

**MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ EKSTRÜZYON  
PROSES PARAMETRELERİNİN SANAL VE GERÇEK  
ORTAMDA İNCELENMESİ**

**Enes KURTULUŞ**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ EKSTRÜZYON PROSES  
PARAMETRELERİNİN SANAL VE GERÇEK ORTAMDA İNCELENMESİ**

Enes KURTULUŞ  
0000-0003-4271-8566

Prof. Dr. Fatih KARPAT  
0000-0001-8474-7328  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Enes KURTULUŞ tarafından hazırlanan “MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ EKSTRÜZYON PROSES PARAMETRELERİNİN SANAL VE GERÇEK ORTAMDA İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Fatih KARPAT

- |                 |   |      |
|-----------------|---|------|
| <b>Başkan</b> : | Prof. Dr. Fatih KARPAT<br>0000-0001-8474-7328<br>Bursa Uludağ Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Makine Mühendisliği Anabilim Dalı                            | İmza |
| <b>Üye</b> :    | Prof. Dr. Necmettin KAYA<br>0000-0002-8297-0777<br>Bursa Uludağ Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Makine Mühendisliği Anabilim Dalı                          | İmza |
| <b>Üye</b> :    | Doç. Dr. Zeliha Kamış KOCABIÇAK<br>0000-0003-3292-8324<br>Bursa Uludağ Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı                 | İmza |
| <b>Üye</b> :    | Dr. Öğr. Üyesi Gürkan İRSEL<br>0000-0003-0828-6560<br>Trakya Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Makine Mühendisliği Anabilim Dalı                             | İmza |
| <b>Üye</b> :    | Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur GENÇ<br>0000-0003-0332-1785<br>Bursa Teknik Üniversitesi,<br>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,<br>Makine Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**

.././.....

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**08/06/2022**

**Enes KURTULUŞ**

## TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı  
Tarih

Prof. Dr. Fatih KARPAT  
31.04.2022

Öğrencinin Adı-Soyadı  
Tarih

Enes KURTULUŞ  
31.04.2022

## ÖZET

Doktora Tezi

### MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ EKSTRÜZYON PROSES PARAMETRELERİNİN SANAL VE GERÇEK ORTAMDA İNCELENMESİ

**Enes KURTULUŞ**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Fatih KARPAT

Magnezyum ekstrüzyon alaşımları, günümüzde hafiflik avantajından dolayı başta otomotiv olmak üzere birçok sektörün ilgisini çekmektedir.

Bu çalışmada; AM50 ve AZ31 magnezyum alaşımından dikdörtgen kesitli olarak üretilmesi planlanan solid profil için optimum ekstrüzyon proses parametreleri sanal analizlerle belirlenmiştir. Kalıp sıcaklığı, biyet sıcaklığı, konteyner sıcaklığı ve baskı hızını içeren proses parametreleri ve kalıp cep yüksekliği için Taguchi L18 deney tasarımı tablosu oluşturulmuş, her bir alaşım için toplam 18 farklı sürekli rejim ekstrüzyon analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki alaşım için, farklı parametrelerle gerçekleştirilen sanal analizler sonucunda; gerekli ekstrüzyon kuvveti, profil çıkış sıcaklığı ve izafi hız farkı değerleri incelenmiş, optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve optimum proses parametreleri elde edilmiştir. Optimum proses parametreleri ve kalıp geometrisi kullanılarak deneysel ekstrüzyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kuvvet sensörleri ve sıcaklık ölçerler sayesinde prosten alınan kuvvet ve sıcaklık verileri, sonlu elemanlar analizi sonucu ortaya çıkan verilerle karşılaştırılmıştır.

Farklı soğutma yöntemlerinin, AM50 ve AZ31 magnezyum alaşımı kullanılarak ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş profiller üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda; hava ile ve su ile soğutulmuş ekstrüzyon profillerinden alınmış numunelerle çekme ve basma testleri gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde; farklı yöntemlerle soğutulmuş profillerden alınan numunelerin içyapı incelemeleri de gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte belirtilen numuneler için sertlik ölçümleri, SEM analizi ile kırılma yüzeyi incelemeleri ve Charpy darbe testleri gerçekleştirilip sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AM50, AZ31, Magnezyum ekstrüzyonu, Hyperxtrude, Ekstrüzyon parametreleri, SEA, Soğutma metodu, İçyapı özellikleri.

**2022, xvii + 126 sayfa.**

## **ABSTRACT**

PhD Thesis

### **INVESTIGATION OF EXTRUSION PROCESS PARAMETERS OF MAGNESIUM ALLOYS WITH VIRTUAL ANALYSIS AND EXPERIMENTALLY**

**Enes KURTULUŞ**

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

**Supervisor:** Prof. Dr. Fatih KARPAT

In this study, optimum extrusion process parameters for a solid profile planned to be produced from AM50 and AZ31 magnesium alloys with a rectangular cross-section, were determined by virtual analysis. Taguchi L18 orthogonal array was created for process parameters, including die temperature, billet temperature, container temperature, ram speed and die pocket length. As a result of virtual analysis performed with different parameters, required extrusion force, profile outlet temperature, and relative speed difference values were examined. Optimization was carried out and optimum process parameters were obtained. Extrusion experiments were carried out using the optimum process parameters and die geometry. Force and temperature values taken from the process using loadcells and thermocouples were compared with the values obtained from virtual extrusion analysis.

The effects of cooling methods on tensile – compression behaviors and microstructural properties of samples are investigated. Tensile and compression tests were carried out with samples taken from extrusion profiles cooled by air and water. Similarly, microstructural properties of the samples taken from profiles cooled by different methods were investigated. In addition, hardness measurements, fracture surface examinations with SEM analysis, and Charpy impact tests were performed for the specified samples and the results were given comparatively.

**Keywords:** AM50, AZ31, Magnesium extrusion, Hyperxtrude, Optimization, Extrusion parameters, FEA, Cooling method, Microstructure.

**2022, xvii + 126 pages.**

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sırasında vermiş olduğu destek, bilgi paylaşımı ve yönlendirmelerinden dolayı, öncelikle tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Fatih KARPAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Ar-Ge çalışmalarında ve lisansüstü eğitim konusunda her türlü maddi-manevi destek ve teşvikleri için Yeşilova Holding A.Ş. yönetim kuruluna, tecrübelerini benimle paylaşan Ingwerk GmbH İnovasyon Müdürü Sayın Dr. Felix GENSCHE'e ve Bursa Uludağ Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Hakan AYDIN ile Sayın Araştırma Görevlisi Meryem ALTAY'a teşekkür ederim.

Tez çalışmasına konu olan ve yürütücülüğünü gerçekleştirdiğim çalışmalar; TÜBİTAK tarafından desteklenmeye hak kazanmış TEYDEB-1511 / 1160380 kodlu 'Magnezyum Alaşımlarının Ekstrüzyonu ve Magnezyum Alaşımli Ön Çarpışma Tamponu Geliştirilmesi' isimli proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Her türlü desteği için TÜBİTAK'a ve projede emeği geçen çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında yer alan bilgisayar destekli analiz ve test konularındaki destekleri ve daha da önemlisi, değerli dostlukları için Yeşilova Holding Ar-Ge Merkezi çalışanları Sayın İrem SAPMAZ, Sayın Yalçın ŞENSOY ve Sayın Barış KARA 'ya teşekkürlerimi bildiririm.

Tez çalışması süresince gösterdikleri anlayış ve verdikleri destek için Coşkunöz Metal Form ailesine, ekip arkadaşlarıma ve Teknik Genel Müdür Yardımcısı Sayın Gökalp UYSAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

Hayatımın her anında ve alanında olduğu gibi; bu yoğun tez çalışması sırasında da verdiği destek, gösterdiği sabır ve fedakârlık için değerli eşim Gülşah KURTULUŞ'a, çalışmama ellerinden geldiği kadar müsaade eden, huzur kaynaklarım, kızım Sare'ye ve oğlum Bera'ya en derin duygularıyla teşekkür ederim.

Enes KURTULUŞ

08/06/2022



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Magnezyum.....	4
2.2. Magnezyum Alaşımları ve Yaygın Kullanılan Alaşım Elementleri.....	6
2.2.1. Alüminyum.....	9
2.2.2. Çinko.....	11
2.2.3. Mangan.....	12
2.3. Magnezyum Alaşımlarının Uygulama Alanları.....	14
2.3.1. Magnezyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisindeki Kullanımı.....	15
2.4. Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu.....	19
2.5. Magnezyum Alaşımlarının Deformasyon Mekanizması.....	20
2.5.1. Kayma.....	20
2.5.2. İkizlenme.....	21
2.6. Magnezyum Alaşımlarının Ekstrüzyonu.....	23
2.6.1. Ekstrüzyon Hızı.....	24
2.6.2. Ekstrüzyon Sıcaklığı.....	26
2.6.3. Ekstrüzyon Oranı.....	27
2.7. Ekstrüzyon Prosesinin Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi.....	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	35
3.1. Sonlu Elemanlar Metodu.....	35
3.2. Magnezyum Ekstrüzyon Prosesinin Sonlu Elemanlar Metodu ile Simülasyonu.....	36
3.2.1. HyperXtrude Yazılımı.....	37
3.2.2. Ekstrüzyon Malzeme Modeli.....	39
3.2.3. Magnezyum Alaşımlarının Sıcak Basma Testleri.....	42
3.2.4. Ekstrüzyon Kalıbı Tasarımı.....	45
3.2.5. Ekstrüzyon Kalıbı ve Profilin Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması.....	48
3.2.6. Sınır Şartlarının Tanımlanması.....	50
3.2.7. Malzeme Parametrelerinin Tanımlanması.....	53
3.2.8. HyperXtrude Yazılımı İle Analiz Modelinin Çözdürülmesi.....	55
3.3. Optimizasyon Çalışmaları.....	57
3.3.1. Deney Tasarımı.....	57
3.3.2. Taguchi Metodu.....	58
3.3.3. Ekstrüzyon Prosesi İçin Deney Tasarımı Tablosunun Oluşturulması.....	60
3.3.4. Optimum Proses Parametrelerinin Belirlenmesi.....	63
3.4. Magnezyum Ekstrüzyon Kalıbının Üretimi.....	63
3.5. Deneysel Magnezyum Ekstrüzyon Çalışmaları.....	65
3.6. Mekanik Özelliklerin ve İyapıların İnceleme Yöntemleri.....	67

3.6.1. Metalografik Muayene Numunesi Hazırlama İşlemleri.....	68
3.6.2. Optik Mikroskop İncelemeleri .....	68
3.6.3. Sertlik Ölçümleri.....	69
3.6.4. Çekme Testleri .....	69
3.6.5. Basma Testleri.....	72
3.6.6. SEM Analizleri.....	72
3.6.7. Charpy Çentik Darbe Testi.....	73
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	75
4.1. Sıcak Basma Testi Sonuçları.....	75
4.2. Sıcak Basma Test Sonuçlarından Malzeme Parametrelerinin Elde Edilmesi.....	80
4.3. Deney Tasarımı Tablosuna Göre Sürekli Rejim Ekstrüzyon Analizlerinin Gerçekleştirilmesi .....	83
4.4. Optimum Proses Parametrelerinin Belirlenmesi.....	84
4.5. Geçici Rejim Ekstrüzyon Analizleri ile Optimizasyonun Doğrulanması .....	85
4.6. Deneysel Magnezyum Ekstrüzyon Sonuçları .....	87
4.7. Sonlu Elemanlar Analizleri ve Deneysel Çalışma Verilerinin Karşılaştırılması .....	89
4.8. Magnezyum Ekstrüzyonunda Soğutma Yönteminin Etkisinin İncelenmesi.....	93
4.8.1 Çekme Testi Sonuçlarının Kıyaslanması .....	95
4.8.2. Basma Testi Sonuçlarının Kıyaslanması.....	100
4.8.3 Sertlik Ölçümlerinin Karşılaştırılması .....	104
4.8.4. İÇyapı İncelemelerinin Karşılaştırılması .....	104
4.8.5. Kırılma Yüzeyi İncelemeleri.....	107
4.8.6. Charpy Çentik Darbe Testi Sonuçlarının Kıyaslanması .....	110
5. SONUÇ.....	112
KAYNAKLAR .....	115
ÖZGEÇMİŞ .....	125

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
Q	Aktivasyon Enerjisi
a	Atomik Kafes Genişliği
c	Atomik Kafes Yüksekliği
HB	Brinell Sertlik Değeri
R	Evrensel Gaz Sabiti
$\sigma$	Gerilme
$\alpha$	Gerilme Çarpanı
$d\phi/dt$	Gerinim Oranı
n	Gerinim Oranı Sertleşme Üsteli
GPa	Gigapascal
gr	Gram
J	Joule
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
A	Karşılıklı Gerinim Oranı Faktörü
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
MN	Meganewton
MPa	Megapascal
$\mu\text{m}$	Mikrometre
ml	Mililitre
mm	Milimetre
nm	Nanometre
pH	Potansiyel Hidrojen
°C	Santigrat Derece
T	Sıcaklık
V	Volt
Z	Zener-Holloman Parametresi

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
ASTM	American Society for Testing and Materials
ALE	Arbitrary Lagrangian Euler
CAE	Computer Aided Engineering
CNC	Computer Numerical Control
CAM	Computer Aided Manufacturing
EKAP	Eşit Kanallı Açısal Presleme
HSP	Hegzagonal Sıkı Paket
IACS	International Annealed Copper Standard (Uluslararası Tavlı Bakır Standardı)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Birim magnezyum hücre kristal yapısının şematik gösterimi. a) atomik pozisyonlar, b) taban düzlem ve [1210] bölgesindeki temel düzlemler, c) [1100] bölgesindeki temel düzlemler ve d) temel yönler (Roberts, 1960).....	6
Şekil 2.2.	Mg-Al ikili faz diyagramı (West & Gribach, 1988) .....	10
Şekil 2.3.	Mg-Zn ikili faz diyagramı.....	11
Şekil 2.4.	Mg-Al ve Mg-Zn ikili sistemlerinde çözünen miktarın dayanıma etkisi (Polmear, 2005).....	12
Şekil 2.5.	Mg-Al-Zn-Mn alaşımına ait faz diyagramı (Laser vd., 2006).....	13
Şekil 2.6.	Magnezyum alaşımlarının yapısal malzeme olarak döküm formunda kullanıldığı bazı kullanım alanları (Zengin, 2018).....	14
Şekil 2.7.	Ekstrüzyon magnezyum uygulamalarından bazı örnekler (Zengin, 2018) .....	15
Şekil 2.8.	Magnezyum alaşımlarından üretilen otomobil parçaları ve sağladığı ağırlık kazançları (Zengin, 2018).....	17
Şekil 2.9.	Magnezyum teknoloji gelişimi için Volkswagen stratejisi (Öztürk & Kaçar, 2012) .....	17
Şekil 2.10.	Otomobillerde kullanılan bazı magnezyum parça örnekleri (Kulekci, 2015).....	18
Şekil 2.11.	Magnezyumun sulu çözeltilerdeki reaksiyonları .....	19
Şekil 2.12.	Magnezyumda kayma sistemleri. a) (0001) tabansal kayma, b) (1010) prizmatik kayma, c) birinci dereceden (1011) piramidal kayma, d) ikinci dereceden (1122) piramidal kayma (Fan & El-Awady, 2015) .....	21
Şekil 2.13.	Magnezyumda ikizlenme sistemlerinin şematik gösterimi, a) çekme ikizlenmesi, b) basma ikizlenmesi (Lentz, 2015).....	22
Şekil 2.14.	Ekstrüzyon prosesinin şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.15.	Magnezyum ekstrüzyonunda proses limit diyagramı.....	24
Şekil 2.16.	a) Bazı magnezyum alaşımlarının ve AA6063 alüminyum alaşımının ekstrüzyon limit diyagramları (Atwell & Barnett, 2007), b) AZ31 magnezyum alaşımının 375 °C' de farklı ekstrüzyon hızlarındaki yüzey görünümü (Sillekens vd., 2005).....	25
Şekil 2.17.	Mg-2Zn-0,5Ce magnezyum alaşımının ekstrüzyonu sırasında kalıp sıcaklığının değişimi (Hyuk vd., 2014).....	26
Şekil 2.18.	Farklı ekstrüzyon alaşımlarında ekstrüzyon sıcaklığının, a) yeniden kristalleşmiş tane boyutuna, b) yeniden kristalleşme oranına etkileri (Ross vd., 2014) .....	27
Şekil 3.1.	Sonlu elemanlar metodunda ağ yapısının gösterimi (Yıldız, 2017).	36
Şekil 3.2.	HyperXtrude analiz adımları.....	39
Şekil 3.3.	HyperXtrude malzeme kütüphanesinde yer alan magnezyum alaşımlarına ilişkin yazılım ekran görüntüsü.....	42
Şekil 3.4.	Gleeble 3800-3500 termal-mekanik fiziksel simülasyon sistemlerinin kapasite ve yetenekleri .....	42
Şekil 3.5.	Gleeble Hydrawedge-II test odacığının görüntüsü .....	43
Şekil 3.6.	Isıl çift monte edilmiş test numunesi.....	44
Şekil 3.7.	Sürtünmenin azaltılması için grafit folyo uygulaması.....	44

Şekil 3.8.	Sıcak basma test uygulaması .....	45
Şekil 3.9.	Test sonucu deforme olmuş numune örneği.....	45
Şekil 3.10.	Ekstrüzyon üretimi gerçekleştirilecek magnezyum profil kesidi.....	46
Şekil 3.11.	Magnezyum ekstrüzyonu için konsept kalıp tasarımı.....	46
Şekil 3.12.	Konsept kalıp tasarımı ile gerçekleştirilen ön değerlendirme sonucunda profil orta kesidinde ortaya çıkan hız farkı .....	47
Şekil 3.13.	Değişken havuz formlu kalıp tasarımı .....	47
Şekil 3.14.	5 mm, 10 mm ve 15 mm yüksekliğe sahip değişken havuz formlu kalıp tasarımları.....	48
Şekil 3.15.	Ekstrüzyon prosesinin simülasyon ortamına aktarılması.....	49
Şekil 3.16.	Ekstrüzyon analizine hazır datanın sonlu eleman modeli.....	50
Şekil 3.17.	Magnezyum alaşımlarının güvenli ekstrüzyon prosesi için optimum koşullar.....	50
Şekil 3.18.	HyperXtrude arayüzünde biyet, kalıp ve konteyner sıcaklıklarının tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü .....	51
Şekil 3.19.	HyperXtrude arayüzünde baskı hızının tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü.....	52
Şekil 3.20.	HyperXtrude arayüzünde sürtünme katsayısının tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü .....	52
Şekil 3.21.	HyperXtrude arayüzünde ısı iletim katsayısının tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü .....	53
Şekil 3.22.	HyperXtrude arayüzünde AM50 alaşım için malzeme parametrelerinin tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü....	53
Şekil 3.23.	AM50 alaşım için tanımlanan parametreler ile oluşturulan malzeme akış eğrilerine ilişkin yazılım ekran görüntüsü .....	54
Şekil 3.24.	HyperXtrude arayüzünde AM50 alaşım için malzeme parametrelerinin tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü....	54
Şekil 3.25.	AZ31 alaşım için tanımlanan parametreler ile oluşturulan malzeme akış eğrilerine ilişkin yazılım ekran görüntüsü .....	55
Şekil 3.26.	Ekstrüzyon simülasyonu başlangıcında çözücü arayüzüne ilişkin yazılım ekran görüntüsü .....	56
Şekil 3.27.	Ekstrüzyon simülasyonu sonucunda çözücü arayüzüne ilişkin yazılım ekran görüntüsü .....	57
Şekil 3.28.	Şerit testere ile kesim.....	63
Şekil 3.29.	CNC torna ile işleme.....	64
Şekil 3.30.	CNC freze ile işleme.....	64
Şekil 3.31.	Üretimi tamamlanmış magnezyum ekstrüzyon kalıbı.....	65
Şekil 3.32.	Isıl çift (termokupl) pozisyonları .....	65
Şekil 3.33.	Ekstrüzyon presi-şematik görünüm (Gall vd. 2013'ten değiştirilerek alınmıştır).....	66
Şekil 3.34.	AZ31 ve AM50 alaşımlarına ait biyetler .....	67
Şekil 3.35.	Optik mikroskop .....	68
Şekil 3.36.	Sertlik ölçüm cihazı.....	69
Şekil 3.37.	Profillerin yönlerine bağlı olarak hazırlanan çekme testi numunelerine ait teknik resimler; (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°.....	70
Şekil 3.38.	Optik doğrulamalı çekme test cihazı.....	71
Şekil 3.39.	Tel erezyon yöntemiyle basma testi numunelerinin profillerden çıkartılması.....	72

Şekil 3.40.	Taramalı elektron mikroskobu .....	73
Şekil 3.41.	Charpy çentik darbe testi numune ölçüleri.....	73
Şekil 3.42.	Charpy çentik darbe testi cihazı .....	74
Şekil 4.1.	AZ31 alaşımı için 300 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi .....	75
Şekil 4.2.	AZ31 alaşımı için 350 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi .....	76
Şekil 4.3.	AZ31 alaşımı için 400 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi.....	76
Şekil 4.4.	AZ31 alaşımı için 450 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi .....	77
Şekil 4.5.	AZ31 alaşımı için 500 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi .....	77
Şekil 4.6.	AM50 alaşımı için 300 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi .....	78
Şekil 4.7.	AM50 alaşımı için 350 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi .....	78
Şekil 4.8.	AM50 alaşımı için 400 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi .....	79
Şekil 4.9.	AM50 alaşımı için 450 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi .....	79
Şekil 4.10.	AM50 alaşımı için 500 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi .....	80
Şekil 4.11.	Doğrusal regresyon analizi ile sıcaklık düzeltmesi için <i>m</i> değerinin elde edilmesi .....	81
Şekil 4.12.	AZ31 malzeme için akış gerilmesi-gerinim oranı grafiği .....	82
Şekil 4.13.	AM50 malzeme için akış gerilmesi-gerinim oranı grafiği .....	82
Şekil 4.14.	Üretilcek kalıp geometrisi ve sıcaklık ölçerlerin kalıptaki konumları.....	86
Şekil 4.15.	AZ31 alaşımı için, optimum parametrelerle gerçekleştirilen geçici rejim ekstrüzyon analizinde elde edilen kuvvet, hız ve sıcaklık dağılımı.....	86
Şekil 4.16.	AM50 alaşımı için, optimum parametrelerle gerçekleştirilen geçici rejim ekstrüzyon analizinde elde edilen kuvvet, hız ve sıcaklık dağılımı.....	87
Şekil 4.17.	AZ31 alaşımına ait deneysel sıcaklık ve kuvvet değişim grafiği .....	88
Şekil 4.18.	AM50 alaşımına ait deneysel sıcaklık ve kuvvet değişim grafiği .....	88
Şekil 4.19.	Ekstrüzyon analizinde sıcaklık ölçüm noktaları .....	89
Şekil 4.20.	Kalıp üzerindeki sıcaklık ölçüm noktaları .....	89
Şekil 4.21.	AZ31 test-simülasyon sıcaklık ölçüm karşılaştırması.....	90
Şekil 4.22.	AM50 test-simülasyon sıcaklık ölçüm karşılaştırması .....	90
Şekil 4.23.	AM50 test-simülasyon kuvvet ölçüm karşılaştırması .....	91
Şekil 4.24.	AZ31 test-simülasyon kuvvet ölçüm karşılaştırması .....	91
Şekil 4.25.	(a) Primer su soğutma, (b) Sekonder su soğutma, (c) Hava ve su ile soğutma .....	94
Şekil 4.26.	Ekstrüzyonla üretilmiş magnezyum profiller .....	94

Şekil 4.27.	AZ31 alaşımının kullanılan soğutma yöntemine göre ekstrüzyon doğrultusundan alınan numunelerine ait çekme testi sonuçları: a) Hava soğutma, b) Su soğutma .....	96
Şekil 4.28.	AM50 alaşımının kullanılan soğutma yöntemine göre ekstrüzyon doğrultusundan alınan numunelerine ait çekme testi sonuçları: a) Hava soğutma, b) Su soğutma.....	97
Şekil 4.29.	AZ31 alaşımının kullanılan soğutma yöntemlerine göre ekstrüzyon doğrultusundan alınan numunelerine ait basma testi sonuçları: a) Hava soğutma, b) Su soğutma.....	100
Şekil 4.30.	AM50 alaşımının kullanılan soğutma yöntemlerine göre ekstrüzyon doğrultusundan alınan numunelerine ait basma testi sonuçları: a) Hava soğutma, b) Su soğutma .....	102
Şekil 4.31.	Magnezyum profillerin alaşımlarına ve soğutma türlerine göre boylamasına kesitlerinden alınan mikro yapı görüntüleri .....	105
Şekil 4.32.	Magnezyum profillerin alaşımlarına ve soğutma türlerine göre enlemesine kesitlerinden alınan mikro yapı görüntüleri .....	105
Şekil 4.33.	Magnezyum profillerin alaşımlarına ve soğutma türlerine göre ölçülen tane boyutları .....	106
Şekil 4.34.	AZ31-Hava ile soğutulmuş numunede kırılma yüzeyine ilişkin SEM görseli .....	107
Şekil 4.35.	AZ31-Su ile soğutulmuş numunede kırılma yüzeyine ilişkin SEM görseli .....	108
Şekil 4.36.	AM50-Hava ile soğutulmuş numunede kırılma yüzeyine ilişkin SEM görseli .....	109
Şekil 4.37.	AM50-Su ile soğutulmuş numunede kırılma yüzeyine ilişkin SEM görseli .....	109
Şekil 4.38.	Charpy çentik-darbe testi sonuçları .....	110

## ÇİZELGELER DİZİNİ

			<b>Sayfa</b>
Çizelge	2.1.	Magnezyumun bazı önemli fiziksel özellikleri (Kainer, 2003; Kaçar & Öztürk, 2006).....	5
Çizelge	2.2.	Magnezyum alaşımlarında kullanılan bazı elementlerin kodları (Avedesian & Baker, 1999).....	7
Çizelge	2.3.	Bazı magnezyum alaşımları ve belirgin özellikleri (Avedesian & Baker, 1999).....	7
Çizelge	2.4.	Magnezyum alaşımlarının kıyaslanması (Anonim, 2019).....	8
Çizelge	2.5.	Alaşım elementlerinin magnezyum üzerindeki etkisi (Demir, 2020) .....	9
Çizelge	3.1.	Malzeme tanımlamasında kullanılan parametreler.....	41
Çizelge	3.2.	Magnezyum alaşımlarının sıcak basma testi matrisi.....	43
Çizelge	3.3.	Analizlerde kullanılan eleman tipleri ve ortalama eleman sayıları.....	49
Çizelge	3.4.	Magnezyum ekstrüzyon proses parametre aralığı.....	51
Çizelge	3.5.	Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu (Gökçe & Taşgetiren, 2009).....	60
Çizelge	3.6.	Ekstrüzyon parametreleri.....	61
Çizelge	3.7.	Taguchi L18 tasarımı.....	61
Çizelge	3.8.	Taguchi L18 tasarımında faktör numaralarının sayısal karşılığı.....	62
Çizelge	3.9.	Biyetlere ilişkin detaylar.....	66
Çizelge	3.10.	Magnezyum biyetlere ait kimyasal kompozisyonlar (%).....	67
Çizelge	3.11.	Ekstrüzyon parametreleri.....	67
Çizelge	3.12.	Çekme ve basma test-numune sayıları.....	69
Çizelge	4.1.	Magnezyum ekstrüzyon malzeme modeli katsayıları.....	81
Çizelge	4.2.	Analizler sonucu elde edilen sonuçlar (AM50 alaşımı).....	83
Çizelge	4.3.	Analizler sonucu elde edilen sonuçlar (AZ31 alaşımı).....	84
Çizelge	4.4.	Optimizasyon çalışmasına göre optimum proses parametreleri ve karşılık gelen çıktı değerleri (AM50).....	85
Çizelge	4.5.	Optimizasyon çalışmasına göre optimum proses parametreleri ve karşılık gelen çıktı değerleri (AZ31).....	85
Çizelge	4.6.	Soğutma yöntemlerine göre AZ31 profilinin çeşitli doğrultulardaki ortalama akma ve çekme mukavemeti değerleri.....	95
Çizelge	4.7.	Soğutma yöntemlerine göre AM50 profilinin çeşitli doğrultulardaki ortalama akma ve çekme mukavemeti değerleri.....	97
Çizelge	4.8.	AZ31 ve AM50 alaşımlarının soğutma türlerine göre ortalama mekanik değerlerinin karşılaştırması.....	99
Çizelge	4.9.	Soğutma yöntemlerine göre AZ31 profilinin çeşitli doğrultulardaki ortalama maksimum gerilme değerleri.....	101
Çizelge	4.10.	Soğutma yöntemlerine göre AM50 profilinin çeşitli doğrultulardaki ortalama maksimum gerilme değerleri.....	101



Çizelge	4.11.	AZ31 ve AM50 alaşımlarının soğutma türlerine göre maksimum ortalama gerilme değerlerinin karşılaştırması....	103
Çizelge	4.12.	Sertlik değerleri.....	104

## 1. GİRİŞ

Magnezyum yirmi birinci yüzyılın en iyi yeşil malzemesi olarak kabul edilmektedir (Yang vd., 2021). Tüm yapısal metaller içinde en düşük yoğunluğa (1.74 g/cm<sup>3</sup>) sahiptir ve bu özelliği sayesinde hafifletme odaklı uygulamalar için özellikle son yıllarda çok fazla ilgi gören bir malzeme haline gelmiştir (Peng vd., 2022). Ayrıca iyi sönümlenebilirliği, yüksek özgül dayanımı ve iyi dökülebilirlik gibi sahip olduğu diğer özellikler de magnezyumu birçok mühendislik uygulamaları için uygun bir aday yapmaktadır (D. Wang vd., 2022). Magnezyum alaşımları; otomotiv, elektronik, havacılık ve uzay, tüketici ürünleri, konstrüksiyon ve spor aletleri gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe artan elektrikli araç trendi, emisyon azaltma ve ekonomik yakıt kullanımı hedeflerinin araç tasarımında önemli bir kriter haline gelmesi gibi etkenler de göz önüne alındığında; magnezyum gibi hafif metal alaşımların kullanımı son yirmi yılda önemli derecede artmıştır ve artmaya devam etmektedir (Lv, Xie, Yang, Meng, & Qiu, 2022).

Magnezyumun kristal yapısı, hegzagonal sıkı paket formundadır. Bu yapısıyla fiziksel özellikleri özel bir ilgi konusudur (Prasad vd., 2022). Bu kristal yapısı sebebiyle oda sıcaklığında sınırlı sayıda kayma düzlemine sahiptir ve buna bağlı olarak oda sıcaklığında deforme edilmeleri çok zordur. Yüksek sıcaklıkta yapıda daha fazla kayma düzlemi aktif hale geçtiğinden, magnezyum alaşımları genellikle 300-400 °C aralığındaki sıcaklıklarda şekillendirilir. Magnezyum alaşımlarına plastik şekil vermek için; sıcak haddeleme, dövme, ekstrüzyon, döküm gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında, ticari anlamdaki kullanım alanları değerlendirildiğinde; basınçlı döküm metodu ile üretim daha fazla ön plana çıkmaktadır. Fakat son yıllarda dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi yöntemlerle üretilen magnezyum alaşımlarının, döküm ile üretilen alaşımlara nazaran daha iyi mekanik özellik ve daha homojen dağılımlı bir içyapı özelliklerine sahip olduğundan, yapı malzemesi olarak daha yaygın kullanılması ön plana çıkmıştır (J. Zhang vd., 2022).

Teknik ve ekonomik avantajlarının yanında, geniş bir ürün profilinde üretim olanağı sunması, ekstrüzyonu magnezyum alaşımları için en önemli termomekanik proseslerden biri kılmaktadır (Zeng, Stanford, Davies, Nie, & Birbilis, 2019). Homojenizasyon,

yaşlandırma veya sıcak ekstrüzyon gibi şekillendirme proseslerinde kullanılan deformasyon oranı, deformasyon hızı ve proses sıcaklığı gibi parametreler içyapının şekillenmesinde ciddi rol oynar ve böylece magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini değiştirir (Colleen J. Bettles & Gibson, 2005). Magnezyum alaşımlarının ekstrüzyonundaki en önemli sorun; iyi bir mekanik özellik ve ekstrüze edilebilirlik kombinasyonuna sahip olmamalarıdır. AZ61, AZ80 ve ZK60 gibi ekstrüzyon işlemine uygun olarak görülen bazı alaşımlar şimdiye kadar genel olarak kabul görmüş olsa da ne yazık ki bu alaşımların mekanik özellikleri ve üretim hızları (ekstrüzyon hızı) istenilen seviyelere getirilememiştir ve halen alüminyum alaşımları ile kıyaslandığında, ekstrüzyon hızları oldukça düşük kalmaktadır (C. J. Bettles & Barnett, 2012). Bu durum da hammadde maliyeti dışında, üretim maliyetlerinin oldukça yüksek olmasının en önemli sebeplerindedir. Bu yüzden proses parametrelerinin optimum seviyede belirlenmesi önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında; magnezyum alaşımlarının ekstrüzyon prosesi, ilk kalıp tasarım sürecinden başlayarak, üretim ve sonrasını da kapsayacak şekilde, detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmada imal edilebilirlik, uygun ekstrüzyon hızı, darbe yüklerine ve korozyona karşı direnç, hammadde teminatının kolaylığı ve hammadde maliyetleri gibi farklı parametreler değerlendirilmiş ve çalışmalara elde edilen bu veriler ışığında yön verilmiştir. Bu doğrultuda literatürde otomotiv yapılarında bazı kullanım alanları yer alan ve sıkça incelenen, ekstrüzyon kabiliyeti yüksek magnezyum alaşımlarından olan AZ31 alaşımı; çalışmaların yürütüleceği ilk alaşım olarak seçilmiştir (Kaczyński, Gronostajski, & Polak, 2019; Z. Li, Yang, Hu, Wei, & Han, 2018; S. Wang & Gao, 2018). Diğer alaşım için ise; içeriğine eklenen mangan sayesinde sünekliği ve korozyon direnci iyileştirilmiş bir malzeme olan AM50 alaşımı, kolay işlenebilirliği de göz önüne alınarak seçilmiştir.

AM50 ve AZ31 magnezyum alaşımlarından üretilecek dikdörtgen kesitli solid profil için hem kalıp geometrisi hem de kalıp sıcaklığı, biyet sıcaklığı ve konteyner sıcaklığını içeren proses parametreleri için sanal ekstrüzyon analizleri yardımıyla optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve bilgisayar destekli analiz sonuçlarına göre en uygun parametreler belirlenmiştir. Belirlenen optimum proses parametreleri kullanılarak deneysel ekstrüzyon üretimleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler bilgisayar destekli

analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu kısımda; her iki alaşım için tek eksenli sıcak basma testleri kullanılarak malzeme akış eğrileri elde edilmiş ve bunun sonucunda ortaya konan malzeme parametreleri ile bilgisayar destekli ekstrüzyon analizleri için ekstrüzyon malzeme modeli oluşturulmuş ve özellikle AM50 alaşımı için literatüre sunulmuştur. Çalışmanın sonraki aşamasında; ekstrüzyon çıkışında kullanılan farklı soğutma metotlarının mekanik özelliklere ve malzemenin içyapı özelliklerine olan etkisi derinlemesine incelenmiştir. Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilen inceleme sonucunda içyapı incelemeleri ve kırılma yüzeylerinin analizleri gerçekleştirilmiş ve her iki alaşım için elde edilen sonuçlar ortaya konarak birbirleriyle kıyaslanmıştır. Son olarak üretilen magnezyum alaşımlı profiller için Charpy darbe testleri gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar ortaya konmuştur.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tez çalışmasının bu bölümünde; magnezyum elementinin özellikleri, magnezyum alaşımları, kullanım alanları, magnezyum alaşımlarının ekstrüzyonu gibi konularda genel bilgi verilmiştir. Bununla birlikte sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen ekstrüzyon analizleri ile ilgili detaylı literatür taraması gerçekleştirilmiş olup, bu tez çalışması kapsamında incelenen alaŐımlarla alakalı geçmiŐte yer alan çalışmalara ilişkin bilgi verilmiştir.

### 2.1. Magnezyum

Periyodik cetvelin II A grubunda bulunan bir toprak alkali elementi olan magnezyum, yeryüzünde en çok bulunan altıncı metal ve sekizinci elementtir.  $1,74 \text{ g/cm}^3$  lük yoğunluğu ile yapısal uygulamalara elveriŐliliĐi açısından en hafif metaldir. Bu özelliği, ticari olarak en sık kullanılan metaller olan elik ( $7,8 \text{ g/cm}^3$ ) ve alüminyum ile ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) kıyaslandığında, magnezyumu daha da fazla ön plana çıkarmaktadır (Y. Yang vd., 2021). Magnezyum ve diğer mühendislik malzemeleri arasındaki karŐılaŐtırmaya göre, magnezyum benzer veya daha iyi spesifik elastisite modülü ve yüksek özgül mukavemet değerleri göstermektedir (Blawert, Hort, & Kainer, 2004). Magnezyumun diğer avantajlarından bazıları; çok iyi iŐlenebilirliĐe, iyi sönümleme kabiliyetine ve iyi kaynaklanabilirliğe sahip olmasıdır. Diğer yandan; magnezyumun  $-2,37 \text{ V}$  gibi oldukça düşük oksitlenme potansiyeline sahip olması galvanik korozyona olan yatkınlığını arttırarak korozyon direncini düşürmektedir. Magnezyumun bir diğer dezavantajı ise düşük sürünme dayanımına sahip olmasıdır. Magnezyumun bazı önemli fiziksel özellikleri izelge 2.1' de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Magnezyumun bazı önemli fiziksel özellikleri (Kainer, 2003; Kaçar & Öztürk, 2006)

<b>Atom numarası</b>	12
<b>Yoğunluk</b>	1,738 g/cm <sup>3</sup>
<b>Ergime noktası</b>	650 °C
<b>Kaynama noktası</b>	1090 °C
<b>Özgül ısı</b>	1,025 kJ.K <sup>-1</sup> . kg <sup>-1</sup> (20 °C'de)
<b>Elastisite (Young) modülü</b>	45 GPa
<b>Sertlik</b>	30-47 HB
<b>Elektriksel iletkenlik</b>	39 (%IACS)
<b>Termal iletkenlik</b>	167 (W/mK)
<b>Kristal yapısı</b>	Hegzagonal sıkı paket (HSP)
<b>Atom yarıçapı</b>	0,159 nm

Saf magnezyum, atmosferik basınç altında hegzagonal sıkı paket formunda kristalize olur. Oda sıcaklığındaki saf magnezyumun kafes parametreleri  $a=0,32092$  nm ve  $c=0,52105$  nm' dir ve sahip olduğu 1,6236 c/a oranı ile mükemmel sıkı paket oranı olan 1,633 değerine oldukça yakındır, yani neredeyse tamamen doymuştur (Busk, 1950). Şekil 2.1' de birim magnezyum hücresindeki atomik dizilimler, temel düzlemler ve yönler gösterilmektedir. Magnezyum, hegzagonal kristal yapısı nedeniyle oda sıcaklığında sınırlı sayıda aktif kayma sistemine sahiptir. Bu nedenle deformasyon; birincil kayma, ikincil kayma ve ikizlenme mekanizmalarını içerir. Birincil kayma (0001) taban düzleminde ve bu düzlemin en sıkı paketlenmiş yönü olan  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  yönünde gerçekleşir. İkincil kayma (10 $\bar{1}0$ ) prizmatik düzleminde ve  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  yönünde gerçekleşir. Artan sıcaklıkla birlikte (10 $\bar{1}1$ ) piramidal düzlemler de devreye girer. İkizlenme, özellikle aktif kayma sistemlerinin yeterli olmadığı durumlarda gerçekleşir ve magnezyumun oda sıcaklığındaki deformasyonunda sıkça görülür (Zengin, 2018).



2.2’de, bazı magnezyum alaşımları ve belirgin özellikleri ise Çizelge 2.3’te sırasıyla verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Magnezyum alaşımlarında kullanılan bazı elementlerin kodları (Avedesian & Baker, 1999)

Harf Kodu	Alaşım Elementi
A	Alüminyum
E	Nadir toprak elementi
J	Stronsiyum
K	Zirkonyum
L	Lityum
M	Mangan
P	Kurşun
Q	Gümüş
S	Silisyum
T	Kalay
W	İtriyum
X	Kalsiyum
Z	Çinko

**Çizelge 2.3.** Bazı magnezyum alaşımları ve belirgin özellikleri (Avedesian & Baker, 1999)

Alaşım	Karakteristik Özellikleri
AZ63	İyi oda sıcaklığı dayanımı ve süneklilik
AZ91	İyi dayanım ve genel kullanım amaçlı, kum kalıba ve basınçlı döküme uygun
AM20	İyi süneklilik ve darbe direnci
AS41	150 °C’de iyi sürünme direnci
ZK51	Kum kalıba döküme uygun, iyi oda sıcaklığı dayanımı ve süneklilik
ZE41	İyi dökülebilirlik özellikleri, iyi oda sıcaklığı dayanımı ve süneklilik
EZ33	İyi dökülebilirlik özellikleri, kaynak edilebilir ve iyi sürünme direnci
HK31	Kum kalıba dökülebilir, 350 °C’de iyi sürünme direnci
QE22	Kaynak edilebilir, 250 °C’de iyi akma dayanımı
QH21	Kaynak edilebilir, iyi sürünme direnci, 300 °C’de iyi akma dayanımı
WE43	İyi korozyon direnci, kaynak edilebilir
AZ31	Orta dayanım, iyi şekillendirilebilirlik, iyi sönümlenme kabiliyeti
AZ80	Yüksek dayanımlı alaşım
ZK60	İyi şekillendirilebilirlik
HK31	350 °C’de iyi sürünme direnci, kaynak edilebilir
WE54	İyi sürünme direnci
LA141	Ultra hafif alaşım, düşük dayanım

Mg alaşımları ASTM (A275) standart sistemi tarafından belirlenmiştir. Gösterim şekli iki harf ve iki sayı şeklindedir. İki harf, alaşımın en büyük iki elemanına verilmiş olan harf



kısaltması ve rakamlar ise bu elementlerin en yakın tam sayıya yuvarlanmış ağırlıkça yüzdelik oranlarıdır. Örneğin AZ91 alaşımının ilk harfi A-Alüminyum, ikinci harfi Z-Çinko alaşımlarını ifade eder. Bunların alaşım içindeki yaklaşık olarak yüzdeleri %9 Alüminyum, %1 Çinko olduğunu ifade etmektedir.

Magnezyum alaşımlarında; çözünebilirliği az olan alaşım elementi ilavesi sonucunda intermetalikler oluştuğunda dayanımda artış sağlanırken, süneklik azalır ve genellikle bu alaşımlar sadece döküm alaşımı olarak kullanılır. Oluşan termal kararlılığı yüksek intermetaliklerin uygun boyut kontrolü ve homojen dağılımları sağlandığında alaşımların sürünme direnci artırılabilir. Bunun yanında, intermetalik fazlar sıcak deformasyon sırasında sahip oldukları boyutlara göre yeni çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak tekstürün azaltılmasına yardımcı olabilir veya tane küçültücü etki göstererek yeniden kristalleşmiş tane boyutunun küçülmesini sağlayabilir (Zengin, 2018). Çizelge 2.4'te; bazı magnezyum alaşımlarının çeşitli açılardan birbirleriyle kıyaslanması, Çizelge 2.5'te ise en yaygın kullanılan alaşım elementlerinin magnezyum üzerindeki temel etkileri sırasıyla verilmiştir.

**Çizelge 2.4.** Magnezyum alaşımlarının kıyaslanması (Anonim, 2019)

Alaşım	Ekstrüze Edilebilirlik	Mukavemet	Süneklik	Mekanik İzotropi
AM30	++	o	o	-
AM50	+	+	o	-
AZ31	+	o	o	-
AZ80	-	+	-	-
ME21	o	o	+	+
ZME211	o	+	+	+
WE43	-	++	o	++

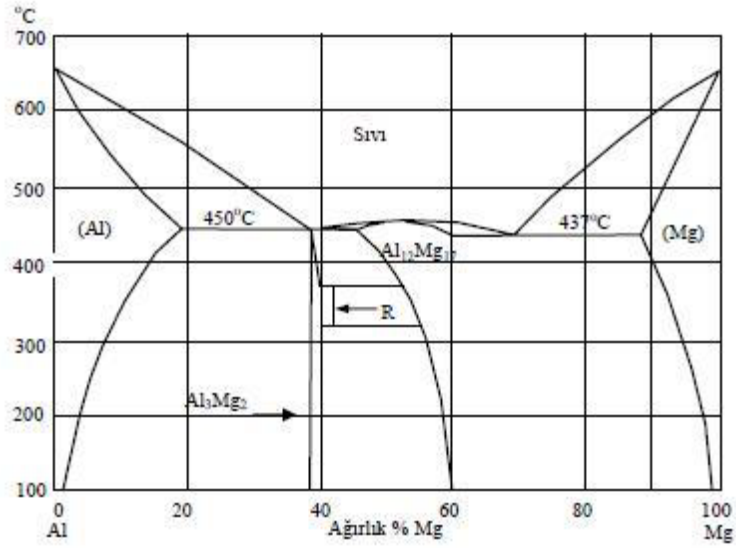
**Çizelge 2.5.** Alaşım elementlerinin magnezyum üzerindeki etkisi (Demir, 2020)

<b>Alaşım Elementi</b>	<b>Alaşım Elementinin Temel Etkileri</b>
Alüminyum (Al)	-Çekme mukavemeti ve sertliği artırır. -Metaller arası ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) fazının çökmesini destekler. -Dökülebilirliği artırır. -Korozyon direncini artırır.
Çinko (Zn)	-Çekme mukavemeti ve sertliği artırır. -Tane yapısını inceltir. -Dökülebilirliği artırır. -Korozyon direncini artırır.
Mangan (Mn)	-Demir elementinin olumsuz etkisini azaltarak korozyon direncini artırır. -Akma dayanımını artırır.
Silisyum (Si)	-Ergimiş haldeki metalin akışkanlığını artırır. -Sürünme direncini artırır. - $Mg_2Si$ fazının oluşumunu destekler. -Dökülebilirliği ve korozyon direncinin azaltır.
Nadir Toprak Elementleri	-Soğukta çalışma direncinin artırır. -Çekme mukavemetini ve sertliği artırır.

Bu bölümde AZ ve AM serisi magnezyum alaşımlarında ilave olarak kullanılan alüminyum, çinko ve mangan elementleri ve bu elementlerin magnezyum malzeme üzerindeki etkileri ayrı başlıklar altında detaylı olarak verilmiştir.

### **2.2.1. Alüminyum**

Alüminyum, magnezyum alaşımlarında en çok kullanılan alaşım elementidir. Alüminyum ilavesi alaşımda sertlik, mukavemet ve katılma süresini olumlu yönde etkilemekte, ancak sünekliği düşürmektedir. Magnezyum ve alüminyumun oluşturduğu ikili faz diyagramı Şekil 2.2' de gösterilmektedir. Alüminyumun magnezyum katı çözeltisi içindeki maksimum çözünürlüğü  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de ağırlıkça %12,7' dir ve ağırlıkça %6' yı geçen alaşımlara ısı işlem uygulanabilmektedir (Dahle, Lee, Nave, Schaffer, & StJohn, 2001). Alüminyumun, magnezyum ile atom boyutlarının farkı yaklaşık %12' dir ve bu fark sayesinde, katı çözelti halindeyken kafes çarpılması oluşturarak dislokasyon hareketini etkili bir şekilde engeller ve bu sayede alaşımın dayanımını artırır (Pekguleryuz, Kainer & Kaya, 2013).



**Şekil 2.2.** Mg-Al ikili faz diyagramı (West & Ghibach, 1988)

Maksimum çözünürlüğün üzerinde alüminyum bulunduğunda kırılğan  $\beta$ -fazı ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) çökeler. Maksimum çözünürlük oda sıcaklığında %1' e kadar düşer bu yüzden  $\beta$ -fazı ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) alaşımın son özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Mg-Al alaşımlarının döküm halinde, alüminyum ağırlıkça %2 veya daha fazla oranda bulunduğunda  $\beta$ -( $Mg_{17}Al_{12}$ ) fazı oluşur. Alüminyum oranı arttıkça tane sınırlarında çökelen  $\beta$ -( $Mg_{17}Al_{12}$ ) fazı oranı artar ve alüminyum oranı %8' in üzerine çıkınca süneklik hızlı bir şekilde düşüş gösterir.  $\beta$ -( $Mg_{17}Al_{12}$ ) fazının süresiz çökmesi, alaşımın sürünme direncini olumsuz etkiler (Polmear, 2005). Faz diyagramından da görülebileceği üzere,  $\beta$ -( $Mg_{17}Al_{12}$ ) fazı, termal kararlılığı düşük olduğundan, alaşıma 400 °C civarında yapılacak bir tavlama işlemi ile bu fazın katı çözeltili içerisinde tamamen çözünmesi sağlanabilir.

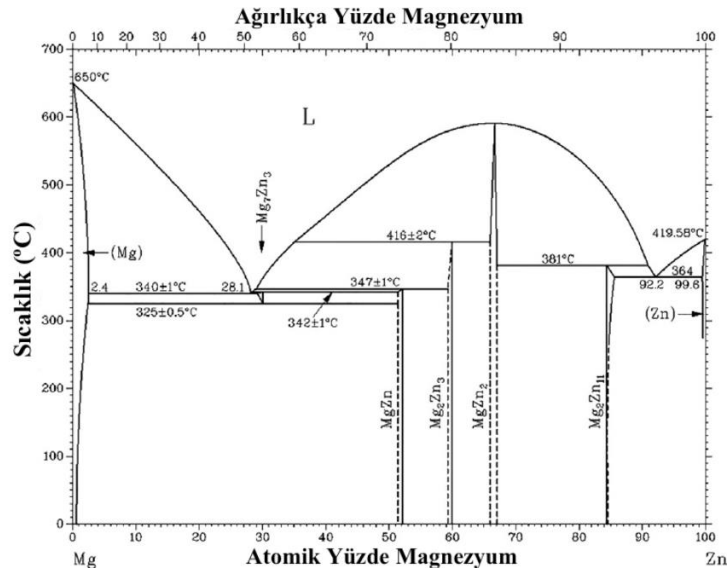
Alüminyum magnezyuma ilave edildiğinde, korozyon saldırısı sırasında malzeme yüzeyinde alüminyum atomlarının konsantrasyonu artar ve bu da alüminyumca zengin oksit katmanının oluşumuna neden olarak korozyon direncini artırır (Pardo vd., 2008). Alüminyum miktarı %4 değerine kadar arttırıldığında, korozyon hızının hızla düştüğü belirlenmiştir. Daha sonra, %9 değerine kadar ilave edilen alüminyumun ise, magnezyumun korozyon özelliklerini az miktarda iyileştirdiği gözlenmiştir. Alüminyumun, magnezyumun korozyonu ile ilgili en önemli etkisi;  $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$  fazının korozyon bariyeri görevi görerek Mg-Al alaşımının korozyon direncini arttırmasıdır.

Buna ek olarak alüminyumun, magnezyumun yüzeyinde oluşan hidroksit filminin bileşimini değiştirerek korozyon özelliklerini iyileştirdiği de bildirilmiştir (Guang, Song, & Atrens, 2000).

### 2.2.2. Çinko

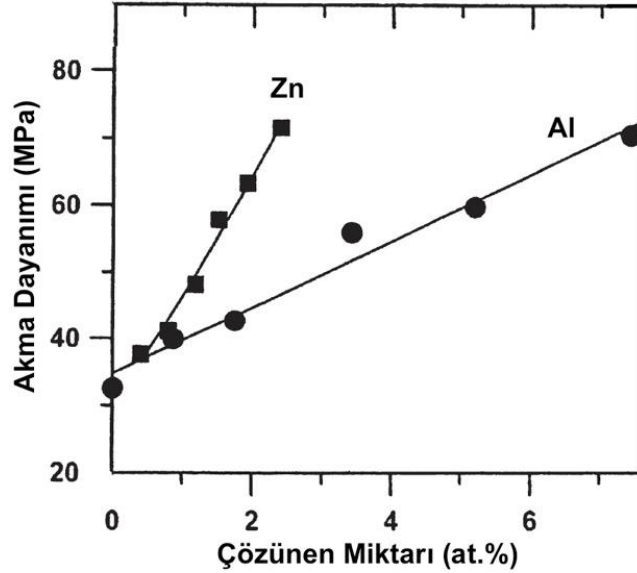
Alüminyumdan sonra magnezyumda en çok kullanılan alaşım elementi olan çinko, sağladığı tane inceltici etkisi, katı çözeltili ve çökelti (yaşlandırma) sertleştirmeleri sayesinde magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmektedir (Caceres, Mann, & Griffiths, 2011). Bunun yanında, çinkonun magnezyum alaşımlarının üzerinde koruyucu film tabakasının oluşumuna katkı sağlayarak korozyon direncini arttırdığı bilinmektedir (Cai, Lei, Li, & Feng, 2012).

Magnezyum ve çinkonun ikili faz diyagramı Şekil 2.3’ de görülmektedir. Çinkonun magnezyum katı çözeltili içerisindeki maksimum çözünürlüğü yaklaşık ağırlıkça %6,2’ dir ve ana alaşım elementi olarak genellikle bu oranın üzerinde kullanılmaz. Alüminyuma benzer şekilde, oda sıcaklığındaki çözünürlüğü yaklaşık ağırlıkça %1 olduğundan aşırı doymuş katı çözeltilinin bozunması ısı işlemi ile kontrol edilerek, yaşlandırma gerçekleştirilebilir ve alaşımın dayanımı artırılabilir (Gao & Nie, 2007).



Şekil 2.3. Mg-Zn ikili faz diyagramı

Şekil 2.4’ de Mg-Al ve Mg-Zn ikili alaşımlarında alüminyum ve çinko çözünen miktarının dayanıma etkisi karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Yüksek konsantrasyonda, çinko ilavesinin magnezyumun dayanımını alüminyuma kıyasla çok daha fazla arttırdığı görülmektedir.



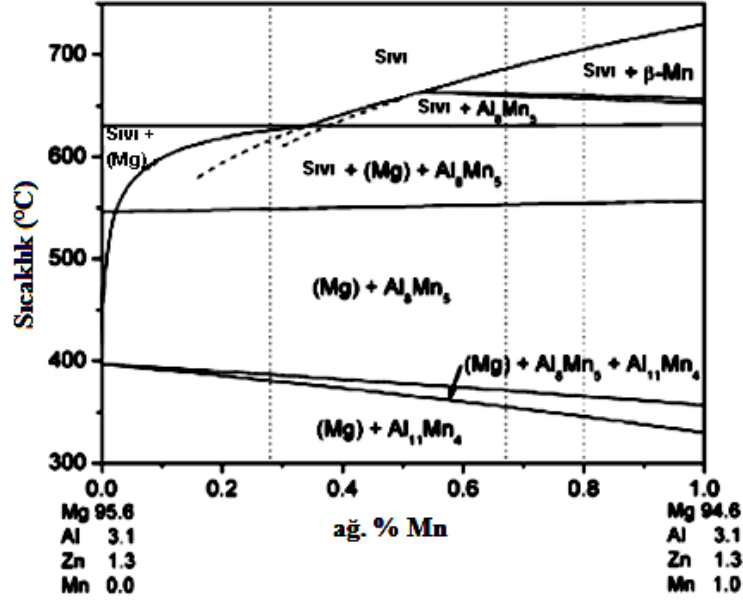
**Şekil 2.4.** Mg-Al ve Mg-Zn ikili sistemlerinde çözünen miktarın dayanıma etkisi (Polmear, 2005)

Çinko, magnezyumun elektrokimyasal olarak daha soy olmasını sağlayarak, korozyon hızını düşürmektedir. Ağırlıkça %1-3 çinko içeren Mg-Al alaşımlarında çinkonun, empürite tolerans sınırı değerlerini arttırarak alaşımın korozyon özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir.

### 2.2.3. Mangan

Mangan, magnezyum alaşımlarında genellikle diğer alaşım elementleri ile birlikte kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımı en fazla ağırlıkça %1,5 – 2 mangan içermektedir. Alüminyum içeren magnezyum alaşımlarında mangan, alüminyum ile  $MnAl$ ,  $MnAl_4$ ,  $MnAl_6$ ,  $Al_8Mn_5$  ve  $Al_8(Mn,Fe)_5$  bileşiklerini oluşturmaktadır (Wang, Xia, Fan, Zhou, & Thompson, 2010). Mg-Al-Zn-Mn alaşımına ait faz diyagramı Şekil 2.5’te görülmektedir. Magnezyum alaşımlarına mangan ilave edilmesinin temel sebebi, manganın Fe-Mn çökeltileri oluşturarak demir miktarının kontrol altında tutulmasını sağlamasıdır. Bu

sayede, alaşımda bulunan ağır metal empüritelere giderilerek korozyon özellikleri iyileştirilebilmektedir (Czerwinski, 2008).



Şekil 2.5. Mg-Al-Zn-Mn alaşımına ait faz diyagramı (Laser vd., 2006)

Özellikle AZ serisi alaşımlara ilave edilen mangan, empürite elementlerinin zararlı etkilerini azaltarak magnezyum alaşımlarının korozyon direncini arttırmaktadır. Magnezyum alaşımlarının korozyon hızı, bileşimindeki demir miktarına ve Fe/Mn oranına bağlı olarak değişmektedir. Mangan, eriyik magnezyum içerisindeki demir ile birleşerek, eriyiğin dip kısmına çöken ve alaşımın demir miktarını düşüren bir intermetalik bileşik meydana getirmektedir. Alaşımda kalan manganın ise, çökme ile uzaklaştırılmayan demirin olumsuz etkisini azaltıcı rolü bulunmaktadır. Buna ek olarak mangan, katılaşma sırasında metal içerisinde kalan demir partiküllerini kuşatarak aktivitelerini kısıtlamaktadır. Mangan ve magnezyum arasındaki galvanik aktivite, magnezyum ve demir arasındaki ile kıyaslandığında daha azdır (Seçgin, 2012). Diğer taraftan, Al/Mn oranı düşük olan ikili Al-Mn fazı, yüksek katot potansiyeline sahiptir. Bu nedenle Mg-Al alaşımına, Al-Mn ve Al-Mn-Fe intermetalik fazlarının oluşması için mangan ilave edildiğinde korozyon hızı artmaktadır (Skar, 1999).

### 2.3. Magnezyum Alaşımlarının Uygulama Alanları

Magnezyum alaşımları Şimdiye kadar en çok uygulama alanı bulduğu otomotiv ve havacılık sektörleri dışında; taŐınabilir cihazlar, dizüstü bilgisayarlar, kameralar, cep telefonları, mutfak el aletleri gibi elektronik cihazlar, tenis raketleri, bisiklet çerçeveleri gibi çok farklı ürünlerde kullanılmaktadır. Bu ürünlerden bazıları Şekil 2.6' da gösterilmiştir. Belirtilen uygulamaların çoğunda magnezyum alaşımları döküm formunda kullanılmıştır.



**Şekil 2.6.** Magnezyum alaşımlarının yapısal malzeme olarak döküm formunda kullanıldığı bazı kullanım alanları (Zengin, 2018)

Magnezyum alaşımları döküm formu dışında ayrıca dövme, haddelenmiŐ sac veya levha ya da ekstrüzyon Şeklinde de sıkça kullanılmaya baŐlanmıŐtır. Ekstrüzyon magnezyum alaşımları, almiyumu benzerlerinin yapısal mukavemet avantajlarını yaklaşık %30' luk bir ağırlık tasarrufuyla sunmaktadır. Ekstrüzyon magnezyum alaşımları, yüksek mekanik mukavemet ve performans vaat ederken, en kolay iŐlenebilir yapısal metal olarak da üreticilere yüksek rekabetçi pazar için yenilikçi ürünler tasarlanmanın daha iyi yollarını sunar. Ayrıca diğer proseslere göre ekstrüzyon kalıp maliyetleri ciddi anlamda rekabetçidir. Magnezyum ekstrüzyon ürünler, son yıllarda hafif bisiklet iskeleti, merdiven ve fotoğrafılıktaki kullanılan ayak (tripod) gibi yapılarda da tercih edilmeye baŐlanmıŐtır. Şekil 2.7' de ekstrüzyon magnezyum alaşımlarının bazı uygulama örnekleri gösterilmektedir.



**Şekil 2.7.** Ekstrüzyon magnezyum uygulamalarından bazı örnekler (Zengin, 2018)

### **2.3.1. Magnezyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisindeki Kullanımı**

Yeşil Mutabakat kapsamındaki ‘sıfır karbon’ hedefi doğrultusunda, egzoz emisyon değerlerine getirilen agresif hedefler; otomotiv endüstrisini taşıt ağırlığını azaltmak için modern hafif yapılara yönlendirmiştir. Ayrıca güvenlik, konfor ve yüksek performans talepleri otomobil ağırlığını artırmış, bu durum da hafif malzeme kullanımını kaçınılmaz kılmıştır. Otomobillerde ağırlık azaltımı ile hem yakıt verimliliğinin artırılması, hem de ortaya çıkan zararlı egzoz emisyonlarının en aza indirgenmesi hedeflenmektedir (Kelen, 2021).

Magnezyum ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım, kolay geri dönüşüm ve yüksek titreşim sönümlenme kapasitesi gibi üstün özellikleri ile otomotiv uygulamaları için önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Bu malzemelerin otomobillerde yüksek sıcaklık ve gerilmelere maruz kalmayan; iç donanım, karoseri ve araç ön alanı gibi birçok uygulaması bulunmasına karşın asıl kullanım alanlarının taşıt ağırlığının önemli bir kısmını oluşturan şasi, güç aktarma organları, motor bloğu, silindir kapağı, vites ve diferansiyel kutusu gibi bileşenler olacağı öngörülmektedir. Fakat yüksek sıcaklık



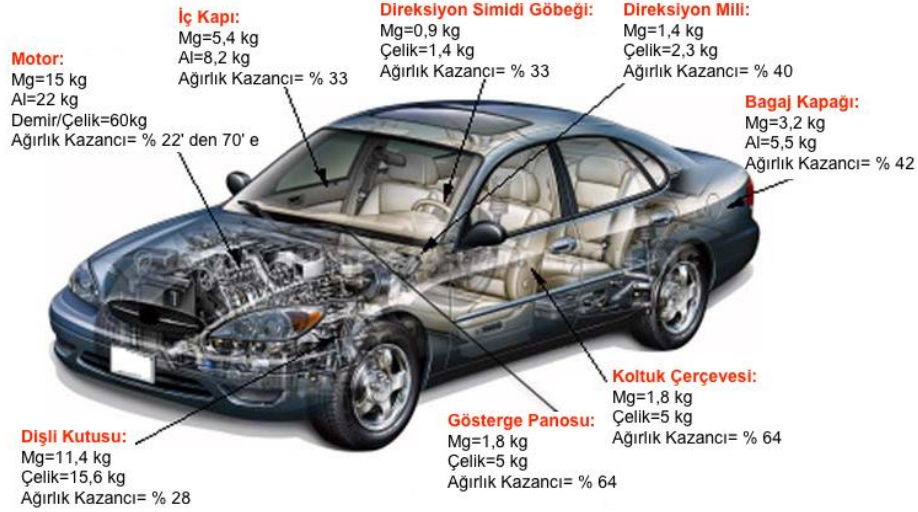
dayanımlarının düşük olması, yetersiz sürünme dirençleri, zayıf korozyon dayanımları ve oda sıcaklığında gözlenen düşük süneklikleri yüksek performans gerektiren bu uygulamalardaki kullanımlarını sınırlamaktadır. Bu nedenle magnezyum ve alaşımlarının yapısal ve fonksiyonel özelliklerinin iyileştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Özellikle maliyeti düşük, performans ve dayanımı yüksek ve iyileştirilmiş korozyon dayanımına sahip alaşım ve çözümlerin geliştirilmesi otomotiv endüstrisinin temel beklentilerindedir (Kelen, 2021).

Geri dönüşüm açısından değerlendirildiğinde; hafif alaşımlar içerisinde otomotiv sektöründe en yaygın kullanılan alüminyum alaşımları ile magnezyum alaşımları kıyaslandığında magnezyum ve alaşımları için üretim süreçlerinde daha az CO<sub>2</sub> salınımının gerçekleştiği tespit edilmiş olup magnezyum ve alaşımları, alüminyum ve alaşımlarına göre daha çevre dostu kabul edilmektedir (Gül, 2021).

Alternatif enerji kaynaklarının (güneş enerjisi, hidrojen, elektrik vb. gibi) kullanılacağı öngörülen geleceğin otomobillerinde hafiflik, günümüzde kullanılan araçlara kıyasla çok daha önemli bir gereksinim olacaktır (Önür, 2021). Sektörel trende bakıldığında; elektrikli araçların pazarda ciddi anlamda kendisine yer bulmaya başladığı günümüzde, magnezyum gibi hafif metallerle olan ilgi ve talebin, hafifletme hedefleri doğrultusunda her geçen gün artması kaçınılmazdır.

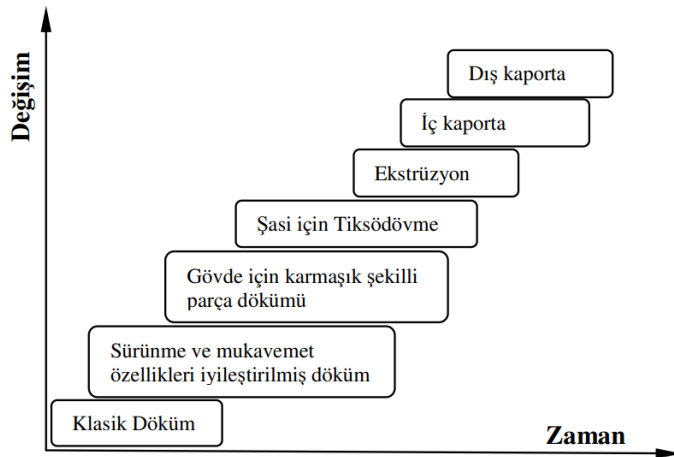
Magnezyum alaşımlarının en çok kullanıldığı otomotiv sektöründe ilk uygulama alanı bulması, 1920'li yıllara dayanmaktadır. Yıllar içinde kullanımı sürekli bir şekilde artarken, 1971 yılında Volkswagen Beetle aracı ile birlikte kullanım miktarı en üst seviyeye çıkmıştır. Magnezyum alaşımları belirtilen araçta hava soğutmalı motor ve vites kutusu parçalarında kullanılmıştır (Luo, 2013). Bu dönem sonrasında magnezyum alaşımlarının, gelişen teknolojiye bağlı olarak artan motor güçleri ve çalışma yüklerini karşılamada yeterli performans gösterememesi sebebiyle, otomotiv endüstrisinde kullanımının görece azaldığı görülmüştür (Hu, Yu, Li, & Allison, 2003). Bununla birlikte; yakın gelecekte daha çok geliştirileceği öngörülen yeni nesil elektrikli ve hibrit otomobillerde ağırlık kazancının belirli bir kısmının magnezyum ile karşılanacak olması kuvvetle muhtemeldir.

Şekil 2.8’ de magnezyum alaşımlarının kullanılması durumunda, bir otomobilde elde edilebilecek yaklaşık ağırlık kazançları gösterilmiştir. Çelik yerine magnezyum alaşımlarının kullanılması ile bazı parçalarda %70 gibi oldukça yüksek ağırlık kazançlarının elde edilebileceği öngörülmektedir.



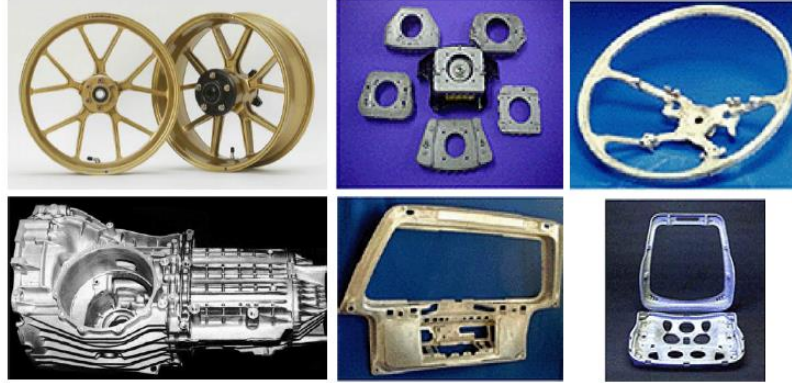
**Şekil 2.8.** Magnezyum alaşımlarından üretilen otomobil parçaları ve sağladığı ağırlık kazançları (Zengin, 2018)

Volkswagen’in farklı otomobil parçalarının üretimi için geliştirdiği strateji, Şekil 2.9’da verilmiştir. Buna göre; hâlihazırda devam eden magnezyum döküm geliştirme çalışmalarına ilaveten, orta vadede ekstrüzyon ile üretim gibi tekniklere odaklanılacağı anlaşılmaktadır.



**Şekil 2.9.** Magnezyum teknoloji gelişimi için Volkswagen stratejisi (Öztürk & Kaçar, 2012)

Magnezyum alaşımlarının, özellikle döküm formunda yaygın olarak kullanıldığı otomotiv parçalarına örnek olarak koltuk iskeleti, tekerlek, gösterge tablosu, direksiyon simidi, motor valf kapağı, emme manifoldu, vites kutusu, kapı kolu, pedal ve yağ karteri verilebilmektedir (Şekil 2.10). Özellikle mangan içeren AM serisi alaşımlar, yüksek toklukları ve enerji sönümlenme özellikleri de göz önüne alınarak, koltuk iskeleti, tekerlek ve direksiyon simidi gibi yapıların üretiminde kullanılmaktadır (Seçgin, 2012).



**Şekil 2.10.** Otomobillerde kullanılan bazı magnezyum parça örnekleri (Kulekci, 2015)

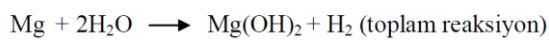
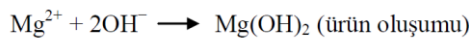
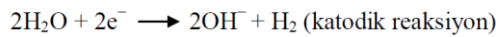
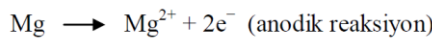
Bunun dışında, farklı geometrilere üretilen ekstrüzyon magnezyum alaşımları da araçların koltuk, tavan veya gösterge çerçeveleri, radyatör destekleri gibi parçalarında kullanılmaktadır. Ayrıca, literatürde magnezyum ekstrüzyon profillerin tampon sistemleri ve şasi bağlantı profillerinde kullanılabilmesine dair farklı çalışmalar mevcuttur (Demirci, & Yıldız, 2018; Plumeri, 2018; Kaczyński, Gronostajski, & Polak, 2019; Kurtulus & Tekin, 2021)

Gelecekte kullanımı artması beklenen alternatif enerjili araçlarda da magnezyumun farklı alanlarda ciddi bir potansiyel taşıdığı düşünülmektedir. Magnezyum, enerji depolama konusunda da çalışmaların merkezinde olan alaşımlardan biri olup hidrojen yakıt tankları ve hidrojen depolama çalışmaları için geliştirilmektedir. Buna ek olarak; temiz enerji açısından, elektrikli araçların batarya sistemlerinde lityum alternatifi olarak magnezyumun kullanılabilmesine dair çalışmalar sürdürülmektedir. Özellikle bu başlıklarda magnezyumun korozyon dayanımının iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmakta ve bu kapsamda literatürde akademik çalışmalar yer almaktadır (Yang vd., 2021).

#### 2.4. Magnezyum Alaşımının Korozyonu

Korozyon, metal ve alaşımların içinde buldukları ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonu sonucunda metalik yapıların diğer kimyasal yapılara dönüşmesi ve malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde meydana gelen istenmeyen değişiklikler sebebiyle oluşan hasardır (Jones, 1996; Talbot & Talbot, 1998). Magnezyum alaşımlarının kullanımı günden güne artış gösterse de en büyük rakibi olan alüminyum ile kıyaslandığında halen sınırlıdır ve bunun en büyük nedenlerinden biri zayıf korozyon direncidir. Magnezyum metalinin elektrokimyasal standart elektrot potansiyel değeri; -2,375 V ile tüm yapısal metaller arasında en düşüğüdür (Guang vd., 2000). Bu nedenle diğer metallerle temas durumunda, ara yüzeyde oluşan galvanik etki sebebiyle korozyona uğrar ve daha agresif ortamlarda bozulma süreci daha da hızlanır.

Metal yüzeyinde oluşan gri oksit filmin koruyucu özellikte olması nedeniyle, magnezyumun atmosferik korozyona karşı direnci yüksektir ve bu oksit film, metali kırsal ve endüstriyel ortamlarda da büyük ölçüde korumaktadır (Ghali, 2010). Koruyucu filmin, metali saldırıya açık hale getirecek şekilde zarar görmesi durumunda korozyon meydana gelmektedir. Magnezyum alaşımlarının korozyonu neme bağlı olarak artış göstermektedir. Sulu çözeltilerde magnezyum, su ile birlikte oluşan elektrokimyasal reaksiyon sonucunda ayrışarak  $Mg(OH)_2$  kristal filmini ve hidrojen gazını oluşturmaktadır. Anodik (magnezyumun çözünmesi) ve katodik (hidrojen oluşumu) reaksiyonlar ile bunların toplamı olan genel korozyon reaksiyonu Şekil 2.11'de verilmiştir. Malzeme üzerinde katodik reaksiyonun meydana geldiği bölgelerdeki fazla voltaj, magnezyumun korozyon davranışı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Fazla voltaja sahip olan katotlar, hidrojen oluşumunu kolaylaştırarak korozyon hızını arttırmaktadır (Song & Atrens, 2003).



**Şekil 2.11.** Magnezyumun sulu çözeltilerdeki reaksiyonları

Magnezyumun yüzeyinde oluşan pasif film, alkali ortamlarda (pH: 11,5 üzerinde) kararlı yapıdadır. Alüminyum ise, yüzeyinde gerçekleşen katodik reaksiyonun yarattığı lokal alkalileşme sonucu korozyona karşı hassas hale gelmektedir. Bu anlamda bakıldığında, magnezyumun alkali ortamlarda alüminyuma oranla korozyona karşı daha dirençli olduğu görülmektedir (Zanotto, 2009).

Günümüzde, magnezyum alaşımlarının korozyon direnci halen birçok uygulama için yeterli seviyelerde değildir. Korozyon direncine temel olarak etki eden kimyasal bileşim ve termomekanik işlemler de kendi içlerinde alaşımın fiziksel ve kimyasal özelliklerine etki etmektedir ve bunların da göz önünde bulundurulmasıyla her bir alaşımın korozyon mekanizması kapsamlı bir şekilde incelenmelidir.

Saf magnezyumun sergilediği istenmeyen özellikler, farklı alaşım elementi ilaveleri ile bir miktar iyileştirilebilmektedir. Alaşım elementlerinin, magnezyum matris ile karşılaştırıldığında daha soy olan ikincil faz partiküllerini oluşturarak korozyonu hızlandırmak ya da korozyon ürünlerini zenginleştirerek korozyon hızını azaltmak gibi farklı etkileri bulunmaktadır (Seçgin, 2012).

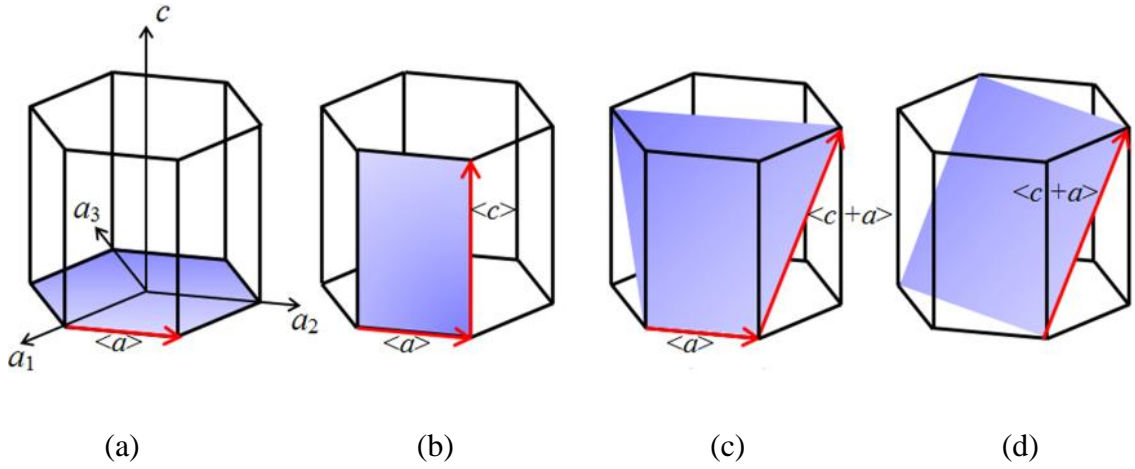
## **2.5. Magnezyum Alaşımlarının Deformasyon Mekanizması**

Magnezyumun deformasyonu, sahip olduğu hegzagonal kristal yapının düşük simetrik özelliklerinden kaynaklanan kalıtsal anizotropik davranıştan çok fazla etkilenir. Düşük simetri, farklı kayma sistemlerinin eş zamanlı olarak aktif hale gelmesini engellemektedir. Hegzagonal kristal yapıya sahip magnezyum, yüzey merkezli ve hacim merkezli yapılara göre sınırlı kayma sistemine sahiptir. Oda sıcaklığında magnezyumun deformasyonu, dislokasyonların belli kristalografik düzlemlerde kaydığı mekanizma olan kayma ile gerçekleşir. Temel kayma sistemi taban düzleminde gerçekleşir. Prizmatik ve piramidal kaymalar ancak yüksek sıcaklıklarda aktif hale gelebilir. Oda sıcaklığında gerçekleşebilen diğer bir deformasyon mekanizması ise ikizlenmedir.

### **2.5.1. Kayma**

Kayma, malzemenin kayma düzleminde ve kayma yönünde uygulanan gerilmenin kritik kayma gerilmesini geçmesi durumunda gerçekleşir. Kritik kayma gerilmesi sıkı paket düzlemlerde ve sıkı paket yönlerinde, minimum kafes direnci ile karşılaşacağından

buralarda en düşük değeri alır. Magnezyumda kayma sistemleri Şekil 2.12’ de gösterilmektedir.



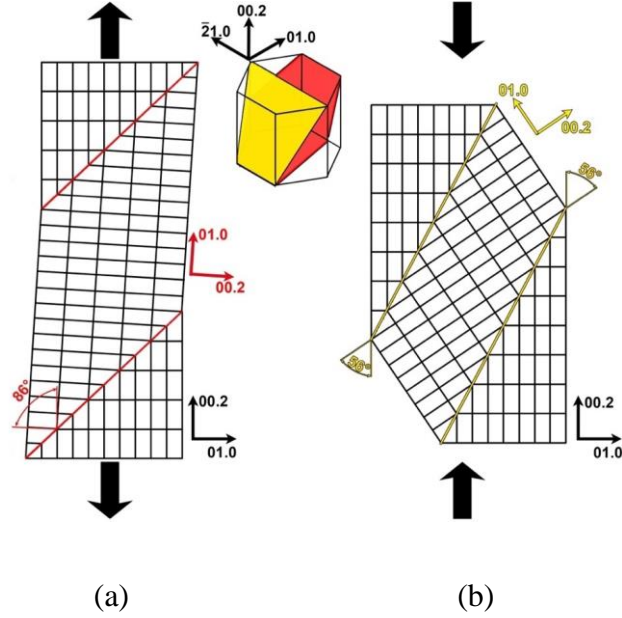
**Şekil 2.12.** Magnezyumda kayma sistemleri. a) (0001) tabansal kayma, b) ( $10\bar{1}0$ ) prizmatik kayma, c) birinci dereceden ( $10\bar{1}1$ ) piramidal kayma, d) ikinci dereceden ( $11\bar{2}2$ ) piramidal kayma (Fan & El-Awady, 2015)

Magnezyumda, en düşük kritik kayma gerilmesi (0001) taban düzleminde ve  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  yönünde görülmektedir. Von Mises kriterine göre, tek biçimli plastik deformasyon için beş bağımsız kayma sistemi gereklidir (Hertzberg, Vinci, & Hertzberg, 2012). Magnezyum oda sıcaklığında sadece iki bağımsız kayma sistemine ve ikizlenme mekanizmasına sahiptir. Bu durum, magnezyumun oda sıcaklığındaki deformasyonunu sınırlamaktadır. Ek kayma sistemleri magnezyumun şekillendirilebilirliğini geliştirmek için aktif hale getirilmelidir. Sıcaklığın artırılmasıyla birlikte, magnezyumda Şekil 2.12’ de gösterilen prizmatik ve piramidal kayma sistemleri aktifleştirilebilir.

### 2.5.2. İkizlenme

Hegzagonal kristal yapıları metallere göre çok az olduğundan, ikizlenme; magnezyumun deformasyonunda önemli bir mekanizma haline gelmektedir. İkizlenme için gereken kritik kayma gerilmesi, tabansal olmayan (prizmatik ve piramidal) düzlemlerinkinden daha düşüktür ve ikizlenme kayma sistemlerinin sınırlandığı durumlarda aktif hale gelmektedir. Bu durum, ikizlenmenin hegzagonal malzemelerde düşük sıcaklıklarda ve yüksek deformasyon hızlarında meydana gelmesini açıklamaktadır (Christian & Mahajan, 1995). Magnezyum

alaşımalarında en yaygın görülen ikizlenme sistemleri olan çekme ve basma ikizlenmeleri Şekil 2.13' te şematik olarak gösterilmektedir. Çekme ikizlenmeleri ( $1\bar{1}20$ ) düzleminde ve  $\langle\bar{1}011\rangle$  yönünde, basma ikizlenmeleri ise  $(10\bar{1}1)$  düzleminde ve  $\langle\bar{1}012\rangle$  yönünde gerçekleşir.



**Şekil 2.13.** Magnezyumda ikizlenme sistemlerinin şematik gösterimi, a) çekme ikizlenmesi, b) basma ikizlenmesi (Lentz, 2015)

Bir kristalde, bir ikizlenme biçimini oluşturmak için gereken kafes gerinmesi küçüktür, dolayısıyla ikizlenmeler tarafından üretilen toplam deformasyon miktarı da küçüktür. İkizlenmenin plastik deformasyondaki asıl rolü oluşturduğu gerinmeden değil, daha çok yönlenmeyi değiştirmesindedir. İkizlenme, istenen yönlenmelerde yeni kayma sistemlerinin oluşmasına yol açar (Barnett, 2007).

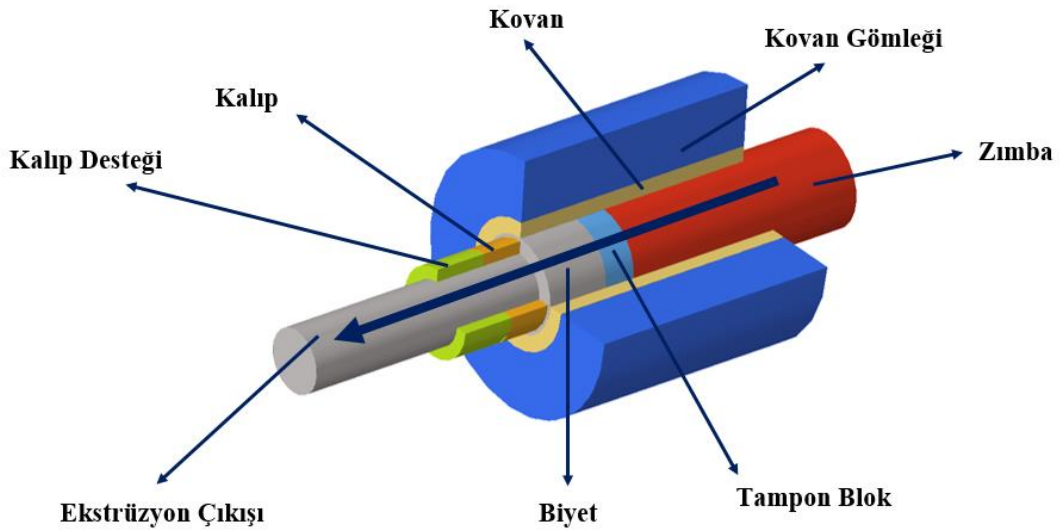
İkizlenmeyi kristalografik kaymadan ayıran kendine has özellikleri aşağıdaki gibidir.

- İkizlenme tek yönlü bir deformasyon mekanizmasıdır. c-ekseni boyunca çekme veya basma gerinimi oluşturur fakat ikisini birlikte oluşturmaz.
- İkizlenme gerinim sağlamada sınırlı kapasiteye sahiptir. İkizlenmeden kaynaklı plastik deformasyon miktarı çok küçüktür.
- İkizlenme dislokasyon kaymasında bariyer görevi görür ve yüksek oranda oluştuğunda tane küçültücü etkisi vardır.

- İkizlenme, ikiz sisteminin çeşidine bağlı olarak, kristallerin yeniden düzenlenmesini sağlar.

## 2.6. Magnezyum Alaşımlarının Ekstrüzyonu

Magnezyum alaşımlarına plastik şekil vermek için farklı metotlar kullanılabilir. Bunlar; sıcak haddeleme, sıcak ekstrüzyon, dövme, magnezyum tozlarının sıcak işlenmesi gibi yöntemlerdir. Ayrıca bahsedilen yöntemler dışında, aşırı plastik deformasyon, EKAP (eşit kanallı açısız presleme) gibi özel yöntemlerle de çok küçük taneli magnezyum alaşımları üretilebilmektedir. Ekstrüzyon; basma kuvveti ile bir biyetin, kendi kesit alanından daha küçük bir kesit alanına sahip bir kalıp boşluğundan geçirilerek plastik şekil verilmesi işlemidir. Şekil 2.14' te temel direkt ekstrüzyon sistemi şematik olarak gösterilmektedir.

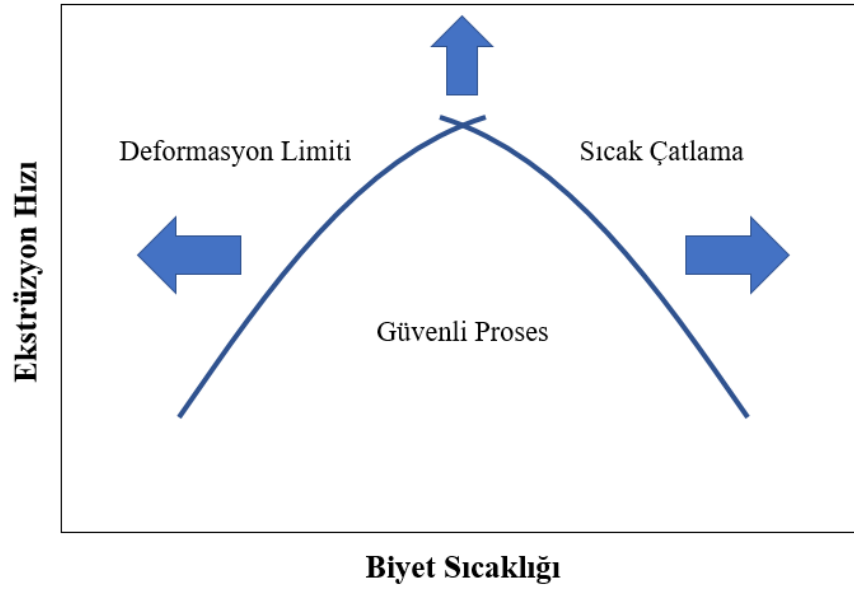


**Şekil 2.14.** Ekstrüzyon prosesinin şematik gösterimi

Ekstrüze magnezyum alaşımları daha yüksek mekanik özellikler sağlasa da magnezyum alaşımlarında ekstrüzyon işleminin, daha düşük ekstrüzyon hızı ve daha dar bir ekstrüzyon sıcaklık aralığı gibi önemli engelleri vardır (Atwell & Barnett, 2007). Daha düşük ekstrüzyon hızı, daha düşük üretim verimliliği nedeniyle yüksek üretim maliyetlerine neden olur.



Magnezyum alaşımları için ekstrüzyon sınırları, şematik olarak Şekil 2.15’ te gösterilmiştir. Deformasyon limiti, sabit bir ekstrüzyon presi kapasitesi için belirli ekstrüzyon basıncının değişimini, sıcaklık limiti ise sıcak yırtılmanın başladığı yeri temsil etmektedir. Biyet sıcaklığının magnezyum alaşımının solidus sıcaklığına yaklaşması ile sıcak yırtılma riski artmaktadır. Her iki limitin arasında oluşan pencere ise başarılı bir ekstrüzyon prosesi için güvenli bölgeyi temsil etmektedir.



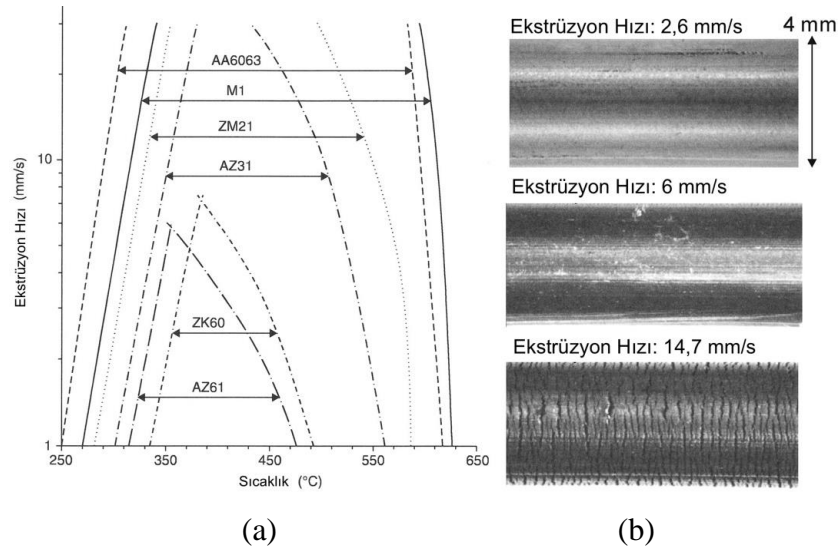
**Şekil 2.15.** Magnezyum ekstrüzyonunda proses limit diyagramı

Ekstrüzyon, proses değişkenleri ve malzemenin yüksek sıcaklık özellikleri arasındaki ilişkiyi içinde barındırdığından magnezyum alaşımları için karmaşık bir prosestir. Teorik olarak proses değişkenleri; ekstrüzyon hızı, ekstrüzyon sıcaklığı ve ekstrüzyon oranıdır. Tekstür, mikroyapı ve mekanik özellikler bu değişkenlere göre şekillenir.

### 2.6.1. Ekstrüzyon Hızı

Magnezyum alaşımlarının ekstrüzyonundaki en önemli parametre ekstrüzyon hızıdır çünkü ticari alaşımların üretim verimliliğini doğrudan etkiler. Bir malzemenin ekstrüze edilebilirliği ekstrüzyon hızı ile ölçülür ve üretimin maliyeti bakımından çok önemlidir. Ekstrüzyon hızı; alaşımın içeriği, kalıntı gerilme, ilk tekstür ve mikroyapı ile ilişkilidir. Şekil 2.16’ da farklı alaşımların ekstrüze edilebilirliklerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak değişimi ve artan ekstrüzyon hızının alaşımın yüzeyine etkisi gösterilmektedir. Şekil 2.16

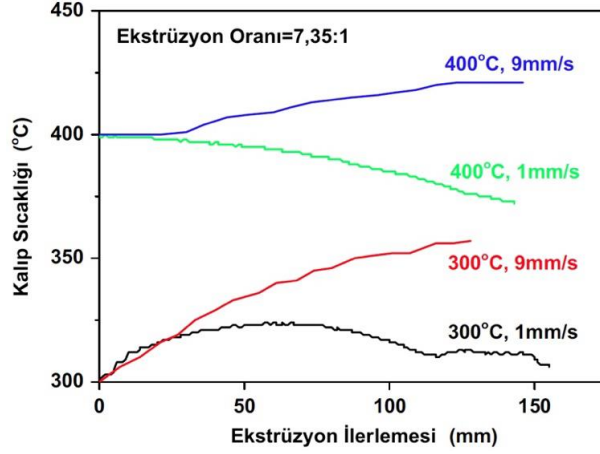
(a)' da; AA6063 olarak gösterilen alüminyum alaşımının ekstrüzyon limitinin magnezyum alaşımlarına göre daha geniş olduğu, M1, ZM21 ve AZ31 alaşımlarının da alüminyum alaşımlarıyla rekabet edebilir seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu alaşımlara göre daha yüksek dayanımlı olan AZ61 ve ZK60 alaşımları, nispeten daha düşük deformasyon hızlarında şekillendirilebilmektedirler. Şekil 2.16 (b)' de; AZ31 alaşımında ekstrüzyon hızının artması ile yüzeyde sıcak çatlakların giderek arttığı açıkça görülmektedir. Şekil 2.15' te görüldüğü üzere; magnezyum alaşımları yüksek hızda ekstrüze edildiğinde, biyet sıcaklığı düşükse gereken pres basıncı artar, biyet sıcaklığı yüksek olduğunda ise ekstrüzyonun sıcaklığı daha da artarak yüzeyde sıcak çatlaklara sebep olur (Sillekens, Van, & Pravdic, 2005).



**Şekil 2.16.** a) Bazı magnezyum alaşımlarının ve AA6063 alüminyum alaşımının ekstrüzyon limit diyagramları (Atwell & Barnett, 2007), b) AZ31 magnezyum alaşımının 375 °C' de farklı ekstrüzyon hızlarındaki yüzey görünümü (Sillekens vd., 2005)

Hyuk, Sun, Mishra, ve Sachdev, (2014) yapmış oldukları bir çalışmada, 1 mm/s ve 9 mm/s ekstrüzyon hızlarında ve 300 °C ve 400 °C ekstrüzyon sıcaklıklarındaki ekstrüzyon işlemleri sırasında kalıp çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür ve Mg-2Zn-0,5Ce alaşımı için Şekil 2.17' de gösterilen sonuç elde edilmiştir. Buna göre, ekstrüzyon işlemi ilerledikçe, 300 °C ekstrüzyon sıcaklığının, 400 °C' den daha yüksek ısı ürettiği görülmektedir. Düşük ekstrüzyon hızında (1 mm/s) ve yüksek ekstrüzyon sıcaklığında (400 °C), ekstrüzyon işlemi yavaş olduğu için ısı kaybının ısı üretiminden daha yüksek olması nedeniyle kalıp

sıcaklıkları düşüş göstermiştir. Ancak yüksek ekstrüzyon hızında (9 mm/s), ekstrüzyon boyunca kalıp sıcaklığı sürekli artmıştır. Yüksek deformasyon hızı, oluşan ısının malzeme içinde akışına zaman tanımamıştır.



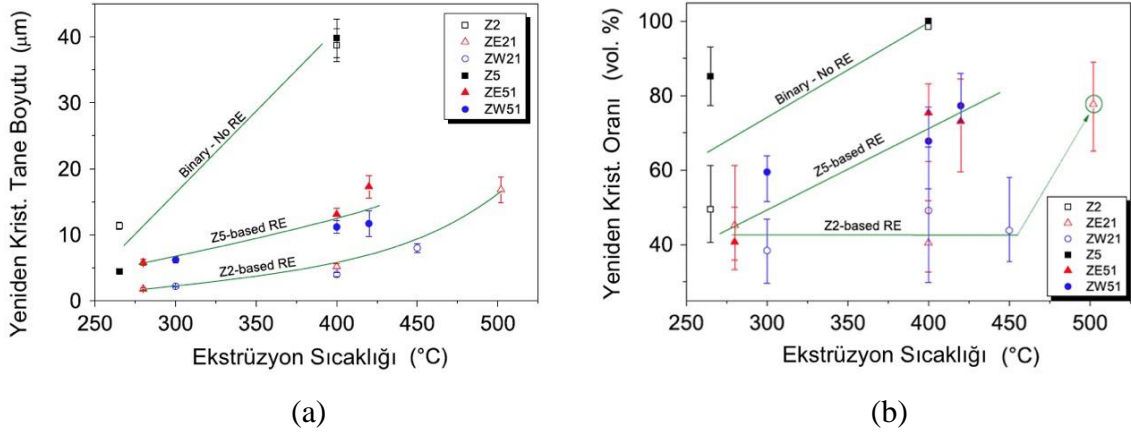
**Şekil 2.17.** Mg-2Zn-0,5Ce magnezyum alaşımının ekstrüzyonu sırasında kalıp sıcaklığının değişimi (Hyuk vd., 2014)

Govind, Nair, Mittal, Sikand ve Gupta (2008) ZK30 alaşımında ekstrüzyon parametrelerinin etkisi üzerine yaptıkları bir çalışmada, ekstrüzyon hızının 4 mm/s den 8 mm/s' e çıkmasıyla biyetin yüzeyinde sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Bu seviyeye kadar akma dayanımında artış görülürken, ekstrüzyon hızı 16 mm/s olduğunda tane büyümesi ve ikincil yeniden kristalleşme oluşarak malzemenin mekanik özellikleri düşmüştür.

## 2.6.2. Ekstrüzyon Sıcaklığı

Magnezyum düşük sıcaklıklarda zayıf şekillendirilebilirlik gösterdiğinden, yüksek sıcaklıklarda ekstrüze edilir. Yüksek sıcaklıklarda deformasyon çok daha kolay olup, toparlanma ve yeniden kristalleşme mekanizmaları da aynı anda gerçekleşebilmektedir. Bu yumuşama mekanizmaları sayesinde deformasyon düşük ekstrüzyon basıncında yapılabilir. Ekstrüzyon sıcaklığı yeniden kristalleşme mekanizmasını şekillendirerek, son malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesini de sağlar. Alaşımın kimyasal kompozisyonuna göre içyapı ve tekstür oluşumunu şekillendirerek, belli sıcaklıklardaki ekstrüzyon sırasında dinamik yeniden kristalleşmeyi oluşturur. Şekil 2.15' te gösterildiği üzere, artan ekstrüzyon sıcaklığı ile alaşımın sıcak çatlama riski artar ve maksimum ekstrüzyon hızı yani ekstrüze edilebilirlik düşer.

Ross, Barnett ve Beer (2014) tarafından yapılan, farklı ekstrüzyon alaşımlarının ve ekstrüzyon sıcaklıklarının içyapı ve mekanik özelliklere etkilerinin incelendiği bir çalışmada, ekstrüzyon sıcaklığının yeniden kristalleşmiş tane boyutuna ve yeniden kristalleşme oranına etkileri Şekil 2.18’ de gösterilmiştir. Neredeyse bütün alaşımlarda artan ekstrüzyon sıcaklığı ile yeniden kristalleşen tanelerin boyutu ve yeniden kristalleşme oranı sürekli bir artış göstermiştir.



**Şekil 2.18.** Farklı ekstrüzyon alaşımlarında ekstrüzyon sıcaklığının, a) yeniden kristalleşmiş tane boyutuna, b) yeniden kristalleşme oranına etkileri (Ross vd., 2014)

Zhang, Geng, Huang, Zhang, & Dong (2010) tarafından yapılan bir çalışmada da benzer şekilde ekstrüzyon sıcaklığı 310 °C’ den 400 °C’ ye doğru arttıkça yeniden kristalleşmiş tane boyutu da artış göstermiştir. İçyapıdaki bu değişiklikler aynı zamanda mekanik özellikleri de ciddi derece etkilemiş, artan ekstrüzyon sıcaklığı ile akma ve çekme dayanımları düşerken, uzama miktarında bir miktar artış görülmüştür.

Zhang vd. (2020) 350 °C, 400 °C ve 450 °C sıcaklıklarda ekstrüze edilmiş AZ31 magnezyum alaşımlı levhalarda içyapı ve mekanik özelliklerin değişimini incelemiştir. Buna göre; ekstrüzyon sıcaklığı düştükçe, levhaların akma ve çekme dayanımlarının iyileştiği gözlemlenmiştir. 350 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen ekstrüzyon işlemi sonucunda; en iyi mekanik özellikler ve en ince tane boyutu elde edilmiştir.

### 2.6.3. Ekstrüzyon Oranı

Ekstrüzyon oranı, ekstrüzyon prosesi sırasında yapılan mekanik işin miktarını gösteren, biyetin kesit alanının, nihai ürünün kesit alanına oranlanmasıyla elde edilen değerdir.

Düşük ekstrüzyon oranı düşük plastik gerinme, yüksek ekstrüzyon oranı da yüksek gerinme oluşumuna sebep olmaktadır.

Ekstrüzyon oranının, son ürünün tane boyutuna etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda farklı bulgular elde edilmiştir. Chen, Wang, Peng, Zhai ve Ding (2007) gerçekleştirdikleri çalışmada AZ31 alaşımının 250 °C’de sabit ekstrüzyon hızında, ekstrüzyon oranı 7’ den 100’ e çıktığında, tane boyutlarında 25 µm’ dan 4 µm’ a küçülme gözlemlenmiştir. Ishihara, Shibata, Komano, Goshima ve Nan (2007) yine AZ31 alaşımında 450 °C’ de sabit ekstrüzyon hızında, ekstrüzyon oranı 10’ dan 100’ e çıktıkça, tane boyutlarında 30 µm’ dan 170 µm’ a büyüme gözlemlenmiştir. Uematsu vd. (2006), AZ80 alaşımında 330 °C’ de sabit ekstrüzyon hızında, ekstrüzyon oranı 39’ dan 133’ e çıktıkça tane boyutlarında 5,9 µm’ dan 4,3 µm’ a, sadece küçük bir değişiklik gözlemlenmiştir.

Ekstrüzyon oranı ile ilgili farklı bulguların en temel sebebi; ilk ekstrüzyon sıcaklıklarının farklı olması ve ekstrüzyon oranının da artmasıyla, malzeme çıkış sıcaklığının artmasıdır. Bu yüzden ekstrüzyon oranı, ekstrüzyon sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı gibi parametrelerin birlikte incelendiği çalışmalar da mevcuttur. Gall, Müller ve Reimers (2013) yaptıkları çalışmada ekstrüzyon sıcaklığı ve ekstrüzyon oranının AZ31 ekstrüze levhaların içyapı ve mekanik özelliklere olan etkisini araştırmışlardır. Tang, Huang, Zhang, Li ve Peng, (2011) AZ31 alaşımı üzerinde farklı ekstrüzyon parametreleri ile direkt ekstrüzyon denemeleri gerçekleştirmiştir. Deneysel sonuçlar; ekstrüzyon oranının tane boyutunun inceltilmesi için en önemli parametre olduğunu göstermiştir.

## **2.7. Ekstrüzyon Prosesinin Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi**

Sonlu elemanlar metodu ilk kez 1950 yılında uzay mühendisliği alanında kullanılmaya başlanmış, çağın getirdiği gelişmelere bağlı olarak 1970’lerden itibaren yaygınlaşmıştır. Günümüzde ise; bilgisayar teknolojilerinin hızlı gelişimine de paralel olarak inşaat, elektrik, makine, uçak, hidrodinamik, atom gibi çeşitli mühendislik alanlarının yanında, tıp dalında ortopedi, kalp ve damar cerrahisi, estetik cerrahi gibi bölümlerde kullanılmaktadır ve kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır (Anonim, 2021a). Sonlu elemanlar metodunu kullanarak; muhtemel prototip doğrulama maliyetlerini ve sürelerini ciddi anlamda azaltmak mümkün olmaktadır. Bu kapsamda statik dayanım, yorulma analizi, akış analizleri, titreşim-gürültü analizleri, termal analiz, kalıp dolum analizleri,

elektromanyetik analizler, çoklu fizik analizleri, topoloji optimizasyonu gibi çok farklı analiz çalışmaları yürütülmektedir (Anonim, 2021b).

Ekstrüzyon prosesi oldukça eski bir teknoloji olmasına rağmen sonlu elemanlar metodunun prosese uygulanması ve yaygınlaşması özellikle son yirmi yılda gerçekleşmiştir. Metal deformasyonu için sonlu elemanlar modelleme yazılımlarının geliştirilmesinden bu yana, farklı kalıp tasarımları aracılığıyla metal akışının daha iyi anlaşılması ve ekstrüzyon sürecini simüle etmek için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu karmaşık işlem sırasında ekstrüzyon basıncı, gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık gibi farklı proses değişkenleri izlenebilmektedir. Bazı araştırmacılar, üretkenliği artırmak ve olası proses hatalarını en aza indirmek için ilgili proses parametrelerini optimize etmek adına alüminyum ve magnezyum gibi hafif metallerin sıcak ekstrüzyon simülasyonuna odaklanmıştır. Literatürde ekstrüzyon prosesinin simülasyonu için farklı yazılımlar mevcuttur. Forge, QForm, Deform 3D, HyperXtrude gibi ekstrüzyon odaklı yazılım araçları dışında, Abaqus ve Ansys gibi farklı disiplinler için geliştirilmiş simülasyon yazılımları ile de ekstrüzyon prosesi modellenmektedir (Bakhtiani, 2015).

Jo, Jeong, Lee ve Kim (2003) AA7003 alüminyum alaşımından ekstrüzyonla üretilen içi boş profil boruların kaynak kalitesi üzerine; biyet sıcaklıklarının, sürtünme yüzeyi uzunluğunun ve ürün kalınlığının etkisini araştırmışlardır. Ürünün metal akışı, DEFORM simülasyonları ve 400 ° C, 430 ° C ve 460 ° C' lik farklı biyet sıcaklıkları için deneyler kullanılarak analiz edilmiştir.

Flitta ve Sheppard (2003) implisit sonlu eleman kodları olan FORGE2 ve FORGE3 yazılımlarını kullanarak, solid bir profilin ekstrüzyonunda sürtünmenin malzeme akışı üzerindeki etkilerini incelemiş ve deneysel olarak doğrulamıştır. Araştırmaları boyunca, biyet ve konteyner ara yüzü arasındaki sürtünme katsayısının, baskı kuvveti ve ekstrüzyon sıcaklığı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olan metal akışı ve iç malzeme gerilimleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Donati ve Tomesani (2004) ekstrüzyon basıncının, malzeme akış gerilmesinin ve çıkış hızının ekstrüzyon kaynama yüzeyi üzerindeki etkisini incelemek için AA6082 alüminyum alaşımının ekstrüzyonunu modellemiştir. Çalışmada modifiye edilmiş yeni

bir ekstrüzyon kaynama kriteri ortaya konmuş ve H-şekilli ekstrüzyon profile uygulanmıştır.

Min, Kim ve Kang (2005) Lagrange formülasyonu kullanan Deform 3D yazılımını kullanarak malzeme akışını, kaynama basıncını, ekstrüzyon yükünü ve mandrel sapma eğilimini değerlendirmek için kondenser tüpler için köprülü bir kalıpta havuz şekillerinin etkilerini araştırmıştır.

Ceretti, Mazzoni ve Giardini (2007) kalıp geometrisini, kalıp aşınmasını ve kalıp takım ömrünü iyileştirmek için Deform 3D kullanarak bir köprülü kalıptaki malzeme akışı ve gerilmelerin etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmada dokuz farklı kalıp geometrik konfigürasyonu; ekstrüzyon basıncı, ekstrüzyon kuvveti, sıcaklık, kalıp üzerindeki gerilmeler ve malzeme akışının homojenliği açısından analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçlarından; daha düşük açılı ve genişliğe sahip ağırlara sahip olmanın, kalıba etki eden düşük gerilmelerle sonuçlandığı ve ayrıca malzeme akışını artırarak ekstrüzyon yükünü azalttığı anlaşılmıştır.

Ekstrüzyonda kaynama olayı, Liu, Zhou, & Duszczyc (2007b, 2007a) tarafından magnezyum alaşımları için sayısal analizler ile incelenmiştir. Dikdörtgen bir kesite sahip AZ31 magnezyum alaşımının ekstrüzyonu çeşitli baskı hızlarında sayısal olarak simüle edilmiş ve analiz sonuçları deneylerle doğrulanmıştır. Sonuçlar, portların içindeki metal sıcaklığının uniform olmadığını ve kalıp ağzına yakın kaynama odasında arttığını göstermiştir. Sıcaklık artışı ile baskı hızı arasında doğrusal bir ilişki kurulmuştur. Ayrıca, baskı hızı ne kadar yüksekse, çıkış sıcaklığının da o kadar yüksek olduğu bulunmuştur.

AZ31 alaşımının ekstrüzyonunda boyuna kaynama kalitesi farklı bir çalışmada Li vd. (2008) tarafından da incelenmiştir. Maksimum normal basınç, kaynama bölgesi içindeki akış gerilimi değeriyle birlikte azalmıştır. Bu sonuçlar, ekstrüze edilmiş profilin ön ucundaki kaynama kusurunun ana nedeninin kaynama odası içindeki köprülerin altında sıkışmış hava olduğunu göstermiştir. Kalıp yüzeyi ile konteyner arasındaki köşelerde ölü metal bölgesi gözlenmiştir.

Fang, Zhou ve Duszczyk (2009) sürtünme uzunluğu ve ekstrüzyon hızının ekstrüzyon sıcaklığı ve basıncı üzerindeki etkilerini araştırmak için karmaşık bir katı profilin ekstrüzyonunu simüle etmek için Deform 3D'den elde edilen sonuçları deneysel olarak doğrulamıştır. Araştırmalarından, ekstrüzyon hızının ve sürtünme uzunluğunun, son ürünün ekstrüzyon sıcaklığı ve yüzey kalitesi üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Khan ve Valberg (2010) tarafından kalıp köprüsünün her iki yanındaki iki komşu port kanalının farklı boyutta olduğu durumlarda metal akışını analiz etmek için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Daha büyük portun, alüminyum alaşımın ekstrüzyonunda daha fazla ilerlemeye sahip olduğu ve bunun deformasyon ve metal akışı üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Kalıp köprüsünün arkasındaki kaynama odasında DEFORM 3D simülasyonu ile önemli bir basınç düşüşü tahmin edilmiştir ve bu düşüşün, köprü yüzeyinin yanında meydana gelen ısı oluşumundan kaynaklandığı ortaya konmuştur.

Jian, Gao-yong, Di, Yan-ming ve Li-ping (2010) alüminyum köprülü kalıp ekstrüzyonunda daha iyi boyuna kaynama kalitesi için gereksinimleri belirlemek amacıyla farklı koşullarla simülasyonlar modellemiştir. 1, 5, 10 ile 15 mm / s arasında değişen baskı hızları, 420, 450, 465 ve 480 °C biyet sıcaklıklarında ve 4, 7 ve 10 mm kaynama odası yükseklikleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarından, daha yüksek kaynama odası ve daha keskin kalıp ayağının daha iyi kaynama kalitesini sağladığı bulunmuştur. Ek olarak, daha yüksek baskı hızının kaynama kalitesini düşürdüğü gözlemlenmiştir. 450 ve 465 ° C biyet sıcaklıklarında daha iyi kaynama kalitesi ortaya konmuştur.

Parkar (2011) HyperXtrude yazılımı kullanarak magnezyum alaşımları olan AZ61 ve AM30 alaşımları ile birlikte Al1100 alüminyum alaşımının ekstrüzyonunu modellemiş ve deneysel doğrulamalarını gerçekleştirmiştir.

Zhang, Zhao ve Chen (2012) ALE formülasyonu kullanan bir yazılım olan HyperXtrude'u kullanarak karmaşık bir içi boş alüminyum profilin malzeme akışını araştırmış ve deneysel olarak doğrulamıştır. Çalışmanın sonuçları, alüminyumun kalıp boşluğundan geçen uniform olmayan hızının kalıp tasarım geometrisi tarafından



belirlendiği sonucuna varmıştır. Sayısal analiz simülasyonlarını kullanmanın; çarpılma, eğilme ve çatlama gibi nihai ürün kusurlarını tahmin etmede etkili bir araç olabileceği ortaya konmuştur.

Baskı hızının AA6063 alüminyum alaşımının ekstrüzyonu üzerindeki etkisinin bir araştırması yine Zhang, Zhao, Chen, Chen ve Kou (2012) tarafından gerçekteştirilmiştir. 0.1 mm / s ile 1.5 mm / s arasında değişen baskı hızlarında farklı simülasyonlar HyperXtrude yazılım paketi kullanılarak gerçekteştirilmiştir. Belirli bir kalıp ve proses koşulları için metal akış homojenliğinin optimum değer, 0.3 mm / s' lik baskı hızında elde edilmiştir. Ayrıca baskı hızındaki artış, daha yüksek kaynak kalitesini sağlamıştır.

Liu, Xie ve Cheng (2012) HyperXtrude'u, ekstrüze edilmiş ürünün malzeme akış hızını inceleyerek ve deneysel olarak doğrulayarak ince duvarlı bir köprülü kalıbın kalıp yapısını optimize etmek için kullanmıştır. Araştırmalarında kalıp yapısının modifikasyonlarının, bükülme, kıvrılma gibi üretim kusurlarından kaçınmak için malzeme akışının uniform bir çıkış hızına ulaşmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

Jam ve Zadeh (2012) Tellür-Kurşun alaşımının ekstrüzyon kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmak için genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımı olan Abaqus'u kullanmıştır.

Hosseini, Farhangdoost ve Manoochehri (2012) kalıp açısı, sürtünme katsayısı ve ekstrüzyon oranının ekstrüzyon basıncı üzerindeki etkisini araştırmak için bir deney tasarımı çalışması yürüterek, ekstrüzyon proses parametrelerini optimize etmek için solid bir 2A12T4 alüminyum alaşımının iki boyutlu ekstrüzyonunu simüle etmek amacıyla Abaqus yazılımını kullanmıştır.

Tang, Fang, Fan, Li ve Peng (2014) kalıp tasarımının dikiş kaynağı mukavemeti ve mikro yapı üzerindeki etkilerini incelemek için Deform 3D kullanarak mikro kanallı tüplerin ekstrüzyonu için düz ekstrüzyon kalıbı ve yarı küresel ekstrüzyon kalıbı üzerinde bir çalışma yürütmüştür.

Alharthi (2014) AM30 magnezyum alaşımından dikdörtgensel kesitli bir profil üretimi için HyperXtrude yazılımını kullanmış ve analiz sonuçlarını deneysel çalışmalar ile

doğrulamıştır. Çalışmada ayrıca kaynama kalitesinin doğrulaması da sonlu eleman analizleri ile gerçekleştirilmiştir.

Plumeri (2018) yeni bir magnezyum alaşımı olan ZE20 alaşımının ekstrüzyonunu simüle etmek amacıyla bir nümerik model ortaya koymuştur. Deform yazılımı kullanarak gerçekleştirdiği analiz çalışmalarını deneysel sonuçlarla da doğrularak otomotivde kullanıma uygun bir alt bileşen prototipini ekstrüzyon metodu ile üretmiştir.

Yu, Zhao, Cui, Chen ve Chen (2019) köprülü kalıp ile üretilen içi boş alüminyum profilde boyuna kaynama kalitesinin incelenmesi için QFORM yazılımını kullanmıştır. Elde edilen sonuçların deneysel doğrulaması ile, ekstrüzyonda kaynama kalitesinin mekanik özellikler ve mikro yapıdaki etkilerinin simülasyon yardımıyla optimize edilebileceği ortaya konmuştur.

Ayer, Bingöl ve Karakaya (2019) HyperXtrude yazılımı ile gerçekleştirdikleri simülasyon çalışmaları ile alüminyum AA6063 alaşımında, profil üzerindeki bozulma ve akış süreksizliklerinin tahmin edilebileceğini göstermişlerdir. Aynı çalışmada ayrıca ekstrüzyon esnasında ortaya çıkan basınç değişimleri incelenmiştir.

Lili, Jingru, Jianqiang ve Yongbing (2020) ZK60 magnezyum alaşımdan, içi boş ekstrüzyon profil olarak üretilen ürün üzerinde sıcaklık, hız, yer değiştirme ve gerinim dağılımlarını HyperXtrude yazılımı yardımıyla incelemiştir.

Kothasiri, Chalamalasetti ve Peteti (2021) kalıp açısı, baskı hızı ve sürtünme katsayısının; AA2024 alüminyum alaşımının ekstrüzyon prosesine etkisini DEFORM 3D yazılımı ile incelemiştir. Çalışma sonucunda Gri İlişkiler Metodu kullanılarak ekstrüzyon prosesinin optimizasyonu sağlanmıştır.

Öğüt (2021) aşırı plastik deformasyon proseslerinden olan eşit kanallı açısal ekstrüzyon simülasyonu için DEFORM 3D yazılımını kullanmıştır. Çalışmada yapay sinir ağları kullanılarak, AZ31 magnezyum alaşımının kullanıldığı ekstrüzyon kalıbının optimum tasarımı elde edilmiştir.

Dewang ve Sharma (2021) kalıp açısı ve sürtünme katsayısının alüminyum malzemenin ekstrüzyonuna olan etkisini incelemek için ABAQUS yazılımını kullanmış ve çalışma

sonucunda elde edilen veriler literatürde yer alan geçmiş çalışmalarla kıyaslanarak tutarlılığı ortaya konmuştur.

Nitsche (2021) AZ31 magnezyum alaşımında değişken et kalınlığına sahip bir ekstrüzyon prosesi geliştirmiş ve deneysel çalışmalarını HyperXtrude yazılımı kullanarak sonlu eleman analizleri ile doğrulamıştır.

Yan, Li, Liu ve Li (2022) AZ31 magnezyum alaşımından üretilen boru kesitli ekstrüzyon yapıda kaynama kalitesi ve buna etki eden faktörleri HyperXtrude yazılımı ile incelemiştir.

Sonlu elemanlar metodunun doğru sonuç vermesi için gerekli en önemli şartlar; malzeme parametrelerinin ve sınır şartlarının doğru olarak tanımlanmasıdır. Bu tez çalışmasında; AM50 magnezyum alaşımı için ekstrüzyon malzeme parametreleri elde edilip sunulmuştur. Gerçekleştirilen literatür taramasında; AM50 alaşımlarının ekstrüzyonu üzerine herhangi bir bilgisayar destekli analiz çalışmasına rastlanmamıştır. Ayrıca belirtilen alaşımın deneysel ekstrüzyonu ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu tez çalışmasında ortaya konacak çıktılardan, özellikle literatürdeki bu eksikliği gidermesi hedeflenmiştir.

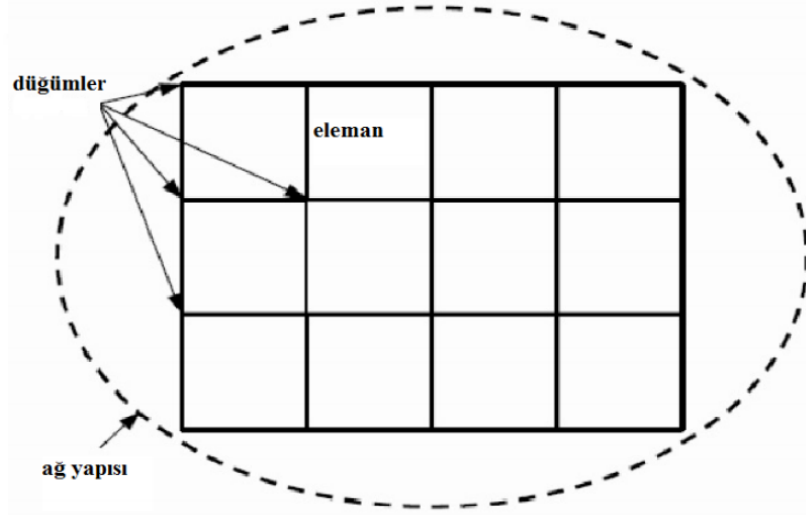
### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tez çalışmasının *Materyal ve Yöntem* kısmında, tez kapsamında gerçekleştirilen sanal analiz çalışmaları ve optimizasyon çalışmalarına ilişkin detaylar yer almaktadır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre kalıp üretimi ve deneysel ekstrüzyon çalışmalarına sırasıyla yer verilmiştir. Ayrıca malzemenin mekanik ve içyapı özelliklerinin incelemesinde kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde paylaşılmıştır.

#### 3.1. Sonlu Elemanlar Metodu

Karmaşık ve anlaşılması güç yapısından dolayı birçok mühendislik problemi, sonuçlarının elde edilmesi noktasında oldukça zahmetlidir. Bu tarz karmaşık yapıdaki problemlerin analitik yöntemler ile çözümlenebilmesi çoğu zaman mümkün olamamaktadır. Deneme-yanılma yoluyla gerçekleştirilen çözüm arayışları ise; hem zaman hem de maliyet açısından olumsuz yönde sonuçlanabilmektedir. Sonlu elemanlar metodu; bilim ve mühendislik uygulamalarında karşılaşılan birçok karmaşık problemin yaklaşık çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin, bilgisayar temelli sayısal yöntemlerden biridir. Sonlu elemanlar metodundaki temel mantık; karmaşık bir problemi basite indirgeyerek çözüme ulaştırmaktır. Bu metotta çözüm bölgesi; çok sayıda basit, küçük, birbirine bağlı alt bölgelere ayrılmaktadır. Bunlara ‘sonlu eleman’ adı verilir. Bu sayede birbirine çok sayıda düğüm noktalarıyla bağlanmış parçalara ayrılmış problemin çözümü, kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Sonlu elemanlar metodunu kullanarak analiz yapan ticari programlar, çözümü yapılacak fiziksel problemi sonlu sayıda ideal elemanlara böler. Bu elemanlar arasındaki bağlantı düğüm noktalarıyla sağlanır. Problemin fonksiyonu ve türevi bu düğümlerin içerisinde tanımlanmıştır. Sonlu sayıdaki bu eleman ve düğümler, ağ yapısı sistemini (mesh) meydana getirir (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1.** Sonlu elemanlar metodunda ağ yapısının gösterimi (Yıldız, 2017)

Genel bir ifade ile sonlu elemanlar analizinde problem çözümleri düğüm noktalarında gerçekleştirilmekte ve interpolasyon yardımıyla elemanlar üzerindeki sonuçlar elde edilmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan elemanlar; problemin karmaşıklığı ve analiz türüne göre bir boyutlu (1D) çizgisel elemanlar, iki boyutlu (2D) kabuk elemanlar ve üç boyutlu (3D) katı elemanlar olabilmektedir.

Sonlu elemanlar analizinde oluşturulan ağ yapısı, analiz sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Temel amaç, geometriyi olabildiğince iyi bir şekilde temsil edebilecek yoğunlukta bir ağ yapısının oluşturulmasıdır. Ağ yapısı içerisindeki sonlu elemanların boyutu ne kadar küçük olursa eleman sayısı da o kadar artar ve sonuç olarak problemin çözümü için gerçekleştirilen iterasyon sayısı fazla olur. Böylece elde edilen sonucun hassasiyeti artar, fakat bu durum işlem süresini uzatır. Sonlu elemanlar metoduyla gerçekleştirilen analizlerde; ağ yapısını oluşturan eleman sayısının optimum seviyede tutularak, uygun bir işlem süresinde en iyi hassasiyete sahip sonuçlar elde etmek hedeflenmektedir ve bu aşama ciddi bir deneyim gerektirmektedir.

### **3.2. Magnezyum Ekstrüzyon Prosesinin Sonlu Elemanlar Metodu ile Simülasyonu**

Ekstrüzyon prosesinin simülasyonu; Deform 3D, Dynaform, Abaqus, HyperXtrude ve PamStamp gibi paket programlar kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Çalışmanın bu kısmında; magnezyum alaşımlarında ekstrüzyon prosesinin bilgisayar ortamında

modellenmesi ve sonlu elemanlar analizi için kullanılan yazılım ve yöntemler, HyperXtrude paket programı odağında alt detaylarıyla birlikte verilmiştir.

### 3.2.1. HyperXtrude Yazılımı

HyperXtrude; Altair firması tarafından, metallerin ve polimerlerin ekstrüzyon işleminde kalıp tasarımını ve malzeme akışını araştırmak için geliştirilmiş, ekstrüzyona özgü ticari bir simülasyon yazılımıdır. Yazılımın temel amacı; kalıp tasarımcılarının ve üretim mühendislerinin, ekstrüzyon prosesi esnasında biyet malzemesinin termomekanik davranışını doğru bir şekilde modellemesini ve böylece maliyetli kalıp denemelerini azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla erken aşamalarda kalıp tasarımlarını doğrulamasını sağlamaktır. Kalıp denemesi, ekstrüzyon endüstrisinde dengeli malzeme akışı sağlamak amacıyla kalıp tasarım ve iyileştirme iterasyonlarını kapsayan yaygın bir uygulamadır.

En uygun kalıp tasarımı ve proses parametrelerinin elde edilmesi amacıyla tekrar edilmesi gereken deneme çalışmaları oldukça maliyetli ve zaman alan süreçlerdir. Bu olumsuzlukları azaltmak amacıyla endüstride HyperXtrude gibi yazılımlar kullanılmaktadır. HyperXtrude, metal ekstrüzyon sırasında izotermal olmayan malzeme akışını modellemek ve simüle etmek için tasarlanmış sonlu eleman tabanlı bir koddur. Kod, Newtonian olmayan sıkıştırılmaz viskoz akışkanların akışını ve ısı transferini yöneten temel diferansiyel denklemlerin çözümünde ALE (Arbitrary Lagrangian Euler) formülasyonunu kullanır.

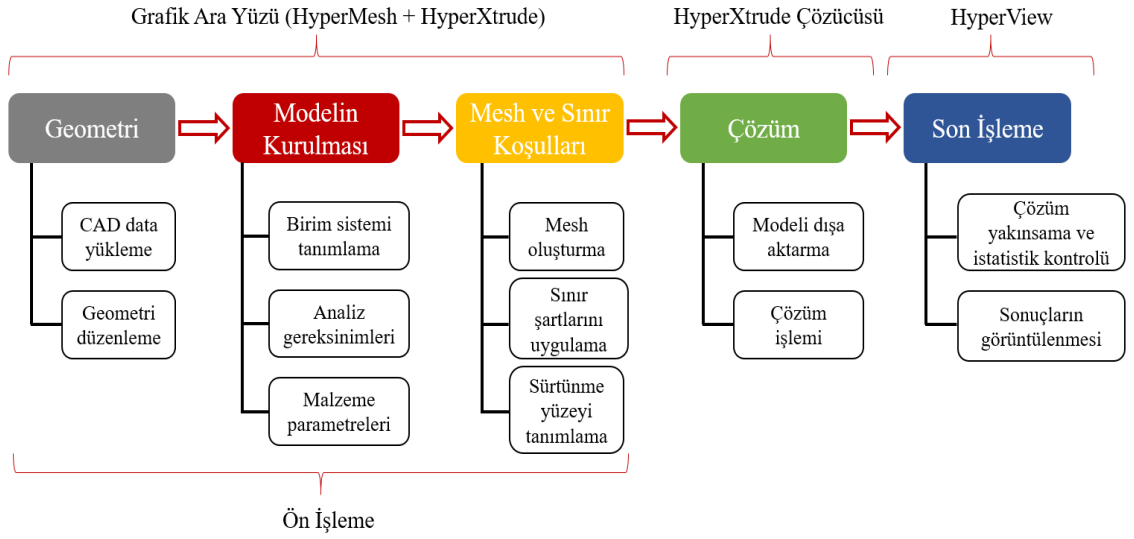
HyperXtrude yazılımının temel özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Ekstrüzyon prosesine özgü kullanıcı ara yüzü,
- Metal, polimer, seramik gibi farklı malzemelerin ekstrüzyonunu analiz etme yeteneği,
- Kalıp deformasyonu ve takım gerilmelerini belirlemek için yerleşik kalıp deformasyon modülü,
- Daha doğru kalıp gerilme analizi ve yorulma hesaplamaları gerçekleştirmek için Radioss yazılım veri desteğinin otomatik olarak oluşturulması,
- İki veya daha fazla malzemenin birlikte ekstrüzyonunu modelleyebilme,
- Kalıp sürtünmesi, köprü ve cep şekillerinin optimizasyonu için, optimizasyon alt aracı olan HyperStudy yazılımı ile entegrasyon.

HyperXtrude yazılımının bazı avantajları aşağıda verilmiştir:

- Kalıp tasarım süresini ve maliyetini en aza indirme: Sağlam, güvenilir ve verimli bilgisayar simülasyonu, kalıpları üretmeden ve pres kurulumundan önce bilgi ve yön verir.
- Sağlam kalıp tertibatları tasarlama: Kalıp tasarımlarını optimize etmek için, ekstrüzyon yüklerinden kaynaklanan kalıp deformasyonlarını ve gerilmeleri doğru bir şekilde tahmin etmede kolaylık sağlar.
- Malzeme akışını görselleştirme: Ekstrüzyon malzeme akışını, sıcaklıklarını, basınçlarını ve kuvvetlerini anlama ve yorumlamada kolaylık sağlar.
- Kaynama kaynaklı hurdayı en aza indirme: Ekstrüzyonda oluşan enine kaynama uzunluğunu hesaplayarak hurdayı en aza indirmede yol gösterir.
- Maliyeti azaltma: Sanal validasyon sayesinde, zaman ve maliyetten tasarruf etmek için kalıp denemelerini azaltmada yardımcı olur.
- Üretkenliği artırma: Belirtilen tüm bu faydalar sayesinde, genel üretkenliğin artırılmasını sağlar (Anonim, 2021c).

Diğer sonlu eleman analiz çalışmalarına benzer şekilde; ekstrüzyon simülasyonu da temel olarak ön işleme, çözüm ve son işleme adımlarından oluşmaktadır. Geometri temizliği, ağ yapısının (mesh) oluşturulması, malzeme parametrelerinin ve sınır koşullarının tanımlanması gibi adımlar ön işleme kısmını oluşturmaktadır. Oluşturulan ağ modeli üzerinden nümerik metotlarla gerekli hesaplamaların gerçekleştirilmesi çözüm aşamasıdır. Sonuçların görsel olarak renklendirilmiş skalalarla ve gerektiği takdirde grafikler üzerinden incelenip yorumlandığı ve değerlendirildiği aşama ise son işleme kısmıdır. Bahsedilen HyperXtrude analiz adımları Şekil 3.2’de şema şeklinde verilmiştir.



**Şekil 3.2.** HyperXtrude analiz adımları

### 3.2.2. Ekstrüzyon Malzeme Modeli

Ekstrüzyon prosesinde malzeme farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarına maruz kalmaktadır. HyperXtrude ekstrüzyon yazılımında malzeme tanımı için dört farklı malzeme modeli mevcuttur. Bunlar; ters sinüs hiperbolik malzeme modeli, metal forming power law malzeme modeli, Norton-Hoff modeli ve Hensel-Spittel malzeme modelleridir.

Sıcak sıkıştırımda magnezyum alaşımı, yüksek sıcaklıkta sürünme prosesiyle aynı özelliklere sahiptir; yani yapıda sürekli olarak termal aktivasyon meydana gelir. Ters sinüs hiperbolik malzeme modeli, metalik malzemenin sıcak deformasyon sırasında ısıl viskoplastik davranışını tanımlamak için en yaygın olarak kullanılan malzeme modelidir (Mcqueen & Ryan, 2002). Bu çalışmada da ters sinüs hiperbolik malzeme modeli kullanılmış, magnezyum alaşımlarının ekstrüzyon prosesi esnasındaki malzeme davranışını tanımlamak için simülasyonda Zener – Hollomon parametresinden faydalanılmıştır.

$\frac{d\phi}{dt}$  gerinim oranı; Q aktivasyon enerjisi, T sıcaklık ve R evrensel gaz sabiti olmak üzere, Z, Zener-Hollomon parametresi; denklem 3.1 ifadesine göre hesaplanmaktadır.



$$Z = \frac{d\varphi}{dt} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (3.1)$$

Ters sinüs hiperbolik malzeme yasası için kullanılan bağıntı yazıldığında denklem 3.2 elde edilir.

$$\frac{d\varphi}{dt} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = Z = A(\sinh\alpha\sigma)^n \quad (3.2)$$

Gerekli işlemler sonucunda 3.3 ve 3.4 denklemleri elde edilir.

$$\frac{d\varphi}{dt} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = Z = A'\sigma^{n'} \quad (3.3)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = Z = A'' \exp(\beta\sigma) \quad (3.4)$$

Son olarak; yukarıdaki denklemler bir arada düşünüldüğünde denklem 3.5'teki halini alır.

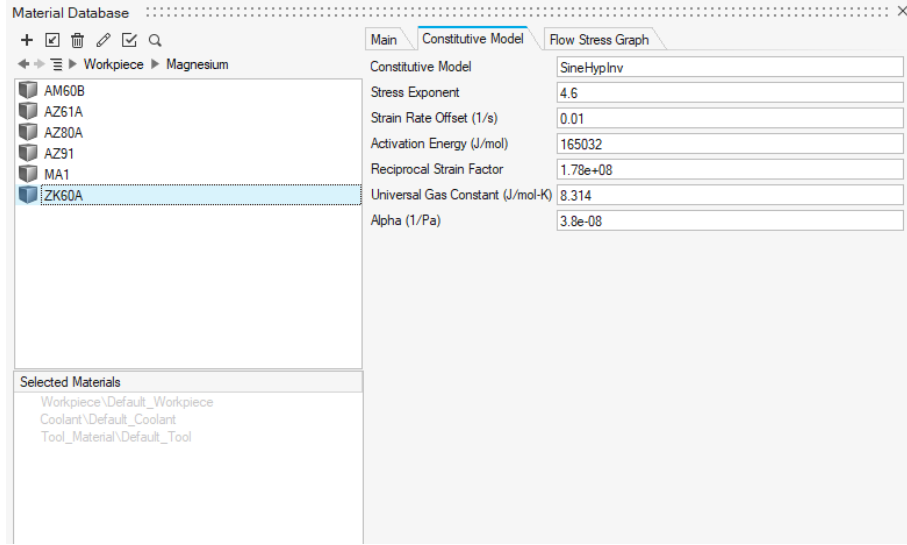
$$\sigma_{f,p} = \frac{1}{\alpha} \sinh^{-1} \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \quad (3.5)$$

Burada  $\sigma$  malzeme akış gerilmesini belirtir; A,  $\alpha$  ve n ise sıcaklıktan bağımsız malzeme sabitlerdir. Verilen tüm denklemlerde yer alan tanımlamalar ve karşılıkları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Malzeme tanımlamasında kullanılan parametreler

<b>Parametre Tanımı</b>	<b>Parametre</b>	<b>Açıklama</b>	<b>Birim</b>
$A, A', A''$	Karşılıklı gerinim oranı faktörü	Malzeme sabiti	$s^{-1}$
$Q$	Aktivasyon enerjisi	Malzeme sabiti	$\frac{J}{mol}$
$R$	Evrensel gaz sabiti	Sabit değer	$8,3144598 \frac{J}{mol.K}$
$T$	Sıcaklık	Değişken	$K$
$\sigma$	Gerilme	Değişken	$MPa$
$Z$	Zener-Holloman parametresi	Malzeme sabiti	$s^{-1}$
$n, n'$	Gerinim oranı sertleşme üsteli	Malzeme sabiti	-
$\alpha$	Gerilme çarpanı	Malzeme sabiti	$MPa^{-1}$
$\beta$	Malzeme sabiti	Malzeme sabiti	-
$\frac{d\phi}{dt}$	Gerinim oranı	Oran	$s^{-1}$

Pratik uygulamalarda,  $A$ ,  $Q$ ,  $\alpha$  ve  $n$  değerleri bilindiğinde, malzemenin reolojik gerilmeleri herhangi bir deformasyon koşulunda belirlenebilir. Bu parametreler ise deneysel akış eğrilerinden elde edilebilmektedir. HyperXtrude malzeme kütüphanesinde sık kullanılan bazı ticari alaşımlar için genelleştirilmiş malzeme parametreleri mevcuttur (Şekil 3.3). Tez çalışması kapsamında üretilecek olan AZ31 ve AM50 magnezyum alaşımları için ise bu veriler yazılım kütüphanesinde yer almamaktadır. Çalışma kapsamında belirtilen akış eğrilerinin elde edilmesi amacıyla malzemelere sıcak basma testleri uygulanmış ve bu eğriler üzerinde gerçekleştirilen düzenlemelerle malzeme parametreleri ortaya konarak yazılım kütüphanesine eklenmiştir. Sıcak basma testlerinin gerçekleştirilmesine yönelik detaylar, sonraki bölümde paylaşılmıştır.



**Şekil 3.3.** HyperXtrude malzeme kütüphanesinde yer alan magnezyum alaşımlarına ilişkin yazılım ekran görüntüsü

### 3.2.3. Magnezyum Alaşımlarının Sıcak Basma Testleri

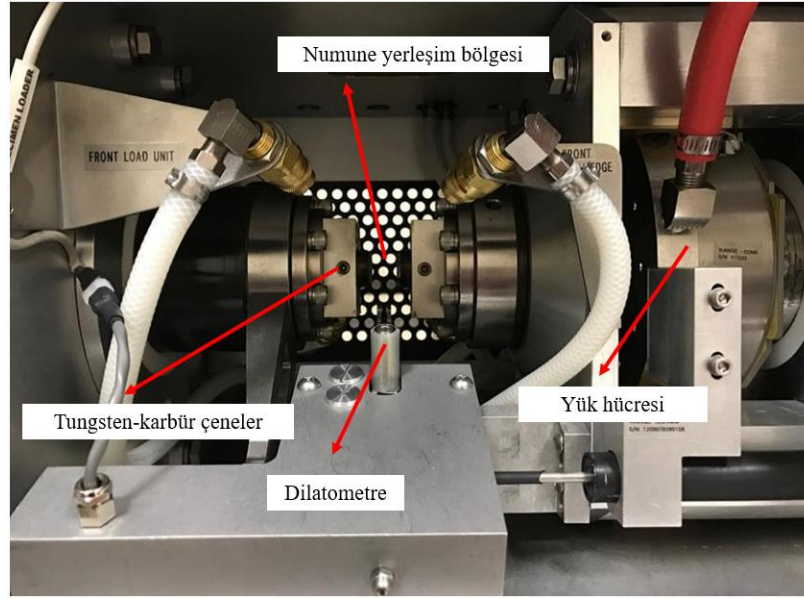
Sıcak basma testleri; Gleeble System 3800 model termal-mekanik fiziksel simülasyon sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Sistemin yetenekleri ve test odacığı görüntüsü sırası ile Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’te gösterilmiştir.

		Gleeble® 3800	Gleeble® 3500
Kuvvet	Maks. Basma Kuvveti	20 ton	10 ton
	Maks. Çekme Kuvveti	10 ton	10 ton
Hız	Maks. Koç Hızı	2000 mm/sn	1000 mm/sn
	Min. Koç Hızı	0.001 mm/sn	0.001 mm/sn
	Maks. Gerinim Hızı*	200 s <sup>-1</sup>	100 s <sup>-1</sup>
	Min. Gerinim Hızı*	0.0001 s <sup>-1</sup>	0.0001 s <sup>-1</sup>
Sıcaklık	Maks. Sıcaklık**	3000°C	3000°C
	Maks. Isıtma Hızı**	10,000°C/sn	10,000°C/sn
	Maks. Soğutma Hızı**	10,000°C/sn	10,000°C/sn
Sıcaklık Kontrolü		<ul style="list-style-type: none"> <li>Isıl Çift (K ve R tipi)</li> <li>Çift Renkli Piro metre (350°C – 1300°C)</li> <li>Çift Renkli Piro metre (1000°C – 3000°C)</li> </ul>	
Gerinim Kontrolü		<ul style="list-style-type: none"> <li>Stroke (Plastik)</li> <li>L-Gauge, JawtoJaw (Plastik)</li> <li>HZT060, HZT071, C-Gauge (Elastik, Plastik)</li> </ul>	
Test Ortamı		<ul style="list-style-type: none"> <li>Kaba vakum (10<sup>-2</sup> Torr)</li> <li>Yüksek vakum (10<sup>-5</sup> Torr)</li> <li>İnert gaz (Ar, He, N)</li> </ul>	

\*Servo valf ayarı, PID, gerinim miktarı, numune geometrisi vb. etkenlere göre bu değerler değişebilir.

\*\*Numune geometrisi, PID, soğutma ekipmanı vb. etkenlere göre bu değerler değişebilir.

**Şekil 3.4.** Gleeble 3800-3500 termal-mekanik fiziksel simülasyon sistemlerinin kapasite ve yetenekleri



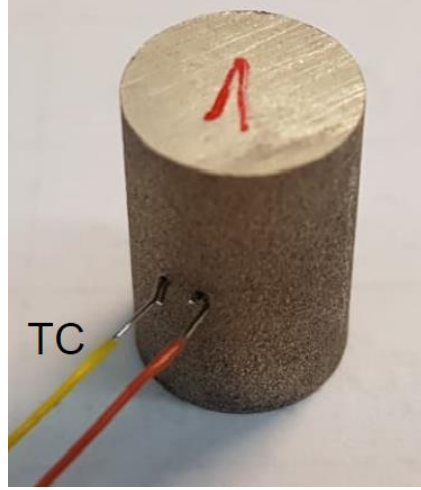
**Şekil 3.5.** Gleeble Hydrawedge-II test odacığının görüntüsü

Her iki alaşım için biyet hammaddesinden 10 mm çapında ve 15 mm uzunluğunda silindirik test numuneleri alınmış, testler beş farklı sıcaklık ve dört farklı gerinme oranı ile, üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Test sıcaklıkları sırasıyla 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C ve 500 °C iken, gerinme oranları  $0.01 s^{-1}$ ,  $0.1 s^{-1}$ ,  $1 s^{-1}$ ,  $10 s^{-1}$  olarak belirlenmiştir. Sıcaklık ve gerinme değerlerinin yer aldığı deney matrisi Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Magnezyum alaşımlarının sıcak basma testi matrisi

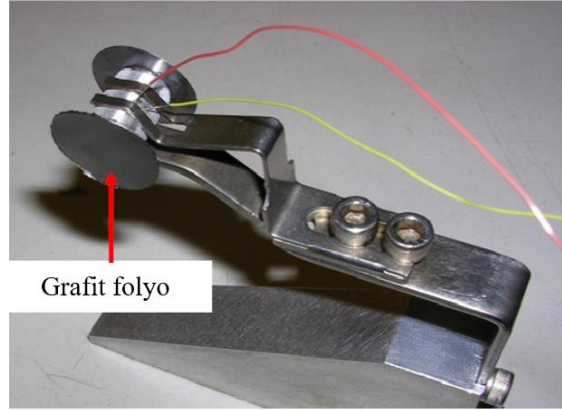
Sıcaklık/Gerinim Hızı	$0.01 s^{-1}$	$0.1 s^{-1}$	$1 s^{-1}$	$10 s^{-1}$
300 °C	•	•	•	•
350 °C	•	•	•	•
400 °C	•	•	•	•
450 °C	•	•	•	•
500 °C	•	•	•	•

Test esnasında sıcaklık kontrolü; öncesinde kalibrasyonu gerçekleştirilmiş ve numuneler üzerinde açılmış deliklere monte edilmiş K tipi ısı çiftler (thermocouple) yardımıyla sağlanmıştır (Şekil 3.6). Dirençli ısıtma ile ısıtılan test numuneleri, istenen sıcaklığa ulaşıldıktan sonra test sıcaklığında 60 saniye bekletilmiştir.



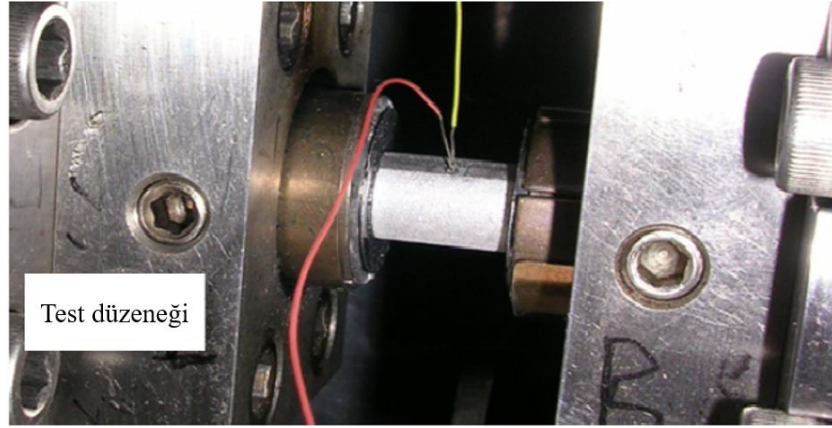
**Şekil 3.6.** Isıl çift monte edilmiş test numunesi

Test esnasında sürtünmenin azaltılması için grafit folyo ve nikel-grafit macunu kullanılmıştır (Şekil 3.7). Gerçek gerilim-gerinim eğrilerinin elde edilmesi için numuneler  $\epsilon=1$  gerçek gerinim değerine kadar basma testine tabi tutulmuştur.



**Şekil 3.7.** Sürtünmenin azaltılması için grafit folyo uygulaması

Deneyler sırasında her 0.001'lik gerinim adımlarında veri toplanarak malzeme davranışının her ayrıntısını analiz edebilecek şekilde veri toplama hızı belirlenmiştir. Sıcak basma test uygulaması ve test sonucu deforme olmuş test numunesi örneği sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.



**Şekil 3.8.** Sıcak basma test uygulaması



**Şekil 3.9.** Test sonucu deforme olmuş numune örneği

#### **3.2.4. Ekstrüzyon Kalıbı Tasarımı**

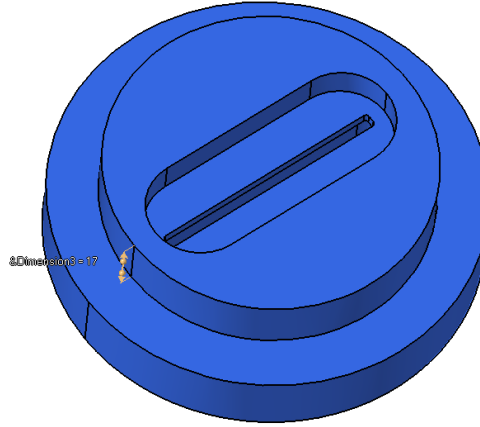
Magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için deneme profillerinin ekstrüzyonla üretilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda; kalıp geometrisini belirleyen parametreler doğrultusunda, Catia yazılımı kullanılarak 3 boyutlu olarak magnezyum alaşımlı ekstrüzyon kalıp tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Deneme profilleri için; yapılacak mekanik testler için boyutları karşılayabilecek ölçüler içerisinde ve ekstrüzyon oranı yaklaşık 25 olan 70x4 mm'lik profil seçilmiştir. Ekstrüzyondaki boyuna kaynama etkilerinden kaçınmak için solid profil tercih edilmiş ve kalıp tasarımları bu profil baz alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10).



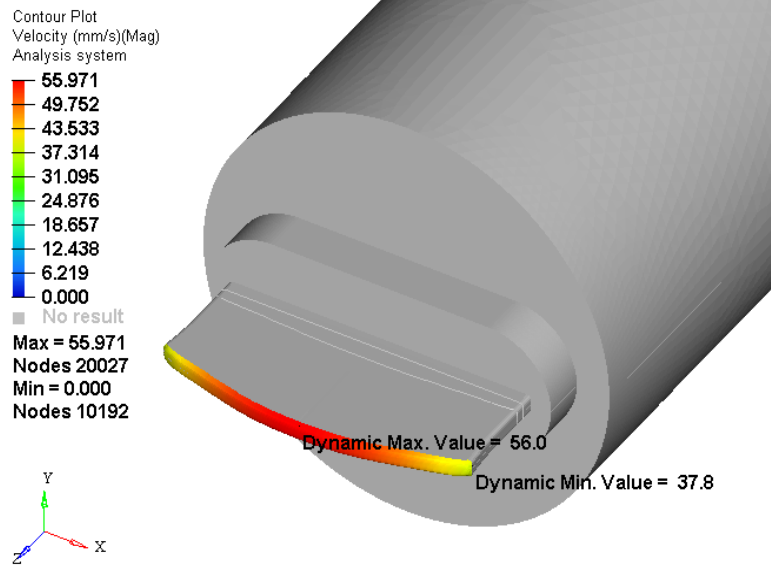
**Şekil 3.10.** Ekstrüzyon üretimi gerçekleştirilecek magnezyum profil kesidi

Ekstrüzyon işleminde kalıp tasarımı ile homojen şekilde akış sağlanarak kalıp çıkışındaki profil kesitinde hız farklılığının az olması idealdir. Artan kalıp temas yüzeyi profil çıkış sıcaklığını arttırmaktadır. Bu bağlamda hız profili ve sıcaklık parametreleri incelenerek kalıp tasarımına yön verilmiştir.



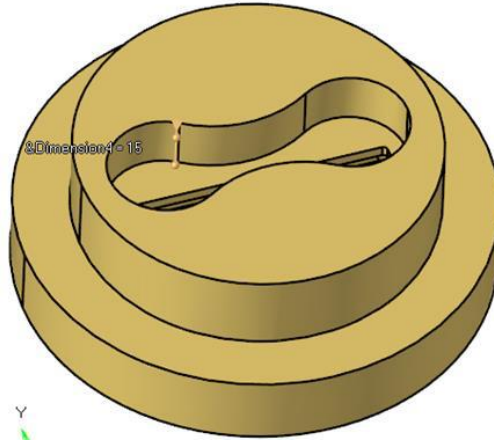
**Şekil 3.11.** Magnezyum ekstrüzyonu için konsept kalıp tasarımı

Konsept kalıp tasarım çalışmasında; magnezyum ekstrüzyon kalıbı, yüksekliği 10 mm olan sabit bir akış havuzu referans alınarak tasarlanmıştır. Bu tasarım ile gerçekleştirilen ekstrüzyon proses ön değerlendirmesi sonucunda Şekil 3.12’de gösterildiği üzere profilin orta kısmında hız farkı meydana çıktığı görülmüş; bu yüzden sonraki kalıp tasarımlarında akış havuzu formunda revizyona gidilmiştir. Çıkış kesitindeki hız profilinin dengeli olması ile uygun yüzey kalitesi ve tanecik yapısının daha homojen olması hedeflenmektedir.



**Şekil 3.12.** Konsept kalıp tasarımı ile gerçekleştirilen ön değerlendirme sonucunda profil orta kesidinde ortaya çıkan hız farkı

İkinci kalıp tasarımında, orta kısımdaki akışı yavaşlatmak için havuz formu bu etkiyi sağlayacak şekilde tasarlanmış ve Şekil 3.13'te görülen kalıp tasarımı geliştirilmiştir.

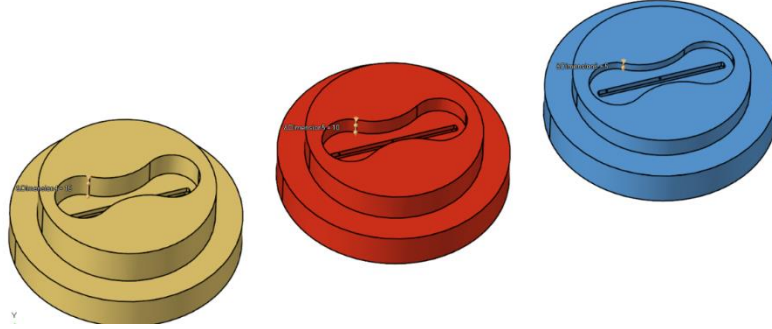


**Şekil 3.13.** Değişken havuz formu kalıp tasarımı

Güncellenen kalıp tasarımı ile gerçekleştirilen proses ön analizi sonucuna göre; kalıp havuz bölgesindeki geometrik revizyon ile akış yönlendirilmiş ve kesit üzerindeki izafi hız farkı azaltılmıştır. Bununla birlikte; uzunluğu artan kaynama havuzu ile izafi hız farkının iyileştiği ancak gerekli ekstrüzyon kuvvetinin arttığı ve profil çıkış sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda artan havuz uzunluğu ile profil enine kaynama



uzunluğunun da artacağı bilinmektedir. Bu yüzden optimizasyon çalışmasında havuz yüksekliğinin de optimizasyona dahil edilmesine karar verilmiştir. Optimizasyon çalışmasına dâhil edilmek üzere; havuz yüksekliği 5 mm, 10 mm ve 15 mm olan üç farklı kalıp tasarımı gerçekleştirilmiş ve ayrı ayrı ekstrüzyon simülasyonları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14).



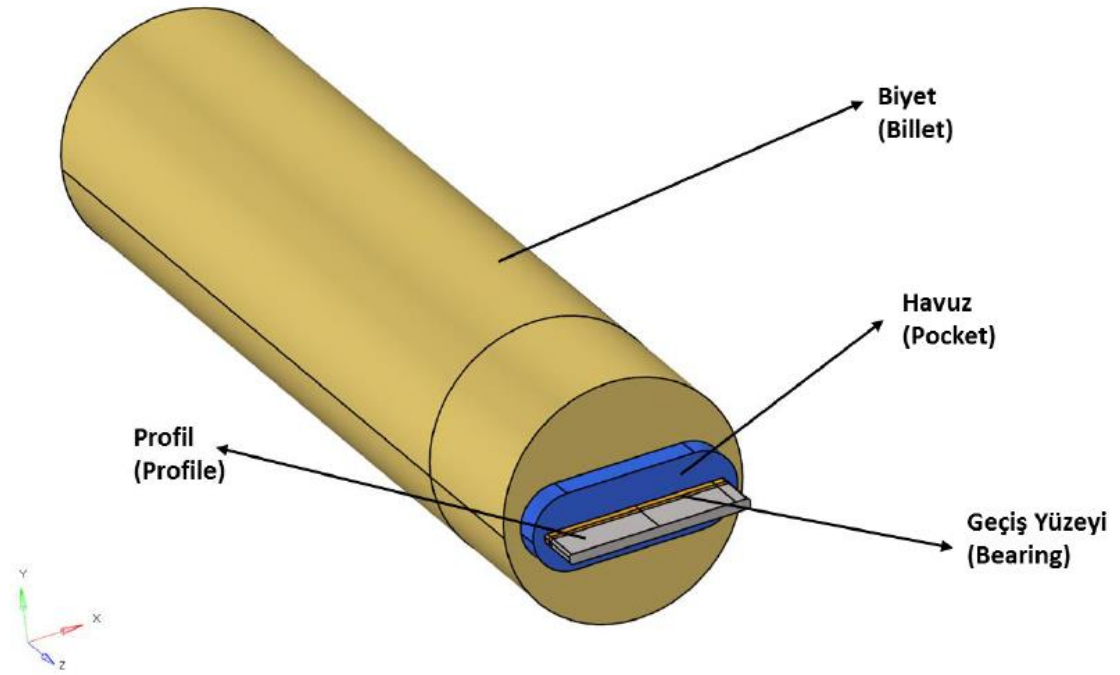
**Şekil 3.14.** 5 mm, 10 mm ve 15 mm yüksekliğe sahip değişken havuz formu kalıp tasarımları

### **3.2.5. Ekstrüzyon Kalıbı ve Profilin Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması**

Tasarımları CATIA yazılımı ile tamamlanan kalıplar üzerinden ekstrüzyon akış analizleri gerçekleştirilerek; sıcaklık, basınç ve çıkış kesitinde hız profili incelenmiş ve üretimi gerçekleştirilecek kalıba karar verilmiştir. CAE analizleri HyperWorks programında yer alan HyperXtrude modülünde, AM50 ve AZ31 magnezyum malzeme parametreleri kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

70×4 dikdörtgen kesitli lama profil kesitine göre tasarımı gerçekleştirilmiş olan kalıplar için akış dengesizliklerini, sıcaklık ve gerekli baskı kuvvetini incelemek adına HyperXtrude programı ile belirlenen proses parametreleri ile zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilen sürekli rejim analizleri farklı kalıp tasarımları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.






Sonlu elemanlar analizi için kalıp negatifi alınarak akış hacmi çıkarılmış ve akış hacmi üzerinden matematiksel model oluşturulmuştur.

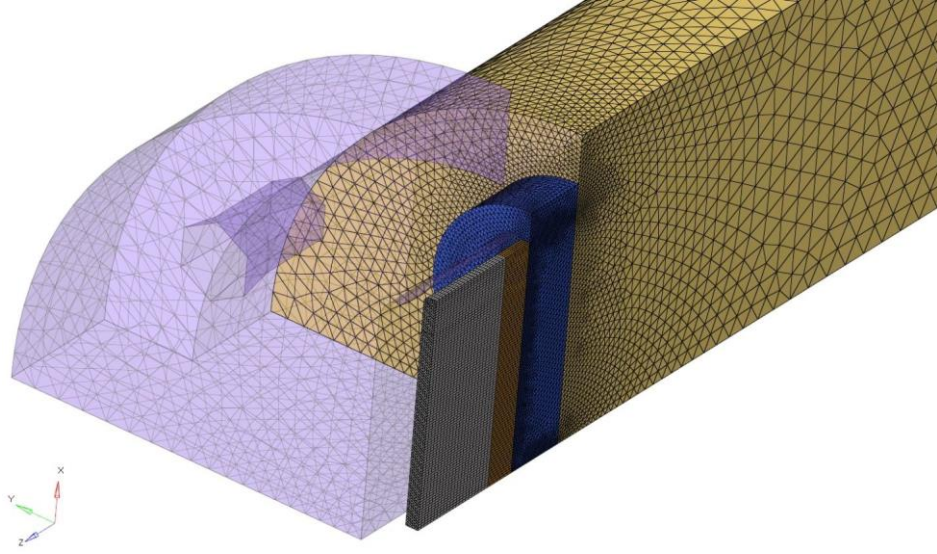


**Şekil 3.15.** Ekstrüzyon prosesinin simülasyon ortamına aktarılması

Akış üzerinde etkisi fazla olan sürtünme yüzeyi bölümünde sonlu eleman ağ yapısı daha küçük boyutlu (ince); etkisi daha az biyet bölümünde ise eleman sayısını daha az tutmak için daha büyük boyutlu (kaba) elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Algoritmanın da izin verdiği eleman tipleri ile sonlu elemanlar modeli sürtünme yüzeyi ve profil bölümünde penta, havuz ve biyet bölümleri için tetra yapıdaki elemanlar ile oluşturulmuştur. Kullanılan eleman ve düğüm nokta sayısı Çizelge 3.3'te yer almaktadır. Modelin X ve Y eksenlerinde simetrik olması sebebiyle çeyrek model üzerinden sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve gerekli simetri tanımlamaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.16).

**Çizelge 3.3.** Analizlerde kullanılan eleman tipleri ve ortalama eleman sayıları

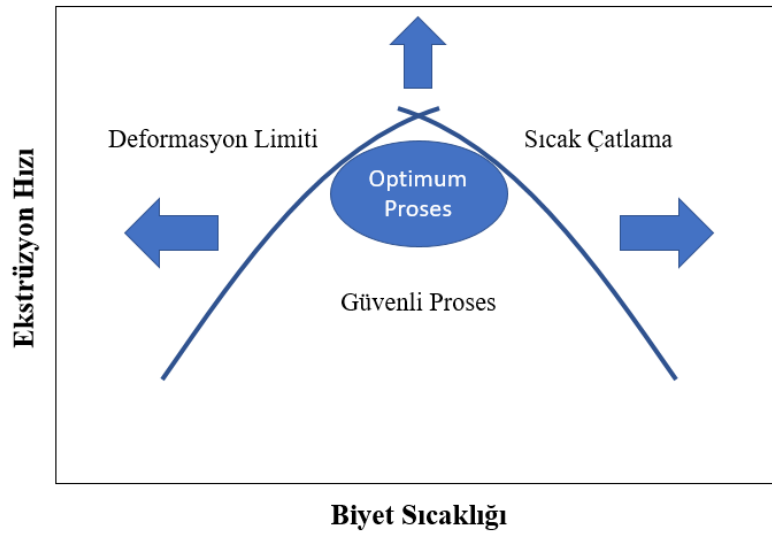
Eleman Tipi	Komponent Adı	Eleman Sayısı	Düğüm Nokta Sayısı
 Linear Tetra4	Die	108485	21758
 Linear Tetra4	Pocket	86592	17511
 Linear Tetra4	Billet	101593	20415
 Linear Penta 6	Bearing	16140	10128
 Linear Penta 6	Profile	23672	14559



**Şekil 3.16.** Ekstrüzyon analizine hazır datanın sonlu eleman modeli

### 3.2.6. Sınır Şartlarının Tanımlanması

Çalışmada hedef; magnezyum alaşımlı profilin ekstrüzyonu için optimum proses koşullarını belirlemektir. Bu kapsamda proses parametreleri aralıkları ekstrüzyon limit diyagramı (Şekil 3.17) kısıtları dikkate alınarak ve literatürdeki çalışmalar incelenerek belirlenmiştir. Ekstrüzyon analizleri Çizelge 3.4’te aralıkları verilen proses parametreleri dahilinde gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.17.** Magnezyum alaşımlarının güvenli ekstrüzyon prosesi için optimum koşullar

**Çizelge 3.4.** Magnezyum ekstrüzyon proses parametre aralığı

<b>Malzeme</b>	AZ31-AM50
<b>Biyet Sıcaklığı</b>	400-450 °C
<b>Kalıp Sıcaklığı</b>	380-430 °C
<b>Konteyner Sıcaklığı</b>	370-420 °C
<b>Baskı Hızı</b>	1.0-4.0 mm/s

Biyet, kalıp ve konteyner sıcaklıkları, baskı hızı, sürtünme katsayısı, kalıp malzemesine göre ısı iletim katsayısı, ekstrüzyon yönü gibi analiz proses parametrelerinin HyperXtrude ara yüzünde tanımlanmasına ilişkin detaylar sırasıyla Şekil 3.18-Şekil 3.21’de verilmiştir.

Define Altair HyperXtrude Analysis Parameters

Session | **Metal Extrusion** | Advanced | User Commands | Transient Data

Analysis Type:  Extrusion Direction:

Extrusion Type:  Number of Cycles:

Container Diameter:  mm Container Initial Temperature:  deg C

Die Initial Temperature:  deg C Billet Length:  mm

Billet Axial Taper:  deg C Billet Preheat:  deg C

Billet Radial Taper:  deg C Butt Length:  mm

Billet Interface Tracking:

Ram Acceleration Time:  s

Skin Interface Tracking:

Skin Component:

Ram Speed:  mm/s Viscous Dissipation On/Off:

Work Converted To Heat (%):  Calculate Tool Deflection:

Calculate Free Surface:

Mesh Update Flag:

Max Number of Mesh Updates:  Mesh Update Frequency:

Mesh Update Tolerance:  Free Surface Relaxation Factor:

Free Surface Start Location:  mm Bearing Optimization Flag:

GlassPad Thickness:  mm GlassPad Initial Temp:  deg C

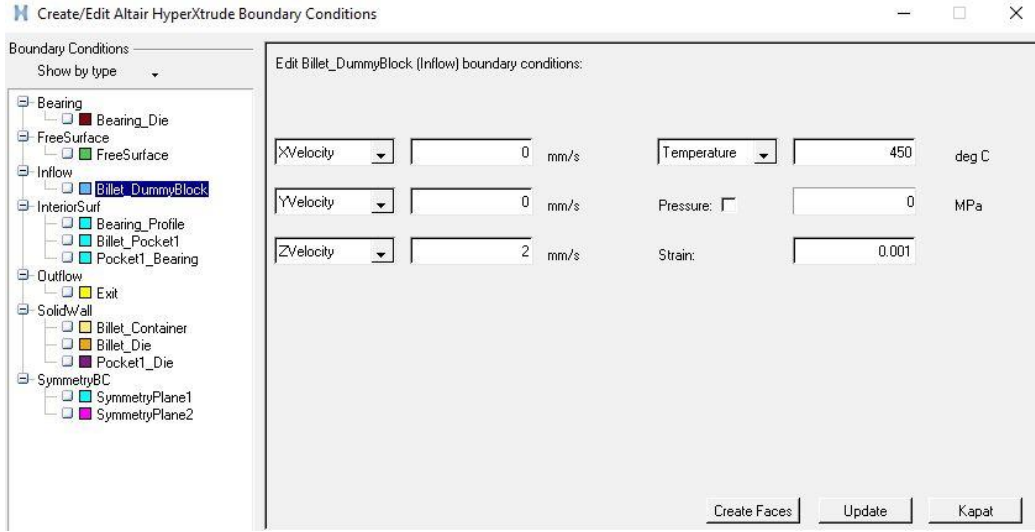
Enforce Press Limit:

Max Optimization Tot:

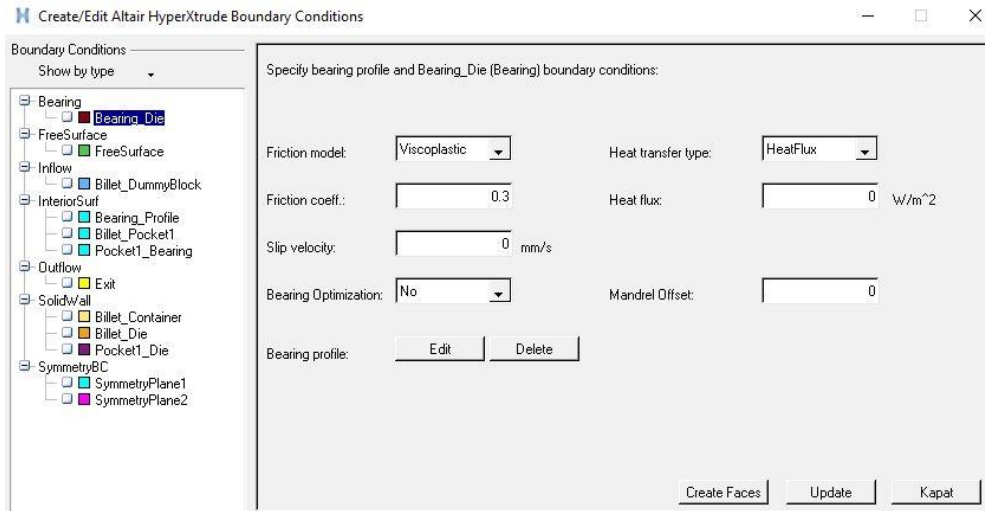
Optimization Tolerance:  Num Dead Cycle Time Steps:

Write Choke Data:

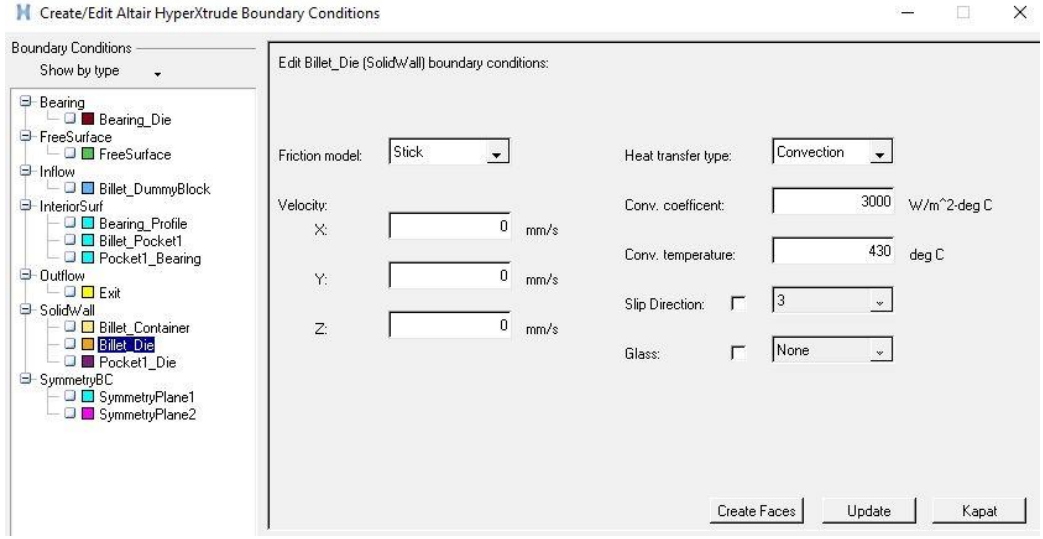
**Şekil 3.18.** HyperXtrude arayüzünde biyet, kalıp ve konteyner sıcaklıklarının tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü



**Şekil 3.19.** HyperXtrude arayüzünde baskı hızının tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü



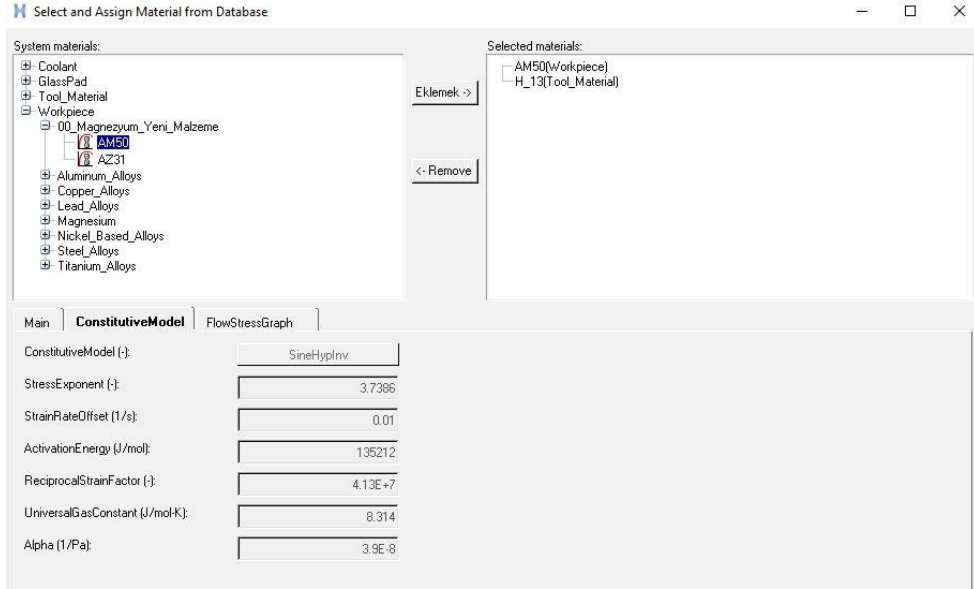
**Şekil 3.20.** HyperXtrude arayüzünde sürtünme katsayısının tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü



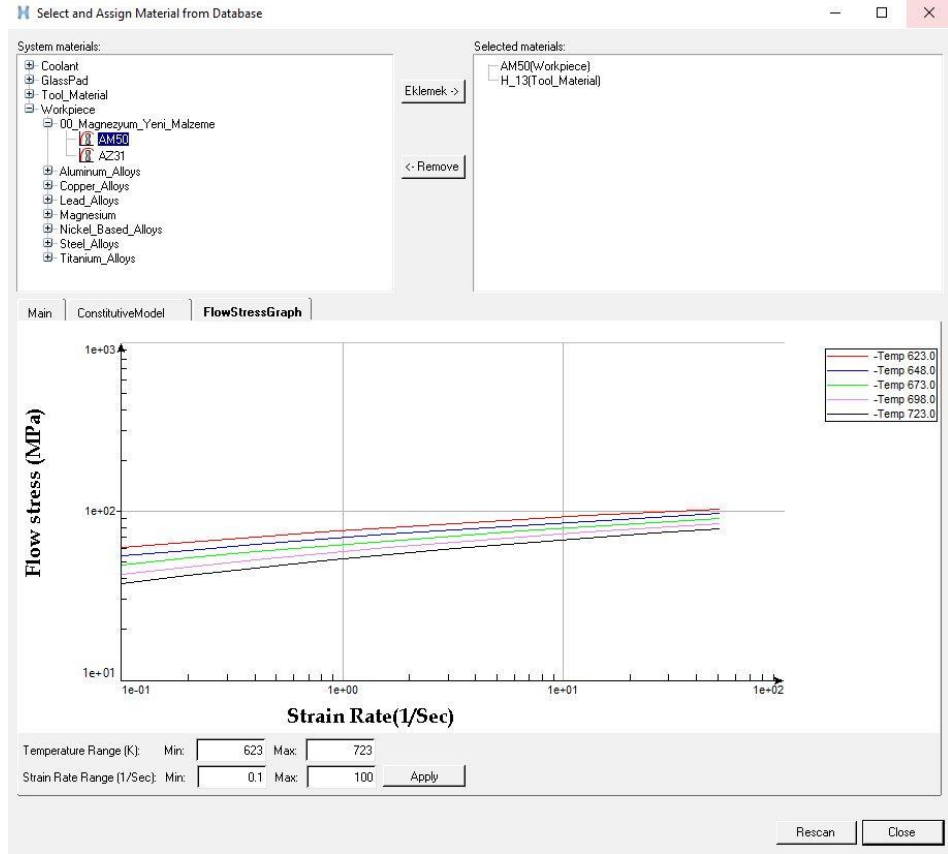
**Şekil 3.21.** HyperXtrude arayüzünde ısı iletim katsayısının tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü

### 3.2.7. Malzeme Parametrelerinin Tanımlanması

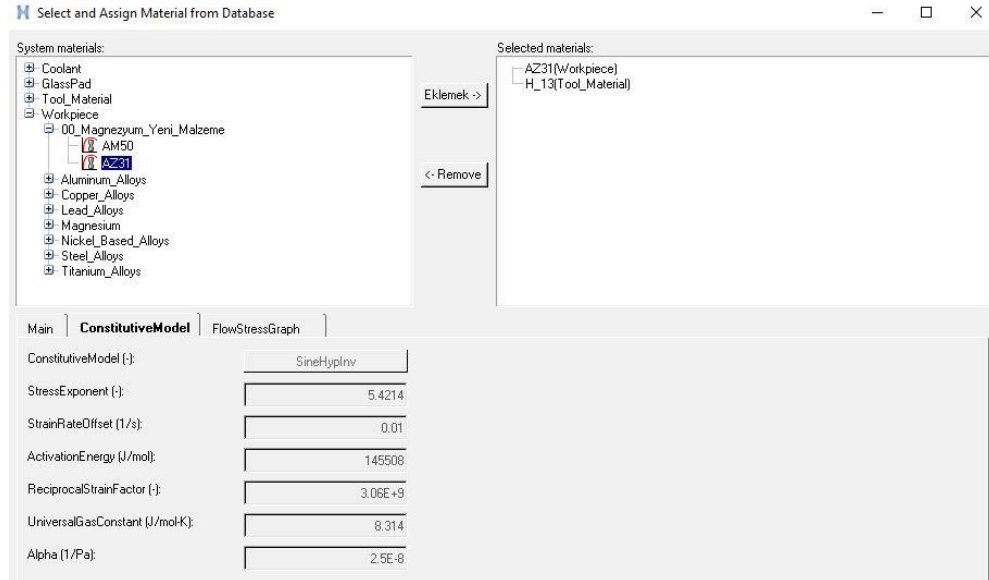
Ekstrüzyon analizleri için, malzeme parametrelerinin HyperXtrude arayüzünde tanımlanması gerekmektedir. Bu tanımlamaya ilişkin detaylar her iki aşım için sırasıyla Şekil 3.22-Şekil 3.25'te verilmiştir.



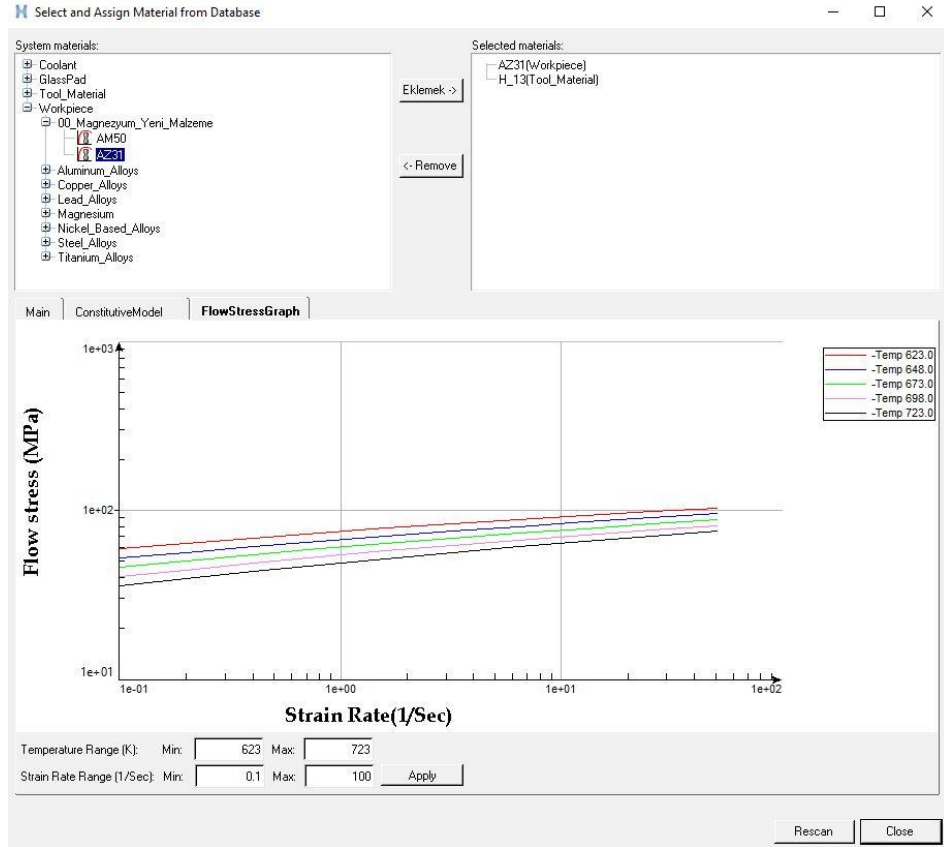
**Şekil 3.22.** HyperXtrude arayüzünde AM50 aşım için malzeme parametrelerinin tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü



**Şekil 3.23.** AM50 alaşım için tanımlanan parametreler ile oluşturulan malzeme akış eğrilerine ilişkin yazılım ekran görüntüsü



**Şekil 3.24.** HyperXtrude arayüzünde AM50 alaşım için malzeme parametrelerinin tanımlanmasına ilişkin yazılım ekran görüntüsü



**Şekil 3.25.** AZ31 alaşım için tanımlanan parametreler ile oluşturulan malzeme akış eğrilerine ilişkin yazılım ekran görüntüsü

### 3.2.8. HyperXtrude Yazılımı İle Analiz Modelinin Çözdürülmesi

Ekstrüzyon analizleri için gerekli ön işleme adımlarının tamamlanmasından sonra HyperXtrude yazılımının çözücüsü yardımıyla sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyonun başlangıcında ve tamamlanmasının ardından alınan çözücü arayüzü görselleri sırasıyla Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de verilmiştir.



```

*
*
*           Altair HyperXtrude(TM) 2018
*
*   Finite Element Analysis Software for the Simulation
*   of Material Flow and Heat Transfer During Extrusion
*   from Altair Engineering, Inc.
*
*   Windows Server 2008 SP1 (Build 760 YSLSRV25
*   32 CPU: AMD Opteron(tm) Processor 6282
*   CPU speed 2600 MHz
*   70393 MB RAM, 163737 MB swap
*
*   Build Tag: 0926482_88BA200_Ce64BW42R18B11:62809
*****
*   COPYRIGHT (C) 1996-2018           Altair Engineering, Inc. *
*   All Rights Reserved. Copyright notice does not imply publication. *
*   Contains trade secrets of Altair Engineering, Inc.
*   Decompilation or disassembly of this software strictly prohibited. *
*****

load Mg_AM50_PS_Transient_A10_190319.grf phlex {Metal Extrusion}
Non-hex elements present : 39812 prisms 296670 tets, total of 336482 elements

Mesh Jacobians tested at element center/midedges/corners(exactly):

Total number of elements= 336482, (linear geometry)

Calculating Extrusion Ratio
  ... Extrusion Ratio = 24.8695
Recomputing profile opening thickness ...

Mapping element faces at Workpiece and Tool interface
This will take few minutes. Please Wait ...

Total Number of Contact Surface Conditions      = 13479
Number of Contact Surface Conditions on Tool    = 6844
Number of Contact Surface Conditions on Workpiece = 6635

```

**Şekil 3.26.** Ekstrüzyon simülasyonu başlangıcında çözücü arayüzüne ilişkin yazılım ekran görüntüsü

```

***** SOLUTION CONVERGED *****

BILLET INTERFACE/SKIN CALCULATION STEP
-----

CONVERGENCE BEHAVIOR AT TIME STEP : 30 OF 30

NONLINEAR ITERATION : 8 OF 25
Mass Balance errors are within acceptable limits
Ram Force = 400.430 (Tons) = 3.562 (MN)

Flow Imbalance in the Extrusion Direction (%) = +10.86 to -24.79
Velocity in X-Direction is large - Will cause the profile to deflect
Velocity in Y-Direction is small/within acceptable limits

Profile Surface Boundary Name : FreeSurface

% Temperature Difference on Profile Surface = 5.66
May Produce a Wavy Surface

Max Temp in component Pocket is above solidus
Max Temp = 558.763 C Solidus = 550.850 C

Max Temp in component Bearing_s is above solidus
Max Temp = 558.763 C Solidus = 550.850 C

Max Temp in component Profile is above solidus
Max Temp = 558.487 C Solidus = 550.850 C

***** END OF TIME INTEGRATION *****

Autosaving Results - end of the solver
Saved to file: Mg_AM50_PS_Transient_A10_190319.save.phx (fileFormat: BINARY, filesize 170032 KB, step 30)

THIS JOB WAS RUN ON : Thu Mar 20 00:35:54 2021
CPU time current cycle : 11.69 hrs.
CPU time cumulative : 11.70 hrs.
Wall time current cycle : 6.52 hrs.
Wall time cumulative : 6.53 hrs.

```

**Şekil 3.27.** Ekstrüzyon simülasyonu sonucunda çözücü arayüzüne ilişkin yazılım ekran görüntüsü

### 3.3. Optimizasyon Çalışmaları

Tez çalışmasının bu kısmında; magnezyum alaşımlarında ekstrüzyon proses parametrelerinin optimizasyonu için uygulanan yöntemler ve gerçekleştirilen çalışmalar, alt detaylarıyla birlikte verilmiştir.

#### 3.3.1. Deney Tasarımı

Deney tasarımı, birden fazla değişkenin, bir süreç üzerindeki etkilerini aynı anda incelemek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir. İlk olarak 1920'lerin başında İngiltere'de ortaya çıkmıştır (Fisher, 1922). Deney tasarımının amacı, genel olarak bir sürecin gösterdiği davranışlar hakkında bilgi toplayarak, bu sürecin kalite karakteristiklerini etkileyen faktörleri belirlemek ve sürecin kalitesinin iyileştirilebilmesi için, hangi faktörlerin hangi seviyede olması gerektiğini tespit etmektir. Bu şekilde süreçten beklenen performans özelliklerinin en iyi durumu için, en uygun faktör seviyeleri belirlenmiş ve ilgili sürecin kalitesi iyileştirilmiş olmaktadır (Biçer, 2020).

Deney tasarımı, üretim süreçlerinin iyileştirilmesi, süreç geliştirme, yeni ürün geliştirme ve mevcut ürünlerin iyileştirilmesi gibi birçok mühendislik alanında kullanılan ve kritik öneme sahip araçlardan biridir. Deney tasarımı tekniklerinin kullanılmasıyla, mevcut süreçlerdeki değişkenlik miktarı azaltılmakta ve süreçten veya üründen beklenen performans özellikleri iyileştirilmektedir (Roy, 2001).

Deney tasarımında amaç, herhangi bir konu üzerinde düşünülen problemle alakalı olan en fazla bilgiyi mümkün olduğunca zaman, para ve deney malzemelerini en ekonomik şekilde kullanarak sağlamak ve kalite karakteristiğini etkileyen en önemli değişkenleri bulmaktır. Belirlenen hedeften olabilecek sapma, kalite kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle ürün; ürün ve süreç tasarımı sırasında en uygun şekilde tasarlanmalıdır. Bu iki aşamanın en önemli adımı parametre tasarımıdır. Parametre tasarımı aşamasında, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörlerin ürünün performansına olan etkilerini belirlemek için kullanılan en etkin yöntem istatistiksel deney tasarımı yöntemidir. Burada amaç, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerini, kontrol edilemeyen faktörlerin ürün üzerine olan etkilerini en aza indirecek şekilde süreci ayarlamaktır. Bu çeşit ürün ya da süreç tasarımı ile tutarlı bir çıktı elde edilir. Deney tasarımı, çevrim dışı kalite kontrolün en etkin aracıdır (İncel, 2016).

### **3.3.2. Taguchi Metodu**

Deney tasarımı tekniklerinin endüstrisinde son yıllarda çok yaygın olarak kullanılmasının en önemli sebeplerinden biri; Dr. Genichi Taguchi'nin geliştirmiş olduğu Taguchi yöntemi olmuştur. Taguchi deney tasarımı 5 ana aşamadan oluşmaktadır, bunlar; problemin belirlenmesi, faktör ve seviyelerin belirlenmesi, uygun ortogonal dizinin seçimi, deneyin uygulanması-verilerin analizi ve doğrulama deneyi olarak sayılabilir.

Belirlenen problem için tanımlanan kalite değişkenlerinin deney sırasında çıktı olarak ölçülecek ve ürünün kalite özelliklerini temsil eden değişkenler olmasına dikkat edilir. Kalite değişkenlerinin ölçülebilir (nicel) olması gereklidir. Ancak nitel olan ve deneye dâhil edilmesi gereken değişkenler varsa bu değişkenler için de nitel özellikleri temsil eden nicel puanlama yapılır. Böylece ölçülemeyen değişkenler de ölçülebilir hale getirilir. Ölçüm metotları ve deney aletleri bu aşamada belirlenir.

Ürün performansına etki eden faktörler belirlenirken, deney tasarımcısı daha önceden konu ile ilgili yapılan çalışmalara ve kendi bilgi birikimine dayanarak hedef değerden sapmalara

neden olabileceğini düşündüğü belirli faktörleri seçer. Bu faktörleri belirlerken beyin fırtınası, sebep-sonuç diyagramı gibi araçlar kullanılabilir. Faktörler belirlendikten sonra bu faktörlerin seviye sayıları da belirlenmelidir. Taguchi seviye sayılarının mümkün olduğunca az seçilmesi gerektiğini belirtmektedir. Çünkü seviye sayısı yapılacak deney sayısını doğrudan etkilemektedir (İncel, 2016).

Birden fazla faktör ve faktör seviyesinden oluşan sistemler için optimum faktör kombinasyonunu veren Taguchi metodu, yararlandığı ortogonal diziler sayesinde yapılması gereken deney sayısını minimum seviyede tutabilmektedir (Mercan, 2019). Maliyet ve zaman açısından sağladığı bu avantaj sayesinde sıklıkla tercih edilen yöntem, bu tez çalışmasında da kullanılmıştır.

Birçok faktör incelenmesine olanak sağlayan Taguchi ortogonal diziler, faktör seviyelerinin tek tek değiştirilmesi yerine eş zamanlı değiştirilerek minimum sayıda deneme ile hedefe ulaşılmasını sağlamaktadır. Örneğin; 2 seviyeli 7 faktör için tam faktöriyel tasarım gereği 128 deney yapılması gerekirken, Taguchi metodunda bu deney sayısı 8'e düşmektedir. Bu da kullanıcıya önemli derecede zaman ve maliyet kazancı sağlamaktadır. Her faktör için eşit miktarda farklı seviye bulunduran ortogonal dizilerde 2 seviyeliler için en çok kullanılan diziler L4, L8, L16 ve L32 iken; 3 seviyeliler için L9, L18, L27 dizilerdir. Parametre sayısı ve seviye sayısına göre kullanılan ortogonal dizi tablosu Çizelge 3.5'te verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu (Gökçe & Taşgetiren, 2009)

		SEVİYE SAYISI										
		2		3		4		5				
PARAMETRE SAYISI	P=2	S=2	L4	P=2	S=3	L9	P=2	S=4	L' 16	P=2	S=5	L25
	P=3	S=2		P=3	S=3		P=3	S=4		P=3	S=5	
	P=4	S=2		P=4	S=3		P=4	S=4		P=4	S=5	
	P=5	S=2		P=5	S=3		P=5	S=4		P=5	S=5	
	P=6	S=2	L8	P=6	S=3	L18	P=6	S=4	L' 32	P=6	S=5	L50
	P=7	S=2		P=7	S=3		P=7	S=4		P=7	S=5	
	P=8	S=2		P=8	S=3		P=8	S=4		P=8	S=5	
	P=9	S=2	L11	P=9	S=3	L27	P=9	S=4	L' 32	P=9	S=5	L50
	P=10	S=2		P=10	S=3		P=10	S=4		P=10	S=5	
	P=11	S=2		P=11	S=3		P=11	S=4		P=11	S=5	
	P=12	S=2	L16	P=12	S=3	L36	P=12	S=3	L' 32	P=12	S=5	L50
	P=13	S=2		P=13	S=3		P=13	S=3		P=13	S=5	
	P=14	S=2		P=14	S=3		P=14	S=3		P=14	S=5	
	P=15	S=2	L16	P=15	S=3	L36	P=15	S=3	L' 32	P=15	S=5	L50
	P=16	S=2		P=16	S=3		P=16	S=3		P=16	S=5	
	P=17	S=2		P=17	S=3		P=17	S=3		P=17	S=5	
	P=18	S=2	L16	P=18	S=3	L36	P=18	S=3	L' 32	P=18	S=5	L50
	P=19	S=2		P=19	S=3		P=19	S=3		P=19	S=5	
	P=20	S=2		P=20	S=3		P=20	S=3		P=20	S=5	
	P=21	S=2	L16	P=21	S=3	L36	P=21	S=3	L' 32	P=21	S=5	L50
	P=22	S=2		P=22	S=3		P=22	S=3		P=22	S=5	
	P=23	S=2		P=23	S=3		P=23	S=3		P=23	S=5	
	P=24	S=2	L16	P=24	S=3	L36	P=24	S=3	L' 32	P=24	S=5	L50
	P=25	S=2		P=25	S=3		P=25	S=3		P=25	S=5	
	P=26	S=2		P=26	S=3		P=26	S=3		P=26	S=5	
	P=27	S=2	L16	P=27	S=3	L36	P=27	S=3	L' 32	P=27	S=5	L50
	P=28	S=2		P=28	S=3		P=28	S=3		P=28	S=5	
	P=29	S=2		P=29	S=3		P=29	S=3		P=29	S=5	
	P=30	S=2	L16	P=30	S=3	L36	P=30	S=3	L' 32	P=30	S=5	L50
	P=31	S=2		P=31	S=3		P=31	S=3		P=31	S=5	

Bu tez çalışmasında da; 3 seviyeli 5 farklı tasarım faktörü yer aldığı için L18 ortogonal dizisi kullanılmış ve deney tasarım çalışmaları bu kapsamda gerçekleştirilmiştir.

### 3.3.3. Ekstrüzyon Prosesi İçin Deney Tasarımı Tablosunun Oluşturulması

Ekstrüzyon prosesi için 5 farklı proses parametresi ve bunların 3 farklı seviyesi belirlenmiştir. Kalıp sıcaklığı, konteyner sıcaklığı, biyet sıcaklığı, zımba hızı ve kalıp cep yüksekliği için parametre tanımları ve farklı seviye değerlerine ilişkin bilgiler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

**Çizelge 3.6.** Ekstrüzyon parametreleri

<b>Parametre Tanımı</b>	<b>Parametreler</b>	<b>Seviye 1</b>	<b>Seviye 2</b>	<b>Seviye 3</b>
A	Kalıp Sıcaklığı (°C)	380	405	430
B	Konteyner Sıcaklığı (°C)	370	395	420
C	Biyet Sıcaklığı (°C)	400	425	450
D	Zımba Hızı (mm/s)	1	2	4
E	Kalıp Cep Yüksekliği (mm)	5	10	15

Seviyelere göre oluşturulmuş Taguchi L18 ortogonal dizi seçimi tablosu Çizelge 3.7’de verilmiştir.

**Çizelge 3.7.** Taguchi L18 tasarımı

	<b>Faktör Seviyeleri</b>				
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>Analiz No.</b>	<b>Kalıp Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Konteyner Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Biyet Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Zımba Hızı (mm/s)</b>	<b>Kalıp Cep Yüksekliği (mm)</b>
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	2	1	1	2	2
5	2	2	2	3	3
6	2	3	3	1	1
7	3	1	2	1	3
8	3	2	3	2	1
9	3	3	1	3	2
10	1	1	3	3	2
11	1	2	1	1	3
12	1	3	2	2	1
13	2	1	2	3	1
14	2	2	3	1	2
15	2	3	1	2	3
16	3	1	3	2	3
17	3	2	1	3	1
18	3	3	2	1	2

Taguchi L18 ortogonal dizi tasarımında; seviye değerlerinin sayısal karşılıklarının gösterildiği tablo, Çizelge 3.8’de verilmiştir.

**Çizelge 3.8.** Taguchi L18 tasarımında faktör numaralarının sayısal karşılığı

	<b>Faktör Seviyeleri</b>				
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>Analiz No.</b>	<b>Kalıp Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Konteyner Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Biyet Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Zımba Hızı (mm/s)</b>	<b>Kalıp Cep Yüksekliği (mm)</b>
<b>1</b>	380	370	400	1	5
<b>2</b>	380	395	425	2	10
<b>3</b>	380	420	450	4	15
<b>4</b>	405	370	400	2	10
<b>5</b>	405	395	425	4	15
<b>6</b>	405	420	450	1	5
<b>7</b>	430	370	425	1	15
<b>8</b>	430	395	450	2	5
<b>9</b>	430	420	400	4	10
<b>10</b>	380	370	450	4	10
<b>11</b>	380	395	400	1	15
<b>12</b>	380	420	425	2	5
<b>13</b>	405	370	425	4	5
<b>14</b>	405	395	450	1	10
<b>15</b>	405	420	400	2	15
<b>16</b>	430	370	450	2	15
<b>17</b>	430	395	400	4	5
<b>18</b>	430	420	425	1	10

Tablodan görüleceği üzere; tam faktöriyelli bir deney tasarım tablosuna göre toplamda 243 ( $3^5$ ) farklı deneme gerçekleştirilmesi gerekirken, Taguchi metodu ile bu sayı 18’e indirilmiştir. Bu da görece uzun süren ekstrüzyon analizlerinin, tüm varyasyonları içerecek şekilde daha kısa sürede tamamlanmasına imkân sağlamıştır.

### 3.3.4. Optimum Proses Parametrelerinin Belirlenmesi

Optimizasyon, kısıt fonksiyonları sağlanacak şekilde amaç fonksiyonu ya da fonksiyonlarının minimum veya maksimum değerlerini veren tasarım değişkenlerinin en ideal değerlerinin bulunmasıdır (Arora, 2012). Optimizasyon yöntemleri kesin çözüm veren, iteratif yöntemler, evrim tabanlı, popülasyon tabanlı, vb. gibi çeşitli sınıflara ayrılabilir. Optimizasyon yönteminin seçimi, optimizasyon probleminin yapısına bağlı olarak değişmektedir.

Bu tez çalışmasında; profil çıkış sıcaklık değeri (500 °C) kısıt parametresi olarak belirlenmiştir. Bu sayede proses değişkenlerini hızı arttıracak şekilde optimize etmek hedeflenmiştir. Amaç fonksiyonu olarak ise izafi hız farkını minimize etmek ve pres kuvvetini maksimize etmek belirlenmiş ve bu kapsamda çok amaçlı optimizasyon çalışması HyperStudy yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

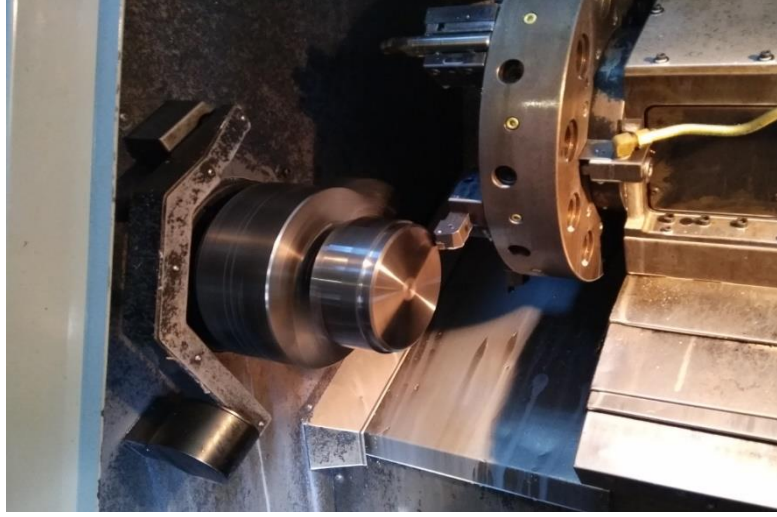
### 3.4. Magnezyum Ekstrüzyon Kalıbının Üretimi

Bilgisayar destekli ekstrüzyon analizleri ve optimizasyon sonucunda tasarımı elde edilen magnezyum ekstrüzyon kalıbının üretimi gerçekleştirilmiştir. Kalıp üretimi için 2344 sıcak iş çeliği kullanılmıştır. Üretim aşamasında; ilk olarak kütük olarak alınan çelik, şerit testere ile yüzeyden talaş da alınacağı için paylı olarak istenen ölçüde kesilmiştir (Şekil 3.28). Sonrasında CNC torna ile hassas şekilde tornalama ile uygun ölçüye getirilmiştir (Şekil 3.29).



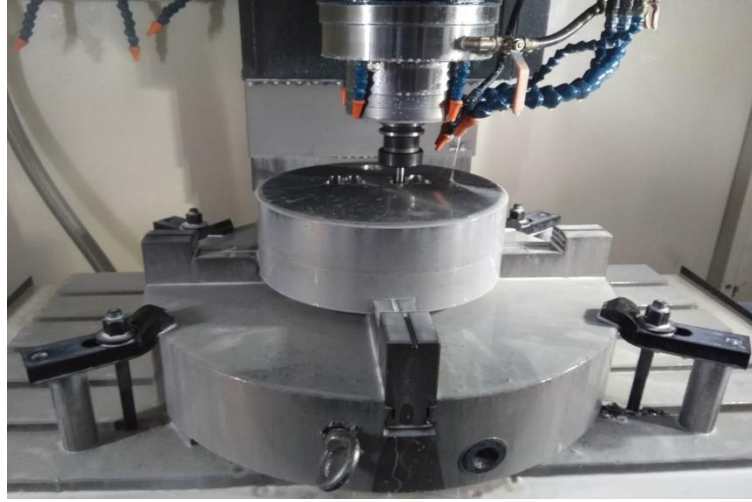
Şekil 3.28. Şerit testere ile kesim





**Şekil 3.29.** CNC torna ile işleme

Profil kesitinin kalıba işlenmesi; tasarlanan 3 boyutlu datanın CAM ortamına aktarılması ve bu hassas işlemenin CNC freze ile uygulanması ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.30). CNC frezenin ardından kalıbın uygun sertlik değerine ulaşması için ısıl işlem görmesi sağlanmıştır.



**Şekil 3.30.** CNC freze ile işleme

Isıl işlemin ardından kalıba nihai formunu kazandırmak için tel erozyon ve dalma ark erozyon işlemleri ile kalıp üretim aşaması tamamlanmıştır. Şekil 3.31’de üretimi tamamlanmış magnezyum ekstrüzyon kalıbı gösterilmektedir.



**Şekil 3.31.** Üretimi tamamlanmış magnezyum ekstrüzyon kalıbı

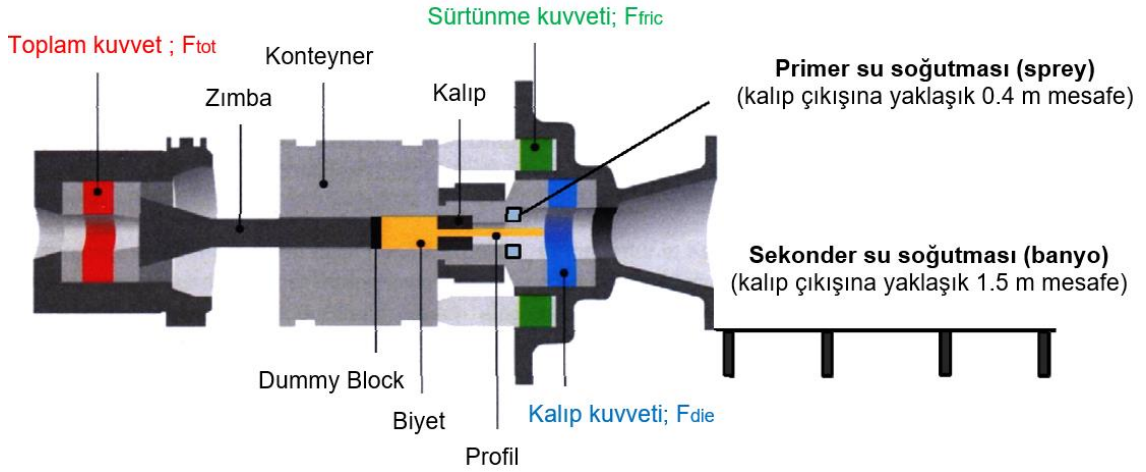
### 3.5. Deneysel Magnezyum Ekstrüzyon Çalışmaları

Optimum kalıp tasarımına göre üretilen magnezyum ekstrüzyon kalıbı ile deneysel profil ekstrüzyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. CAE çalışmalarında sıcaklık ölçümlerinin gerçekleştirildiği 2 noktadan ölçüm alınabilmesi amacıyla kalıp içerisinde aynı noktalara 2 adet ısı çift yerleştirilmiştir (Şekil 3.32).



**Şekil 3.32.** Isıl çift (termokupl) pozisyonları

Kuvvet değerleri ise kuvvet sensörleri aracılığıyla proses boyunca takip edilmiştir. Kullanılan ekstrüzyon presi 5 MN kapasiteli olup, spesifik basıncı 100 MPa seviyelerindedir. Ekstrüzyon presinin şematik görünümü Şekil 3.33'te verilmiştir.



**Şekil 3.33.** Ekstrüzyon presi-şematik görünüm (Gall vd. 2013'ten değiştirilerek alınmıştır)

Ekstrüzyon üretimi öncesinde hammadde gereksinimi belirlenmiş ve her iki magnezyum alaşımı için biyet tedarik edilmiştir. Ekstrüzyon prosesi için biyetler istenen boyutlara işlenmiştir. Her iki alaşım için biyet çapı pres ölçüleri ile uyumlu olacak şekilde 93 mm'dir (Şekil 3.34). Homojenizasyon işlemi; AM50 alaşımında 410 °C'de 15 saat, AZ31 alaşımında ise 375 °C'de 15 saat olarak tavlama fırınında gerçekleştirilmiştir. Biyetlere ilişkin detaylar Çizelge 3.9'da, malzemelere ait kimyasal kompozisyonlar Çizelge 3.10'da sırasıyla verilmiştir.

**Çizelge 3.9.** Biyetlere ilişkin detaylar

Magnezyum Alaşımı	Biyet Çapı (mm)	Homojenizasyon Sıcaklığı (°C)	Homojenizasyon Süresi (saat)
AM50	93	410	15
AZ31	93	375	15



**Şekil 3.34.** AZ31 ve AM50 alaşımlarına ait biyetler

**Çizelge 3.10.** Magnezyum biyetlere ait kimyasal kompozisyonlar (%)

Malzeme	Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Si	Ni	Mg
AZ31	3,36	1,12	0,345	0,001	0,0003	0,0110	0,0002	Balanced
AM50	4,74	0,004	0,38	0,0022	0,0006	0,0224	0,0007	Balanced

Proses esnasında, detayları '*Bulgular*' kısmında verilmiş olan, optimizasyon çalışması sonucu belirlenen parametreler kullanılmıştır. Ekstrüzyon prosesine ilişkin parametreler Çizelge 3.11'de verilmiştir.

**Çizelge 3.11.** Ekstrüzyon parametreleri

<b>Biyet sıcaklığı</b>	400 °C (AZ31) - 400 °C (AM50)
<b>Kalıp sıcaklığı</b>	400 °C (AZ31) - 405 °C (AM50)
<b>Konteyner sıcaklığı</b>	380 °C (AZ31) - 385 °C (AM50)
<b>Konteyner çapı</b>	95 mm
<b>Ekstrüzyon oranı</b>	24:1
<b>Ekstrüzyon hızı</b>	2.2 mm/s (AZ31) - 2.1 mm/s (AM50)

### 3.6. Mekanik Özelliklerin ve İçyapıların İnceleme Yöntemleri

Ekstrüzyon sonrası soğutma yönteminin, malzemenin mekanik özelliklerine ve içyapılarına olan etkilerinin incelenebilmesi amacıyla her iki alaşım için, hava ile ve su

ile soğutulmuş numuneler üzerinden malzeme testleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde, belirtilen testler ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

### **3.6.1. Metalografik Muayene Numunesi Hazırlama İşlemleri**

Ekstrüze edilmiş magnezyum profillerin yüzeyi, sırasıyla 180 / 320 / 600 / 800 / 1200 / 2500 / 4000 grid SiC zımpara kağıtları kullanılarak kaba ve ince zımparalama işlemleri ile parlatmaya hazır hale getirilmiştir. Zımparalanmış numunelerin yüzeyleri, sırasıyla 6 µm, 3 µm ve 1 µm elmas süspansiyon ve su içermeyen yağlayıcı kullanılarak parlatılmıştır. Kimyasal parlatma ise 100 ml etanol, 12 ml hidroklorik asit ve 8 ml nitrik asit içeren CP2 kimyasalı ile 5 saniye süreyle gerçekleştirilmiştir. Parlatma işlemlerinin ardından numunelerin renkli dağlaması ve tane sınırı dağlaması işlemleri için 100 ml etanol, 20 ml distile su, 6 ml asetik asit ve 5 gr pikrik asit içeren pikral dağlama solüsyonu hazırlanmış; numuneler 10-15 saniye süreyle solüsyona batırılarak dağlanmıştır. Yapılan renkli dağlama işlemi, magnezyum profillerinde soğutma türü ve alaşım türüne bağlı olarak tane oryantasyonunun gözlemlenmesini sağlamaktadır. Her işlem basamağının ardından numuneler, ultrasonik banyoda etanol kullanılarak 60 saniye süreyle temizlenmiştir.

### **3.6.2. Optik Mikroskop İncelemeleri**

Mikro yapı incelemeleri, Clemex adlı görüntü analiz yazılımına sahip Nikon LV150NA model optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ortalama tane boyutu ölçümü için lineer kesişme metodu kullanılmıştır. Optik mikroskop görseli Şekil 3.35'te verilmiştir.



**Şekil 3.35.** Optik mikroskop

### 3.6.3. Sertlik Ölçümleri

Optik mikroskop incelemelerinin ardından sertlik ölçümleri, EN6506-1 standardına göre Digirock-RBV model sertlik ölçme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin Brinell sertlik değerleri (HB) 2,5 mm çapında bir indenter bilye kullanılarak ölçülmüştür. Kullanılan yük 62,5 kg'dır. Her numune için beş ölçüm yapılmıştır. Sertlik ölçüm cihazı görseli Şekil 3.36'da verilmiştir.



Şekil 3.36. Sertlik ölçüm cihazı

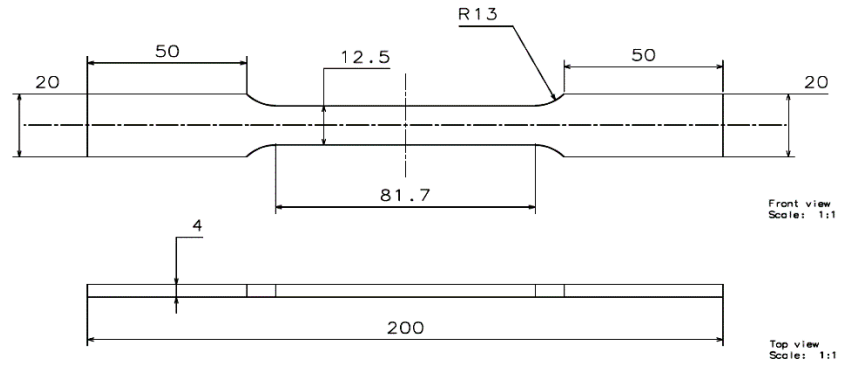
### 3.6.4. Çekme Testleri

Profillerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değerlerinin belirlenebilmesi için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testi için numuneler, ekstrüzyonla üretilmiş profillerden su jeti yardımıyla çıkartılmıştır. Ekstrüzyon yönüne bağlı olarak çıkarılan numunelere toplamda 36 adet çekme ve 36 adet basma testi (Çizelge 3.12) olacak şekilde test yapılmıştır. Her yönden toplamda 3 adet test yapılarak yapılan testlerin sonuçlarının tekrarlanabilirliği ve güvenilirliği de kontrol edilmiştir.

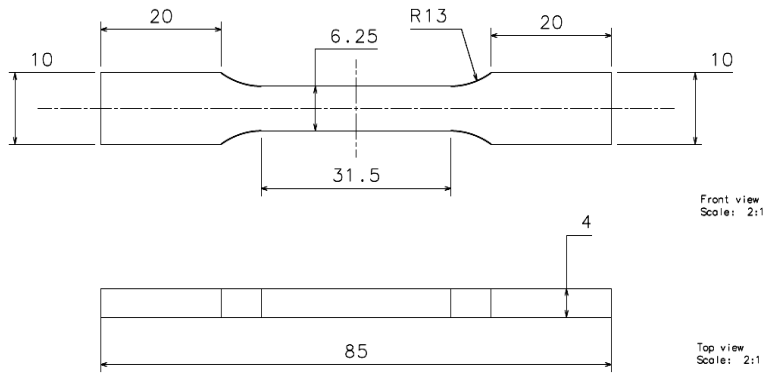
Çizelge 3.12. Çekme ve basma test-numune sayıları

Numunelerin Ekstrüzyon Profillerinden Çıkarılma Yönü	ÇEKME TESTLERİ			BASMA TESTLERİ		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
<b>AZ31 (Hava soğutma)</b>	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet
<b>AZ31 (Su soğutma)</b>	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet
<b>AM50 (Hava soğutma)</b>	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet
<b>AM50 (Su soğutma)</b>	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet	3 adet
	<b>12 adet</b>	<b>12 adet</b>	<b>12 adet</b>	<b>12 adet</b>	<b>12 adet</b>	<b>12 adet</b>
<b>TOPLAM</b>	<b>36 adet</b>			<b>36 adet</b>		

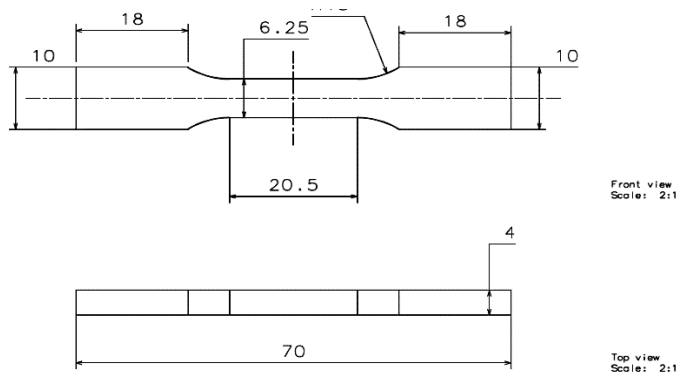
AZ31 hava soğutmalı/su soğutmalı ve AM50 hava soğutmalı/su soğutmalı ekstrüzyon profillerinden su jeti ile Çizelge 3.12’de verildiği gibi her bir yönden 3 adet olacak şekilde; ekstrüzyon doğrultusunda ( $0^\circ$ ), ekstrüzyon yönüne  $45^\circ$  ve ekstrüzyon yönüne dik ( $90^\circ$ ) yönlerinden toplamda 36 adet numune çıkartılmıştır. Numuneler her bir yön için hazırlanan teknik resimler (Şekil 3.37) esas alınarak hazırlanmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.37. Profillerin yönlerine bağlı olarak hazırlanan çekme testi numunelerine ait teknik resimler; (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$ , (c)  $90^\circ$

Hazırlanan numunelerin çekme testleri; daha hassas sonuçlar alabilmek amacıyla Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi Mekanik Karakterizasyon Laboratuvarı bünyesinde bulunan Zwick marka optik doğrulamalı çekme test cihazı (Şekil 3.38) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.38.** Optik doğrulamalı çekme test cihazı

Standart makro ekstansometreli çekme testinde elde edilen değerler mühendislik gerilme-gerinme değerleri olmaktadır. Sonrasında bu dataların formülasyon ile gerçek gerilme-gerinme eğrisine dönüştürülmesi gerekmektedir. Optik doğrulamalı test sonucunda ise veriler doğrudan gerçek gerilme-gerçek gerinme değerleri olarak alınabilmektedir. Ayrıca standart makro ekstansometreli çekme testinde boyun vermeden sonra gerinme değerleri anlamsızlaşmakta ve yaklaşık 0.2-0.3 değerlerinden 1 değerine ekstrapole edilmektedir. Optik doğrulamalı testte ise kopma uzamasına kadar gerçek gerilme-gerinme grafiği elde edilebilmektedir. Bu sayede sonlu eleman analizleri için oldukça doğru bir malzeme modellemesine imkân sağlanmaktadır.



### 3.6.5. Basma Testleri

AZ31 hava soğutmalı/su soğutmalı ve AM50 hava soğutmalı/su soğutmalı ekstrüzyon profillerinden basma testi numuneleri boyutlarının çok küçük olması sebebiyle tel erezyon yöntemi (Şekil 3.39) kullanılarak Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde yer alan Mekanik Karakterizasyon Laboratuvarı'nda hazırlanmıştır. Çizelge 3.12'de verildiği üzere; her bir yönden üç adet olacak şekilde, ekstrüzyon doğrultusunda ( $0^\circ$ ), ekstrüzyon yönüne  $45^\circ$  ve ekstrüzyon yönüne dik ( $90^\circ$ ) yönlerinden toplamda 36 adet numune çıkartılmıştır.



**Şekil 3.39.** Tel erezyon yöntemiyle basma testi numunelerinin profillerden çıkartılması

### 3.6.6. SEM Analizleri

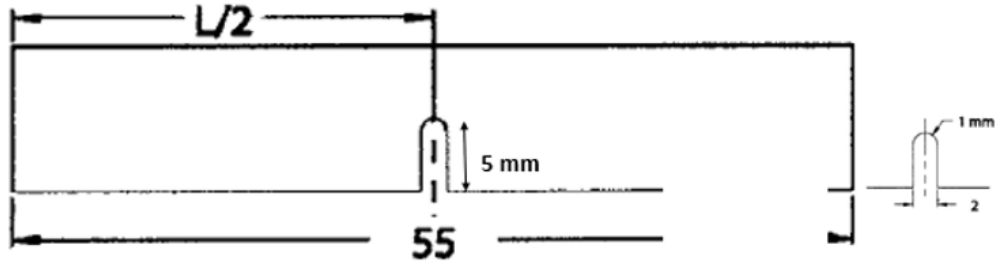
Çekme testi numunelerinin kırılma yüzeyleri, JEOL NeoScope JCM-6000 Plus model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilen SEM analizleri ile incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskop görseli Şekil 3.40'ta verilmiştir.



**Şekil 3.40.** Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

### 3.6.7. Charpy Çentik Darbe Testi

Charpy çentik darbe testi numuneleri, su jeti ile ASTM E23-07 standardına göre C tipi olarak hazırlanmıştır (Şekil 3.41).



**Şekil 3.41.** Charpy çentik darbe testi numune ölçüleri

Testler, ALŞA marka test cihazı ile (Şekil 3.42) üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş ve ortalama değerler kaydedilmiştir.



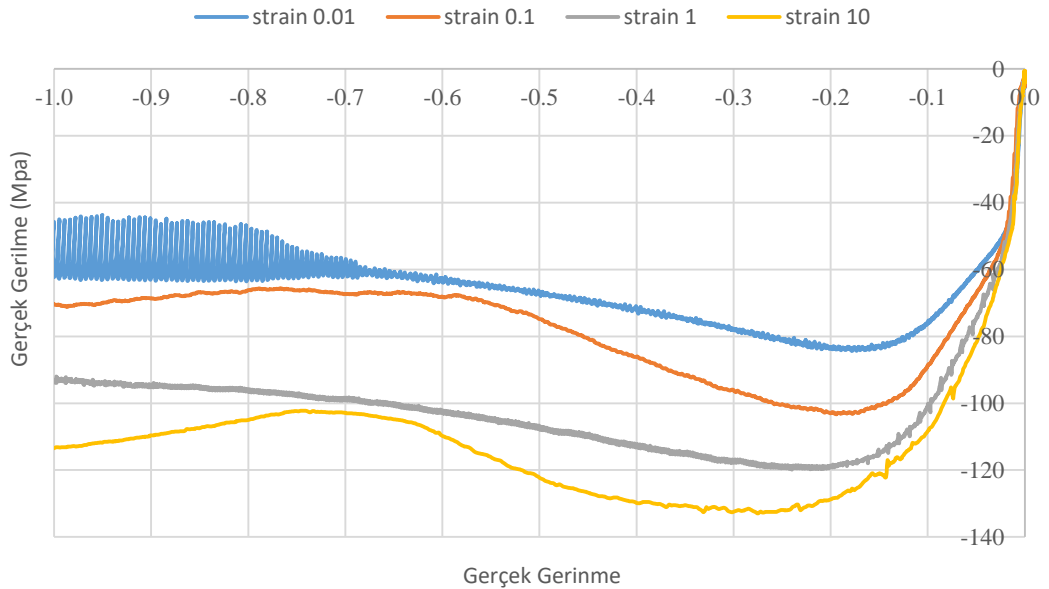
**Şekil 3.42.** Charpy çentik darbe testi cihazı

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

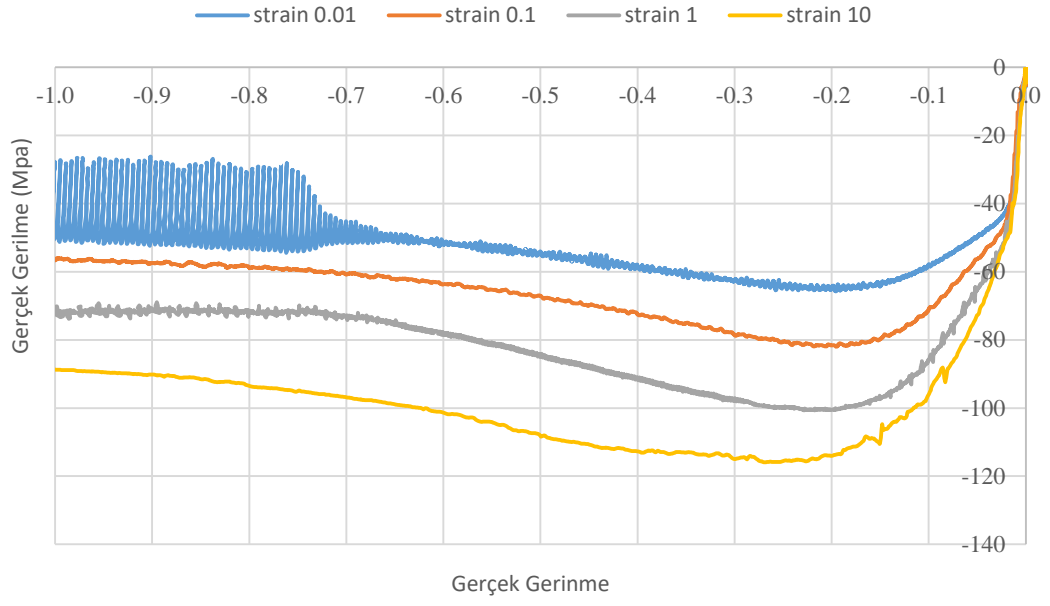
Tez çalışmasının bu kısmında ilk olarak malzeme parametrelerinin elde edilmesine ilişkin çalışma detayları paylaşılmıştır. Elde edilen malzeme parametreleri ve deney tasarımı tablosunda belirtilen parametrelerle gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri sonuçları ve buna bağlı olarak gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları verilmiştir. Optimum parametrelerle gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi sonuçları ve deneysel ekstrüzyon çalışmasından elde edilen veriler kıyaslanmıştır. Sonrasında aynı koşullarda ekstrüzyon ile üretilip farklı hızlarda soğutulan magnezyum alaşımlı profiller üzerinden alınan test numuneleri ile gerçekleştirilen testlere ilişkin sonuçlar paylaşılmıştır. Çekme-basma testleri, optik mikroskop incelemeleri, kırılma yüzeylerinden alınan görüntülerle gerçekleştirilen SEM analizleri ile birlikte Charpy darbe testi sonuçları verilmiştir.

##### 4.1. Sıcak Basma Testi Sonuçları

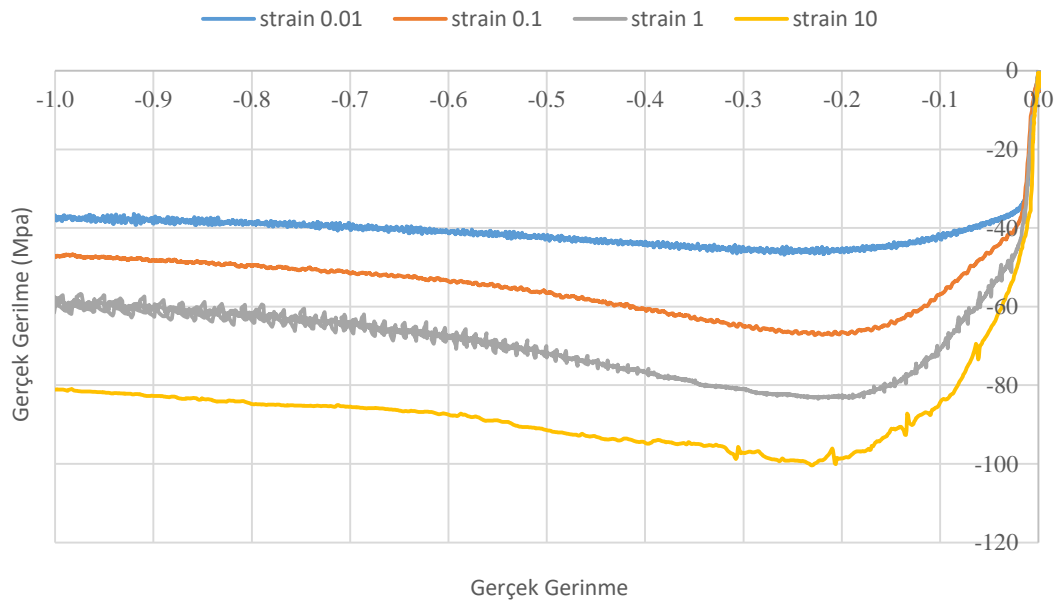
Her iki alaşım için; sıcak basma testlerinden elde edilen farklı sıcaklık ve gerinme hızlarına ait gerçek gerilme-gerçek gerinme grafikleri aşağıda sırasıyla verilmiştir (Şekil 4.1 – Şekil 4.10).



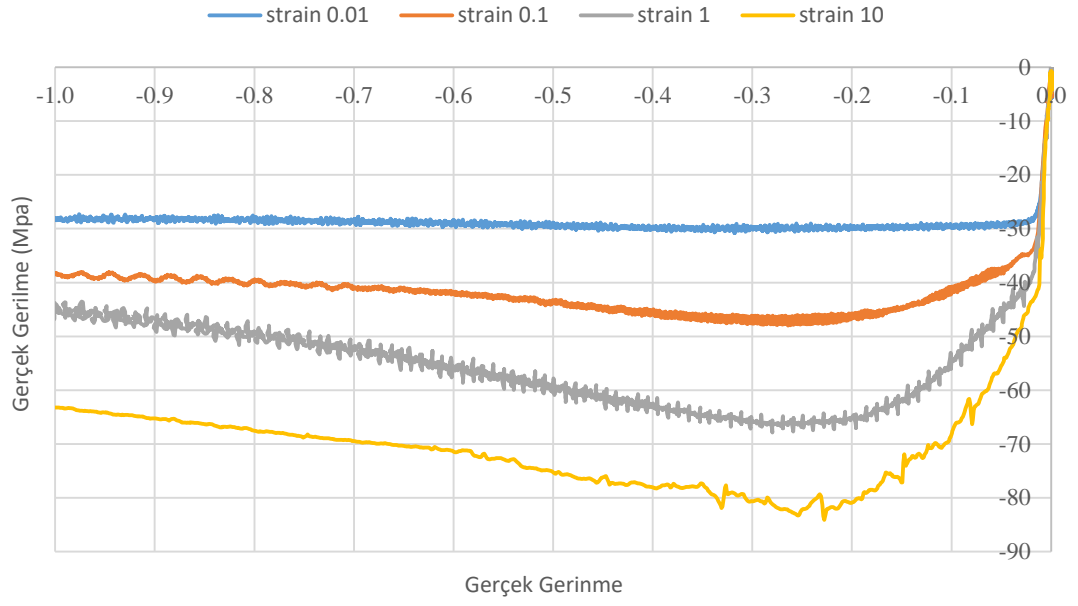
**Şekil 4.1.** AZ31 alaşımı için 300 °C' de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi



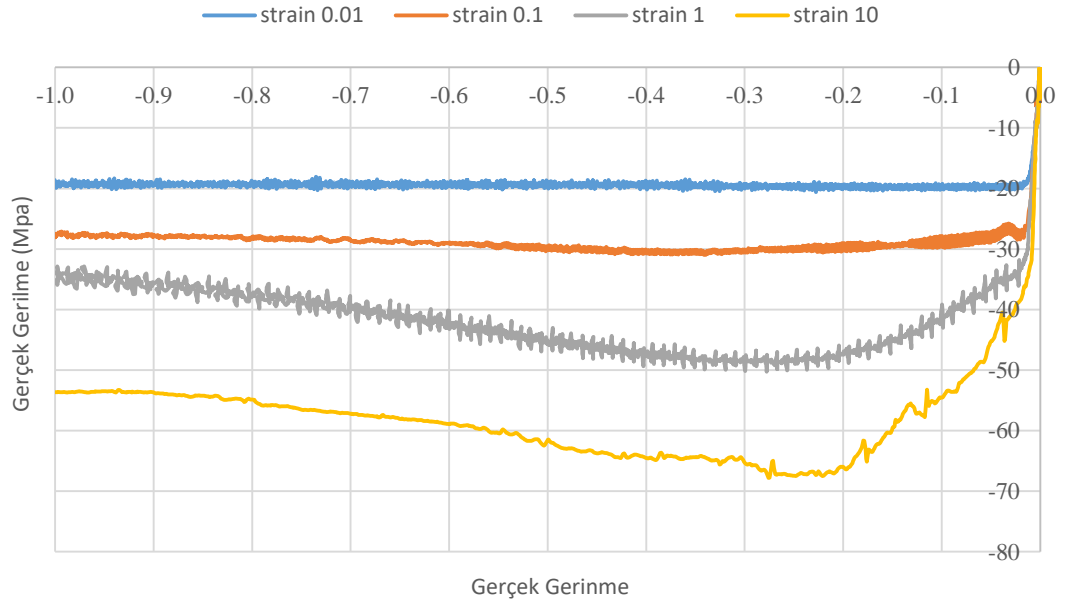
**Şekil 4.2.** AZ31 alaşımı için 350 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi



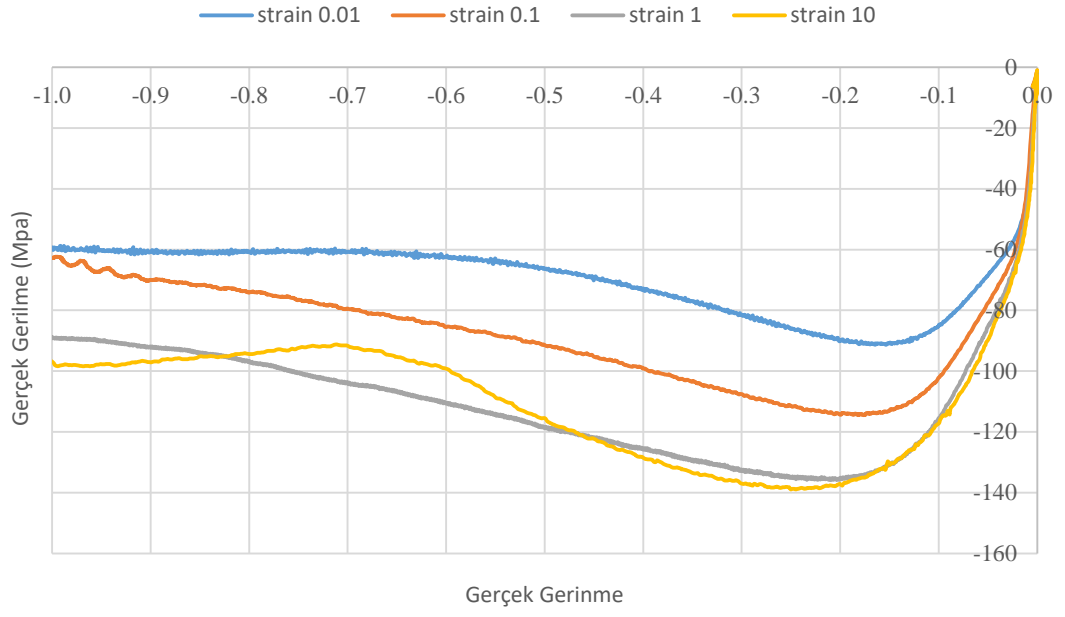
**Şekil 4.3.** AZ31 alaşımı için 400 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi



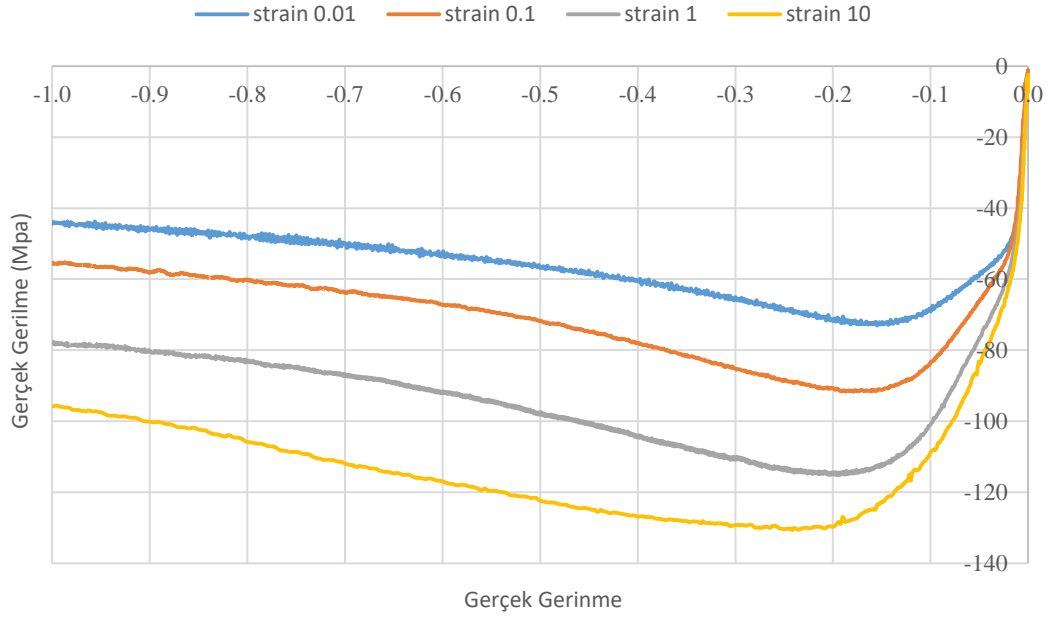
**Şekil 4.4.** AZ31 alaşımı için 450 °C' de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi



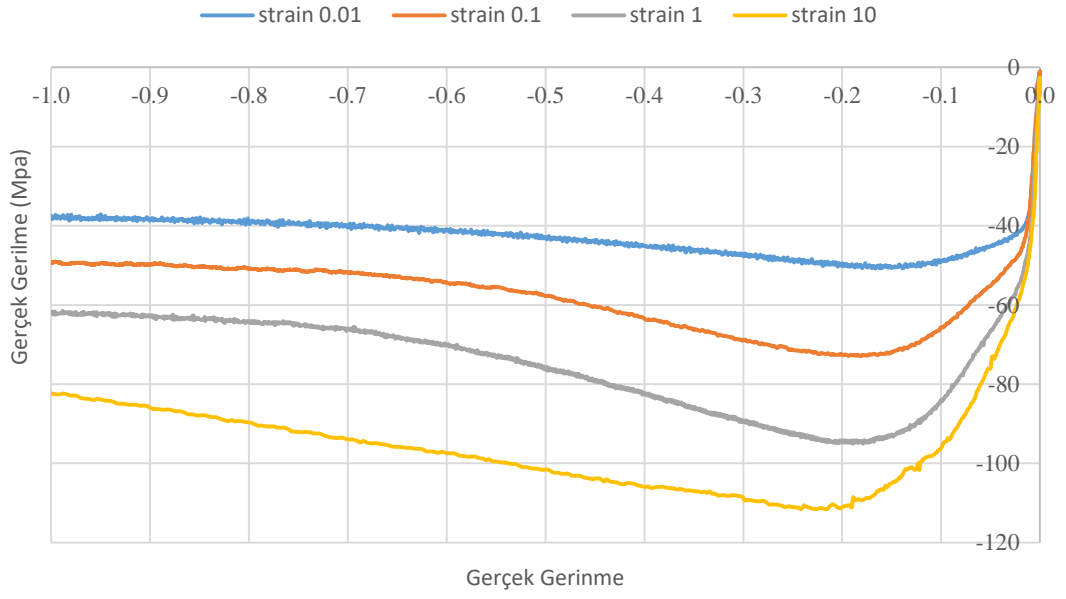
**Şekil 4.5.** AZ31 alaşımı için 500 °C' de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi



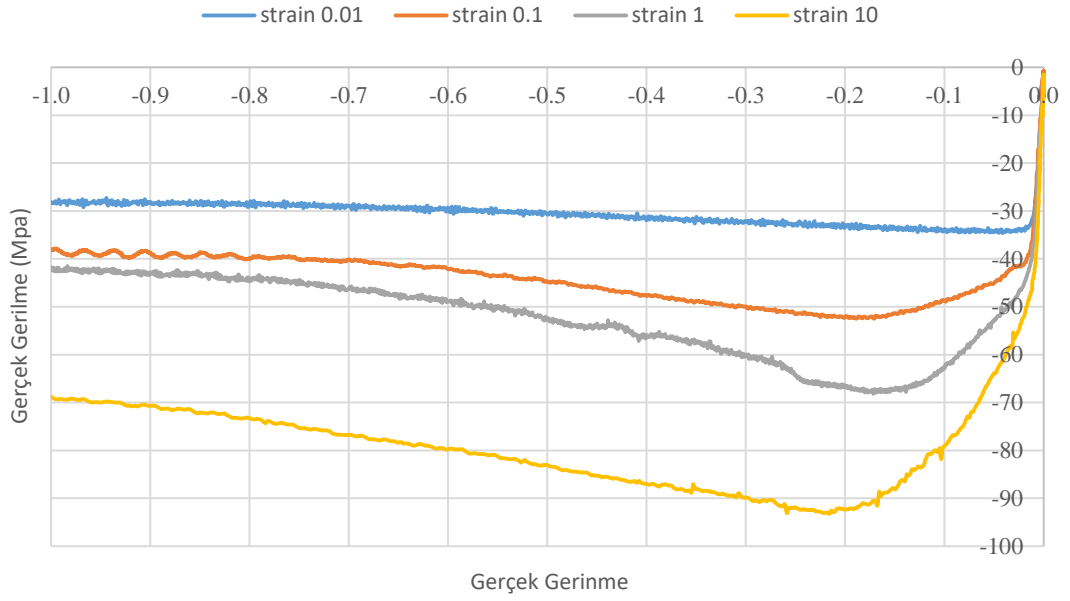
**Şekil 4.6.** AM50 alaşımı için 300 °C' de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi



**Şekil 4.7.** AM50 alaşımı için 350 °C' de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi

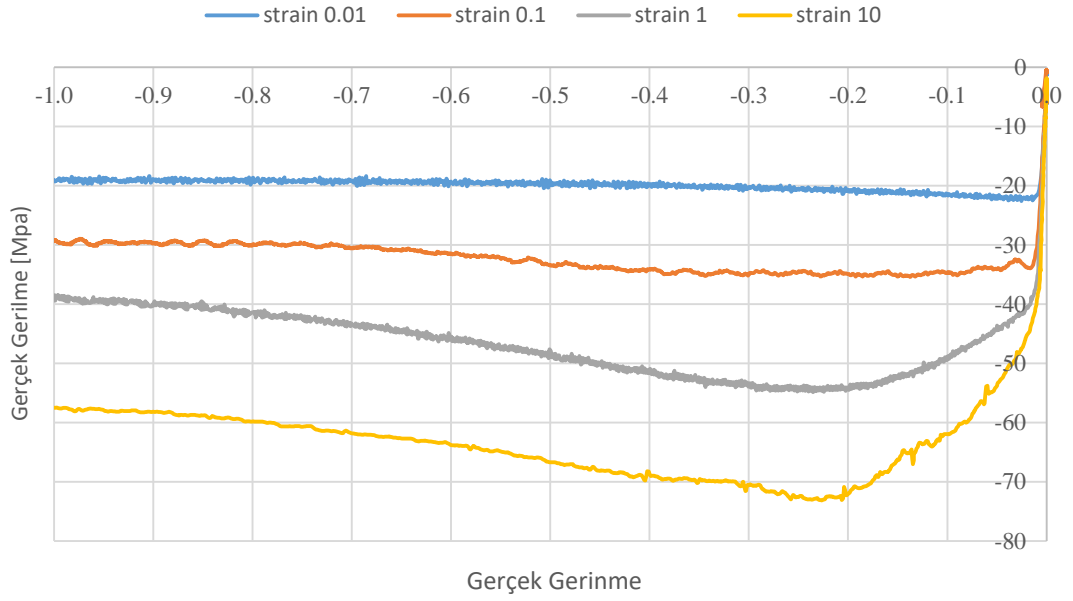


**Şekil 4.8.** AM50 alaşımı için 400 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi



**Şekil 4.9.** AM50 alaşımı için 450 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi





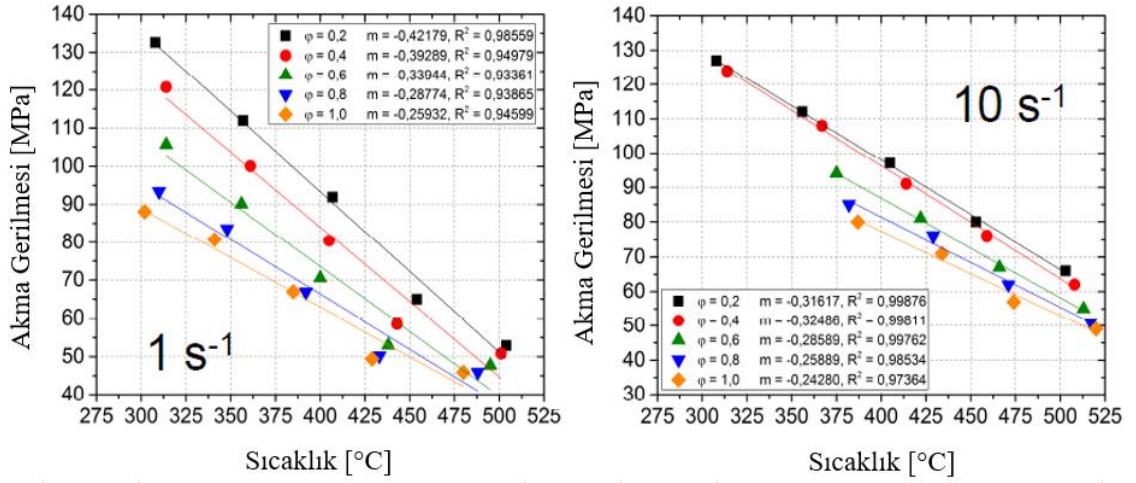
**Şekil 4.10.** AM50 alaşımı için 500 °C’ de gerilim-gerinim eğrilerinin gerinim hızına bağlı değişimi

#### 4.2. Sıcak Basma Test Sonuçlarından Malzeme Parametrelerinin Elde Edilmesi

Gerilim verisini etkileyen ve düzeltilmesi gereken en önemli etken deformasyon ısınmasıdır. Malzemeleri deforme ederken yapılan mekanik işin büyük bir kısmı ısıya dönüşmektedir. Yüksek hızlı testlerde ısıya dönüşen iş miktarı yavaş hızlı testlere göre artmakta ve numunedeki ısının çevreye iletimi için yeterli süre kalmamaktadır. Bu sebeple numunede meydana gelen sıcaklık artışı malzemenin yumuşamasına neden olmaktadır. Bu durum sıcaklık düzeltmesi için kullanılan lineer yaklaşım denklemi ile düzeltilebilmektedir.

$$\sigma_{düzeltilmiş} = \sigma_{ölçülen} - m \cdot (T_{ölçülen} - T_{ayarlanmış}) \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de  $m$ ; sabit gerinim hızında belli bir gerinimde malzemenin akma mukavemetinin sıcaklıkla değişimini ifade etmektedir.  $m$  değeri doğrudan bilinen bir değer değildir fakat en az 2 sıcaklıkta aynı gerinim hızında test gerçekleştirilerek değeri belirlenebilir. Deney matrisinde 5 farklı sıcaklıkta deney yer aldığından  $m$  değeri doğrusal regresyon analizi kullanılarak elde edilmiştir.

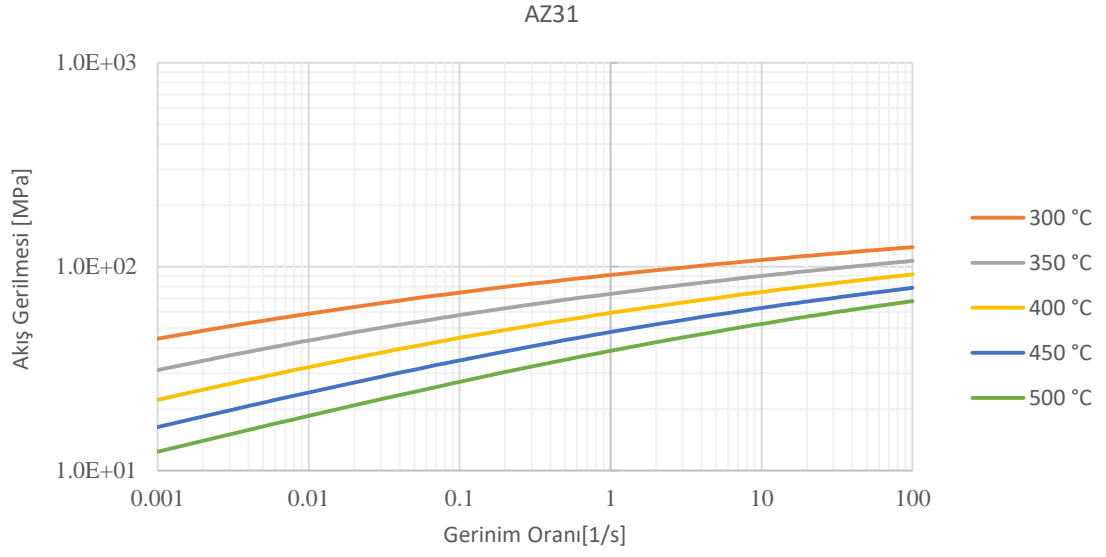


**Şekil 4.11.** Doğrusal regresyon analizi ile sıcaklık düzeltmesi için  $m$  değerinin elde edilmesi

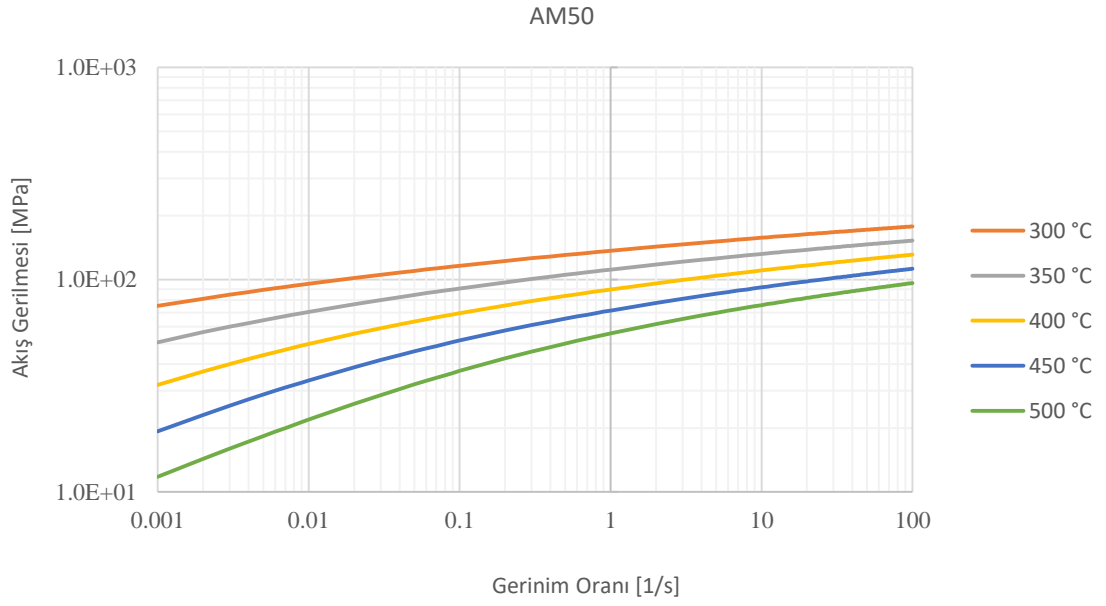
Basma testlerinden elde edilen düzeltilmiş akma eğrilerinin proses simülasyonunda kullanılabilmesi için reolojik bir yasa cinsinden ifade edilmesi gerekmektedir. Bağımsız deneylerden elde edilen akma eğrileri, reolojik yasa aracılığıyla süreç aralığını kapsayan sürekli fonksiyonlara dönüştürülmektedir. Proses sırasında iş parçasının içindeki noktalar test koşullarından farklı gerinim, gerinme hızı ve sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Reolojik yasa bu işlemi gerçekleştirmenin yanı sıra deneysel rastgele hataların azaltılmasını da sağlamaktadır. Bu kapsamda simülasyon arayüzünde her bir koşuldaki akma eğrisinin altında kalan alan integral yardımı ile hesaplanmış ve ortalama bir gerinim değeri bulunmuştur. Sonrasında Denklem 3.1-3.5 üzerinde logaritmik ve kısmi türev işlemlerinden faydalanılarak malzeme model parametreleri elde edilmiştir. Her iki aşım için elde edilen malzeme modeli parametreleri Çizelge 4.1’de, bu parametrelerle elde edilen gerinim oranına bağlı akış gerilmesi grafikleri sırasıyla Şekil 4.12 ve 4.13’te verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Magnezyum ekstrüzyon malzeme modeli katsayıları

Malzeme	Q (J/mol)	N	A	$\alpha$ (Pa <sup>-1</sup> )
AZ31	145508	5.4214	3.06E-09	2.50E-08
AM50	135212	3.7386	4.13E-07	3.90E-08



**Şekil 4.12.** AZ31 malzeme için akış gerilmesi-gerinim oranı grafiği



**Şekil 4.13.** AM50 malzeme için akış gerilmesi-gerinim oranı grafiği

### 4.3. Deney Tasarımı Tablosuna Göre Sürekli Rejim Ekstrüzyon Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

Çalışmanın bu kısmında; önceki bölümlerde detayları verildiği üzere; proses parametreleri ve kalıp tasarımları değiştirilerek Çizelge 3.8'deki parametreler ile ekstrüzyon simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu elde edilen çıktılar, AM50 ve AZ31 alaşımı için sırasıyla Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Analizler sonucu elde edilen sonuçlar (AM50 alaşımı)

Analiz No.	Girdiler (Parametreler)					Çıktılar (Sonuçlar)		
	A	B	C	D	E	X	Y	Z
1	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Konteyner Sıcaklığı (°C)	Biyet Sıcaklığı (°C)	Zimba Hızı (mm/s)	Kalıp Cep Yüksekliği (mm)	Ekstrüzyon Kuvveti (MN)	Maksimum Ekstrüzyon Çıkış Sıcaklığı (°C)	İzafi Çıkış Hız Farkı (%)
1	380	370	400	1	5	4,246	469,2	16,9
2	380	395	425	2	10	4,142	513,1	32,0
3	380	420	450	4	15	4,025	549,7	60,6
4	405	370	400	2	10	4,457	503,2	26,7
5	405	395	425	4	15	4,317	538,0	50,3
6	405	420	450	1	5	3,517	500,2	18,0
7	430	370	425	1	15	4,281	491,2	11,7
8	430	395	450	2	5	3,901	513,4	30,3
9	430	420	400	4	10	4,105	541,0	49,0
10	380	370	450	4	10	4,339	521,8	58,0
11	380	395	400	1	15	4,179	490,7	16,0
12	380	420	425	2	5	3,789	520	36,1
13	405	370	425	4	5	4,332	512,8	56,4
14	405	395	450	1	10	3,885	492,2	15,4
15	405	420	400	2	15	4,042	532,7	30,0
16	430	370	450	2	15	4,356	514,2	22,6
17	430	395	400	4	5	4,217	522,5	51,8
18	430	420	425	1	10	3,634	509,5	15,1

**Çizelge 4.3.** Analizler sonucu elde edilen sonuçlar (AZ31 alaşımı)

	Girdiler (Parametreler)					Çıktılar (Sonuçlar)		
	A	B	C	D	E	X	Y	Z
Analiz No.	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Konteyner Sıcaklığı (°C)	Biyet Sıcaklığı (°C)	Zımba Hızı (mm/s)	Kalıp Cep Yüksekliği (mm)	Ekstrüzyon Kuvveti (MN)	Maksimum Ekstrüzyon Çıkış Sıcaklığı (°C)	İzafi Çıkış Hız Farkı (%)
1	380	370	400	1	5	5,185	455,65	16,17
2	380	395	425	2	10	4,970	500,58	30,44
3	380	420	450	4	15	4,746	538,16	56,82
4	405	370	400	2	10	5,409	491,13	25,91
5	405	395	425	4	15	5,133	526,97	47,43
6	405	420	450	1	5	4,217	487,61	16,63
7	430	370	425	1	15	5,187	477,69	10,78
8	430	395	450	2	5	4,726	501,21	29,17
9	430	420	400	4	10	4,826	535,22	49,72
10	380	370	450	4	10	5,277	506,77	52,62
11	380	395	400	1	15	4,983	477,33	14,75
12	380	420	425	2	5	4,520	508,81	34,83
13	405	370	425	4	5	5,271	500,87	54,19
14	405	395	450	1	10	4,677	478,81	14,27
15	405	420	400	2	15	4,767	521,56	28,18
16	430	370	450	2	15	5,285	500,74	20,74
17	430	395	400	4	5	5,044	515,18	52,88
18	430	420	425	1	10	4,332	497,09	13,99

#### 4.4. Optimum Proses Parametrelerinin Belirlenmesi

Analiz çıktıları değerlendirilirken, presten optimum faydalanmaya müsaade edecek gerekli ekstrüzyon kuvveti, maksimum çıkış sıcaklığı ve izafi hız farkı değerleri incelenmiş ve sonuçlar bu değerlere göre yorumlanmıştır. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışması sonucunda her iki alaşım için elde edilen optimum proses parametreleri sırasıyla Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Optimizasyon çalışmasına göre optimum proses parametreleri ve karşılık gelen çıktı değerleri (AM50)

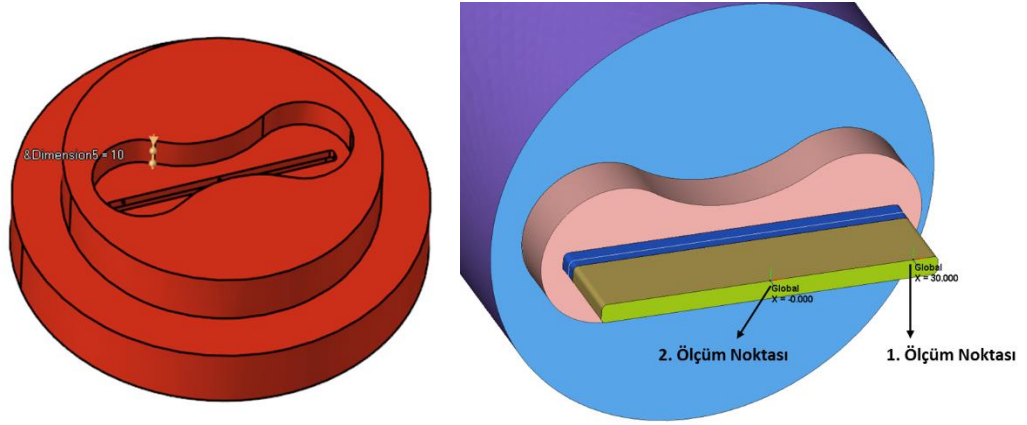
Optimum Ekstrüzyon Parametreleri					Optimum Ekstrüzyon Sonuçları		
A	B	C	D	E	X	Y	Z
Kalıp Sıcaklığı (°C)	Konteyner Sıcaklığı (°C)	Biyet Sıcaklığı (°C)	Zımba Hızı (mm/s)	Kalıp Cep Yüksekliği (mm)	Ekstrüzyon Kuvveti (MN)	Maksimum Ekstrüzyon Sıcaklığı (°C)	İzafi Çıkış Hız Farkı (%)
405	385	400	2.1	10	4.36	499	15.8

**Çizelge 4.5.** Optimizasyon çalışmasına göre optimum proses parametreleri ve karşılık gelen çıktı değerleri (AZ31)

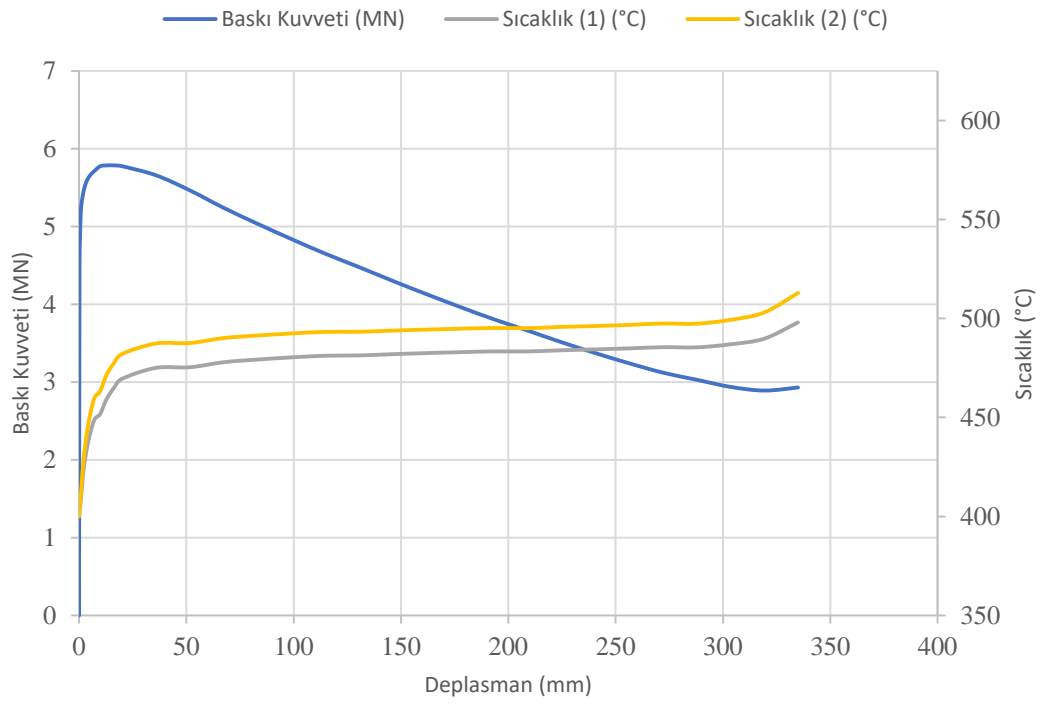
Optimum Ekstrüzyon Parametreleri					Optimum Ekstrüzyon Sonuçları		
A	B	C	D	E	X	Y	Z
Kalıp Sıcaklığı (°C)	Konteyner Sıcaklığı (°C)	Biyet Sıcaklığı (°C)	Zımba Hızı (mm/s)	Kalıp Cep Yüksekliği (mm)	Ekstrüzyon Kuvveti (MN)	Maksimum Ekstrüzyon Sıcaklığı (°C)	İzafi Çıkış Hız Farkı (%)
400	380	400	2.2	10	4.86	495	16.9

#### **4.5. Geçici Rejim Ekstrüzyon Analizleri ile Optimizasyonun Doğrulanması**

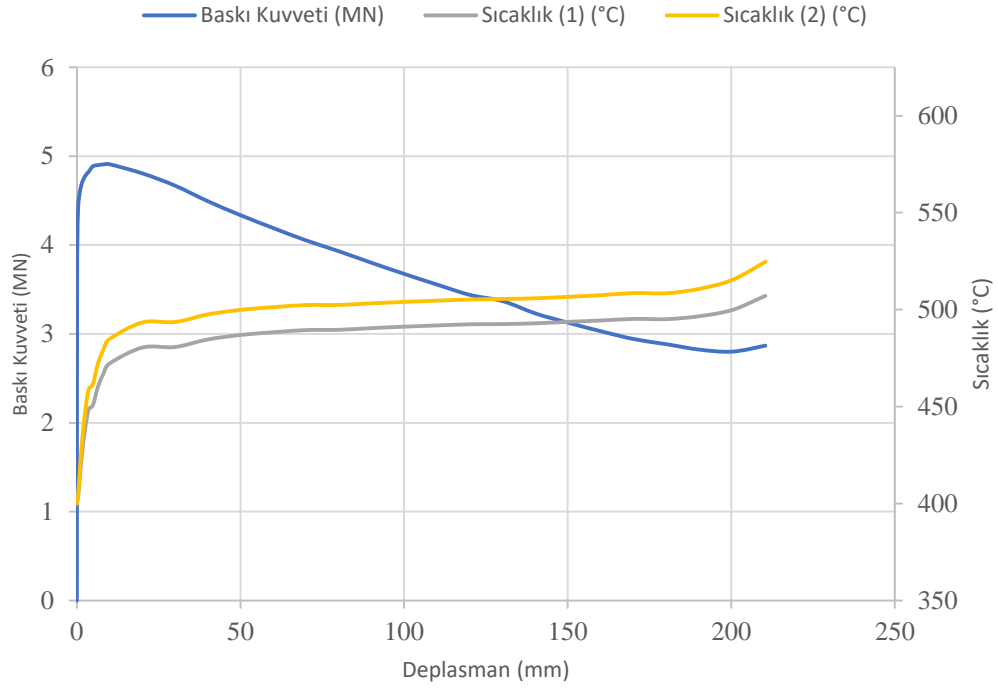
Her iki alaşım için optimum proses parametreleri belirlendikten sonra, elde edilen bu parametreler ile geçici rejim analizleri HyperXtrude yazılımı ile zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiş, baskı boyunca baskı kuvveti ve profil çıkış sıcaklıkları sanal ortamda elde edilmiştir. Sıcaklık ölçümleri, sıcaklık ölçerlerin kalıpta konumlandırılacağı noktalardan gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.14). Her iki alaşım için, optimum parametrelerle gerçekleştirilen geçici rejim ekstrüzyon analizinde elde edilen kuvvet, hız ve sıcaklık dağılımı grafikleri sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilmiştir.



**Şekil 4.14.** Üretilecek kalıp geometrisi ve sıcaklık ölçerlerin kalıptaki konumları



**Şekil 4.15.** AZ31 alaşımı için, optimum parametrelerle gerçekleştirilen geçici rejim ekstrüzyon analizinde elde edilen kuvvet, hız ve sıcaklık dağılımı



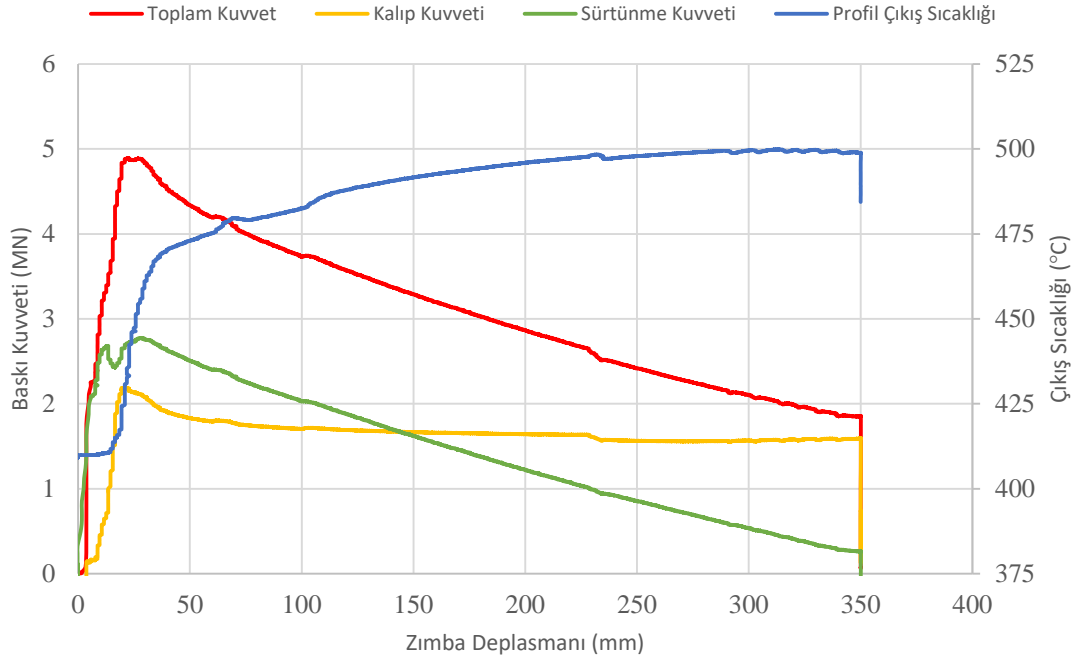
**Şekil 4.16.** AM50 alaşımı için, optimum parametrelerle gerçekleştirilen geçici rejim ekstrüzyon analizinde elde edilen kuvvet, hız ve sıcaklık dağılımı

Gerçekleştirilen analiz çıktıları neticesinde proses, üretilebilirlik ve fizibilite açısından uygun olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen optimum kalıp havuz yüksekliği de dikkate alınarak magnezyum ekstrüzyon kalıbı üretilmiştir ve magnezyum ekstrüzyon işlemi sırasında ekstrüzyon presinden elde edilen kalıp baskı kuvveti ve kalıba yerleştirilen ısı çift verileri, sanal analizlerde ortaya çıkan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

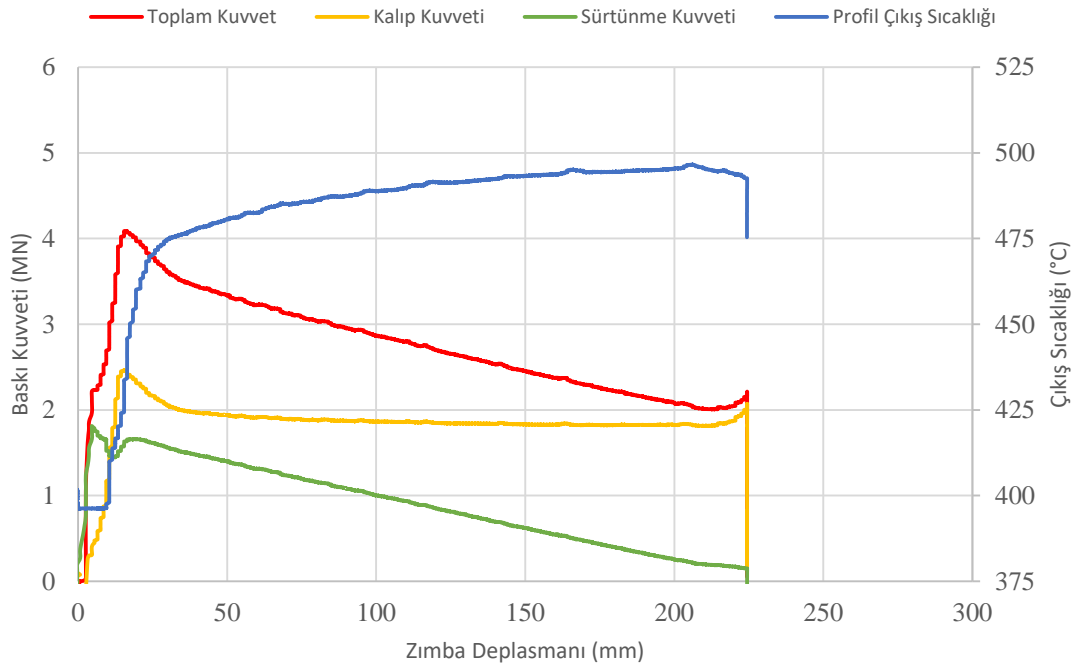
#### 4.6. Deneysel Magnezyum Ekstrüzyon Sonuçları

AZ31 ve AM50 alaşımları için belirlenmiş optimum proses parametreleri ile ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilmiş ve bu esnada kalıptaki sıcaklık ve prosese ilişkin kuvvet değerleri kaydedilmiştir. Her iki alaşıma ait, ekstrüzyon prosesinden alınan sıcaklık-kuvvet-deplasman değişikliklerini gösteren grafikler Şekil 4.17 ve 4.18’de sırasıyla verilmiştir.





Şekil 4.17. AZ31 alaşımına ait deneysel sıcaklık ve kuvvet değişim grafiği

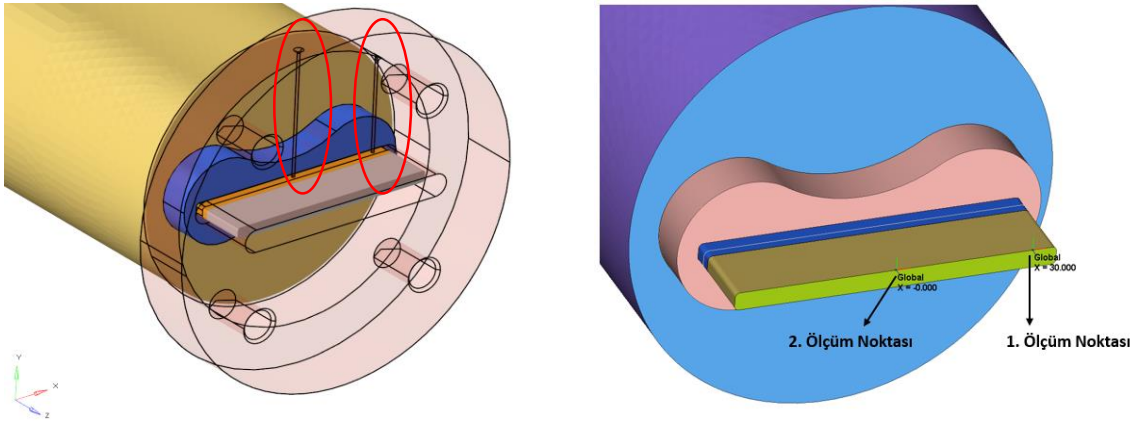


Şekil 4.18. AM50 alaşımına ait deneysel sıcaklık ve kuvvet değişim grafiği

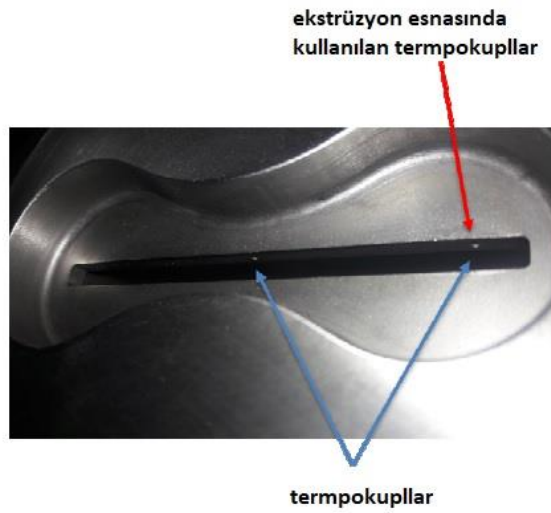
Grafiklerden elde edilen sonuca göre; sürtünme gerilmesi 25-30 MPa aralığında değişmektedir. Bir diğer detay ise; AZ31 alaşımının ekstrüzyonunun, AM50 alaşımına göre yaklaşık %17 oranında daha yüksek ekstrüzyon kuvveti gerektirmesidir. Bu durum ise katı çözeltideki artan alüminyum atom miktarı ile ilişkilendirilebilir.

#### 4.7. Sonlu Elemanlar Analizleri ve Deneysel Çalışma Verilerinin Karşılaştırılması

Kalıp içerisinde sürtünme yüzeyi bölgesinden sıcaklık verisi okunabilmesi amacıyla bir kanal yer almaktadır. Sürtünme yüzeyine yerleştirilen ısı çiftleri ile sıcaklık verisi alınmıştır. Elde edilen bu veriler, simülasyonlarda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

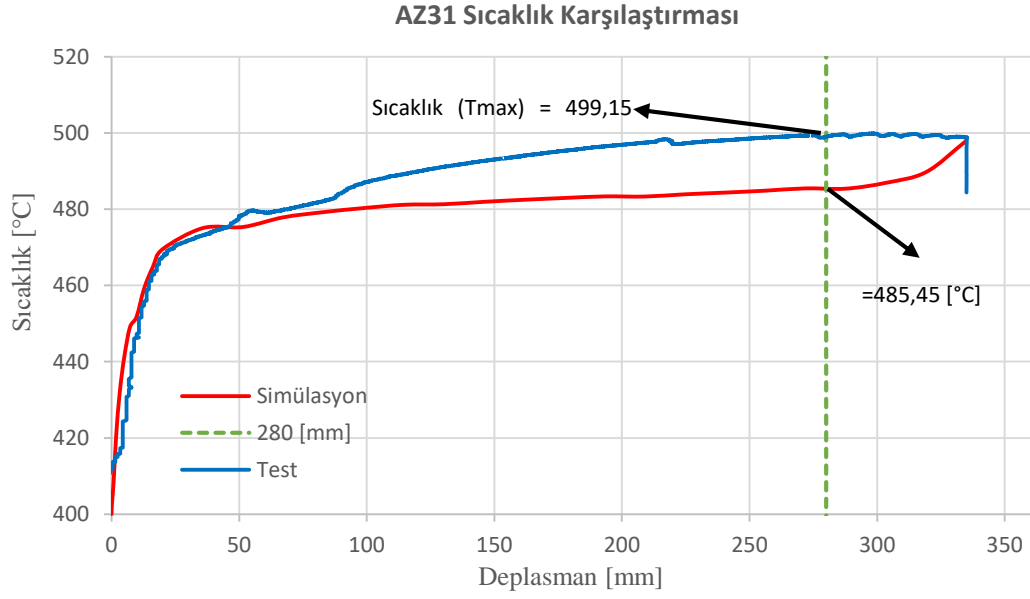


Şekil 4.19. Ekstrüzyon analizinde sıcaklık ölçüm noktaları



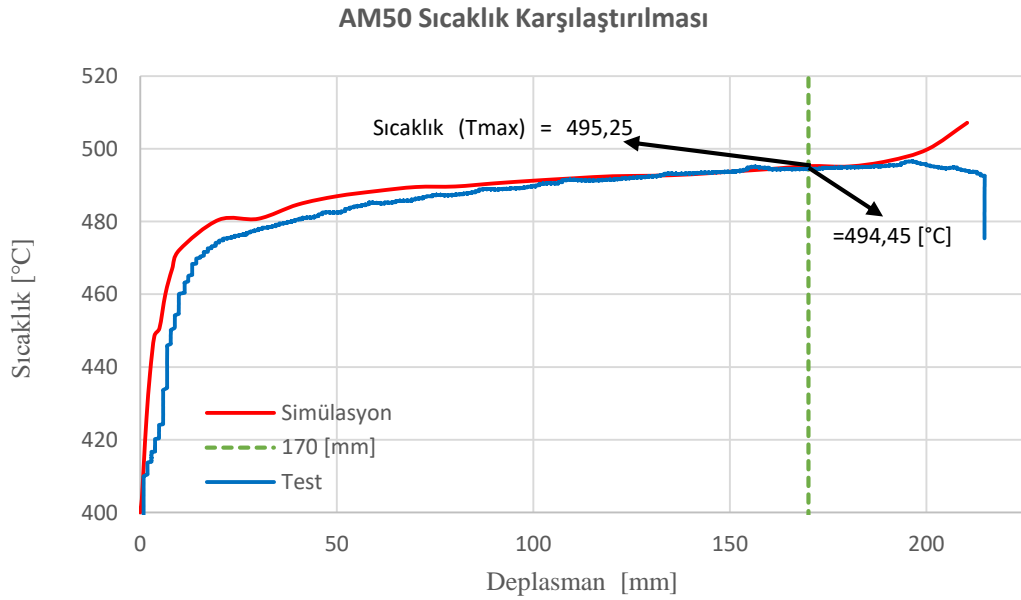
Şekil 4.20. Kalıp üzerindeki sıcaklık ölçüm noktaları

Her iki alaşım için elde edilen maksimum sıcaklık verilerinin test ve simülasyon karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir.



**Şekil 4.21.** AZ31 test-simülasyon sıcaklık ölçüm karşılaştırması

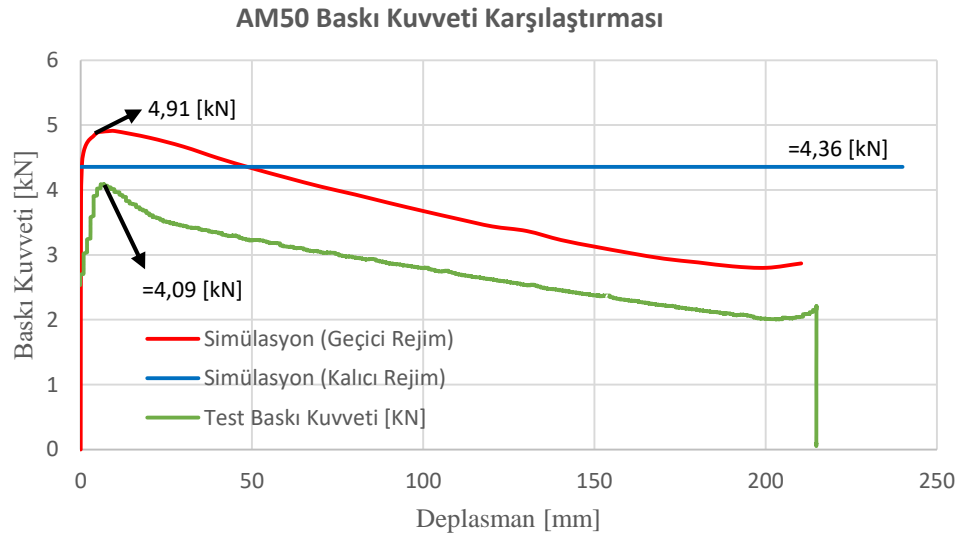
AZ31 için sıcaklık değerleri; baskının 280 mm olduğu maksimum an için karşılaştırıldığında analiz sonucu elde edilen değer 485,45 °C iken, test sonucu ortaya çıkan değer 499,15 °C olup aradaki farkın % 2,74 olduğu tespit edilmiştir.



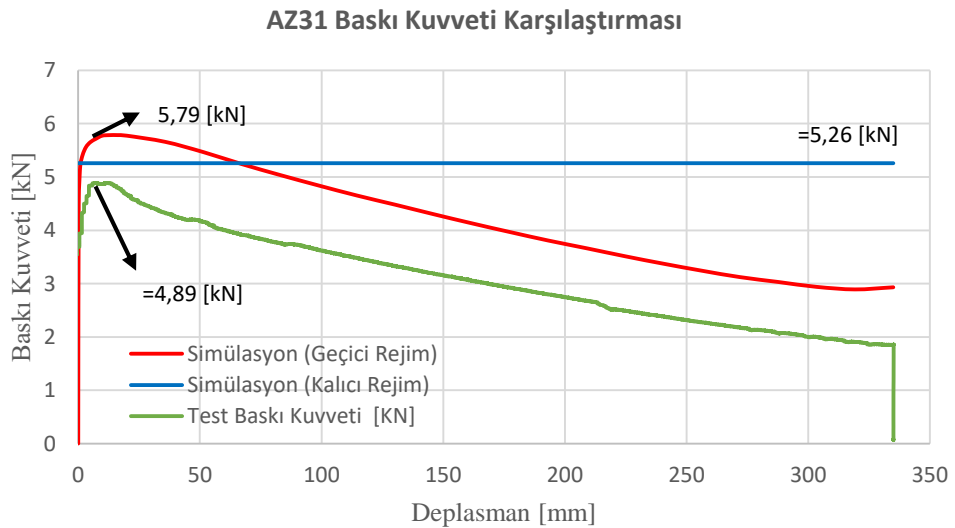
**Şekil 4.22.** AM50 test-simülasyon sıcaklık ölçüm karşılaştırması

AM50 için sıcaklık değerleri; baskının 170 mm olduğu an için karşılaştırıldığında analiz sonucu elde edilen değer 495,25 °C iken, test sonucu ortaya çıkan değer 494,45 °C olup aradaki farkın % 0,4 olduğu tespit edilmiştir.

Her iki alaşım için baskı kuvveti değerlerinin test ve simülasyon kıyaslamaları sırasıyla Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te verilmiştir. Kuvvet kıyaslamaları gerçekleştirilirken; optimum proses parametreleriyle gerçekleştirilen geçici rejim ve kalıcı rejim analizlerinden elde edilen sonuçlar ayrı ayrı verilip birbirleriyle de kıyaslanmıştır.



**Şekil 4.23.** AM50 test-simülasyon kuvvet ölçüm karşılaştırması



**Şekil 4.24.** AZ31 test-simülasyon kuvvet ölçüm karşılaştırması

AZ31 alaşımı ile gerçekleştirilen ekstrüzyon üretiminde, presten alınan kuvvet verileri incelendiğinde maksimum baskı kuvveti 4,89 kN iken, kalıcı rejim ekstrüzyon simülasyonunda bu değer 5,26 kN ve geçici rejim ekstrüzyon simülasyonunda 5,79 kN olarak hesaplanmıştır. Presten alınan kuvvet verileri ile kalıcı rejim ekstrüzyon simülasyonundan elde edilen kuvvet değerleri arasındaki fark %7,5 seviyelerinde iken, geçici rejim ekstrüzyon analizinden elde edilen kuvvet değerleri arasındaki farkın %18 olduğu gözlemlenmiştir.

AM50 alaşımı ile gerçekleştirilen ekstrüzyon üretiminde, presten alınan kuvvet verileri incelendiğinde maksimum baskı kuvveti 4,09 kN iken, kalıcı rejim ekstrüzyon simülasyonunda bu değer 4,36 kN ve geçici rejim ekstrüzyon simülasyonunda 4,91 kN olarak hesaplanmıştır. Presten alınan kuvvet verileri ile kalıcı rejim ekstrüzyon simülasyonundan elde edilen kuvvet değerleri arasındaki fark %6,6 seviyelerinde iken, geçici rejim ekstrüzyon analizinden elde edilen kuvvet değerleri arasındaki farkın %20 seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde; nümerik analizler ve deneysel çalışmalardaki sıcaklık değerleri birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Fakat baskı kuvveti değerleri incelendiğinde; her iki alaşım için deneysel veriler ile sanal analiz sonucunda elde edilen değerler arasında %6 ile %20 aralığında değişen oranlarda bir fark olduğu, simülasyon verilerinin deneysel çalışmada elde edilen verilerden yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

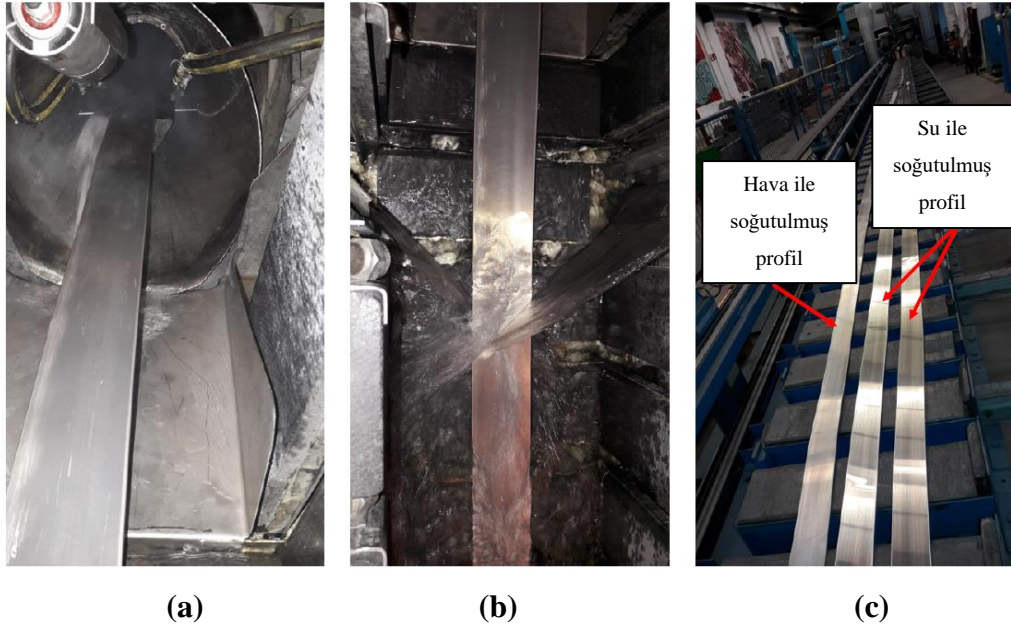
Deneysel veriler ile sayısal analiz verileri arasındaki farkın nedenleri irdelendiğinde farklı sebepler ortaya konabilmektedir. Ockewitz, Sun, Andrieux ve Mueller (2012) HyperXtrude ile gerçekleştirilen çalışmada; sıcaklık değerleri arasında iyi bir korelasyon yakalarken, elde edilen baskı kuvvetinin deneysel verilerden yaklaşık %22 oranında daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun sebebinin; yazılımda biyet ve konteyner arasında tanımlanan sürtünmenin, deneysel duruma göre daha yüksek olarak hesaplanması olduğunu ortaya koymuşlar ve alaşıma özgü yeni bir sürtünme denklemi sunmuşlardır. Pinter ve El Mehtedi (2012) HyperXtrude ile gerçekleştirilen analizlerde, hem geçici hem de kalıcı rejim durumunda gerekli baskı kuvvetinin deneysel çalışma verilerinden yüksek olarak hesaplandığını gözlemlemişlerdir. Oluşan farkın sebebinin;

Zener-Hollomon malzeme denkleminde kullanılan malzeme parametre hesabından kaynaklandığı vurgulanmıştır. Ayrıca hesaplama zamanının optimize edilmesi amacıyla, analizlerde kalıp elemanlarının rijit olduğu kabul edilmektedir. Kalıp deformasyon analizlerinin de sürece dâhil edilmesiyle daha yakın sonuçların elde edilebileceği öngörülmektedir. Yine optimum hesaplama maliyetleri anlamında, ağ yapısının daha hassas ve küçük boyutlu elemanlarla modellenmesi sonucunda deneysel ve nümerik analizler sonucunda elde edilen veriler arasındaki farkların azalacağı düşünülmektedir.

#### **4.8. Magnezyum Ekstrüzyonunda Soğutma Yönteminin Etkisinin İncelenmesi**

Ekstrüze edilmiş profiller, pres çıkışında uygun soğutma hızı ile kontrollü şekilde soğutulmuş ortam sıcaklığına getirilir. Endüstride su ile soğutma, hava ile soğutma, sprey yöntemi ile soğutma gibi farklı uygulamalar mevcuttur. Soğutma hızı; bitmiş ürünün akma-çekme dayanımı, yüzde uzama değeri ve sertlik gibi mekanik özelliklerini etkilemektedir. Genelde; hızlı soğutmanın sertlik anlamında olumlu etkileri olduğu bilinmektedir, fakat tüm durumlar için ideal bir soğutmadan bahsetmek mümkün değildir. Ürün, alaşım, kalınlık, geometri gibi faktörler, soğutma hızının nihai ürüne etkisini değiştirebilmektedir. Örneğin; et kalınlığı yüksek profillerde su ile soğutma sonucunda daha yüksek seviyelerde kalıntı gerilmeler oluşabilmekte ya da gereğinden hızlı soğutma durumunda yüzeysel çatlaklar oluşabilmektedir. Bu yüzden soğutma hızının da alaşım ve geometriye bağlı olarak optimum şekilde belirlenmesi önemlidir.

Ekstrüzyon sırasındaki soğutma hızının mikro yapı özelliklerine ve mekanik değerlere etkisinin de incelenmesi adına; her iki alaşımdan üretilen profillerin bir kısmı hava ile soğutulmuş, diğer kısmında ise su ile soğutma metodu kullanılmıştır (Şekil 4.25). Böylece soğutma metodunun mekanik özelliklere ve malzemenin iç yapısına olan etkisi incelenmiştir.



**Şekil 4.25.** (a) Primer su soğutma, (b) Sekonder su soğutma, (c) Hava ve su ile soğutma

Soğutma sonrasında, profil içerisindeki kalıntı gerilmeleri almak ve boyutsal doğrusalığı sağlamak amacıyla soğuk germe işlemi uygulanmış ve lama profiller istenen boyda kesilmiştir.



**Şekil 4.26.** Ekstrüzyonla üretilmiş magnezyum profiller

Bu aşamanın ardından; mekanik değerlerin ve içyapı özelliklerinin belirlenmesine yönelik test çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

#### 4.8.1 Çekme Testi Sonuçlarının Kıyaslanması

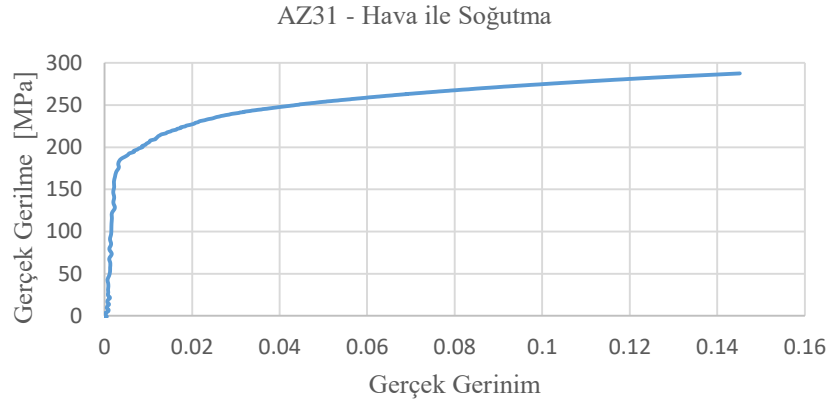
Soğutma türüne bağlı olarak ekstrüzyon doğrultusuna göre hazırlanan AZ31 alaşımı numunelerine ait mekanik değerler Çizelge 4.6’da, AZ31 alaşımına ait Gerçek Gerilme – Gerçek Gerinim (True Stress – True Strain) grafiklerinin kullanılan soğutma türlerine göre karşılaştırılması Şekil 4.27’de sırasıyla verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** Soğutma yöntemlerine göre AZ31 profilinin çeşitli doğrultulardaki ortalama akma ve çekme mukavemeti değerleri

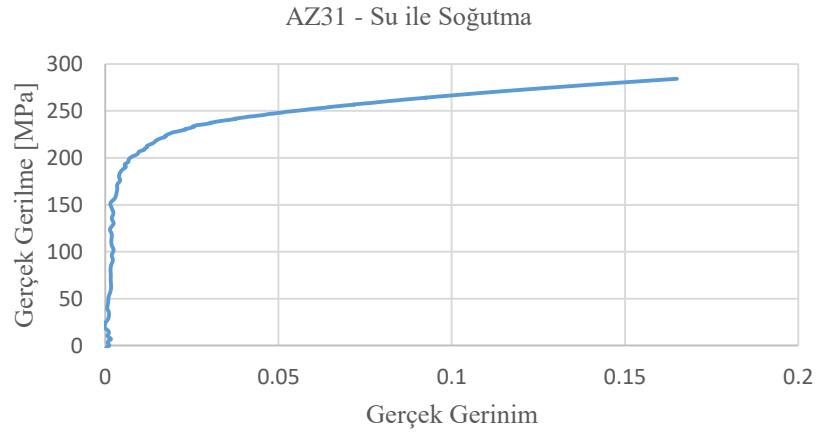
Ekstrüzyon Doğrultusu	AZ31 – HAVA SOĞUTMA			AZ31 – SU SOĞUTMA		
	Akma Mukavemeti (Re) (MPa)	Çekme Mukavemeti (Rm) (MPa)	Gerçek Gerinim (%)	Akma Mukavemeti (Re) (MPa)	Çekme Mukavemeti (Rm) (MPa)	Gerçek Gerinim (%)
0°	194,60	249,30	17,70	199,90	244,60	20,93
45°	112,80	231,50	29,73	111,80	229,60	23,53
90°	95,10	252,40	21,47	99,90	249,90	19,03

Ekstrüzyon doğrultusundan alınmış ve hava ile soğutulmuş AZ31 alaşımının akma mukavemeti (Re) 194,60 MPa, çekme mukavemeti (Rm) 249,30 MPa, gerçek uzama değeri %17,70 iken; su ile soğutulmuş AZ31 alaşımının akma mukavemeti (Re) 199,90 MPa, çekme mukavemeti (Rm) 244,60 MPa ve gerçek uzama değeri %20,93 olarak ölçülmüştür. Su ile soğutulmuş profillerin akma mukavemeti ve uzama değerleri daha yüksek iken, su ile soğutulmuş profilin çekme mukavemetinin az miktarda da olsa daha yüksek olduğu görülmektedir. 45° ve 90° yönlerinden alınan numunelerde hava ile soğutulmuş profilin gerinim değerinin, su ile soğutulmuş profilin gerinim değerine kıyasla çok az miktarda daha yüksek olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, AZ31 alaşımında kullanılan soğutma türünün alaşımın mekanik özellikleri üzerinde çarpıcı bir etkiye sahip olmadığı ancak yönlerine bağlı olarak gerinim değerlerinin üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir.





(a)

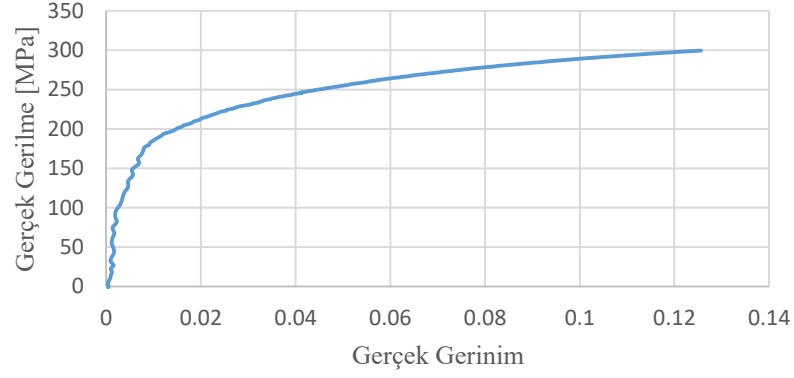


(b)

**Şekil 4.27.** AZ31 alaşımının kullanılan soğutma yöntemine göre ekstrüzyon doğrultusundan alınan numunelerine ait çekme testi sonuçları: a) Hava soğutma, b) Su soğutma

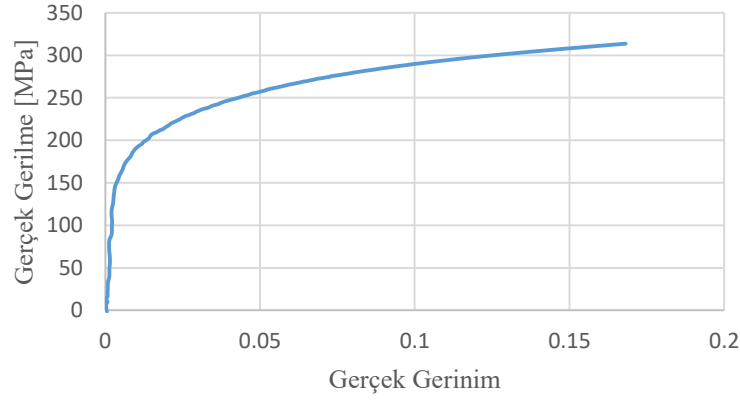
Soğutma türüne bağlı olarak ekstrüzyon doğrultusuna göre hazırlanan AM50 alaşımı numunelerine ait mekanik değerler Çizelge 4.7’de, AM50 alaşımına ait Gerçek Gerilme – Gerçek Gerinim (True Stress – True Strain) grafiklerinin kullanılan soğutma türlerine göre karşılaştırılması Şekil 4.28’de sırasıyla verilmiştir.

AM50 - Hava ile Soğutma



(a)

AM50 - Su ile Soğutma



b)

**Şekil 4.28.** AM50 alaışımının kullanılan soğutma yöntemine göre ekstrüzyon doğrultusundan alınan numunelerine ait çekme testi sonuçları: a) Hava soğutma, b) Su soğutma

**Çizelge 4.7.** Soğutma yöntemlerine göre AM50 profilinin çeşitli doğrultulardaki ortalama akma ve çekme mukavemeti değerleri

Ekstrüzyon Doğrultusu	AM50 – HAVA SOĞUTMA			AM50 – SU SOĞUTMA		
	Akma Mukavemeti (Re) (MPa)	Çekme Mukavemeti (Rm) (MPa)	Gerçek Gerinim (%)	Akma Mukavemeti (Re) (MPa)	Çekme Mukavemeti (Rm) (MPa)	Gerçek Gerinim (%)
0°	169,40	264,60	14,86	170,40	264,90	18,48
45°	145,50	251,90	24,35	146,70	252,70	25,45
90°	152,70	274,30	24,81	159,60	273,30	17,64

Hava ile soğutulmuş AM50 alaşımının akma mukavemeti (Re) 169,40 MPa ve çekme mukavemeti (Rm) 264,60 MPa iken; su ile soğutulmuş AM50 alaşımının akma mukavemeti (Re) 170,40 MPa ve çekme mukavemeti (Rm) 264,90 MPa olarak elde edilmiştir. AM50 profilinden elde edilen gerinim değerleri kıyaslandığında ekstrüzyon doğrultusunda (0°) su ile soğutma elde edilen değerler, hava ile soğutulmuş numunelerden elde edilen değerlere kıyasla daha yüksektir. 45° doğrultusundan alınan numunelerin gerinim değerleri birbirine oldukça yakın iken 90° doğrultusundan alınan numunelerde hava ile soğutulmuş profilin gerinim değerinin, su ile soğutulmuş profilin gerinim değerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Profillerin ekstrüzyon doğrultusundaki test sonuçlarının ortalamasına göre akma mukavemeti ve çekme mukavemeti değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. AM50 alaşımının ekstrüzyon yönünden çıkarılan numunelerine ait Gerçek Gerilme – Gerçek Gerinim grafikleri incelendiğinde, her iki profilin de gerçek gerinim değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, AM50 alaşımında kullanılan soğutma türünün alaşımın mekanik özellikleri üzerinde çarpıcı bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir.

Her iki alaşımın ve soğutma türlerinin test sonuçlarının ortalamalarına göre karşılaştırması Çizelge 4.8’de verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, AM50 alaşımına ait profilin ekstrüzyon doğrultusunda (0°) ortalama akma mukavemeti değerleri her iki soğutma türü için de AZ31 alaşımına ait profilin ekstrüzyon doğrultusundan (0°) alınan numunelerin ortalama akma mukavemeti değerlerine kıyasla daha düşüktür. Ancak 45° ve 90° doğrultularından alınan sonuçlara göre her iki soğutma türü için de AM50 alaşımına ait ortalama akma ve çekme mukavemeti değerleri AZ31 alaşımına kıyasla daha yüksektir. Her üç doğrultudan alınan numunelerin ortalama çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde ise hem hava soğutmada hem de su soğutmada AM50 alaşımının ortalaması AZ31 alaşımına kıyasla daha yüksektir. İki alaşımın soğutma türlerine göre gerinim değerleri kıyaslandığında ise hava ile soğutulmuş numunelerde 0° ve 45° doğrultusundan alınan numunelerde AZ31 alaşımının AM50 alaşımına kıyasla daha yüksek gerinim değerlerine sahip olduğu; ancak 90° doğrultusundan alınan numunelerde AM50 alaşımının gerinim değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Su ile soğutulmuş numunelerde 0° ve 90° doğrultusunda alınan numunelerde AZ31 alaşımının AM50 alaşımının gerinim değerlerine kıyasla daha yüksek olduğu; ancak 45°

doğrultusundan alınan numunelerde AM50 alaşımının gerinim değerinin AZ31 alaşımından daha yüksek olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.8.** AZ31 ve AM50 alaşımlarının soğutma türlerine göre ortalama mekanik değerlerinin karşılaştırması

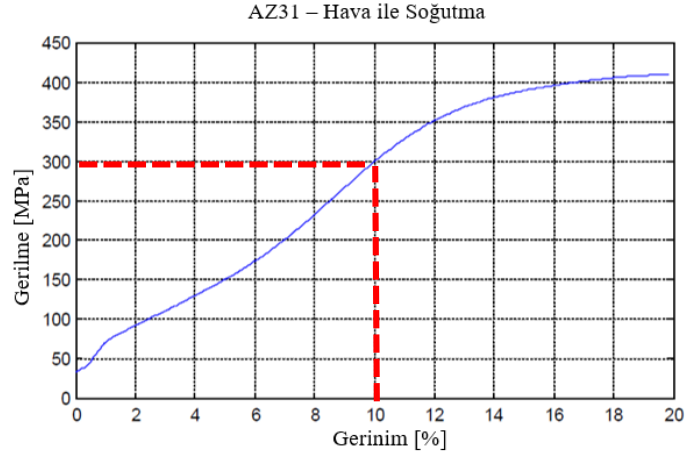
Alaşım ve Ekstrüzyon Doğrultusu	HAVA SOĞUTMA			SU SOĞUTMA		
	Ortalama Akma Mukavemeti (MPa)	Ortalama Çekme Mukavemeti (MPa)	Gerçek Gerinim (%)	Ortalama Akma Mukavemeti (MPa)	Ortalama Çekme Mukavemeti (MPa)	Gerçek Gerinim (%)
AZ31 (0°)	194,60	249,30	17,70	199,90	244,60	20,93
AM50 (0°)	169,40	264,60	14,86	170,40	264,90	18,48
AZ31 (45°)	112,80	231,50	29,73	111,80	229,60	23,53
AM50 (45°)	145,50	251,90	24,35	146,70	252,70	25,45
AZ31 (90°)	95,10	252,40	21,47	99,90	249,90	19,03
AM50 (90°)	152,70	274,30	24,81	159,60	273,30	17,64

Sonuç olarak; soğutma türlerinin ilgili alaşımların mekanik özellikleri üzerine etkisini incelendiğinde, uygulanan her iki soğutma türünün de alaşımların mekanik özelliklerinin üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılmıştır. AZ31 ve AM50 alaşımının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması yapıldığında ise AZ31 alaşımının ekstrüzyon doğrultusunda AM50 alaşımına kıyasla daha yüksek akma mukavemeti değerine sahip olduğu ancak kalan doğrultularda akma mukavemetinin daha düşük olduğu; AM50 alaşımının ise çekme mukavemeti değerinin AZ31 alaşımına kıyasla her üç doğrultuda da daha yüksek olduğu görülmektedir.

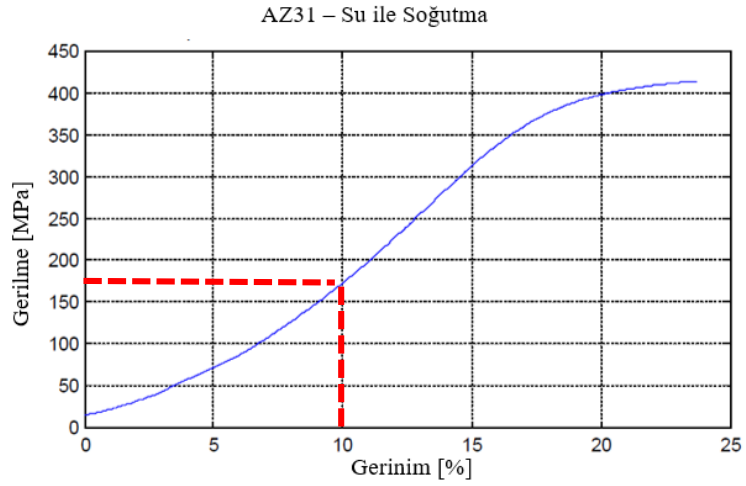
ASTM-B107 olarak bilinen magnezyum ekstrüze profillerin standart şartnamesi incelendiğinde; elde edilen çekme testi sonuçlarının, her iki alaşım için standartta belirtilen değerlere uygun olduğu gözlemlenmiştir. Burada soğutma türünün etkisi dışında vurgulanması gereken konu; alüminyum alaşımlarının aksine, magnezyum ekstrüze profillerde ekstrüzyon doğrultusunda ve ekstrüzyon yönüne dik alınan numunelerle gerçekleştirilen testler arasında %50'ye varan mukavemet düşüşünün gözlemlenmiş olması ve anizotropik davranışın oldukça belirgin olmasıdır. Bu konu; ekstrüze magnezyum profiller ile gerçekleştirilecek alternatif ürün geliştirme süreçlerinde dikkate alınması ve üzerinde durulması gereken önemli bir durumdur.

#### 4.8.2. Basma Testi Sonuçlarının Kıyaslanması

Soğutma türüne bağlı olarak ekstrüzyon doğrultusuna göre hazırlanan AZ31 alaşımı numunelerine ait akma ve çekme mukavemeti değerleri Çizelge 4.9’da, AZ31 alaşımına ait Gerilme – Gerinim grafiklerinin kullanılan soğutma türlerine göre karşılaştırılması Şekil 4.29’da sırasıyla verilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 4.29.** AZ31 alaşımının kullanılan soğutma yöntemlerine göre ekstrüzyon doğrultusundan alınan numunelerine ait basma testi sonuçları: a) Hava soğutma, b) Su soğutma

**Çizelge 4.9.** Soğutma yöntemlerine göre AZ31 profilinin çeşitli doğrultulardaki ortalama maksimum gerilme değerleri

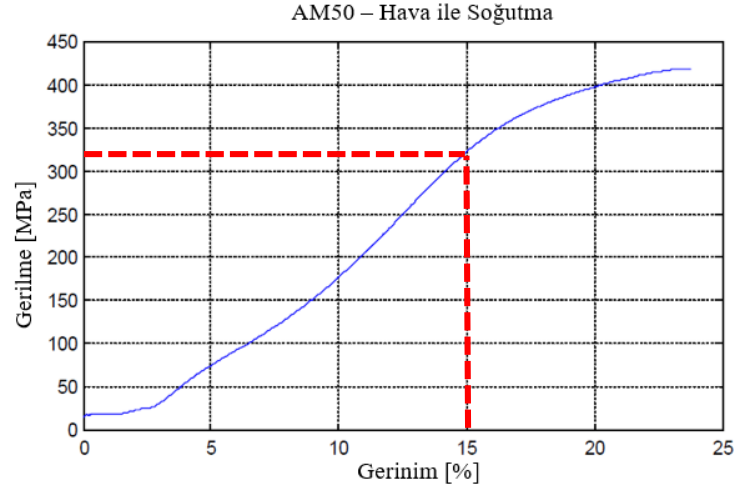
	<b>AZ31 – HAVA SOĞUTMA</b>	<b>AZ31 – SU SOĞUTMA</b>
<b>Ekstrüzyon Doğrultusu</b>	<b>Maksimum Gerilme (MPa)</b>	<b>Maksimum Gerilme (MPa)</b>
0°	427,40	419,10
45°	484,30	473,20
90°	422,10	405,30

Hava ile soğutulmuş AZ31 alaşımının maksimum gerilme değeri 427,40 MPa iken; su ile soğutulmuş AZ31 alaşımının maksimum gerilme değeri 419,10 MPa olarak ölçülmüştür. AZ31 alaşımının ekstrüzyon yönünden alınan basma testi numunelerine ait Gerilme – Gerinim grafikleri incelendiğinde, her iki profilin de maksimum gerilme değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. AZ31 alaşımında kullanılan soğutma türünün basma testi sonuçları özelinde alaşımın mekanik özellikleri üzerinde çarpıcı bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir.

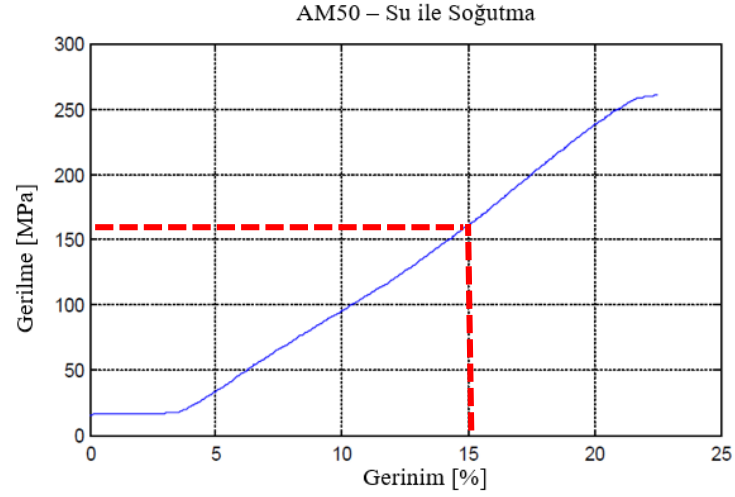
Soğutma türüne bağlı olarak ekstrüzyon doğrultusuna göre hazırlanan AM50 alaşımı numunelerine ait akma ve çekme mukavemeti değerleri Çizelge 4.10’da, AM50 alaşımına ait Gerilme – Gerinim grafiklerinin kullanılan soğutma türlerine göre karşılaştırılması Şekil 4.30’da sırasıyla verilmiştir.

**Çizelge 4.10.** Soğutma yöntemlerine göre AM50 profilinin çeşitli doğrultulardaki ortalama maksimum gerilme değerleri

	<b>AM50 – HAVA SOĞUTMA</b>	<b>AM50 – SU SOĞUTMA</b>
<b>Ekstrüzyon Doğrultusu</b>	<b>Maksimum Gerilme (MPa)</b>	<b>Maksimum Gerilme (MPa)</b>
0°	437,80	339,90
45°	500,20	469,40
90°	450,80	448,40



(a)



(b)

**Şekil 4.30.** AM50 alaşımının kullanılan soğutma yöntemlerine göre ekstrüzyon doğrultusundan alınan numunelerine ait basma testi sonuçları: a) Hava soğutma, b) Su soğutma

Basma testi sonuçlarına göre; hava ile soğutulmuş AM50 alaşımının maksimum gerilme değeri 437,80 MPa iken; su ile soğutulmuş AM50 alaşımının maksimum gerilme değeri 339,90 MPa olarak ölçülmüştür. AM50 alaşımının ekstrüzyon yönünden çıkarılan basma numunelerine ait Gerilme – Gerinim grafikleri incelendiğinde, her iki profilin maksimum gerilme değerlerinin birbiri arasında oldukça fazla fark olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, AM50 alaşımında kullanılan soğutma türünün, basma testi özelinde alaşımın mekanik özellikleri üzerinde önemli etkisi olduğu; su ile soğutulan profillerde basma

testlerinde elde edilen maksimum gerilme değerinin hava ile soğutulan numunelerin sonuçlarına kıyasla daha düşük olduğu sonucuna varılmaktadır.

Her iki alaşımın ve soğutma türlerinin test sonuçlarının, ortalamalarına göre karşılaştırması izelge 4.11’de verilmektedir. Hava ile soğutulmuş AZ31 profilin 0° yönünde hazırlanmış numunelerine ait basma testi sonucuna göre elde edilen ortalama maksimum gerilme değeri, su ile soğutulmuş profilin ortalama maksimum gerilme değerine kıyasla çok yüksek olmayan bir farklılık değeri göstermektedir. Ancak AM50 alaşımında hava ile soğutulmuş profilin 0° yönünde hazırlanmış numunelerine ait basma testlerinden elde edilen ortalama maksimum gerilme değerinin, su ile soğutulmuş profilin ortalama maksimum gerilme değerinden oldukça yüksek olduğu görülmektedir. 45° yönünde hazırlanmış numunelere ait basma testi sonuçlarında da her iki alaşım için de hava ile soğutma sonucunda elde edilmiş maksimum gerilme değerleri, su ile soğutulmuş numunelerin sonuçlarına kıyasla daha yüksektir. Son olarak 90° yönünde hazırlanmış numunelere ait basma testi sonuçlarına göre, maksimum gerilme değeri AM50 alaşımı için çok daha fazladır.

**Çizelge 4.11.** AZ31 ve AM50 alaşımlarının soğutma türlerine göre maksimum ortalama gerilme değerlerinin karşılaştırması

Profil Alaşımları	HAVA SOğUTMA	SU SOğUTMA
	Ortalama Maksimum Gerilme (MPa)	Ortalama Maksimum Gerilme (MPa)
AZ31 (0°)	427,40	419,10
AM50 (0°)	437,80	339,90
AZ31 (45°)	484,30	473,20
AM50 (45°)	500,20	469,40
AZ31 (90°)	422,10	405,30
AM50 (90°)	450,80	448,40

Basma testi sonuçları değerlendirildiğinde; çekme testinde elde edilen verilere göre yapıdaki davranışın oldukça farklı olduğu gözlemlenmiştir. elik ve alüminyum malzemelerde ürün tasarımı esnasında sonlu eleman analizlerinde kullanılan ve çekme testlerine dayandırılan malzeme modellerinin aksine; magnezyum alaşımlarında çekme



ve basma davranışları için farklı malzeme modellerinin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu durum; magnezyum ürün tasarımı esnasında üzerinde çalışılması gereken önemli konulardan biridir.

#### 4.8.3 Sertlik Ölçümlerinin Karşılaştırılması

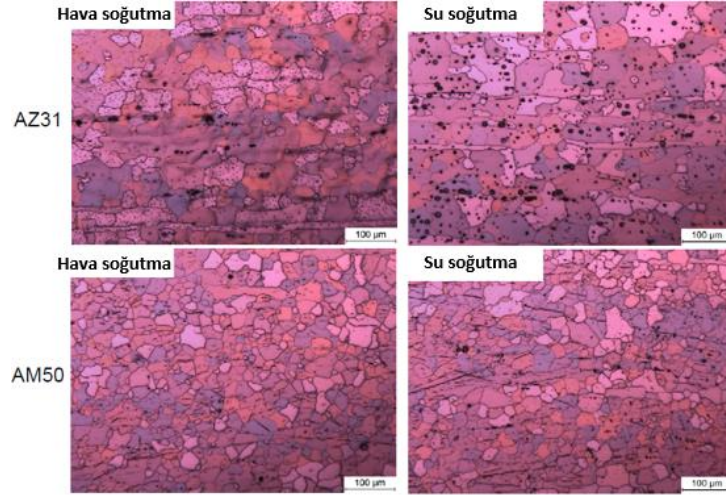
Her iki alaşım için, ekstrüzyon sonrası farklı metotlarla soğutulmuş numunelere ilişkin ortalama sertlik değerleri Çizelge 4.12’de verilmiştir. Her iki alaşım için; su ile soğutulmuş numunelerde elde edilen sertlik değerleri, hava ile soğutulmuş numunelerden elde edilen değerlerden bir miktar yüksek olduğu, ancak farkın belirgin olmadığı gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.12.** Sertlik değerleri

Malzeme ve Soğutma Tipi	AZ31 (Hava)	AZ31 (Su)	AM50 (Hava)	AM50 (Su)
Sertlik Değeri (HB)	55,8	56,5	56,9	58,7

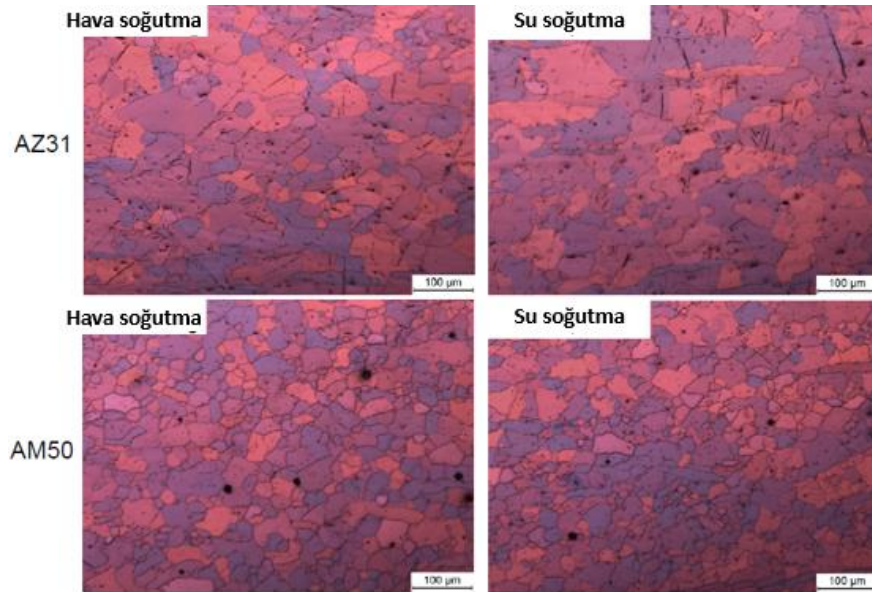
#### 4.8.4. İçyapı İncelemelerinin Karşılaştırılması

Metalografik hazırlık aşamalarından sonra optik mikroskop ile numunelerin mikro yapı analizleri yapılmıştır. Soğutma türlerine ve kullanılan alaşımlara göre 100 kat büyütmede profillerin boylamasına kesitlerinin mikro yapı görüntüleri alınmıştır (Şekil 4.31). Elde edilen görüntülere göre, AM50 alaşımının AZ31 alaşımına göre tane boyutlarının daha küçük olduğu ve soğutma türünün tane yapısı üzerine belirgin bir etkisi olmadığı görülmektedir.



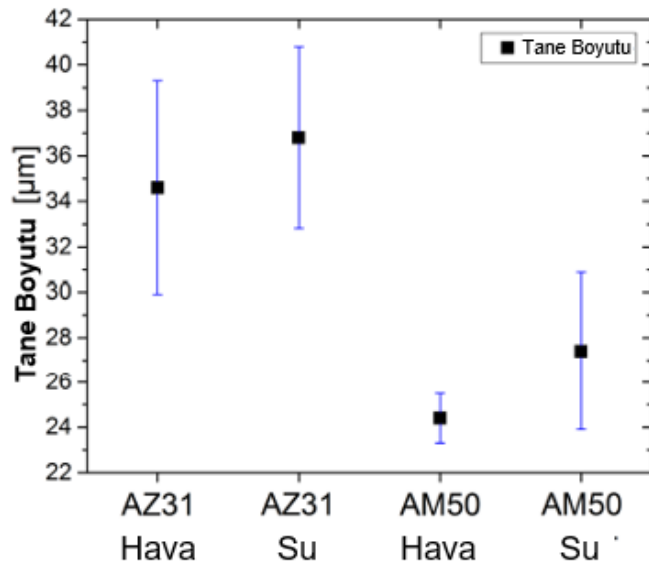
**Şekil 4.31.** Magnezyum profillerin alaşımlarına ve soğutma türlerine göre boylamasına kesitlerinden alınan mikro yapı görüntüleri

Soğutma türlerine ve kullanılan alaşımlara göre 100 kat büyütmede profillerin enine kesitlerinin mikro yapı görüntüleri alınmıştır (Şekil 4.32). Elde edilen görüntülere göre, boyuna kesitte alınan mikro yapı görüntülerinde de olduğu gibi AM50 alaşımının tane yapısının, AZ31 alaşımının tane yapısına kıyasla daha küçük olduğu ve soğutma türünün tane yapısının üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmektedir.



**Şekil 4.32.** Magnezyum profillerin alaşımlarına ve soğutma türlerine göre enlemesine kesitlerinden alınan mikro yapı görüntüleri

Numunelerin alaşım türlerine ve bu alaşımlara uygulanan soğutma türlerine göre yapılan mikro yapı analizine göre yapıda oluşan tanelerin boyutlarının  l m  Şekil 4.33'te verilmiştir. Yapılan  l mlerde AZ31 alaşımına ait tanelerin boyutlarının, AM50 alaşımına ait tanelerin boyutlarından daha büyük olduğu görülmektedir. Ölüm sonuçları değerlendirildiğinde tane boyutunun en küçük ve boyut dağılımının en dar olduğu alaşım ve soğutma türünün AM50 alaşımının havada soğutulması ile elde edildiği; tane boyutunun en büyük ve boyut dağılımı aralığının en geniş olduğu alaşım ve soğutma türünün AZ31 alaşımının suda soğutulmasıyla elde edildiği sonucuna varılmaktadır.

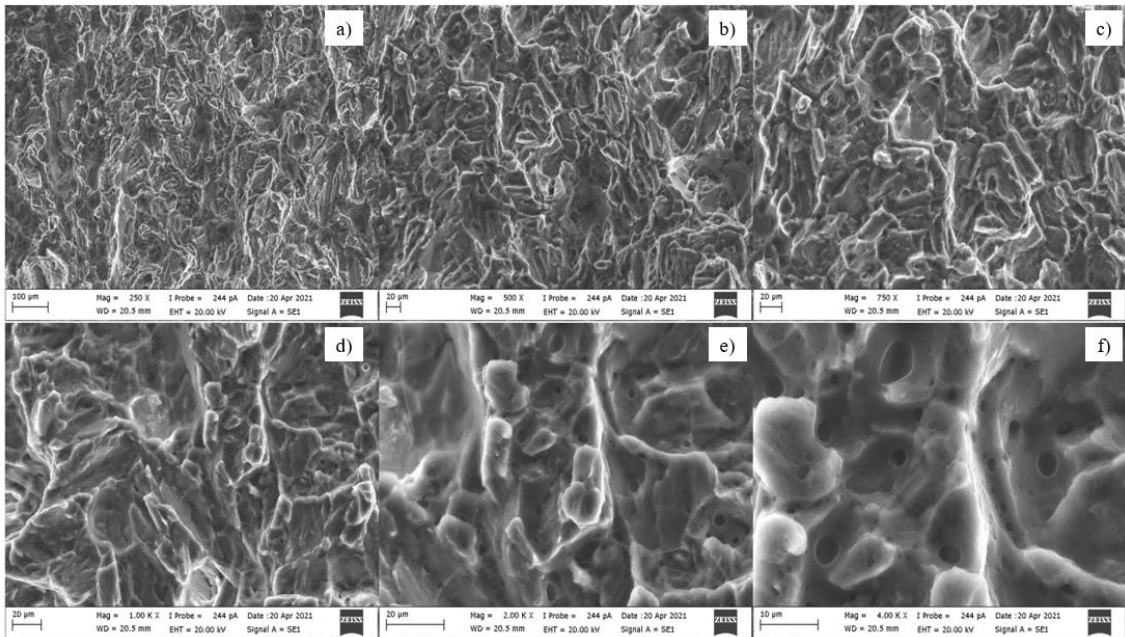


**Şekil 4.33.** Magnezyum profillerin alaşımlarına ve soğutma türlerine göre  l len tane boyutları

Sonuç olarak yapılan analizler ele alındığında, profillere ait mikro yapı görüntülerinde iki farklı yapıda tane formu gözlemlenmektedir. Bunlardan ilki yeniden kristalize olmuş küresel formda olan taneler ve ikincisi ise dökümün doğası gereği yapısında oluşturmuş olduğu deforme olmuş uzun taneler olarak sınıflandırılabilir. AM50 alaşımı, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de de g r ld ği üzere AZ31 alaşımına kıyasla daha homojen bir yapı sergilemektedir ve alaşımın yapısında bulunan tanelerin b y kl ği de daha k c kt r. Profillere uygulanan farklı soğutma tekniklerinin ise malzemenin mikro yapısal özellikleri açısından belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmektedir.

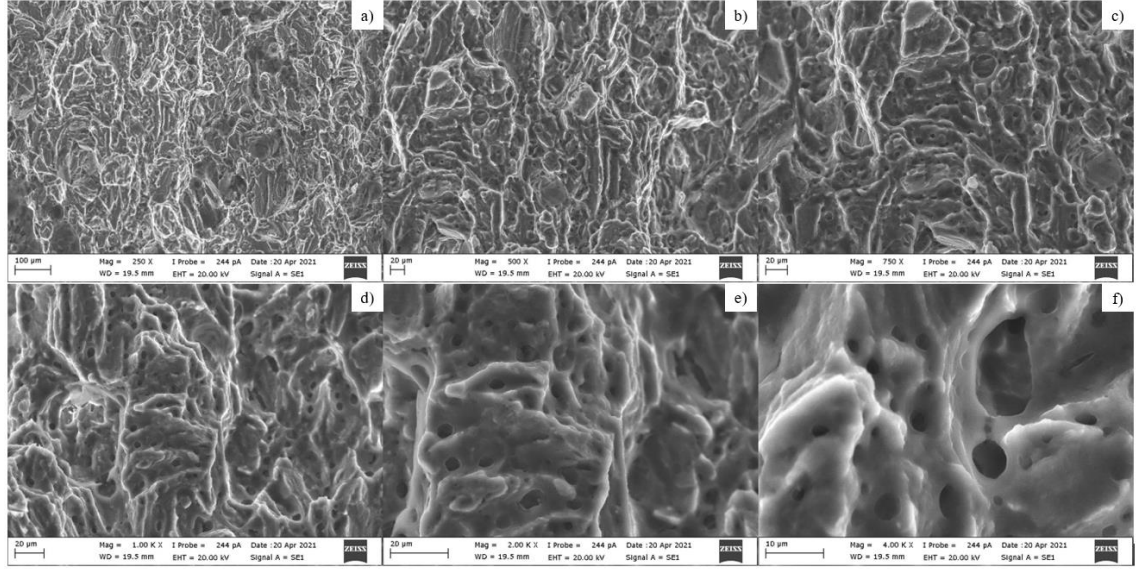
#### 4.8.5. Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

Çekme testi gerçekleştirildikten sonra ekstrüde edilmiş ve hava ile soğutulmuş AZ31 alaşımlı numunenin kırık yüzeyinden alınan tipik SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 4.34'te gösterilmektedir. Hava ile soğutulan AZ31 alaşımının kırık yüzeyine ait SEM mikroyapı görüntülerine göre, alaşım tipik sünek kırılma yüzeyi göstermekte olup; ilgili yüzeyde birçok çukurcuk oluşumu tespit edilmiştir (Somekawa & Mukai, 2005). Kırık yüzey incelemesinde, söz konusu çukurcuklar ile birlikte klivaj kırılma benzeri yapı ve mikro porozite oluşumları tespit edilmiştir (Rashad vd., 2016).



**Şekil 4.34.** AZ31-Hava ile soğutulmuş numunede kırılma yüzeyine ilişkin SEM görseli

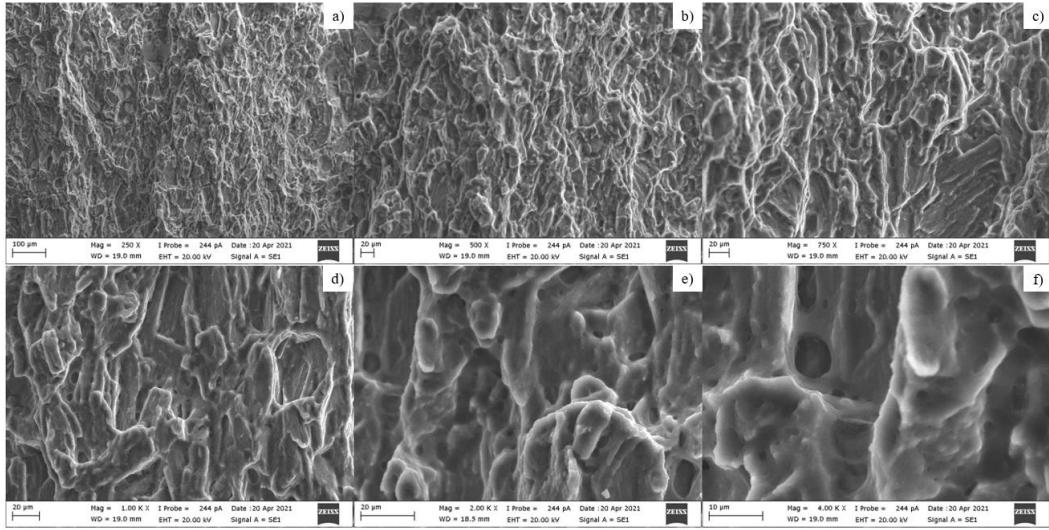
Çekme testi gerçekleştirildikten sonra ekstrüde edilmiş ve su ile soğutulmuş AZ31 alaşımlı numunenin kırık yüzeyinden alınan tipik SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 4.35'te gösterilmektedir. Su ile soğutulan AZ31 alaşımının kırık yüzeyine ait SEM mikroyapı görüntülerine göre, alaşım tipik sünek kırılma yüzeyi göstermekte olup; ilgili yüzeyde birçok çukurcuk oluşumu tespit edilmiştir. Kırık yüzey incelemesinde, söz konusu çukurcuklar ile birlikte klivaj kırılma benzeri yapı, hava ile soğutulan AZ31 alaşımının kırılma yüzeyine kıyasla daha az oluştuğu ve sünek yapıya daha yaklaştığı tespit edilmiştir. Mikro porozite oluşumları su ile soğutulan AZ31 alaşımında da belirgin bir şekilde görülmektedir.



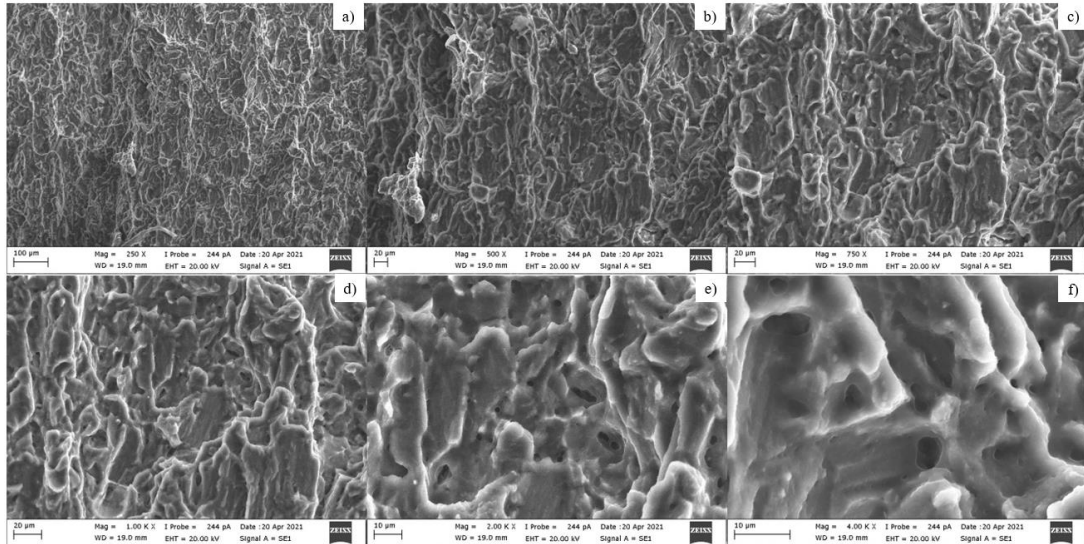
**Şekil 4.35.** AZ31-Su ile soğutulmuş numunede kırılma yüzeyine ilişkin SEM görseli

Sonuç olarak, soğutma yöntemine bağlı olarak AZ31 alaşımının çekme testi numunesinin kırılma yüzeyinde yapılan incelemeler sonucunda yüzey yapısı olarak benzerlik gösterdiği; ancak su ile soğutulan alaşımın yüzeyinin daha sünek kırılma davranışı gösterdiği görülmektedir. İki farklı soğutma türünden elde edilen kırılma yüzeylerinde de sünek kırılma ve çukurcuk karakteristiği bulunmaktadır.

Çekme testi gerçekleştirildikten sonra ekstrüde edilmiş ve hava ile soğutulmuş AM50 alaşımlı numunenin kırık yüzeyinden alınan tipik SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 4.36’da gösterilmektedir. Döküm AM50 alaşımlarının kırık yüzey incelemelerinde yaygın olarak klivaj benzeri morfoloji tespit edilse de (Yang, Liu, Liu, & Song, 2015), hava ile soğutulan AM50 alaşımının kırık yüzeyine ait SEM mikroyapı görüntülerine göre alaşım belirgin bir şekilde sünek kırılma yüzeyi göstermekte olup; mikroyapı görüntülerinde sünek kırılma yüzeyinde yaygın olarak görülen çukurcuk oluşumu gözlemlenmiştir. Mikro porozite oluşumları hava ile soğutulan AM50 alaşımında da belirgin bir şekilde görülmektedir.



**Şekil 4.36.** AM50-Hava ile soğutulmuş numunede kırılma yüzeyine ilişkin SEM görseli Çekme testi gerçekleştirildikten sonra; ekstrüde edilmiş ve su ile soğutulmuş AM50 alaşımlı numunenin kırık yüzeyinden alınan tipik SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 4.37’de gösterilmektedir. Hava ile soğutulan AM50 alaşımı ile oldukça benzer kırılma morfolojisi gösteren su soğutma numunesinden elde edilen SEM mikroyapı görüntülerinde de alaşımın sünek kırılma yüzeyi gösterdiği; ilgili yüzeyde sünek kırılma yüzeyinde yaygın olarak görülen çukurcuk oluşumu gözlemlenmiştir. Mikro porozite oluşumları su ile soğutulan AM50 alaşımında da belirgin bir şekilde görülmektedir.



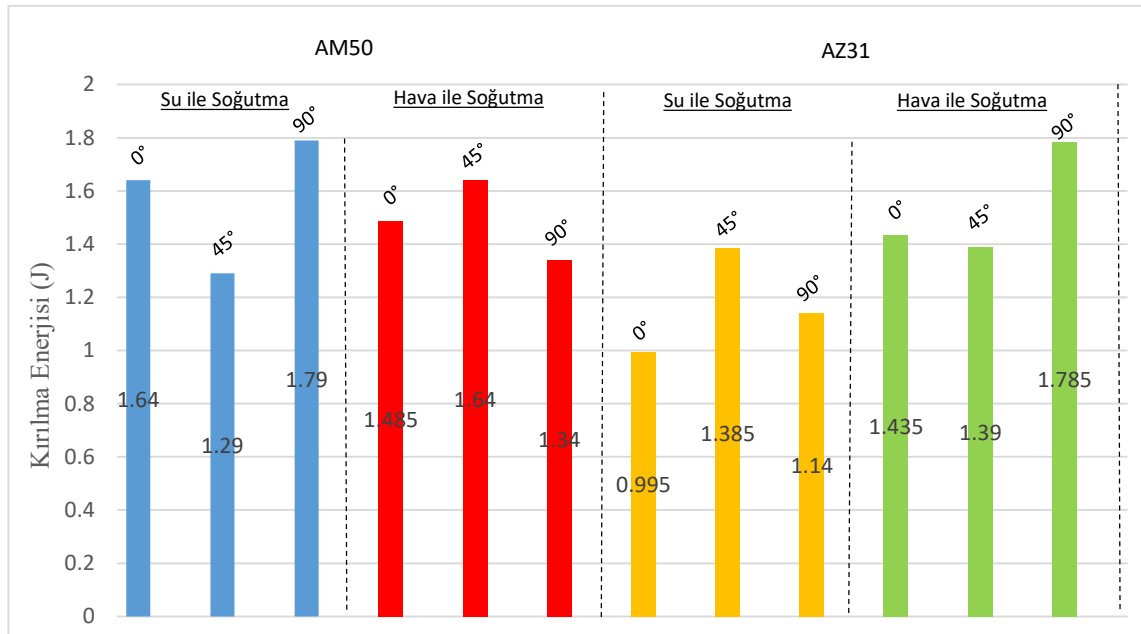
**Şekil 4.37.** AM50-Su ile soğutulmuş numunede kırılma yüzeyine ilişkin SEM görseli

Sonuç olarak, soğutma yöntemine bağlı olarak AM50 alaşımının çekme testi numunesinin kırılma yüzeyinde yapılan incelemeler sonucunda yüzey yapısı olarak oldukça benzerlik gösterdiği; iki farklı soğutma türünden elde edilen kırılma yüzeylerinde de sünek kırılma ve çukurcuk karakteristiği gözlemlenmiştir.

İki farklı alaşımın soğutma türlerine bağlı olarak karşılaştırması yapıldığında, AM50 alaşımının AZ31 alaşımına kıyasla belirgin bir şekilde daha sünek bir kırılma yüzey morfolojisi gösterdiği görülmektedir. Alaşımların soğutma türüne bağlı olarak kıyaslaması yapıldığında ise AZ31 alaşımında su ile soğutulan numunelerin daha sünek davranış gösterdiği görülürken; AM50 alaşımında her iki soğutma türünde de oldukça benzer yapılar elde edilmiştir.

#### 4.8.6. Charpy Çentik Darbe Testi Sonuçlarının Kıyaslanması

Çekme ve basma testlerine ilaveten, gerçekleştirilen charpy çentik darbe testleri ile her iki alaşımın farklı soğutma türlerindeki kırılma enerjileri elde edilmiştir (Şekil 4.38).



Şekil 4.38. Charpy çentik-darbe testi sonuçları

Elde edilen sonuçlara göre; AM50 magnezyum alaşımının AZ31 alaşımına göre izotropik davranış eğiliminin daha fazla olduğu ve kırılma enerjisi değerinin bir miktar daha yüksek

olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca magnezyum alaşımlarında, soğutma tipi ile doğrudan herhangi bir korelasyon kurulamamıştır.



## 5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında; AZ31 ve AM50 magnezyum alaşımlarının ekstrüzyon prosesi, ilk kalıp tasarım sürecinden başlayarak, üretim ve soğutma aşamalarını da kapsayacak şekilde detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmada ekstrüzyon prosesinin sonlu eleman modelleri ile simülasyonlarının gerçekleştirilebilmesi adına ilk etapta AZ31 ve AM50 magnezyum alaşımları için sıcak basma testleri yardımıyla malzeme karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve Zener-Hollomon malzeme parametreleri sunulmuştur.

AM50 ve AZ31 magnezyum alaşımlarından üretilecek 70x4 mm ölçülü dikdörtgen kesitli solid profil için hem kalıp geometrisi hem de kalıp sıcaklığı, biyet sıcaklığı ve konteyner sıcaklığını içeren proses parametreleri dikkate alınarak sanal ekstrüzyon analizleri yardımıyla optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve bilgisayar destekli analiz sonuçlarına göre en uygun parametreler belirlenmiştir. Gerçekleştirilen ekstrüzyon analizlerine göre; baskı hızı ve biyet sıcaklığının, profil çıkış sıcaklığı üzerinde en etkili parametreler olduğu gözlemlenmiştir. Optimizasyon çalışmasında L18 Taguchi ortogonal tablosu kullanılmış, bu sayede 243 test seti ile gerçekleştirilebilecek çalışma 18 farklı parametre seti ile gerçekleştirilebilmiştir. Belirlenen optimum proses parametrelerine göre kalıp tasarım ve üretim işlemi gerçekleştirilmiş, bu parametreler kullanılarak deneysel ekstrüzyon çalışmaları tamamlanmış ve elde edilen veriler bilgisayar destekli analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Simülasyon ve deneysel veriler karşılaştırıldığında; sıcaklık değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Baskı kuvveti kıyaslamasında ise; simülasyon sonuçları test verilerine ortalama %81 seviyelerinde yaklaşabilmiştir. Buna göre; sıcaklık karşılaştırmasında HyperXtrude yazılımının magnezyum alaşımlarının ekstrüzyonunda efektif bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir. Bununla birlikte; pres kapasitesi de dikkate alınarak gerçekleştirilecek baskı kuvveti hesaplamalarında yazılımdan elde edilen değerlerin güvenle bölgede kalabilmek adına daha yüksek olduğu bilinmelidir. Baskı kuvveti açısından daha hassas sonuçlar alabilmek için; sürtünme davranışı detaylı şekilde irdelenmeli ve malzeme ve prosese özgü bir sürtünme denklemi tanımlanmalıdır. Ayrıca kalıp elemanlarının rijit olarak modellenmesi yerine; deforme olabilecek yapıda ve kalıp

deformasyon analizleriyle birlikte göz önüne alınması, analizlerin daha hassas sonuç vermesi anlamında önemlidir.

Çalışmanın sonraki aşamasında; ekstrüzyon çıkışında kullanılan farklı soğutma metotlarının mekanik özelliklere ve malzemenin içyapı özelliklerine olan etkisi derinlemesine incelenmiş ve ortaya konmuştur. Çekme ve basma testleri ile malzemenin mekanik özellikleri incelenmiştir. Soğutma türünün etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen tüm testlerin sonucunda:

- Profillerde kullanılan soğutma türlerinin alaşımların akma ve çekme mukavemetleri üzerinde belirgin bir etki yaratmadığı ancak gerinim değerleri üzerinde etkisinin olduğu,
- Ekstrüzyon doğrultusunda alınan numunelerde en yüksek gerinim değerlerinin su ile soğutulmuş AZ31 alaşımında, 45° doğrultusunda hava ile soğutulmuş AZ31 alaşımında ve 90° doğrultusunda ise su ile soğutulmuş AM50 alaşımında elde edildiği,
- AM50 alaşımının her üç doğrultu için çekme mukavemeti değerinin ve ekstrüzyon doğrultusu (0°) sonucu hariç akma mukavemeti değerinin de AZ31 alaşımına kıyasla daha yüksek olduğu,
- Basma testi sonuçlarında; hava ile soğutma ile her iki alaşım için de maksimum gerilme değerleri su soğutma ile elde edilen numunelerin maksimum gerilme değerlerine kıyasla daha yüksek olduğu,
- Hava ile soğutulan AM50 alaşımında, hava ile soğutulan AZ31 alaşımına kıyasla her üç doğrultuda da daha yüksek maksimum gerilme değerlerinin elde edildiği,
- AM50 alaşımında soğutma türünün alaşımın özellikle ekstrüzyon yönünde basma özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilen inceleme sonucunda içyapı incelemeleri ve kırılma yüzeylerinin analizi gerçekleştirilmiş ve her iki alaşım için elde edilen sonuçlar ortaya konarak birbirleriyle kıyaslanmıştır. Son olarak üretilen magnezyum alaşımlı profiller için Charpy darbe testleri gerçekleştirilerek enerji sönümleme oranları karşılaştırılmıştır.

AM50 alaşımı, AZ31 alaşımına kıyasla daha homojen bir yapı sergilemektedir ve alaşımın yapısında bulunan tanelerin büyüklüğü de daha küçüktür. Profillere uygulanan farklı soğutma tekniklerinin ise malzemenin mikro yapı özelliklerine belirgin bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.

İki farklı alaşımın soğutma türlerine bağlı olarak SEM görüntülerinin karşılaştırması yapıldığında; AM50 alaşımının AZ31 alaşımına kıyasla belirgin bir şekilde daha sünek bir kırılma yüzey morfolojisi gösterdiği anlaşılmıştır. Alaşımların soğutma türüne bağlı olarak kıyaslaması yapıldığında ise; AZ31 alaşımında su ile soğutulan numunelerin daha sünek davranış gösterdiği görülürken; AM50 alaşımında her iki soğutma türünde de oldukça benzer yapıların elde edildiği gözlemlenmiştir.

Elde edilen test bulguları ışığında; AM50 magnezyum alaşımının AZ31 alaşıma göre izotropik davranış eğiliminin daha fazla olduğu ve kırılma enerjisi değerinin bir miktar daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Charpy çentik darbe testi sonuçlarına göre; nispeten gevrek malzeme olarak bilinen EN-AW 6082 alüminyum alaşımının dahi magnezyum alaşımlarından daha iyi enerji sönümediği gözlemlenmiştir. Diğer bir nokta da; AZ31 ve AM50 alaşımlarının mekanik özellikler ve özgül mukavemet değerı (specific strength) yüksek olduğu için yüksek mukavemet gereksinimi duyulan yapılarda kullanılabilir, fakat enerji sönümlenme parçalarında bu iki alaşımın doğrudan kullanılması uygun görülmemektedir.

## KAYNAKLAR

Alharthi, N. H. (2014). *Analysis of Solid State Bonding in the Extrusion Process of Magnesium Alloys -Numerical Prediction and Experimental Verification* (Doctoral Thesis). Lehigh University. Bethlehem PA, USA.

Arora, J. (2012). *Introduction to Optimum Design*. Elsevier Inc. California, USA.  
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-61700-1>

Avedesian, M. M. & Baker, H. (1999) *ASM Specialty Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys*, ASM International.

Atwell, D. L., & Barnett, M. R. (2007). Extrusion limits of magnesium alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 38 A(12), 3032–3041. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9323-2>

Ayer, Ö., Bingöl, S., & Karakaya, İ. (2019). An extrusion simulation of an aluminum profile by porthole die. *Vibroengineering Procedia*, 27(October), 139–144.  
<https://doi.org/10.21595/vp.2019.20958>

Bakhtiani, T. P. (2015). *Optimization of Modular Die Design in Extrusion Process* (Doctoral Thesis). Purdue University. Indianapolis, Indiana.

Barnett, M. R. (2007). Twinning and the ductility of magnesium alloys. Part I: “Tension” twins. *Materials Science and Engineering A*, 464(1–2), 1–7.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.037>

Bettles, C. J., & Barnett, M. R. (2012). *Advances in Wrought Magnesium Alloys: Fundamentals of Processing, Properties and Applications*. Elsevier, 478.  
<https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-968-0.50017-X>

Bettles, C. J., & Gibson, M. A. (2005). Current wrought magnesium alloys: Strengths and weaknesses. *Jom*, 57(5), 46–49. <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0095-0>

Biçer, N. (2020). *Gövde Borulu Isı Değiştiricilerin Yeni Nesil Perdeli Olarak Optimum Tasarımı, Prototip İmalatı ve Testi* (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya.

Blawert, C., Hort, N., & Kainer, K. U. (2004). Automotive applications of magnesium and its alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 57(4), 397–408.

Busk, R. S. (1950). Lattice Parameters of Magnesium Alloys. *Transactions of the American Institute of Mining*. 188 (December), 1460–1464.

- Caceres, C. H., Mann, G. E., & Griffiths, J. R. (2011). Grain size hardening in Mg and Mg-Zn solid solutions. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 42(7), 1950–1959. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0599-2>
- Cai, S., Lei, T., Li, N., & Feng, F. (2012). Effects of Zn on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Mg-Zn alloys. *Materials Science and Engineering C*, 32(8), 2570–2577. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.07.042>
- Ceretti, E., Mazzoni, L., & Giardini, C. (2007). 3D FEM geometry and material flow optimization of porthole-die extrusion. *AIP Conference Proceedings*, 908, 419–424. <https://doi.org/10.1063/1.2740847>
- Chen, Y., Wang, Q., Peng, J., Zhai, C., & Ding, W. (2007). Effects of extrusion ratio on the microstructure and mechanical properties of AZ31 Mg alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1–3), 281–285. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.08.012>
- Christian, J. W., & Mahajan, S. (1995). Deformation Twinning. *Physica Status Solidi (B)*, 191(2), 267–281. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221910204>
- Czerwinski, F. (2008). *Magnesium Injection Molding*. Springer, USA.
- Dahle, A. K., Lee, Y. C., Nave, M. D., Schaffer, P. L., & StJohn, D. H. (2001). Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminum alloys. *Journal of Light Metals*, 1(1), 61–72. [https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(00\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(00)00007-9)
- Demir, İ. D. K. (2020). *AZ63 Magnezyum Alaşımlarının Kriyojenik İşlem Sonrası Mekanik Özelliklerinin ve Korozyon Dayanımının İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Düzce.
- Demirci, E. & Yıldız, A. (2018). An investigation of the crash performance of magnesium, aluminum and advanced high strength steels and different cross-sections for vehicle thin-walled energy absorbers. *Materials Testing*, 60(7-8), 661-668. <https://doi.org/10.3139/120.111201>
- Dewang, Y., & Sharma, V. (2021). Effect of process parameters on thermo-mechanical behavior of extrusion of aluminum alloy. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 18(1), 21–31. <https://doi.org/10.22068/ijmse.18.1.3>
- Donati, L., & Tomesani, L. (2004). The prediction of seam welds quality in aluminum extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154(1–3), 366–373. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.215>
- Fisher, R.A. (1992). On the Mathematical Foundations of Theoretical Statistics. In: Kotz, S., Johnson, N.L. (eds) *Breakthroughs in Statistics*. Springer Series in Statistics. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0919-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0919-5_2)

- Fan, H., & El-Awady, J. A. (2015). Molecular Dynamics Simulations of Orientation Effects during Tension, Compression, and Bending Deformations of Magnesium Nanocrystals. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 82(10). <https://doi.org/10.1115/1.4030930>
- Fang, G., Zhou, J., & Duszczek, J. (2009). Extrusion of 7075 aluminium alloy through double-pocket dies to manufacture a complex profile. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(6), 3050–3059. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.009>
- Flitta, I., & Sheppard, T. (2003). Nature of friction in extrusion process and its effect on material flow. *Materials Science and Technology*, 19(7), 837–846. <https://doi.org/10.1179/026708303225004422>
- Gall, S., Müller, S., & Reimers, W. (2013). Microstructure and mechanical properties of magnesium AZ31 sheets produced by extrusion. *International Journal of Material Forming*, 6(1), 187–197. <https://doi.org/10.1007/s12289-011-1069-0>
- Gao, X., & Nie, J. F. (2007). Characterization of strengthening precipitate phases in a Mg-Zn alloy. *Scripta Materialia*, 56(8), 645–648. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.01.006>
- Ghali, E. (2010). *Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys: Understanding, performance, and testing.* (Vol. 12). John Wiley & Sons.
- Gökçe, B., & Taşgetiren, S. (2009). Kalite İçin Deney Tasarımı. *Electronic Journal of Machine Technologies*, 6(1), 71–83.
- Govind, Nair, K. S., Mittal, M. C., Sikand, R., & Gupta, A. K. (2008). Effect of extrusion parameters on microstructure and mechanical properties of ZK30 Mg Alloy. *Materials Science and Technology*, 24(4), 399–405. <https://doi.org/10.1179/174328408X276224>
- Guang, B., Song, L., & Atrens, A. (2000). Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys. *Advanced Engineering Materials*. (1), 11–33.
- Gül, S. (2021). *WE43 Magnezyum Alaşımına Soğuk Sprey Kaplama Yapılarak Aşınma ve Korozyon Dayanımının Geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Manisa.
- Hertzberg, R. W., Vinci, R. P. & Hertzberg, J. L. (2012). *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 5th Edition. Hoboken, NJ:John Wiley & Sons.
- Hosseini, A., Farhangdoost, K., & Manoochehri, M. (2012). Modelling of extrusion process and application of Taguchi method and ANOVA analysis for optimization the parameters. *Mechanika*, 18(3), 301–305. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.18.3.1881>
- Hu, H., Yu, A., Li, N., & Allison, J. E. (2003). Potential Magnesium Alloys for High Temperature Die Cast Automotive Applications: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*, 18(5), 687–717. <https://doi.org/10.1081/AMP-120024970>

Hyuk, S., Sun, B., Mishra, R. K., & Sachdev, A. K. (2014). Materials Science & Engineering A Effects of extrusion parameters on the microstructure and mechanical properties of Mg – Zn – ( Mn ) – Ce / Gd alloys. *Materials Science & Engineering A*, 598, 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.01.051>

İncel, E. (2016). *Deney Tasarımı ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleriyle Alüminyum Ekstrüzyon Prosesinin İyileştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Balıkesir.

Ishihara, S., Shibata, H., Komano, K., Goshima, T., & Nan, Z. Y. (2007). Effect of Extrusion Ratio on Fatigue Properties of Hot-Extruded Magnesium Alloys. *Key Engineering Materials*, 353–358(September), 291–294. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.353-358.291>

Jam, J. E., & Zadeh, M. G. (2012). 3D Simulation of the cold extrusion process of nonsymmetric section of Tellurium-Lead. *Association of Metallurgical Engineers of Serbia*. 19, 11-21.

Jian, L. I. U., Gao-yong, L. I. N., Di, F., Yan-ming, Z. O. U., & Li-ping, S. U. N. (2010). *Effects of process parameters and die geometry on longitudinal welds quality in aluminum porthole die extrusion process*. 688–696. <https://doi.org/10.1007/s11771>

Jo, H. H., Jeong, C. S., Lee, S. K., & Kim, B. M. (2003). Determination of welding pressure in the non-steady-state porthole die extrusion of improved Al7003 hollow section tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1-3 SPEC), 428–433. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00518-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00518-1)

Jones, D.A. (1996). *Principles and Prevention of Corrosion*. Second Edition. Prentice – Hall, USA.

Kaczyński, P., Gronostajski, Z., & Polak, S. (2019). Progressive crushing as a new mechanism of energy absorption. The crushing study of magnesium alloy crash-boxes. *International Journal of Impact Engineering*, 124, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.10.001>

Kaçar İ. & Öztürk F. (2006). Magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesindeki son gelişmeler, *Timak Tasarım İmalat Analiz Kongre Yayını*, Balıkesir, 354-361.

Kainer, K. U. (2003). *Magnesium Alloys and Technology*, 1. Baskı, Weinheim, Germany: Wiley–VCH Verlag GmbH.

Kelen, F. (2021). Importance and Applications of Magnesium and Its Alloys in Automotive Industry. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(1), 548–562. <https://doi.org/10.21597/jist.789612>

- Khan, Y. A., Valberg, H. S., & Design, E. (2010). Metal Flow In Idealised A-Symmetric 2D Extrusion Welding. *Norwegian University of Science and Technology , Engineering Design and Materials , Norway*. 3, 383–386. <https://doi.org/10.1007/s12289-010-0787-z>
- Kothasiri, A. F., Chalamalasetti, S. R., & Peteti, G. (2021). Multiple process parameter optimization of forward extrusion process on AA 2024. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 13(2), 63–75. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2021.13.2.63>
- Kulekci, M. K. (2015). *Magnesium and its alloys applications in automotive industry*. (2008), 851–865. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1279-2>
- Kurtuluş, E. & Tekin, G. (2021). Conversion of Aluminum Front Bumper System to Magnesium Material by Using Design of Experiment Method . *International Journal of Automotive Science And Technology* , 5 (1) , 34-42 . DOI: 10.30939/ijastech..810401
- Laser, T., Nurnberg, M.R., Janz, A., Hartig, C., Letzig, D., Schmid-Fetzer, R., Bormann, R. (2006). The influence of manganese on the microstructure and mechanical properties of AZ31 gravity die cast alloys. *Acta Materialia*, 54, 3033–3041. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.02.039>
- Lentz, M. C. (2015). *Deformation behavior of extruded magnesium*. (Doctoral Thesis). Technischen Universität Berlin, Berlin.
- Li, L. (2008). Numerical and experimental study on the extrusion through a porthole die to produce a hollow magnesium profile with longitudinal weld seams. *Materials & Design*, 29, 1190–1198. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.05.003>
- Li, Z., Yang, H., Hu, X., Wei, J., & Han, Z. (2018). Experimental study on the crush behavior and energy-absorption ability of circular magnesium thin-walled tubes and the comparison with aluminum tubes. *Engineering Structures*, 164, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.083>
- Lili, G., Jingru, Y., Jianqiang, W., & Yongbing, L. (2020). Finite Element Simulation of Extrusion Process of ZK60 Magnesium Hollow Profile and Its Microstructure and Properties. *Materials Reports*, (51401043), 2–6. DOI:10. 11896 /cldb. 19010016
- Liu, G., Zhou, J., & Duszcyk, J. (2007a). FE analysis of metal flow and weld seam formation in a porthole die during the extrusion of a magnesium alloy into a square tube and the effect of ram speed on weld strength. *Journal of Materials Processing Technology*, 0, 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.032>
- Liu, G., Zhou, J., & Duszcyk, J. (2007b). Prediction and verification of temperature evolution as a function of ram speed during the extrusion of AZ31 alloy into a rectangular section. *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1–3), 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.033>



- Liu, P., Xie, S., & Cheng, L. (2012). Die structure optimization for a large , multi-cavity aluminum profile using numerical simulation and experiments. *Materials and Design*, 36, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.013>
- Luo, A. A. (2013). Magnesium casting technology for structural applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(1), 2–22. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.02.002>
- Lv, S., Xie, Z., Yang, Q., Meng, F., & Qiu, X. (2022). Microstructures and mechanical properties of a hot-extruded Mg–8Zn–6Al–1Gd (wt%) alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 904, 164040. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164040>
- Mcqueen, H. J., & Ryan, N. D. (2002). Constitutive analysis in hot working. *Materials Science and Engineering A*, 322, 43–63.
- Mercan, Ş. (2019). *Deney Tasarımı Ve Yapay Zeka Tekniklerinden Yararlanarak Ürün Kalitesinin Geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Balıkesir.
- Pekguleryuz , M.O., Kainer, K.U., Kaya, A. A. (2013). *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*. Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857097293.frontmatter>
- Min, J., Kim, B. M., & Kang, C. G. (2005). Effects of chamber shapes of porthole die on elastic deformation and extrusion process in condenser tube extrusion. *Materials & Design*, 26, 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.06.007>
- Nitsche, R. (2021). *Untersuchungen zum Strangpressen von Magnesium-Hybridprofilen*. (Doctoral Thesis). Technischen Universität Berlin, Berlin.
- Ockewitz, A., Sun, D. Z., Andrieux, F., & Mueller, S. (2012). Simulation of hot extrusion of an aluminum alloy with modeling of microstructure. *Key Engineering Materials*, 491(September), 257–264. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.491.257>
- Öğüt, S. (2021). *Investigation on Mechanical Properties of Magnesium and Copper Alloys Processed by Expansion Equal Channel Angular Extrusion*. (Doctoral Thesis). Marmara University Institute For Graduate Studies In Pure And Applied Science. Istanbul.
- Önür, A. (2021). *Otomotiv sektörü için yenilikçi magnezyum alaşımlarının geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Mersin.
- Öztürk, F., & Kaçar, İ. (2012). Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1 (2) , 12-20.
- Pardo, A., Merino, M. C., Coy, A. E., Arrabal, R., Viejo, F., & Matykina, E. (2008). Corrosion behaviour of magnesium / aluminium alloys in 3.5 wt.% NaCl. *Corrosion Science*, 50, 823–834. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.11.005>

Parkar, A. A. (2011). On Modeling and Experimental Validation of Extrusion Process Of Lightweight Alloys (Doctoral Thesis). Mississippi State University. Missisipi.

Peng, P., Wang, B., Zhou, S., She, J., Tang, A., Zhang, J., & Pan, F. (2022). Effects of optimizing continuous forging extrusion process on the microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 840(February), 142892. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142892>

Pinter, T., & El Mehtedi, M. (2012). Constitutive equations for hot extrusion of AA6005A, AA6063 and AA7020 Alloys. *Key Engineering Materials*, 491(May 2014), 43–50. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.491.43>

Plumeri, J. E. (2018). *Development and Application of a Numerical Model for the Prediction of Hot Deformation Processing of a Novel ZE20 Magnesium Alloy* (Doctoral Thesis). Leigh University. Bethlehem PA, USA.

Polmear, I. (2005). Light Alloys, Fourth Edition: From Traditional Alloys to Nanocrystals. Butterworth-Heinemann, Oxford; Burlington, MA.

Prasad, S. V. S., Prasad, S. B., Verma, K., Mishra, R. K., Kumar, V., & Singh, S. (2022). The role and significance of Magnesium in modern day research-A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(1), 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.05.012>

Rashad, M., Pan, F., Liu, Y., Chen, X., Lin, H., Pan, R., ... She, J. (2016). High temperature formability of graphene nanoplatelets-AZ31 composites fabricated by stir-casting method. *Journal of Magnesium and Alloys*, 4(4), 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2016.11.003>

Roberts, C., S. (1960). Magnesium and Its Alloys, 1. Baskı, New York, USA: Wiley & Sons. 5, 145-218.

Ross, N. G., Barnett, M. R., & Beer, A. G. (2014). Materials Science & Engineering A Effect of alloying and extrusion temperature on the microstructure and mechanical properties of Mg – Zn and Mg – Zn – RE alloys. *Materials Science & Engineering A*, 619, 238–246. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.09.085>

Roy, R.K. (2001). Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement.

Seçgin, G. O. (2012). *İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemi İle Üretilmiş AZ31 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışının İncelenmesi* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Sillekens, W., Van, H. M., & Pravidic, F. (2005). Extrusion technology for magnesium : Avenues for improving performance. *Conference: 2nd International Light Metals Technology Conference*, St. Wolfgang, Austria.

- Skar, J. I. (1999). Corrosion and corrosion prevention of magnesium alloys. *Materials and Corrosion*, 50, 2-6.
- Somekawa, H., & Mukai, T. (2005). Effect of texture on fracture toughness in extruded AZ31 magnesium alloy. *Scripta Materialia*, 53(5), 541–545.  
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.04.048>
- Song, B. G., & Atrens, A. (2003). Understanding Magnesium Corrosion A Framework for Improved Alloy Performance. *Advanced Engineering Materials*, 5, (12), 837–858.  
<https://doi.org/10.1002/adem.200310405>
- Talbot, D.E.J., & Talbot, J.D.R. (2018). Corrosion Science and Technology (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351259910>
- Tang, D., Fang, W., Fan, X., Li, D., & Peng, Y. (2014). Effect of die design in microchannel tube extrusion. *Procedia Engineering*, 81(October), 628–633.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.051>
- Tang, W., Huang, S., Zhang, S., Li, D., & Peng, Y. (2011). *Journal of Materials Processing Technology Influence of extrusion parameters on grain size and texture distributions of AZ31 alloy*. 211, 1203–1209.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.014>
- Uematsu, Y., Tokaji, K., Kamakura, M., Uchida, K., Shibata, H., & Bekku, N. (2006). Effect of extrusion conditions on grain refinement and fatigue behaviour in magnesium alloys. *Materials Science And Engineering: A*. 434, 131–140.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.117>
- Wang, D., Ma, X., Wu, R., Wu, H., Wang, J., Zhang, S., ... Hou, L. (2022). Effect of extrusion plus rolling on damping capacity and mechanical properties of Mg–Y–Er–Zn–Zr alloy. *Materials Science and Engineering A*, 830(September 2021), 142298.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142298>
- Wang, S., & Gao, G. (2018). Performance of extruded magnesium alloy AZ31B circular tubes under uniaxial compression. *Thin-Walled Structures*, 131, 464–474.  
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.008>
- Wang, Y., Xia, M., Fan, Z., Zhou, X., & Thompson, G. E. (2010). Intermetallics The effect of Al 8 Mn 5 intermetallic particles on grain size of as-cast Mg e Al e Zn AZ91D alloy. *Intermetallics*, 18(8), 1683–1689. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.05.004>
- West, C. & Gribach, E. (1988) Permanent mould casting. *Metals Handbook*. ASM International, Metals Park, (15): 275-285.
- Yan, P., Li, F., Liu, Z., & Li, L. (2022). Sensitivity analysis of die structural and process parameters in porthole die extrusion of magnesium alloy tube using Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(11–12), 8039–8056.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08801-4>

Yang, M., Liu, Y. H., Liu, J. A., & Song, Y. L. (2015). Effect of T6 heat treatment on corrosion resistance and mechanical properties of AM50 magnesium alloy. *Materials Research Innovations*, 19, 259–264.  
<https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000002160>

Yang, Y., Xiong, X., Chen, J., Peng, X., Chen, D., & Pan, F. (2021). Research advances in magnesium and magnesium alloys worldwide in 2020. *Journal of Magnesium and Alloys*, 9(3), 705–747. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.04.001>

Yıldız, B. (2017). *Derin Çekme İşleminde Kalıp Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Diyarbakır.

Yu, J., Zhao, G., Cui, W., Chen, L., & Chen, X. (2019). Evaluating the welding quality of longitudinal welds in a hollow profile manufactured by porthole die extrusion : Experiments and simulation. *Journal of Manufacturing Processes*, 38(February), 502–515. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.044>

Zanotto, F. (2009). *Corrosion Behaviour Of The AZ31 Magnesium Alloy and Surface Treatments For Its Corrosion Protection* (Doctoral Thesis). Università degli Studi di Ferrara. Ferrara, Italy.

Zeng, Z., Stanford, N., Davies, C. H. J., Nie, J. F., & Birbilis, N. (2019). Magnesium extrusion alloys: a review of developments and prospects. *International Materials Reviews*, 64(1), 27–62. <https://doi.org/10.1080/09506608.2017.1421439>

Zengin, H. (2018). *ZK60 Magnezyum Alaşımlarının Döküm ve Ekstrüzyon Sonrası Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Alaşım Elementlerinin Etkisinin İncelenmesi* (Doktora Tezi). Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Karabük.

Zhang, B. P., Geng, L., Huang, L. J., Zhang, X. X., & Dong, C. C. (2010). Enhanced mechanical properties in fine-grained Mg – 1 . 0Zn – 0 . 5Ca alloys prepared by extrusion at different temperatures. *Scripta Materialia*, 63(10), 1024–1027.  
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.07.038>

Zhang, C., Zhao, G., & Chen, H. (2012). Numerical simulation and metal flow analysis of hot extrusion process for a complex hollow aluminum profile. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60, 101–110.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-011-3609-7>

Zhang, C., Zhao, G., Chen, Z., Chen, H., & Kou, F. (2012). Effect of extrusion speed on extrusion process for a hollow aluminum profile. *Materials Science & Engineering B*, 177(19), 1691–1697. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2011.09.041>

Zhang, J., Peng, P., Luo, A. A., She, J., Tang, A., & Pan, F. (2022). Dynamic precipitation and enhanced mechanical properties of ZK60 magnesium alloy achieved by low temperature extrusion. *Materials Science and Engineering A*, 829(June 2021), 142143.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142143>

Zhang, W., Zhang, H., Wang, L., Fan, J., Li, X., Zhu, L., ... Zhang, S. (2020).  
Microstructure Evolution and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Sheets  
Prepared by Low-Speed Extrusion with Different Temperature. *Crystals*, 10, 644, 1–9.  
DOI:10.3390/cryst10080644

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Enes KURTULUŞ  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 1989  
Yabancı Dil : İngilizce  
Eğitim Durumu  
Lise : Bursa Anadolu Lisesi (2003-2007)  
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi (2007-2011)  
Yüksek Lisans : Bursa Teknik Üniversitesi (2012-2015)  
Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Coşkunöz Metal Form Ar-Ge (2021-Halen)  
Yeşilova Holding Ar-Ge Merkezi (2013-2021)  
DTA Mühendislik (2011-2013)  
İletişim (e-posta) : kurtulusenes@gmail.com  
Yayımları :

**Kurtulus, E., Sapmaz I. & Karpat, F. (2021).** Effect of the cooling process on the mechanical properties and microstructural behavior of extruded AZ31 and AM50 Mg alloys. *Materials Testing*, Vol. 63, No 7, pp. 654-661. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0107>.

**Sapmaz, I., Kurtulus, E., Zeybek, A. & Ozdogru, E. F. (2021).** Comparison of Effects of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructural Behavior of Extruded AZ31 and AM50 Magnesium Alloys. In: Luo A. et al. (eds) *Magnesium 2021. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72432-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72432-0_12)

**Kara, B., Kurtulus, E., Zeybek, A., Altay, M. & Aydın, H. (2021).** Understanding Deformation Behavior of AM50 and AZ31 Magnesium Extrusions with Various Heat Treatments in Comparison with AA6063 and AA6082 Aluminum Extrusions. In: Luo A. et al. (eds) *Magnesium 2021. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72432-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72432-0_16)

**Kurtulus, E., Sapmaz, I. & Ozdogru, E. F. (2021).** Investigation of the effect of extrusion speed on mechanical and microstructural characteristics in a tubular profile extruded from AM50 magnesium alloy, In: Luo A. et al. (eds) *Magnesium 2021. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72432-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72432-0_15)

**Kurtulus, E. & Tekin G. (2021).** Conversion of aluminum front bumper system to magnesium material by using design of experiment method. *International Journal of Automotive Science and Technology*, vol.5, no.1, pp. 34-42.

**Kurtuluş, E., Yıldız, A., Sait, S. & Bureerat, S. (2020).** A novel hybrid Harris hawks-simulated annealing algorithm and RBF-based metamodel for design optimization of highway guardrails. *Materials Testing*, Vol. 62 (Issue 3), pp. 251-260.

**Kurtuluş, E. (2019).** Yüksek basınçlı döküm prosesinde çekinti boşluğunun tespiti ve giderilmesi, *The International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology (IMSMATEC'19)*, Cappadocia/Turkey, June 21-23, pp. 1025-1028.

**Yıldız, A., Kurtuluş, E., Demirci, E., Yıldız, B. & Karagöz, S. (2016).** Optimization of thin-wall structures using hybrid gravitational search and Nelder-Mead algorithm. *Materials Testing*, Vol. 58 (Issue 1), pp. 75-78.

**Kurtuluş, E. & Yıldız, A. (2016).** Otokorkuluk sistemlerinin sezgisel optimizasyon yöntemiyle geliştirilmesi. *17th International Conference on Machine Design and Production, UMTIK 2016*, Bursa/Turkey, p. 50.

**Kurtuluş, E. (2015).** Yeni nesil otokorkuluk sistemlerinin çarpışma analizleri ve sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılarak geliştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

**Yıldız, A. & Kurtuluş, E. (2014).** Optimum design of vehicle safety systems, CIE44&IMSS'14 Conference, 14-16 October 2014, İstanbul/Turkey.

Patentler : Araçlarda Çarpışma Enerjisini Sönümlenmek Üzere Değişken Kesitli Bir Darbe Emici - Faydalı Model - 2020-GE-720287

Projeler : TÜBİTAK-TEYDEB 1511/1160380 - Magnezyum Alaşımlarının Ekstrüzyonu ve Magnezyum Alaşımlı Ön Çarpışma Tamponu Geliştirilmesi