrüzyon Zıvanasının Isıl İşlem, Nitrasyon Ve Çelik Mikroyapısı Kontrolü,” *4. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi*, İstanbul, pp. 475, Temmuz 2024.

