



tmmob makina mühendisleri odası  
*uctea chamber of mechanical engineer*

[www.tmmob.org.tr/muhendismakina](http://www.tmmob.org.tr/muhendismakina)

# Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

**Cilt 58**

Volume 58

**Sayı 686**

Number 686

**Mart 2017**

March 2017

# TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI

Yerel Süreli Yayın, Ayda Bir Yayınlanır  
Local Periodical - Monthly

**Mart/March 2017**

**Cilt/Vol: 58 Sayı/No: 686**

## **Yönetim Yeri - Head Office**

Meşrutiyet Cad. No: 19/6 Kızılay - ANKARA  
Tel : (+90 312) 425 21 41 Fax : (+90 312) 417 86 21  
e-posta : yayin@mno.org.tr http://www.mno.org.tr

## **MMO Adına Sahibi**

Publisher  
Ali Ekber ÇAKAR

## **Sorumlu Yazı İşleri Müdürü**

Executive Editor  
Yunus YENER

## **Yayın Sekreteri**

Editorial Secretary  
Aylin Sıla AYTEMİZ

## **Yayın Kurulu**

Editorial Board

Prof. Dr. Metin AKKÖK - *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*  
Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ - *Çankaya Üniversitesi*  
Prof. Dr. L. Berrin ERBAY - *Osmangazi Üniversitesi*  
Prof. Dr. Cemal MERAN - *Pamukkale Üniversitesi*  
Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK - *Pamukkale Üniversitesi*  
Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA - *Trakya Üniversitesi*  
Yrd. Doç. Dr. Nilay ALÜFTEKİN - *Çankaya Üniversitesi*  
Yrd. Doç. Dr. Tolga TANER - *Aksaray Üniversitesi*  
Yrd. Doç. Dr. Gurbet ÖRÇEN - *Dicle Üniversitesi*

## **Yayın Danışma Kurulu**

Editorial Advisory Board

Prof. Dr. C. Erdem İMRAK - *Istanbul Teknik Üniversitesi*  
Prof. Dr. Erdiñ KALUÇ - *Kocaeli Üniversitesi*  
Prof. Dr. İbrahim Deniz AKÇALI - *Akdeniz Üniversitesi*  
Prof. Dr. Ali GÜNGÖR - *Ege Üniversitesi*  
Prof. Dr. Mehmet KOPAÇ - *Bülent Ecevit Üniversitesi*  
Prof. Dr. Hikmet RENDE - *Akdeniz Üniversitesi*  
Prof. Dr. Ali PINARBAŞI - *Yıldız Teknik Üniversitesi*  
Prof. Dr. Bülent YEŞİLATA - *Harran Üniversitesi*  
Prof. Dr. İlhan KONUKSEVEN - *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*  
Doç. Dr. Erol KILIÇKAP - *Dicle Üniversitesi*  
Dr. Varlık ÖZERCİYES - *TAF*

## **Redaksiyon**

Redaction  
Tarık ÖZBEK

## **Kapak ve Sayfa Tasarımı**

Cover and Page Design  
Muazzez POLAT

## **Teknik Sorumlu**

Technical Manager  
Mehmet AYDIN

## **Baskı**

Printed by  
Ankamat Matbaacılık Sanayi Ltd. Şti.  
30. Cadde 538. Sokak No: 60 İvedik Organize Sanayi - Ankara  
Tel: (0312) 394 54 94  
Basım Tarihi : 26 Nisan 2017  
Baskı Sayısı (tiraj) : 3.000

# Mühendis ve Makina

*Engineer and Machinery*

**Cilt 58**

**Sayı 686**

**Mart 2017**

Volume 58

Number 686

March 2017

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Küresel Enerji Tüketimi Bağlamında Mikro Kojenerasyon Sistemlerinin  
Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi** 1  
*Technical and Economical Evaluation of Micro-Cogeneration  
Systems in the Context of Global Energy Consumption*  
**Bilal SUNGUR, Muhammet ÖZDOĞAN,  
Bahattin TOPALOĞLU, Lütfü NAMLI**
- Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri** 21  
*Powder Metallurgy Processing of Aluminum Alloys*  
**Azım GÖKÇE, Fehim FINDIK, Ali Osman KURT**

---

*TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayın Organı olan Mühendis ve Makina dergisi TMMOB Makina Mühendisleri Odası üyelerine ücretsiz olarak gönderilir. 1957 yılından beri yayımlanan dergimiz, **hakemli** bir dergidir. Dergimizle ilgili detaylı bilgi almak için <http://www.mmo.org.tr> web adresinden yararlanabilirsiniz. Telefon, faks ya da e-posta aracılığıyla da bize ulaşabilirsiniz.*

---

*Dergimiz*

**EBSCO**  
P U B L I S H I N G

*Veri tabanında yer almaktadır*

# SUNUŞ

*Değerli Meslektaşlarımız Merhaba,*

*Mühendis ve Makina dergimizde yer alan ilk makalemiz, **Bilal Sungur, Muhammet Özdoğan, Bahattin Topaloğlu** ve **Lütfü Namlı** tarafından hazırlanan “Küresel Enerji Tüketimi Bağlamında Mikro Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi” başlıklı çalışmadır. Bu çalışmada, enerji tüketiminin dünyadaki ve Türkiye’deki son 5 yıllık durumları (2011-2015) ile ilgili veriler elde edilerek genel değerlendirmeler yapılmış, akabinde mikro kojenerasyon sistemleri araştırılarak sistemlerin birbirleriyle kıyaslamaları yapılmıştır. Bu bağlamda, içten yanmalı motor, dıştan yanmalı motor, mikro türbin ve yakıt hücresi bazlı mikro kojenerasyon sistemleri sistematik olarak tanıtılmıştır. Son olarak, literatürdeki ve piyasadaki sistem örnekleriyle ilgili teknik ve ekonomik detaylar verilerek bu kapsamda değerlendirmeler yapılmıştır.*

*İkinci makalemiz, **Azım Gökçe, Fehim Fındık** ve **Ali Osman Kurt** tarafından hazırlanan “Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri” başlıklı çalışmadır. Bu çalışmada, alüminyum alaşımlarından TM ile parça üretimi hakkında bilgi verilmiş, özellikle mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan Al-Cu, Al-Si ve Al-Mg alaşımlarıyla ilgili literatürdeki bir takım sonuçlardan örnekler sunulmuştur. Farklı alaşımların sinterlenmesi sonucu elde edilen özellikler hakkında bilgi verilmiştir.*

*Her iki dergimize de [www.mmo.org.tr/muhendismakina](http://www.mmo.org.tr/muhendismakina) adresinden ulaşabilir; makale, yazı, yeni ürün tanıtımları, reklam ve görüşleriniz ile destek olabilirsiniz.*

*Bir sonraki sayımızda buluşmak üzere esenlikler diliyoruz.*

**TMMOB Makina Mühendisleri Odası  
Yönetim Kurulu**

## PRESENTATION

*Esteemed Colleagues,*

*The first article published in our Engineer and Machinery journal is the article named “Technical and Economical Evaluation of Micro-Cogeneration Systems in the Context of Global Energy Consumption” by **Bilal Sungur, Muhammet Özdoğan, Bahattin Topaloğlu and Lütfü Namlı**. In this regard, internal combustion engine, external combustion engine, micro turbine and fuel cell based micro-cogeneration systems were introduced systematically. Finally, technical and economical details of some aforementioned system samples from the literature and the market were given and evaluated in the context.*

*The second article published in our Engineer and Machinery journal is the article named “Powder Metallurgy Processing of Aluminum Alloys” by **Azım Gökçe, Fehim Fındık and Ali Osman Kurt**. In the future, it is expected that more Al-PM parts will be produced with the development of new high strength Al based PM alloys. In this study, information about the production of the Al-PM parts is given and some examples about the sintering of Al-Cu, Al-Si and Al-Mg PM alloys from the relevant literature are presented. Properties of the various sintered PM Aluminum alloys are highlighted.*

*You can view both of our journals on [www.mmo.org.tr/muhendismakina](http://www.mmo.org.tr/muhendismakina) and support us with your articles, papers, new product promotions, advertisements, and reviews.*

*Best regards, until our next issue...*

**UCTEA CHAMBER OF MECHANICAL ENGINEERS**  
**Board of Directors**

# Küresel Enerji Tüketimi Bağlamında Mikro Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi

Bilal Sungur <sup>1</sup>

Muhammet Özdoğan <sup>2</sup>

Bahattin Topaloğlu <sup>\*3</sup>

Lütfü Namlı <sup>4</sup>

## ÖZ

Mikro kojenerasyon sistemlerine olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Mikro kojenerasyon sistemleri, tek bir enerji kaynağından aynı anda güç ve ısı sağlar. Konvansiyonel sistemlerde güç üretiminde atık ısıdan yararlanılmazken kojenerasyon sistemlerinde atık ısıdan faydalanılır. Böylece toplam sistem verimliliği konvansiyonel güç üretim sistemlerine kıyasla artar. Sistem verimliliğinin artmasıyla birlikte enerji tüketimi, emisyonlar ve enerji maliyetleri kayda değer bir şekilde azalır. Bu çalışmada, enerji tüketiminin dünyadaki ve Türkiye'deki son 5 yıllık durumları (2011-2015) ile ilgili veriler elde edilerek genel değerlendirmeler yapılmış, akabinde mikro kojenerasyon sistemleri araştırılarak sistemlerin birbirleriyle kıyaslamaları yapılmıştır. Bu bağlamda, içten yanmalı motor, dıştan yanmalı motor, mikro türbin ve yakıt hücresi bazlı mikro kojenerasyon sistemleri sistematik olarak tanıtılmıştır. Son olarak, literatürdeki ve piyasadaki sistem örnekleriyle ilgili teknik ve ekonomik detaylar verilerek bu kapsamda değerlendirmeler yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Mikro kojenerasyon, enerji tüketimi, enerji kaynakları, maliyet analizi

## Technical and Economical Evaluation of Micro-Cogeneration Systems in the Context of Global Energy Consumption

### ABSTRACT

The popularity of micro-cogeneration systems is increasing day by day on the market. Micro-cogeneration systems provide power and heat at the same time from the single energy source, in this way the total system efficiency increases compared to conventional power generation systems. In conventional systems waste heat is not used in power generation but waste heat is used in cogeneration systems. With the increase of the system efficiency, energy consumption, emissions, and energy costs reduce notably. In this study, the data related to energy consumption in the last 5 years (2011-2015) in the world and in Turkey were obtained and general evaluations were made, in turn micro-cogeneration systems were investigated and compared with each other. In this regard, internal combustion engine, external combustion engine, micro turbine and fuel cell based micro-cogeneration systems were introduced systematically. Finally, technical and economical details of some aforementioned system samples from the literature and the market were given and evaluated in the context.

**Keywords:** Micro-cogeneration, energy consumption, energy resources, cost analysis

---

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 23.01.2017

Kabul/Accepted : 01.03.2017

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Samsun - bilal.sungur@omu.edu.tr

<sup>2</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Samsun - muhammet.ozdogan@omu.edu.tr

<sup>3</sup> Prof. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Samsun - btopal@omu.edu.tr

<sup>4</sup> Yrd. Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Samsun - lnamli@omu.edu.tr

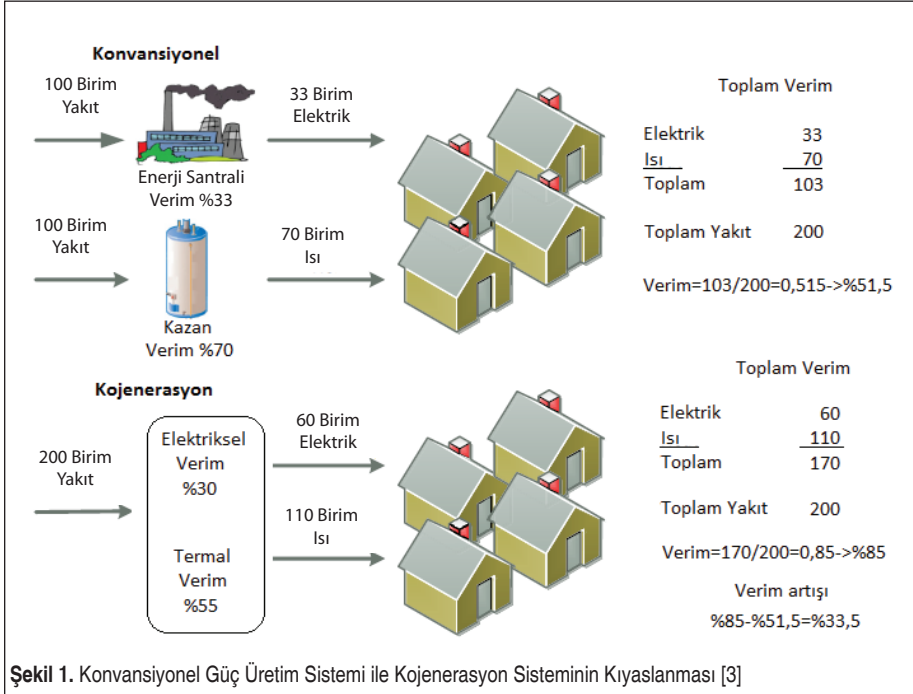


## 1. GİRİŞ

Enerjinin her sektörde kullanılıyor olması sebebiyle enerji ile ekonomi arasında ayrılmaz bir ilişki bulunmaktadır. Ülkeler bu sebeple ellerindeki kısıtlı enerji kaynaklarını verimli bir şekilde kullanmak zorundadırlar. Enerjiye olan ihtiyaç artan nüfusun ve teknolojik gelişmelerin de etkisiyle her geçen gün artmaktadır. Bununla birlikte, enerji tüketiminin önemli bir kısmı evsel ısınma ve elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Enerjinin verimli kullanılması bu ihtiyaçları karşılamak açısından da önem arz etmektedir.

Enerjinin verimli bir şekilde kullanmanın birçok yolu vardır. Kojenerasyon sistemleri de bunlardan biridir. Kojenerasyon, diğer adıyla birleşik ısı ve güç teknolojisi, enerjiyi verimli bir şekilde sağlamakta kullanılan bir mühendislik çözümüdür. Bununla birlikte, mikro kojenerasyon olarak adlandırılan küçük boyutlu birleşik ısı ve güç üreten sistemler de piyasadaki yerini almaya başlamıştır. Mikro kojenerasyon, küçük enerji kapasitelerinde, eşzamanlı olarak ısı ve güç üreten sistemler olarak tanımlanır [1]. Bir diğer tanımlama ise Avrupa Birliği tarafından “bir diğer tanımlama ise Avrupa Birliği tarafından “maksimum elektrik gücü 50 kW<sub>el</sub>’in altında olan kojenerasyon ünitesi” olarak ifade edilmiştir” [2].

Konvansiyonel elektrik gücü üretim tesislerinde, atık ısı taşıma zorluğu nedeniyle



Şekil 1. Konvansiyonel Güç Üretim Sistemi ile Kojenerasyon Sisteminin Kıyaslanması [3]





kullanılamaz ve verimi düşüktür. Diğer yandan mikro kojenerasyon sistemlerinde, atık ısıdan yerel tüketim nedeniyle faydalanılabilir ve bu durum verim artışına sebep olur. Mikro kojenerasyon sistemlerinin temel avantajları şu şekilde özetlenebilir: Isı, sıcak su ve elektrik tek bir kaynaktan elde edilebilir ve toplam sistem verimliliği konvansiyonel güç üretimi ve ısıtma sistemlerine kıyasla artar (Şekil 1). Böylece yakıt tüketimi ve emisyonlar azalacak, kullanım sonrası fazla kalan elektrik enerjisi şebekeye geri satılabilecek ve yerel üretimden dolayı sistem kayıpları önlenebilecektir.

Mikro kojenerasyon sistemlerinin bazı dezavantajları da vardır. Bu sistemler hala gelişme aşamasında olduklarından fiyatları nispeten yüksektir. Ayrıca gürültü problemi de mevcuttur. Sistemin yeni olması sebebiyle insanların bu sistemi kullanmaya alışması zaman alacaktır.

Bu çalışmada, enerji tüketiminin dünyadaki ve Türkiye'deki son 5 yıllık durumları (2011-2015) incelenerek genel değerlendirmeler yapılmış, mikro kojenerasyon sistemleri tanıtılmış, literatürden ve piyasadan bazı sistem örnekleri verilmiştir. Bu sistemlerin verimleri, giren enerji, çıkan elektrik enerjisi, çıkan termal enerji gibi teknik parametreleri incelenmiştir. Ayrıca bazı sistemlerin maliyet analizleri gerçekleştirilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

## 2. ENERJİNİN GENEL DURUMU

Türkiye ve dünyadaki enerjinin genel durumuyla ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Koç ve Şenel [4], enerji kaynaklarının dünyada ve Türkiye'deki rezerv, kapasite üretim ve tüketim miktarlarını incelemişlerdir. Koç ve Kaya [5] ise dünyada ve Türkiye'deki enerji tüketimini ve yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim-tüketim durumlarını irdelemişlerdir.

Çalışmanın bu kısmında, enerji tüketiminin dünyadaki ve Türkiye'deki son 5 yıllık durumları (2011-2015) BP'nin sunduğu "Dünya Enerjisinin İstatistiksel Değerlendirilmesi" [6] raporundan yararlanılarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda ülkelerin enerji kaynakları petrol, doğalgaz, kömür, nükleer, hidrolik ve diğer yenilenebilir olmak üzere ayrı ayrı ele alınmıştır. Dünyada enerji tüketiminde en büyük paya sahip ilk 5 ülke, bu ülkelere ek olarak Türkiye'nin ve dünyanın yıllara ve kaynaklara göre enerji tüketim miktarları Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda ayrıca ülkelerin ve dünyanın kaynaklar bazında son 5 yıllık (2011-2015) enerji tüketimlerinin ortalamaları da verilmiştir. Tablo 1'e bakılarak 2011-2015 yıllarındaki ortalama enerji tüketimleri değerlendirildiğinde, Çin Halk Cumhuriyeti 2875 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) ile ilk sırada yer alırken, bunu ABD 2205 Mtep ile takip etmektedir. Türkiye ise 121 Mtep enerji tüketimi yapmaktadır. Çin Halk Cumhuriyeti yüksek miktarda kömür tüketimi ile dikkat çekmektedir. ABD ise enerji tüketiminde daha çok petrolden faydalanmakta ancak kömür ve doğalgazı da önemli miktarda kullanmaktadır. Rusya ise enerji kay-



nağı olarak en fazla doğalgazdan yararlanırken, yenilenebilir enerji kaynaklarından çok az miktarda yararlandığı görülmektedir.

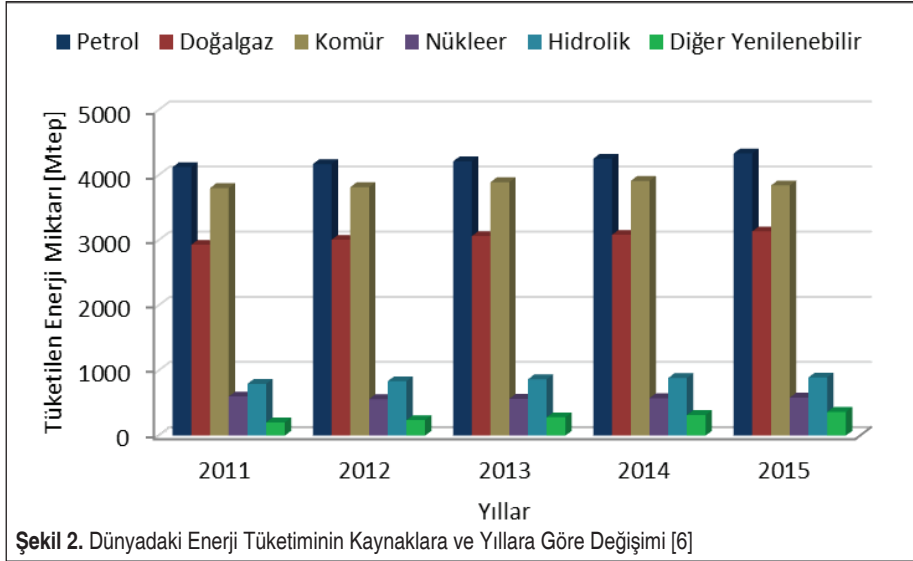
Dünyadaki enerji tüketiminin kaynaklara ve yıllara göre değişimi sütun grafiği şeklinde Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, 2011-2015 yılları arasına bakıldığında, dünyadaki enerji tüketiminin genel trend olarak her geçen yıl arttığı görülmektedir.

**Tablo 1.** Ülkelerin Enerji Kaynaklarını Yıllara Göre Tüketim Miktarları [6]

Ülke	Enerji Kaynağı	Yıllara Göre Enerji Tüketim Miktarları [Mtep]					
		2011	2012	2013	2014	2015	Ortalama
<b>Çin</b>							
	Petrol	464,2	486,3	507,2	526,8	559,7	<b>508,8</b>
	Doğalgaz	123,4	135,8	154,7	169,6	177,6	<b>152,2</b>
	Kömür	1899,0	1923,0	1964,4	1949,3	1920,4	<b>1931,2</b>
	Nükleer	19,5	22,0	25,3	30,0	38,6	<b>27,1</b>
	Hidrolik	158,2	197,3	208,2	242,8	254,9	<b>212,3</b>
	Diğer Yenilenebilir	23,7	30,8	44,1	51,9	62,7	<b>42,6</b>
	<b>Toplam</b>	<b>2688,0</b>	<b>2795,2</b>	<b>2903,9</b>	<b>2970,4</b>	<b>3013,9</b>	<b>2874,3</b>
<b>ABD</b>							
	Petrol	834,9	817,0	832,1	838,1	851,6	<b>834,7</b>
	Doğalgaz	628,8	657,4	675,5	392,7	713,6	<b>613,6</b>
	Kömür	495,4	437,9	454,6	453,8	396,3	<b>447,6</b>
	Nükleer	188,2	183,2	187,9	189,9	189,9	<b>187,8</b>
	Hidrolik	73,0	63,1	61,4	59,3	57,4	<b>62,8</b>
	Diğer Yenilenebilir	45,7	51,7	60,2	66,8	71,7	<b>59,2</b>
	<b>Toplam</b>	<b>2266,0</b>	<b>2210,3</b>	<b>2271,7</b>	<b>2000,6</b>	<b>2280,5</b>	<b>2205,8</b>
<b>Rusya</b>							
	Petrol	142,2	144,6	144,9	150,8	143,0	<b>145,1</b>
	Doğalgaz	382,1	374,6	372,1	370,7	352,3	<b>370,4</b>
	Kömür	94,0	98,4	90,5	87,6	88,7	<b>91,8</b>
	Nükleer	39,1	40,2	39,0	40,9	44,2	<b>40,7</b>
	Hidrolik	37,3	37,3	41,3	39,7	38,5	<b>38,8</b>
	Diğer Yenilenebilir	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<b>0,1</b>
	<b>Toplam</b>	<b>694,8</b>	<b>695,2</b>	<b>687,9</b>	<b>689,8</b>	<b>666,8</b>	<b>686,9</b>



<b>Hindistan</b>							
	Petrol	163,0	173,6	175,3	180,8	195,5	<b>177,6</b>
	Doğalgaz	55,7	51,8	45,3	45,6	45,5	<b>48,8</b>
	Kömür	300,4	330,0	355,6	388,7	407,2	<b>356,4</b>
	Nükleer	7,3	7,5	7,5	7,8	8,6	<b>7,7</b>
	Hidrolik	29,8	26,2	29,8	29,6	28,1	<b>28,7</b>
	Diğer Yenilenebilir	8,8	10,8	12,3	13,6	15,5	<b>12,2</b>
	<b>Toplam</b>	<b>565,0</b>	<b>599,9</b>	<b>625,8</b>	<b>666,1</b>	<b>700,4</b>	<b>631,4</b>
<b>Japonya</b>							
	Petrol	203,6	217,0	208,0	197,3	189,6	<b>203,1</b>
	Doğalgaz	95,0	105,2	105,2	106,2	102,1	<b>102,7</b>
	Kömür	109,6	115,8	120,7	118,7	119,4	<b>116,8</b>
	Nükleer	36,9	4,1	3,3	-	1,0	<b>11,3</b>
	Hidrolik	19,3	18,3	19,0	20,0	21,9	<b>19,7</b>
	Diğer Yenilenebilir	7,5	8,2	9,6	11,6	14,5	<b>10,3</b>
	<b>Toplam</b>	<b>471,9</b>	<b>468,6</b>	<b>465,8</b>	<b>453,8</b>	<b>448,5</b>	<b>461,7</b>
<b>Türkiye</b>							
	Petrol	31,1	31,6	32,7	34,4	38,8	<b>33,7</b>
	Doğalgaz	36,8	37,3	37,6	40,2	39,2	<b>38,2</b>
	Kömür	33,9	36,5	31,6	36,1	34,4	<b>34,5</b>
	Nükleer	-	-	-	-	-	<b>-</b>
	Hidrolik	11,8	13,1	13,4	9,2	15,1	<b>12,5</b>
	Diğer Yenilenebilir	1,3	1,7	2,3	2,8	3,8	<b>2,4</b>
	<b>Toplam</b>	<b>114,9</b>	<b>120,2</b>	<b>117,6</b>	<b>122,7</b>	<b>131,3</b>	<b>121,3</b>
<b>Dünya</b>							
	Petrol	4121,6	4168,6	4209,9	4251,6	4331,3	<b>4216,6</b>
	Doğalgaz	2929,3	3005,8	3062,5	3081,5	3135,2	<b>3042,9</b>
	Kömür	3800,0	3814,4	3890,7	3911,2	3839,9	<b>3851,2</b>
	Nükleer	600,4	559,3	564,0	575,5	583,1	<b>576,5</b>
	Hidrolik	795,5	835,6	864,8	884,3	892,9	<b>854,6</b>
	Diğer Yenilenebilir	203,6	238,5	281,1	316,6	364,9	<b>280,9</b>
	<b>Toplam</b>	<b>12450,4</b>	<b>12622,2</b>	<b>12873,0</b>	<b>13020,7</b>	<b>13147,3</b>	<b>12822,7</b>

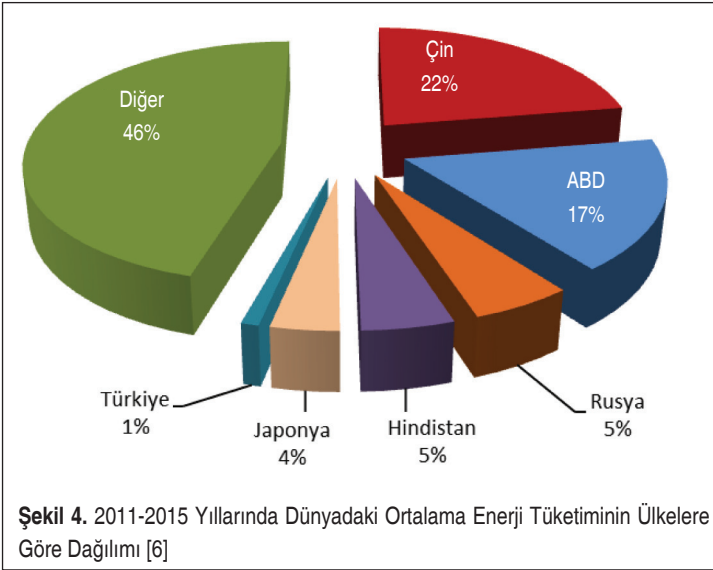
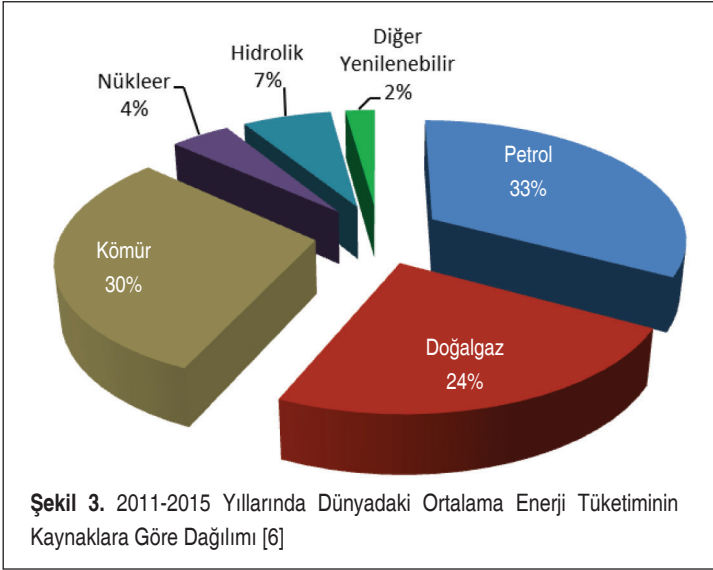


Petrol, doğalgaz, hidrolik ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimin her yıl arttığı şekilden görülmektedir. Kömür kaynaklı enerji tüketimi ise 2011 yılından 2014 yılına kadar artmış, 2015 yılında ise bir önceki yıla göre azalmıştır. Nükleer enerji tüketimi incelendiğinde, 2012 yılında 2011 yılına göre düşüş gerçekleşmiş olup, 2012 yılından itibaren tekrar artış göstermeye başlamıştır.

Enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımının son 5 yılının ortalaması alınarak yapılan incelemede, tüketimde en fazla payı %33 ile petrol oluşturmaktadır. Kömür %30 ile ikinci sırada yer almakta, bunu %24 ile doğalgaz, %7 ile hidrolik, %4 ile nükleer ve %2 ile diğer yenilenebilir kaynakları takip etmektedir ve bu durum Şekil 3'te gösterilmiştir.

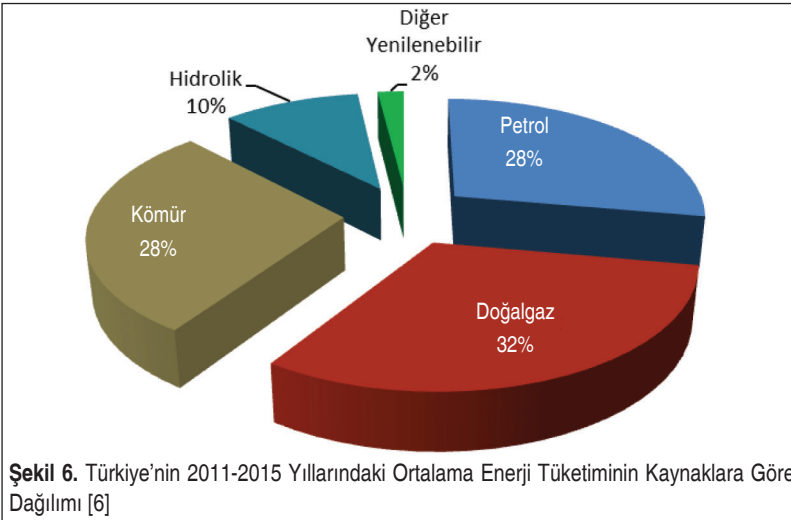
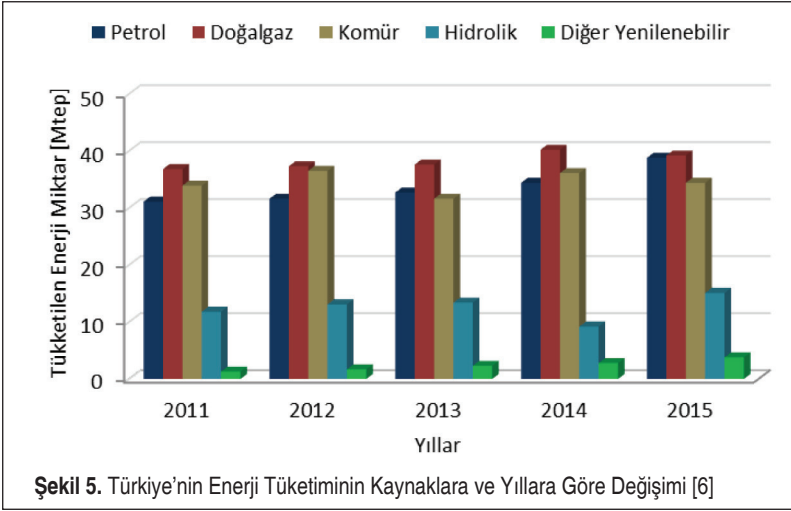
2011-2015 yıllarındaki ortalama enerji tüketiminde en yüksek paya sahip ilk 5 ülke ve Türkiye için dağılım grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, Çin Halk Cumhuriyeti'nin %22 ile dünyadaki enerji tüketiminde en yüksek paya sahip olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla, ABD %17, Rusya %5, Hindistan %5 ve Japonya %4 ile izlemektedir. Türkiye ise dünya enerji tüketiminde yaklaşık olarak %1'lik bir paya sahiptir.

Şekil 5'te Türkiye'deki enerji tüketiminin kaynaklara ve yıllara göre değişimi sütun grafiği şeklinde verilmiştir. Petrol ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketiminin her yıl giderek arttığı görülmektedir. Doğalgaz tüketiminin 2015 yılında 2014 yılına göre düştüğü, kömür tüketiminin 2013 ve 2015 yıllarında bir önceki yıllara göre azaldığı, hidrolik enerji tüketiminin ise özellikle 2015 yılında önceki yıllara göre arttığı görülmektedir.



Türkiye'nin 2011-2015 yılları arasındaki ortalama enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılım grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Enerji tüketiminde en fazla kullanılan enerji kaynağı %32 ile doğalgaz olmuştur. Bu enerji kaynağını sırasıyla, kömür, petrol, hidrolik ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları izlemiştir.

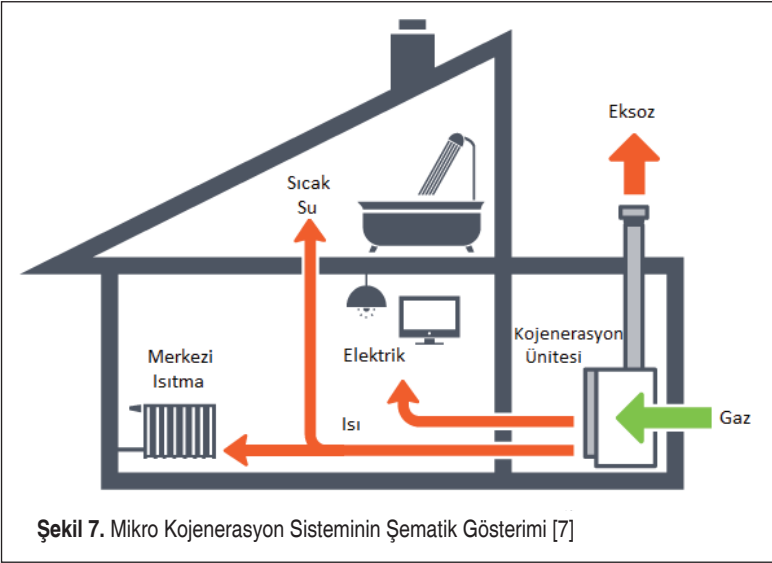
Şekil 3 ve Şekil 6 birlikte incelendiğinde, dünyada enerji tüketimi en fazla petrol kay-



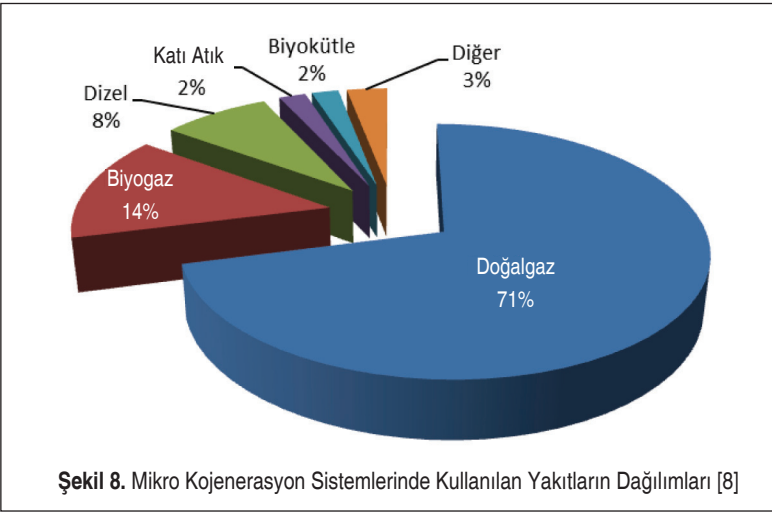
naklıyken, Türkiye’de en fazla doğalgaz kaynaklı olmaktadır. Dünyada enerji tüketiminin yaklaşık %4’lük kısmı nükleer kaynaklardan elde edilirken, Türkiye’de nükleer kaynaklı enerji tüketimi yoktur. Toplam yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimdeki payı dünyada yaklaşık %9 iken Türkiye’de bu değer yaklaşık %12’dir.

### 3. MİKRO KOJENERASYON SİSTEMLERİ

Mikro kojenerasyon veya mikro kombine ısı ve güç sistemleri, tek bir enerji kaynağından aynı anda ısı ve elektrik üreten sistemler olarak tanımlanır. Örnek bir mikro



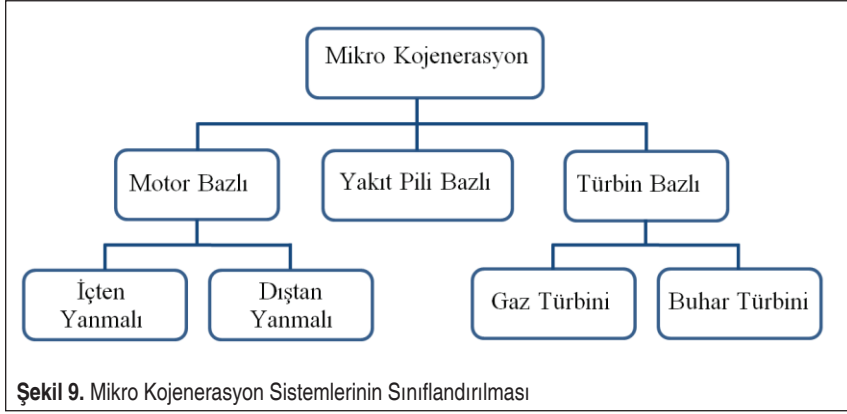
Şekil 7. Mikro Kojenerasyon Sisteminin Şematik Gösterimi [7]



Şekil 8. Mikro Kojenerasyon Sistemlerinde Kullanılan Yakıtların Dağılımları [8]

kojenerasyon sisteminin şeması Şekil 7’de gösterilmektedir. Kojenerasyon ve mikro kojenerasyon sistemlerinde ısı kaynağı olarak genellikle fosil esaslı kaynaklar kullanılır. Şekil 8’de mikro kojenerasyon sistemlerinde kullanılan yakıtların dağılımı verilmiştir [8]. Şekilden de görüldüğü gibi, en çok kullanılan enerji kaynağı %71’lik oran ile doğalgazdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biyogaz da %14’lük kullanım ile önemli bir paya sahiptir.

Mikro kojenerasyon sistemleri tür, teknoloji ve uygulama gibi açılardan sınıflandı-



rılabilir. Bu çalışmada, mikro kojenerasyon sistemleri Şekil 9’da verildiği gibi tür bazında sınıflandırılmıştır.

Motor bazlı sistemlerde içten yanmalı motorlarda enerji kaynağı olarak sıvı veya gaz yakıtlar kullanılırken, dıştan yanmalı motorlarda herhangi bir yakıt türü veya herhangi bir ısı kaynağı (güneş gibi) kullanılabilir. Yakıt pili bazlı sistemlerde enerji kaynağı olarak hidrojen veya hidrokarbon içeren yakıtlar kullanılır. Türbin bazlı sistemlerde gaz türbinlerinde enerji kaynağı olarak sıvı veya gaz yakıtlar kullanılırken, mikro buhar türbin bazlı sistemlerde enerji kaynağı olarak herhangi bir yakıt türü kullanılabilir.

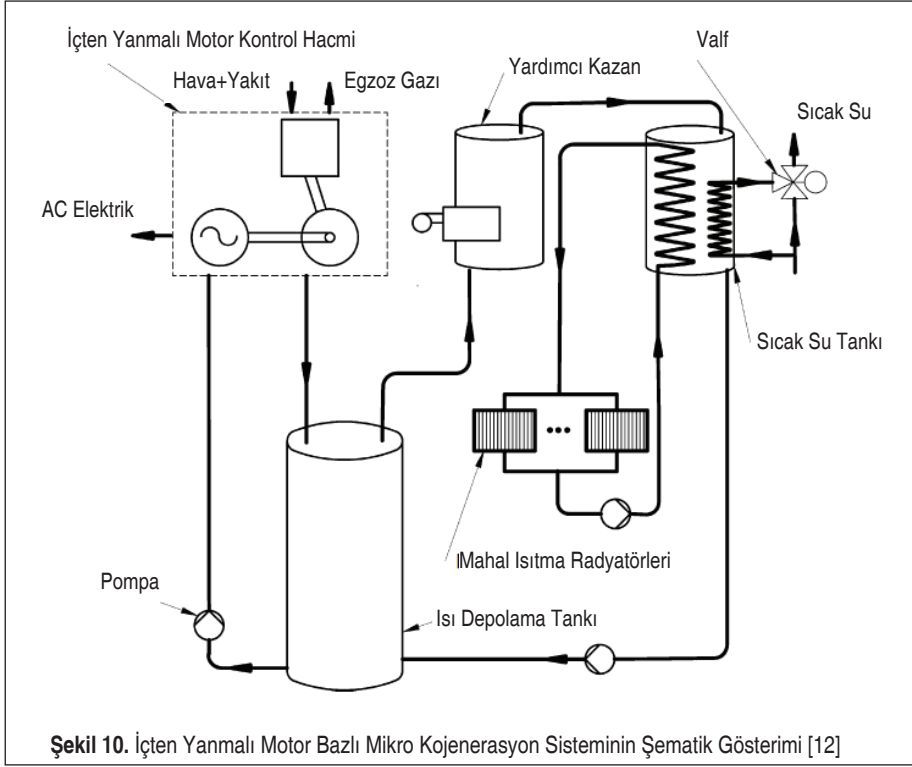
### 3.1 Motor Bazlı Sistemler

Pistonlu motorlar olarak da bilinen motorlar, yanma sonucu silindir içinde artan basıncın pistonu hareket ettirmesi, yani mekanik güç elde edilmesi prensibine dayanarak çalışan makinelerdir. Bu sistemlerde dönüşüm süreci iki gruba ayrılabilir: içten ve dıştan yanmalı motorlar.

#### 3.1.1 İçten Yanmalı Motorlar

İçten yanmalı motorlarda (Otto veya Dizel motorları) yakıt-hava karışımının silindir içinde buji yardımıyla veya kendiliğinden tutuşarak yanması sonucunda mekanik enerji elde edilir. İçten yanmalı motor bazlı sistemler, mikro kojenerasyon uygulamaları için en çok kullanılan teknolojilerden biridir. İçten yanmalı motor bazlı mikro kojenerasyon sistemleriyle ilgili birçok çalışma mevcuttur [9-12]. Bu sistemlerin örneklerinden biri Asaee ve arkadaşları [12] tarafından yapılmıştır ve Şekil 10’da verilmiştir. İçten yanmalı motorlarda yakıtın yanmasıyla birlikte piston hareket etmekte ve mekanik güç üretilmektedir. Elde edilen mekanik güçten bir jeneratör vasıtasıyla alternatif akım üretilmektedir. Egzozdan çıkan atık ısı ise evsel ısıtma amaçlı kullanılmaktadır.





### 3.1.2 Dıştan Yanmalı Motorlar

Dıştan yanmalı motorlarda (Stirling, buhar motoru) silindirin dışında oluşan ısının etkisiyle gazın hareketi sonucu mekanik enerji elde edilir. Dıştan yanmalı motor esaslı mikro kojenerasyon sistemleri ile yapılan çalışmalar genellikle Stirling motorlarıyla yapılmıştır [13-16]. Stirling motorlarının küçük olmaları ve sessiz çalışmalarından dolayı özellikle konut uygulamaları için uygun olmaktadır. Stirling motorlu mikro kojenerasyon sistemleri; gaz, sıvı veya katı yakıtla çalışan normal ısıtma sistemleri gibi çalışır ve ısınma talebi olduğu sürece elektrik üretirler. Isıtma için bir talep olmadığında veya elektrik arzı yetersiz olduğunda elektrik direkt olarak şebekeden alınır. Stirling bazlı mikro kojenerasyon sistemleri; kazanların yanma odası bölgesine, baca kısmına veya herhangi bir sıcak bölgesine yerleştirilerek elde edilen ısıyla, güneş ışınlarından faydalanılarak elde edilen ısıyla veya herhangi bir ısı kaynağından yararlanarak da çalışabilirler.

### 3.2 Türbin Bazlı Sistemler

Türbinler, akışkanın enerjisini yararlı mekanik enerjiye dönüştüren elemanlar olarak



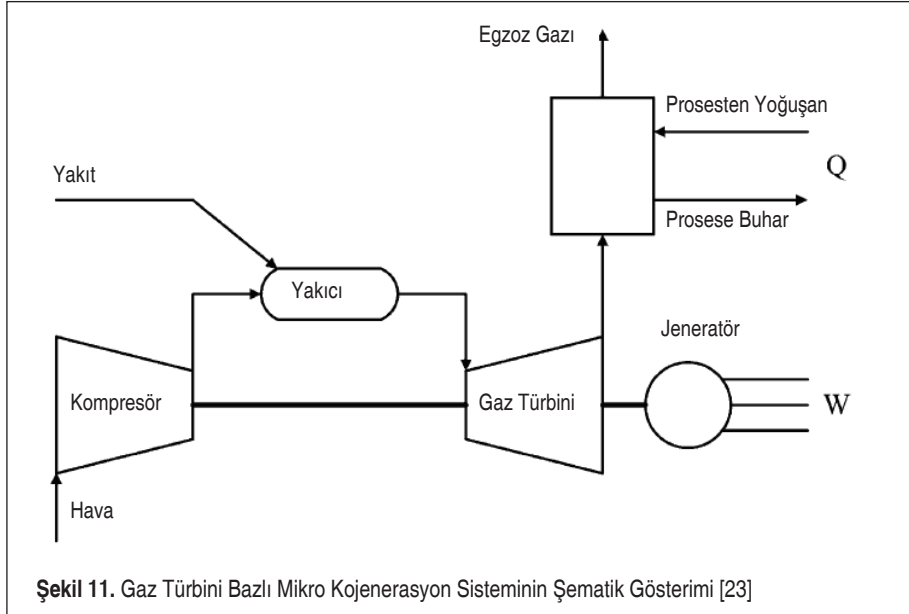
bilinir. Mikro türbinler, türbin teknolojisinin daha küçük ölçeklerde geliştirilmiş halidir ve bu türbinler iki bölüme ayrılabilir: gaz türbinleri ve buhar türbinleri.

### 3.2.1 Gaz Türbinleri

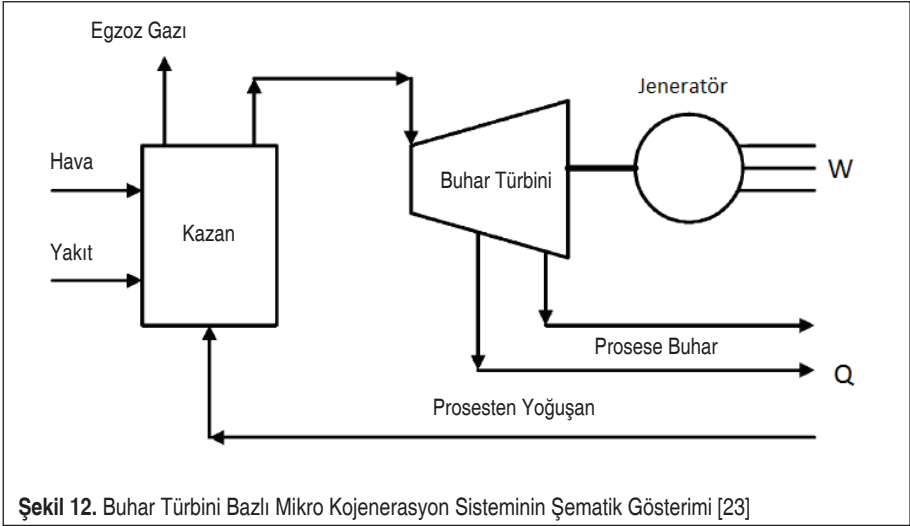
Gaz türbinlerinin çalışma prensipleri buhar türbinlerine benzerdir. Ancak gaz türbinlerinde su buharı yerine yüksek sıcaklık ve basınçta gaz kullanılır. Yanma sonucu oluşan gazın doğrudan türbin içine girerek kanatları döndürmesi sonucu mekanik enerji üretilir. Mikro gaz türbinleri, küçük ölçekli enerji üretiminde diğer teknolojilere kıyasla birçok avantaj sunmaktadır [17]. Örneğin kompakt boyut ve birim güç başına düşük ağırlık maliyetlerin düşmesine neden olurken, hareketli parçaların azlığı ise daha düşük gürültüye neden olur. Genel olarak doğalgazla çalışırlar; ancak dizel gibi sıvı yakıtlarla da çalışabilirler. Literatürde mikro gaz türbinleri ile ilgili çalışmalar mevcuttur [18-22]. Gaz türbini tabanlı mikro kojenerasyona ait bir sistem örneği Şekil 11’de verilmiştir.

### 3.2.2 Buhar Türbinleri

Buhar türbininde, bir kazanda yüksek basınçta üretilen buhar, türbinde genişleyerek işlem sonunda mekanik enerji üretmektedir. Buhar türbinleri Rankine Çevrimi’ne göre çalışmaktadır. Mikro kojenerasyon sistemlerinde genel olarak Organik Rankine Çevrimi yaygın olarak uygulanmaktadır. Organik Rankine Çevrimi’nde çalışma sıvısı olarak sudan daha düşük kaynama sıcaklığına sahip olan bir organik sıvı kullanılır



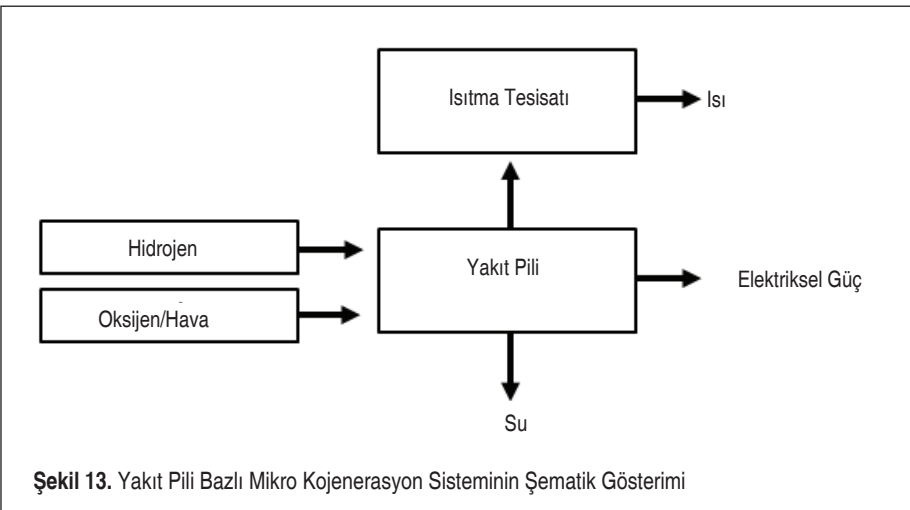
Şekil 11. Gaz Türbini Bazlı Mikro Kojenerasyon Sisteminin Şematik Gösterimi [23]



[24]. Buhar türbinli mikro kojenerasyon sistemleri ile ilgili bazı çalışmalar literatürde mevcut olup [24-28], bunun şematik gösterimi Şekil 12’de verilmiştir.

### 3.3 Yakıt Pili Bazlı Sistemler

Yakıt pillerinde, herhangi bir yanma işlemi ve hareketli parça olmaksızın, elektrokimyasal bir proses ile hidrojen ve oksijenden doğrudan elektrik enerjisi üretilmektedir. Yakıt pilli mikro kojenerasyon sistemleri genelde, düşük sıcaklık (yaklaşık 80 °C) polimer elektrolit membran yakıt pilleri veya yüksek sıcaklık (yaklaşık 800-1000 °C)



Şekil 13. Yakıt Pili Bazlı Mikro Kojenerasyon Sisteminin Şematik Gösterimi



katı oksit yakıt pilleri olmak üzere ikiye ayrılır [29-35]. Yakıt pilli mikro kojenerasyon sistemlerine ait şematik diyagram Şekil 13'te gösterilmektedir.

#### **4. MİKRO KOJENERASYON SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Çalışmanın bu bölümünde, piyasada bulunan ve konut kullanımına uygun beş farklı tipte mikro kojenerasyon sistemleri araştırılarak sistemlerin birbirleriyle karşılaştırmaları yapılmıştır. Tablo 2'de çeşitli firmaların üretmiş oldukları içten yanmalı, dıştan yanmalı, gaz türbinli, buhar türbinli ve yakıt pilli mikro kojenerasyon sistemlerine ait sisteme giren toplam enerji, çıkan elektriksel güç, çıkan termal güç ve sistemin toplam verimleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde, tüm sistemlerin kendi içinde değişiklik gösterdiği görülmektedir. Örneğin içten yanmalı motorlu mikro kojenerasyon sistemlerinde sistemin toplam verimliliği %84-95,3 arasında değişirken, Stirling motorlu sistemlerde %91-100 arasında değişmekte, yakıt pilli sistemlerde ise %85-95 arasında değişmektedir. Genellikle tüm mikro kojenerasyon sistemlerinde termal çıkış güçleri çıkan elektriksel güçten daha yüksektir. En yüksek elektriksel güç ve termal güç Cogengreen firmasının içten yanmalı motorlu mikro kojenerasyon sistemlerinden elde edilmektedir. En yüksek termal verim değeri, OTAG şirketinin üretmiş olduğu Rankine çevrimli mikro kojenerasyon sisteminde görülmüştür. En yüksek elektriksel verim, CFCL BlueGen şirketinin ürettiği katı oksit yakıt pilli mikro kojenerasyon sistemi ile elde edilmiştir; ancak bu sistemin toplam verimi düşüktür.

Mikro kojenerasyon sistemlerinde bir diğer önemli konu da gürültü problemidir. Wu ve Wang [51], kombine soğutma, ısıtma ve güç üretimi ile ilgili bir derleme yapmışlardır. Yaptıkları derleme çalışmalarında, içten yanmalı motorlu mikro kojenerasyon sistemlerinin gürültülü, mikro türbin ve Stirling motorlu sistemlerin orta derecede gürültülü, yakıt pilli sistemlerin ise sessiz çalıştıklarını ifade etmişlerdir.

Doğalgazla çalışan içten yanmalı motor, türbin ve yakıt pilli mikro kojenerasyon sistemler ile ilgili teknik bilgiler ve bu sistemlerin maliyet analizleri Tablo 3'te verilmiştir [52]. Tabloda sistemlerin toplam kapasiteleri, elektrik üretim kapasiteleri, termal kapasiteleri, ilk yatırım maliyetleri ve yıllık kar oranları gibi bilgiler yer almıştır. Basit geri ödeme süreleri baz alındığında en kısa sürenin içten yanmalı motorda, en uzun sürenin ise yakıt pilli sistemde olduğu görülmektedir. Yakıt pilli mikro kojenerasyon sistemleri en yüksek verim ve en düşük işletme maliyetine sahiptir. Ancak, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle yakıt pilli mikro kojenerasyon sistemlerinin geri ödeme süreleri en uzundur.



Tablo 2. Mikro Kojenerasyon Sistemlerinin Temel Karakteristikleri

Teknoloji	Üretici	Model	Giren Güç (kW)	Elektriksel Güç Çıkışı (kW)	Termal Güç Çıkışı (kW)	Toplam Verim (%)	Referans
İçten Yanmalı Motor	Honda	ECOWILL	5,00	1,00	3,30	85,00	[36]
İçten Yanmalı Motor	Cogengreen	Ecogen-12AG	43,00	12,00	28,00	93,00	[37]
İçten Yanmalı Motor	Vaillant	Ecopower e4.7	19,11	4,70	12,50	90,00	[38]
İçten Yanmalı Motor	Senerfec (DACHS)	HKA G 5.0	19,20	5,00	12,12	89,00	[39]
İçten Yanmalı Motor	AISIN SEIKI	GECC46A2	18,00	4,60	10,55	84,00	[40]
İçten Yanmalı Motor	Yanmar	CP5VB	17,50	5,00	9,60	84,80	[41]
İçten Yanmalı Motor	ECpower	XRG19	29,59	9,00	19,20	95,30	[42]
Stirling Motor	Baxi	Ecogen	6,66	1,00	5,06	91,00	[35]
Stirling Motor	Sunmachine		14,90	3,00	10,50	90,60	[43]
Stirling Motor	Stirling Systems	Solo 161	10,00	2,00	8,00	100,00	[43]
Stirling Motor	DISENCO		16,30	3,00	12,00	92,00	[44]
Stirling Motor	MICROGEN		7,40	1,00	6,00	94,60	[43]
Stirling Motor	INFINIA		8,00	1,00	6,40	92,50	[45]
Mikro Gaz Türbin	MTT	Prototype	18,75	3,00	15,00	96,00	[46]
Mikro Rankine Çevrim	OTAG	Lion	19,23	2,00	16,07	94,00	[47]
Mikro Rankine Çevrim	Energetix	Genlec	10,00	1,00	8,00	90,00	[48]
Mikro Rankine Çevrim	COGEN Microsystems	Prototype	13,51	2,50	11,00	99,90	[49]
Yakıt Pili, PEM	Panasonic	Ene-farm	2,86	1,00	1,43	85,00	[35]
Yakıt Pili, SOFC	Hexis Galileo	1000N	2,95	1,00	1,80	95,00	[50]
Yakıt Pili, SOFC	CFCL BlueGen		2,50	1,50	0,63	85,00	[35]

**Tablo 3.** Mikro Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Karşılaştırması [52]

Kojenerasyon Sistem Tipi	İçten Yanmalı Motor	Mikro Türbin	Yakıt Pili
Sistem Kapasitesi [kW]	87,96	68,01	52,59
Elektrik Üretim Kapasitesi [kW]	50,00	30,00	25,00
Termal Kapasite [kW]	37,96	38,01	27,59
Enerji Tüketimi [kW]	174,98	123,77	69,04
Kapasite Kullanım Oranı	0,95	0,95	0,95
Yatırım Maliyeti [\$]	110500	89100	227500
Yıllık Yakıt Maliyeti [\$/Yıl]	37108	26099	14559
Yakıt Hariç Yıllık İşletme Maliyeti [\$/Yıl]	9154	7490	7282
Yıllık Toplam Gider [\$/Yıl]	46262	33589	21840
Elektrik Fiyatı [\$/kWh]	0,17	0,17	0,17
Isınma Maliyeti [\$/kWh]	0,043	0,043	0,043
Elde Edilen Elektrikğin Ekonomik Değeri [\$/Yıl]	70560	42336	35280
Elde Edilen Isının Ekonomik Değeri [\$/Yıl]	13554	13569	9849
Yıllık Ekonomik Kazanç [\$/Yıl]	84114	55905	45129
Yıllık Kar [\$/Yıl]	37852	22316	23289
Basit Amortisman Süresi [Yıl]	2,92	3,99	9,77

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Son yıllarda mikro kojenerasyon teknolojileri piyasada artmaktadır. Bu çalışmada, içten yanmalı motorlara, dıştan yanmalı motorlara, mikro gaz türbinlerine, mikro buhar türbinlerine ve yakıt pillerine dayanan mikro kojenerasyon sistemleri tanıtılmıştır. Bu sistemlerin piyasadaki uygulamaları incelenmiş ve bu sistemlere ait sisteme giren toplam enerji, çıkan elektriksel güç, çıkan termal güç, sistemin toplam verimleri, yatırım maliyetleri, basit amortisman süreleri ile ilgili bilgiler verilerek değerlendirilmeler yapılmıştır. Genel olarak termal çıkış gücü, tüm mikro kojenerasyon sistemlerinde elektriksel güçten daha yüksektir. Sistemlerin toplam verimlerinin de genelde %85'lerin üstünde olduğu görülmüştür. En yüksek elektriksel güç ve termal güç içten yanmalı motorlu mikro kojenerasyon sistemlerinden elde edilmektedir. Basit geri ödeme süreleri baz alındığında, en kısa sürenin içten yanmalı motorlarda, en uzun sürenin ise yakıt pilli sistemlerde olduğu görülmüştür. Yakıt pilli mikro kojenerasyon



sistemlerinin yüksek verim ve düşük işletme maliyetlerine rağmen, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle geri ödeme süreleri en fazla zaman alan sistemler olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, tüm mikro kojenerasyonlu sistemlerde sistem verimi konvansiyonel sistemlere göre daha fazladır ve enerji verimliliğini arttırmada mikro kojenerasyon sistemleri önemli bir rol alabilecek potansiyele sahiptirler.

## KAYNAKÇA

1. **Harrison, J., Redford, S.** 2001. Domestic CHP. What are the Potential Benefits? Report for the Energy Saving Trust, EA Technology Limited, Capenhurst.
2. European Parliament and European Council. 2004. Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of the 11 February 2004 on the Promotion of Cogeneration Based on the Useful Heat Demand in the Internal Energy Market and Amending Directive 92/42/EEC, Official Journal of the European Union.
3. **Fuentes-Cortés, L. F., Ávila-Hernández, A., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J. M.** 2015. "Optimal Design of CHP Systems for Housing Complexes Involving Weather and Electric Market Variations," Applied Thermal Engineering, vol. 90, p. 895-906.
4. **Koç, E., Şenel, M. C.** 2013. "Dünyada ve Türkiye'de Enerji Durumu-Genel Değerlendirme," Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 54, sayı 639, s. 32-44.
5. **Koç, E., Kaya, K.** 2015. "Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu," Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 56, sayı 668, s. 36-47.
6. BP Statistical Review of World Energy. 2016. British Petroleum (BP), London, UK.
7. <http://www.exeterrenewables.co.uk/micro-chp>, son erişim tarihi:21.04.2016.
8. **Cervone, A., Romito, D. Z., Santini, E.** 2011. "Technical and Economic Analysis of a Micro-tri/Cogeneration System with Reference to the Primary Power Source in a Shopping Center," International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 14-16 June 2011, Italy, DOI: 10.1109/ICCEP.2011.6036379, IEEE, p. 439-445.
9. **Possidente, R., Roselli, C., Sasso, M., Sibilio, S.** 2006. "Experimental Analysis of Micro-Cogeneration Units Based on Reciprocating Internal Combustion Engine," Energy and Buildings, vol. 38, no. 12, p.1417-1422.
10. **Magno, A., Mancaruso, E., Vaglieco, B. M.** 2015. "Effects of a Biodiesel Blend on Energy Distribution and Exhaust Emissions of a Small CI Engine," Energy Conversion and Management, vol. 96, p. 72-80.
11. **Muccillo, M., Gimelli, A.** 2014. "Experimental Development, 1D CFD Simulation and Energetic Analysis of a 15 kw Micro-CHP Unit Based on Reciprocating Internal Combustion Engine," Applied Thermal Engineering, vol. 71, no. 2, p. 760-770.
12. **Asaee, S. R., Ugursal, V. I., Beausoleil-Morrison, I.** 2015. "Techno-Economic Evaluation of Internal Combustion Engine Based Cogeneration System Retrofits in Canadian Houses – A Preliminary Study," Applied Energy, vol. 140, p. 171-183.



13. **Cioccolanti, L., Savoretti, A., Renzic, M., Caresana, F., Comodi, G.** 2015. "Design and Test of a Single Effect Thermal Desalination Plant Using Waste Heat From m-CHP Units," *Applied Thermal Engineering*, vol. 82, p. 18-29.
14. **Damirchi, H., Najafi, G., Alizadehnia, S., Ghobadian, B., Yusaf, T., Mamat, R.** 2015. "Design, Fabrication and Evaluation of Gamma-Type Stirling Engine to Produce Electricity from Biomass for the Micro-CHP System," *Energy Procedia*, vol. 75, p. 137-143.
15. **Arashnia, I., Najafi, G., Ghobadian, B., Yusaf, T., Mamat, R., Kettner, M.** 2015. "Development of Micro-Scale Biomass-Fuelled CHP System Using Stirling Engine," *Energy Procedia*, vol. 75, p. 1108-1113.
16. **Renzi, M., Brandoni, C.** 2014. "Study and Application of a Regenerative Stirling Cogeneration Device Based on Biomass Combustion," *Applied Thermal Engineering*, vol. 67, no. 1-2, p. 341-351.
17. **Pilavachi, P. A.** 2000. "Power Generation with Gas Turbine Systems and Combined Heat and Power," *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, no. 15-16, p. 1421-1429.
18. **Nikpey, H., Assadi, M., Breuhaus, P.** 2013. "Development of an Optimized Artificial Neural Network Model for Combined Heat and Power Micro Gas Turbines," *Applied Energy*, vol. 108, p. 137-148.
19. **Nikpey, H., Assadi, M., Breuhaus, P., Mørkved, P. T.** 2014. "Experimental Evaluation and ANN Modeling of a Recuperative Micro Gas Turbine Burning Mixtures of Natural Gas and Biogas," *Applied Energy*, vol. 117, p. 30-41.
20. **Pilavachi, P. A.** 2002. "Mini- and Micro-Gas Turbines for Combined Heat and Power," *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, p. 2003-2014.
21. **Al-attab, K. A., Zainal, Z. A.** 2010. "Turbine Startup Methods for Externally Fired Micro Gas Turbine (EFMGT) System Using Biomass Fuels," *Applied Energy*, vol. 87, no. 4, p. 1336-1341.
22. **Stathopoulos, P., Paschereit, C. O.** 2015. "Retrofitting Micro Gas Turbines for Wet Operation. A Way to Increase Operational Flexibility in Distributed CHP Plants," *Applied Energy*, vol. 154, p. 438-446.
23. **COGEN Europe.** 2001. "An Educational Tool for Cogeneration," <http://www.esco.co.ua>, son erişim tarihi: 19.04.2016.
24. **Qiu, G., Liu, H., Riffat, S.** 2011. "Expanders for Micro-CHP Systems with Organic Rankine Cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 6, p. 3301-3307.
25. **Schuster, A., Karellas, S., Kakaras, E., Spliethoff, H.** 2009. "Energetic and Economic Investigation of Organic Rankine Cycle Applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, no. 8-9, p. 1809-1817.
26. **Liu, H., Qiu, G., Shao, Y., Daminabo, F., Riffat, S. B.** 2010. "Preliminary Experimental Investigations of a Biomass-Fired Micro-Scale CHP with Organic Rankine Cycle," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 5, p. 81-87.





27. **Ebrahimi, M., Keshavarz, A., Jamali, A.** 2012. "Energy and Exergy Analyses of a Micro-Steam CCHP Cycle for a Residential Building," *Energy and Buildings*, vol. 45, p. 202-210.
28. **Mikielewicz, J.** 2010. "Micro Heat and Power Plants Working in Organic Rankine Cycle," *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 19, p. 499-505.
29. **Elmer, T., Worall, M., Wu, S., Riffat, S. B.** 2015. "Emission and Economic Performance Assessment of a solid Oxide Fuel Cell Micro-Combined Heat and Power System in a Domestic Building," *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, p. 1082-1089.
30. **Marcobertardino, G. D., Roses, L., Manzolini, G.** 2016. "Technical Assessment of a Micro-Cogeneration System Based on Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell and Fluidized Bed Autothermal Reformer," *Applied Energy*, vol. 162, p. 231-244.
31. **Wongchanapai, S., Iwai, H., Saito, M., Yoshida, H.** 2013. "Performance Evaluation of a Direct-Biogas Solid Oxide Fuel Cell-Micro Gas Turbine (SOFC-MGT) Hybrid Combined Heat and Power (CHP) System," *Journal of Power Sources*, vol. 223, p. 9-17.
32. **Choudhury, A., Chandra, H., Arora, A.** 2013. "Application of Solid Oxide Fuel Cell Technology for Power Generation—A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, p. 430-442.
33. **Khani, L., Mahmoudi, S. M. S., Chitsaz, A., Rosen, M. A.** 2016. "Energy and Exergoeconomic Evaluation of a New Power/Cooling Cogeneration System Based on a Solid Oxide Fuel Cell," *Energy*, vol. 94, p. 64-77.
34. **Najafi, B., Mamaghani, A. H., Rinaldi, F., Casalegno, A.** 2015. "Fuel Partialization and Power/Heat Shifting Strategies Applied to a 30 kWel High Temperature PEM Fuel Cell Based Residential Micro Cogeneration Plant," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, p. 14224-14234.
35. **Maghanki, M. M., Ghobadian, B., Najafi, G., Galogah, R. J.** 2013. "Micro Combined Heat and Power (MCHP) Technologies and Applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, p. 510-524.
36. <http://world.honda.com/power/cogenerator/>, son erişim tarihi: 19.04.2016.
37. <http://www.cogengreen.com/en/ecogen-12ag>, son erişim tarihi: 24.04.2016.
38. <http://www.bhkw-prinz.de/vaillant-ecopower-3-0-und-ecopower-4-7-mini-bhkw/61>, son erişim tarihi: 21.04.2016.
39. <http://www.senertec.de/>, son erişim tarihi: 21.04.2016.
40. <http://www.aisin.com>, son erişim tarihi: 21.04.2016.
41. **Roselli, C., Sasso, M., Sibilio, S., Tzscheutschler, P.** 2011. "Experimental Analysis of Microcogenerators Based on Different Prime Movers," *Energy and Buildings*, vol. 43, p. 796-804.
42. <http://www.ecpower.eu/en/technical-data.html>, son erişim tarihi: 22.04.2016.



43. **Barbieri, E. S., Spina, P. R., Venturini, M.** 2012. "Analysis of Innovative Micro-CHP Systems to Meet Household Energy Demands," *Applied Energy*, vol. 97, p. 723-733.
44. <http://www.disenco.com/>, son erişim tarihi: 22.04.2016.
45. <http://www.infiniacorp.com>, son erişim tarihi: 23.04.2016.
46. **Visser, W. P. J., Shakariyants, S. A., Oostveen, M.** 2010. "Development of a 3 kW Microturbine for CHP Applications," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 133 no. 4, p. 042301.
47. <http://www.otag.de>, son erişim tarihi: 25.04.2016.
48. <http://www.genlec.com>, son erişim tarihi: 15.04.2016.
49. <http://www.cogenmicro.com>, son erişim tarihi: 15.04.2016.
50. <http://www.hexis.com/en/system-data>, son erişim tarihi: 28.02.2017.
51. **Wu, D. W., Wang, R. Z.** 2006. "Combined Cooling, Heating and Power: A Review," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 32, no. 5-6, p. 459-495.
52. **Brooks, K., Makhmalbaf, A., Anderson, D., Amaya, J., Pilli, S., Srivastava, V., Upton, J.** 2013. "Business Case for a Mico-Combined Heat and Power Fuel-Cell System in Commercial Applications," Pacific Northwest National Laboratory, U.S. Department of Energy, Washington, USA.

# Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri

Azim Gökçe <sup>\*1</sup>

Fehim Fındık <sup>2</sup>

Ali Osman Kurt <sup>3</sup>

## ÖZ

Toz metalurjisi (TM), üreticilere diğer imal usullerine göre büyük avantajlar sunan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemin aşamaları olan toz üretimi, toz işleme, presleme, sinterleme ve sinterleme sonrası işlemlerdeki küçük farklılıklar nihai ürün özelliklerini büyük oranda etkilemektedir. Alüminyum alaşımları günümüzde en çok kullanılan ikinci mühendislik alaşımıdır. Günümüzde otomotiv sektöründe bazı alüminyum parçalar TM uygulamaları ile üretilmektedir. Yüksek dayanımlı alüminyum TM alaşımlarının geliştirilmesi ile ileride daha fazla sayıda parçanın bu yöntemle üretilmesi beklenmektedir. Bu çalışmada, alüminyum alaşımlarından TM ile parça üretimi hakkında bilgi verilmiş, özellikle mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan Al-Cu, Al-Si ve Al-Mg alaşımlarıyla ilgili literatürdeki bir takım sonuçlardan örnekler sunulmuştur. Farklı alaşımların sinterlenmesi sonucu elde edilen özellikler hakkında bilgi verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Toz metalurjisi, alüminyum alaşımları, sinterleme

## Powder Metallurgy Processing of Aluminum Alloys

### ABSTRACT

Powder metallurgy (PM) is a production method that offers manufacturers great advantages over other manufacturing processes. Little changes in the production steps of powder metallurgy method such as powder manufacture, powder processing, pressing, sintering affect the properties of the final product significantly. Aluminum alloys are second most used alloy in the engineering applications. Nowadays some parts in the automotive sector are produced with aluminum PM alloys. In the future, it is expected that more Al-PM parts will be produced with the development of new high strength Al based PM alloys. In this study, information about the production of the Al-PM parts is given and some examples about the sintering of Al-Cu, Al-Si and Al-Mg PM alloys from the relevant literature are presented. Properties of the various sintered PM Aluminum alloys are highlighted.

**Keywords:** Powder metallurgy, aluminium alloys, sintering

---

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 02.02.2017

Kabul/Accepted : 04.04.2017

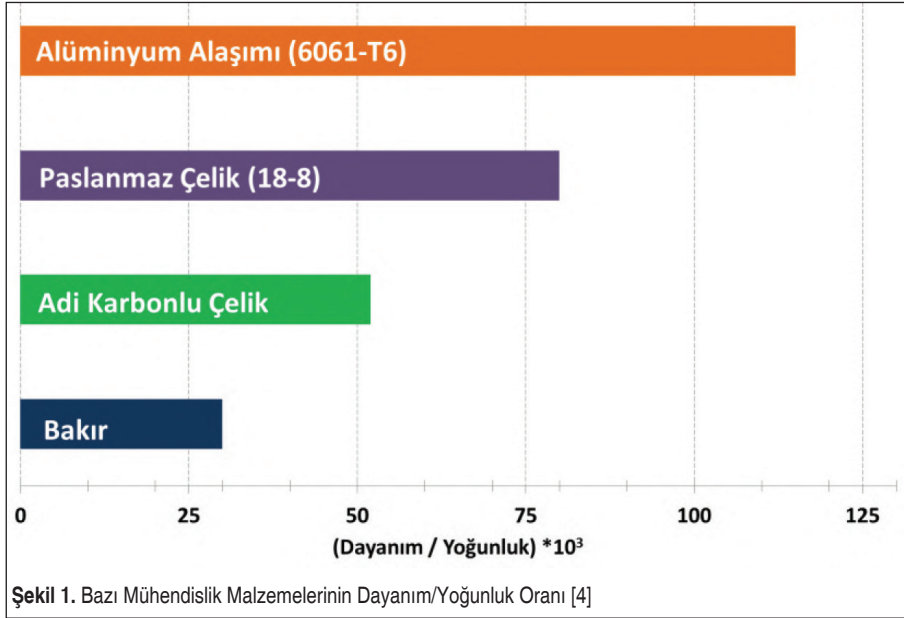
<sup>1</sup> Yrd. Doç. Dr., Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Sakarya  
azimg@sakarya.edu.tr

<sup>2</sup> Prof. Dr., Sakarya Üniversitesi, Biyomedikal, Manyetik, Yarıiletken Malzemeler Uygulama ve Araştırma Merkezi  
(BİMAYAM), Sakarya - findik@sakarya.edu.tr

<sup>3</sup> Prof. Dr., Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Sakarya  
aokurt@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ

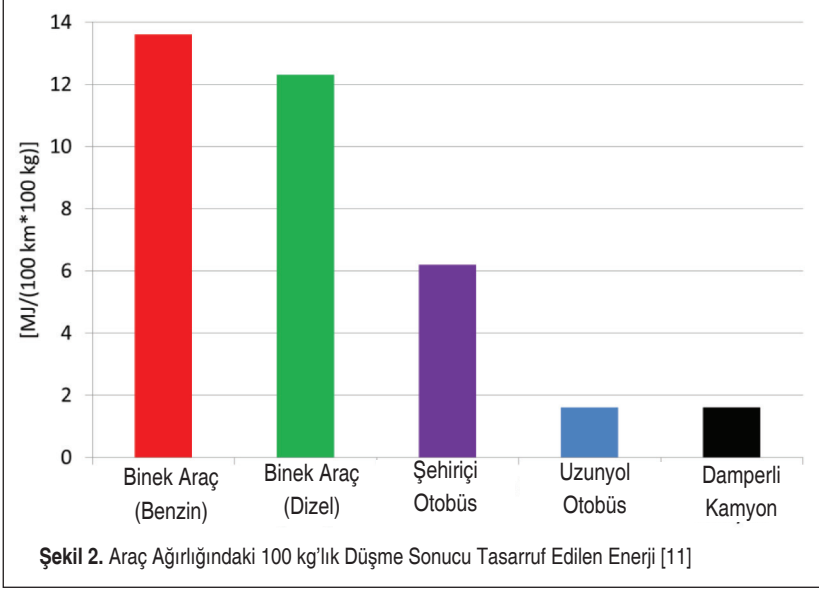
Alüminyum alaşımları günümüzde çelikten sonra en çok kullanılan metalik mühendislik malzemeleridir [1]. Düşük yoğunluk ( $2,7 \text{ gr/cm}^3$ ), yüksek korozyon dayanımı, yüksek elektriksel iletkenlik ve diğer mühendislik malzemelerine göre yüksek spesifik dayanım (Şekil 1) gibi özellikleri alüminyum alaşımlarına olan ilginin sebeplerindendir. Manyetik olmamasından dolayı manyetizmaya dayalı prensiplerle çalışan elektronik cihazların imalatında tercih edilen bir malzemedir. Ayrıca, alüminyum alaşımları yüksek ısı iletkenliği, yanıcı ve parlayıcı olmaması, tamamıyla geri dönüşebilir olması, kaynaklanabilir olması gibi özelliklerinden dolayı diğer mühendislik malzemelerine önemli üstünlükler de sağlamaktadır [2, 3].



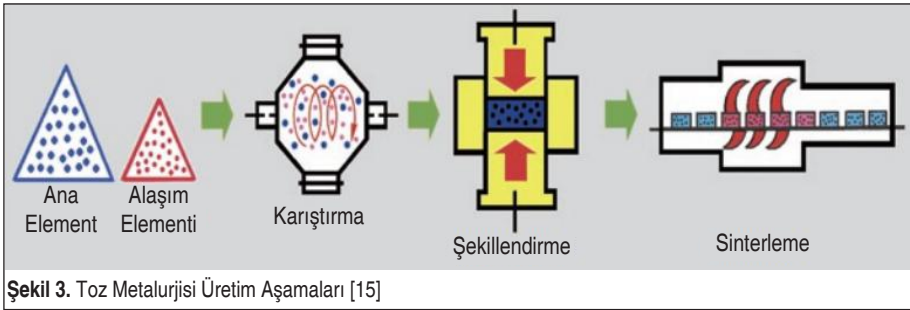
Alüminyum alaşımlarının günümüzde daha çok ilgi görmesinin başka bir sebebi ise taşımacılık sektöründe yaşanan gelişmelerdir. Özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisi daha hafif, dolayısıyla daha az yakıt tüketen ve çevreye daha az zarar veren araçlar üretimi konusunda çaba göstermektedir. Daha hafif araçlar üretmek için günümüzde tercih edilen malzemelerden biri de alüminyum alaşımlarıdır [5–8]. Yapılan bir çalışmada [9], araç ağırlığında elde edilebilecek 100 kg'lık bir düşme ile yakıt sarfiyatında 0,3 lt/100 km'lik bir azalma, CO<sub>2</sub> salınımlarında ise 7,5 ila 12,5 gram'lık bir düşüş olduğu saptanmıştır. Araç ağırlığında meydana gelen 100 kg'lık bir düşme ile 100 km'lik bir mesafede elde edilecek enerji tasarrufu Şekil 2'de verilmiştir. 2006 yılında bir



araçta 142 kg alüminyum alaşımı parça kullanılırken, yapılan öngörülere göre 2035 yılında bu değer 2 katından fazla artarak 325 kg olacaktır [10].

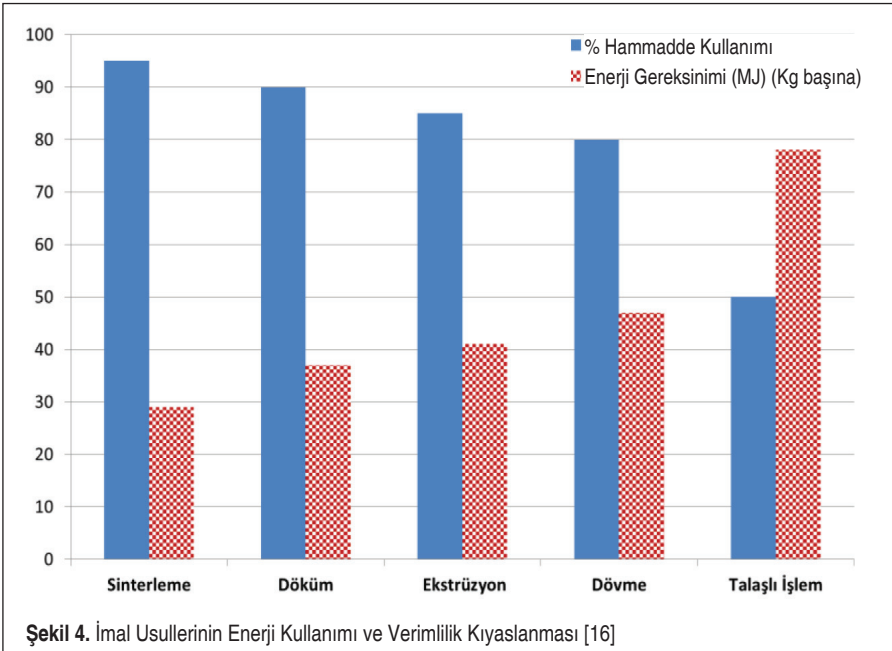


Toz metalurjisi (TM) kısaca, metal veya seramik tozlarını bir kalıpta şekillendirerek, şekillendirme esnasında veya sonrasında ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta pişirilmesi (sinterlenmesi) sürecidir (Şekil 3). Tarihi kaynaklara göre, toz metalurjisi yöntemini ilk olarak MÖ. 3000'li yıllarda Mısırlılar kullanmıştır [12]. Seramikler, mineraller, un, tuz, şeker gibi maddeler tarih boyunca sinterlenerek ürüne dönüştürülmüş olsa da TM yönteminin mühendislik malzemelerinin üretiminde asıl gelişimi 1900'lü yılların 2. yarısından sonra olmuştur [13]. Öncelikle, metalleri eritmek için gerekli ısıyı üretmek için yeterli teknolojiye sahip olunmaması nedeniyle tercih edilen bir yöntem olan TM, gelişen teknolojiyle kolaylıkla yüksek sıcaklıkla-



ra çıkılabilmesi nedeniyle uzun yıllar döküm yönteminin gerisinde kalmıştır. Ancak çok yüksek ergime sıcaklığına (3422 °C) sahip olması nedeniyle, döküm yöntemiyle üretimi halen dahi mümkün olmayan tungsten metalinden lamba flamanlarının bu yöntemle üretilmesi yöntemin gelişimi açısından bir milat olmuştur [14].

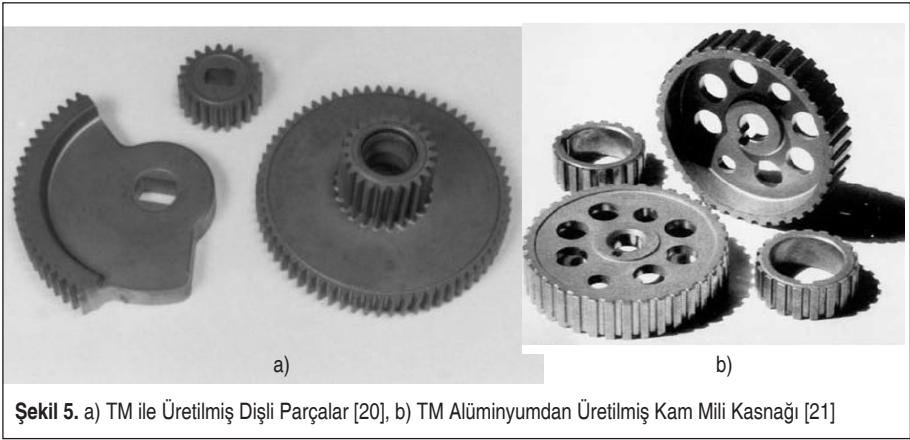
Toz metalurjisi yöntemi enerji sarfiyatı ve hammaddenin ürüne dönüşmesi açısından diğer geleneksel imal usullerine göre büyük avantaj sunmaktadır (Şekil 4). Şekil 4'teki verilere göre, talaşlı imalatta hammaddenin ancak %50'si ürüne dönüşürken TM'de bu miktar %95 civarındadır. Tam tersi olarak 1 kg parça üretmek için talaşlı imalatta yaklaşık 78 MJ enerji gerekirken bu miktar TM süreçlerinde talaşlı işlemler için gerekenin yarısından daha azdır [16]. Üretim hızı diğer usullere göre çok daha yüksektir. Karmaşık şekilli parça üretimi çok daha kolaydır. TM süreçlerinin bir türü olan Toz Enjeksiyon Kalıplama (PIM) ile pres-sinter yöntemine göre çok daha karmaşık şekilli parçaların üretimi mümkündür. Kontrollü gözeneklilik ile üretimin mümkün olması bu yöntemin başkaca avantajlarındandır. Böylelikle metalik filtreler, kendinden yağlamalı yatakların üretimi mümkün olmaktadır. Dökülmesi veya talaşlı işlenmesi mümkün olmayan WC-Co gibi seramik metal kompozit malzemeler bu yöntemle ürüne dönüştürülebilmektedir. Diğer yöntemlerle alaşım haline getirilmesi mümkün olmayan, ergime sıcaklıkları arasında büyük fark bulunan metaller de TM ile kolayca alaşım veya homojen formda karışım haline getirilebilmektedir. Mikroyapı kontrolü diğer yöntemlere göre daha kolaydır [17].





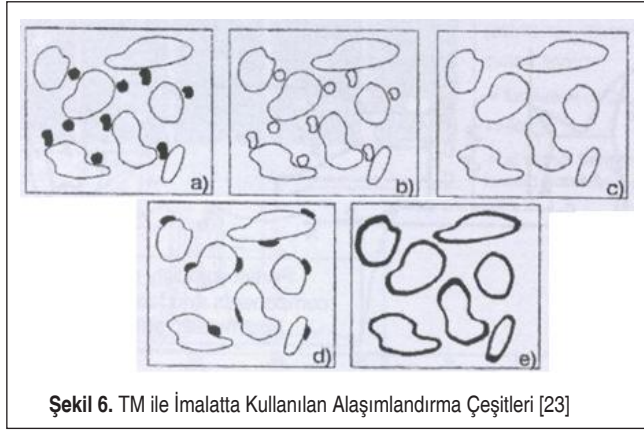
## 2. ALÜMİNYUM TOZ METALURJİSİ

Alüminyum tozlarının şekillendirme esnasında kalıp duvarına sıvanması, kalıba soğuk kaynaklanarak birleşmesi ve iyi akış özelliği göstermemesinden dolayı TM sektörünün alüminyum alaşımlarına ilgisi ancak 1940'lı yıllarda görülmüştür [18]. TM yöntemiyle üretilen parçaların büyük kısmı otomotiv imalat sektöründe kullanılmaktadır [19]. Bu parçaların büyük kısmından ise diferansiyel ve motor parçaları olarak yararlanılmaktadır (Şekil 5a) ve genellikle demir esaslı tozlar kullanılmaktadır. Toz metal alüminyum alaşımlarının motor parçalarında kullanımı eksantrik mili parçası (Şekil 5b) gibi birkaç parça ile sınırlı kalmaktadır [15].



### 2.1 Ticari Alüminyum Tozları

Toz metalurjisi yönteminde alaşımlama 5 farklı yöntem kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 6). Bunlardan birincisi, istenilen bileşime göre tartılmış elementel tozların homojen bir şekilde karıştırılması ile oluşturulmuş elementel toz karışım yöntemidir (Şekil 6a). Bir diğer yöntem, ana alaşım tozları (master alloy) kullanımdır (Şekil 6b). Bu yöntemde bir ana alaşımın (örneğin Al50Si) çeşitli yöntemlerle (atomizasyon vs.) toz haline getirilmesi ve sonrasında, istenilen bileşime getirilmesi için elementel tozlarla karıştırılması esas alınır. TM süreçlerinde en sık kullanılan toz türlerinden biri de önalaşımli tozlardır (Şekil 6c). Önalaşımli tozlar istenilen bileşimde dökülerek külçe haline getirilmiş alaşımın toz haline getirilmesi ile üretilir. Önalaşımli tozların en büyük avantajı kimyasal bileşimin her bir partikülde aynı olması ve karıştırma işlemlerinin çok daha kısa süreli olmasıdır. Bu tip tozların kullanımında karıştırma işlemi sadece farklı boyutlardaki parçacıkların homojen dağıtılması ve olası topaklanmaların ortadan kaldırılması için yapılır. Difüzyonla birleştirilmiş tozlar (Şekil 6d) birbirine difüzyon yöntemi ile birleştirilmiş tozların karıştırılarak kullanılmasını kapsar. Bu

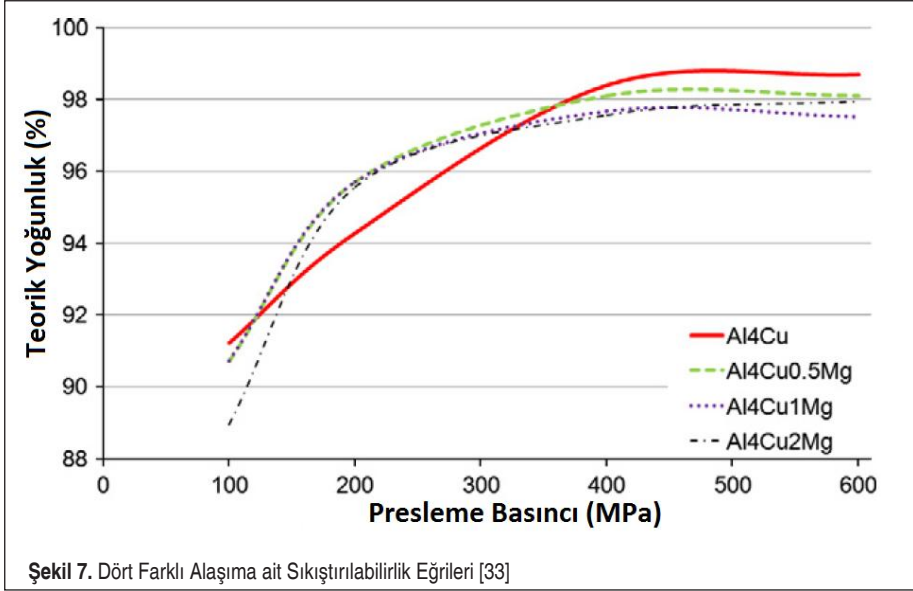


Şekil 6. TM ile İmalatta Kullanılan Alaşımlandırma Çeşitleri [23]

Tablo 1. Bazı Ticari Alüminyum Alaşımlarının Kimyasal Bileşimleri

Üretici	Ürün Kodu	Bileşim (% Ağı.)									
		Cu	Mg	Si	Mn	Cr	Fe	Zn	Yağlayıcı	Al	Ref
ALCOA	602	--	0,6	0,4	--	--	--	--	--	Kalan	[24]
	601	0,25	1	0,6	--	--	--	--	--	Kalan	
	202	4,0	--	--	--	--	--	--	--	Kalan	
	201AB	4,4	0,5	0,8	--	--	--	--	1,5	Kalan	[25]
	201 AC	4,4	0,5	0,8	--	--	--	--	--	Kalan	
ALCAN	24	4,4	0,5	0,9	0,4	--	--	--	--	Kalan	[26]
	22	2	1	0,3	--	--	--	--	--	Kalan	
	69	0,25	1	0,6	--	--	--	--	1,5	Kalan	
	76	1,6	2,5	--	--	--	--	--	1,5	Kalan	
ECKART	Alumix 123	4,5	0,5	0,7	--	--	--	--	--	Kalan	[19]
	Alumix 13	4,5	0,5	0,2	--	--	--	--	--	Kalan	[27]
	Alumix 231	2,5	0,6	14	--	--	--	--	--	Kalan	[28]
	Alumix 431	1,5	2,5	--	--	--	--	5,5	1,2	Kalan	[29]
	Alumix 321	0,21	0,95	0,49	--	--	0,07	--	--	Kalan	[30]
AMPAL	2712	3,8	1	0,75	--	--	--	--	--	Kalan	[24]
ALPOCO	2124	4,24	1,4	0,03	0,85	--	--	--	--	Kalan	[31]
	6061	0,44	0,82	0,6	0,08	0,3	--	--	--	Kalan	[32]





Şekil 7. Dört Farklı Alaşıma ait Sıkıştırılabilirlik Eğrileri [33]

yöntem daha çok demir esaslı alaşımlarda kullanılır. Kaplanmış tozlar (Şekil 6e) ise bir element tozunun çeşitli yöntemlerle başka bir element veya bileşikle kaplanması ile elde edilir.

Alüminyum alaşımlarının TM ile üretiminde genellikle elementel tozlar, önalaşımli tozlar veya ana alaşım tozları kullanılır. Difüzyonla birleştirilmiş alüminyum tozlarına literatürde rastlanılmamakla birlikte, alüminyum tozlarının oksitlenmesinin engellenmesi için polimer esaslı kaplamalarla kaplandığı bazı çalışmalar mevcuttur.

Günümüzde alüminyum tozları ticari olarak elementel, önceden karıştırılarak istenilen bileşime getirilmiş (pre-mix) veya önalaşımli (pre-alloyed) olarak bulunmaktadır. Bu alaşımların bileşimleri (Tablo 1) genellikle döküm veya işlenmiş (wrought) alüminyum alaşımlarına benzerdir. İlk olarak 1920'lerde pulsu yapıda üretilmesine rağmen, patlayıcı özelliğinden dolayı bilyeli değirmenin icadına kadar iş güvenliği bağlantılı sebeplerden dolayı yaygınlaşmamıştır. İkinci dünya savaşı sırasında patlayıcı imalatında büyük oranda alüminyum tozları kullanılmıştır [22].

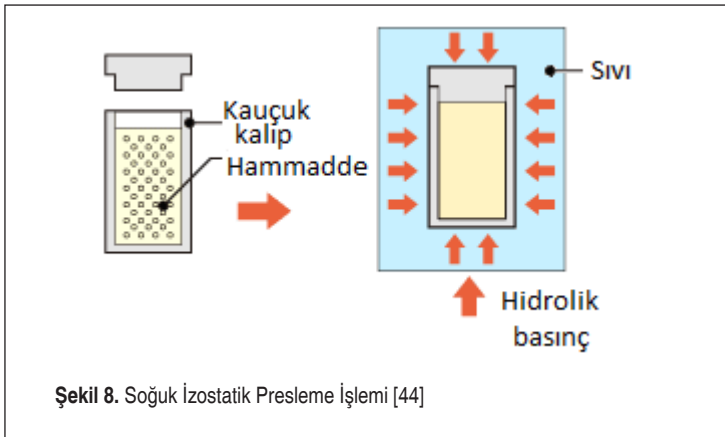
## 2.2 Şekillendirme İşlemleri

Karıştırma veya harmanlama işlemi uygulanmış tozların şekillendirilebilme özellikleri sıkıştırılma eğrileri ile ölçülür. Sıkıştırılma eğrisinin oluşturulabilmesi için toz hammadde düşük değerlerden başlanarak çeşitli basınçlarla preslenir. Belli bir basınç değerinden sonra kompaktların ham yoğunluğu ya hiç değişmez ya da çok az

değişir. Eğrinin sıkıştırma basıncı ile değişmediği bu değer, tozların en yüksek ham yoğunluğa ulaşması için gerekli en düşük basıncı gösterir. TM işlemlerinde en yüksek giderlerden biri kalıp maliyetidir ve yüksek basınçlı sıkıştırma işlemlerinde kalıp ömrü düşmektedir. Bu yüzden tozların sıkıştırma eğrilerinin doğru şekilde belirlenmesi önemlidir. Örnek bir sıkıştırılma eğrisi Şekil 7’de verilmiştir. Şekilde verilen 4 alaşım için eğrinin X eksenine paralellik göstermeye başladığı 400 MPa değeri bu 4 alaşım için en uygun presleme basıncı olarak kullanılmıştır. Grafikte dikkat çeken bir diğer nokta, 600 MPa ile preslenen numunelerin ham yoğunluğunda düşme görülmeye başlamasıdır. Bu durum yazarlar tarafından numunelerin yüksek basınç altında gösterdikleri geri yaylanma (spring back) davranışına bağlanmıştır [33].

Alüminyum tozlarının sertlikleri düşük olduğu için tek eksenli presleme ile kolaylıkla yüksek yoğunluk değerlerine ulaşılabilir [34]. Bu noktada alaşımların sinter sonrası yoğunlukları üzerinde basınçtan sonra en büyük etki tozların alaşımlanmasında kullanılan yöntemdir. Elementel toz karışımları nispeten daha düşük sertlikte olduğu için düşük şekillendirme basınçlarında bile yüksek ham yoğunluk değerlerine ulaşabilirken, daha sert olan önalaşımli tozların yüksek ham yoğunluk değerlerine ulaşabilmesi için daha yüksek presleme basınçları kullanılması gerekmektedir. Youseffi ve Showaiter [32], önalaşımli ve elementel karışım ile hazırlanmış 6061 alaşımı tozları kullandıkları çalışmada elementel tozlar ile 400 MPa basınç kullanarak ulaştıkları ham yoğunluk değerlerine önalaşımli tozlarda 800 MPa basınçla ulaşabilmişlerdir. Elementel karışımla hazırlanan alüminyum alaşımlarının tek eksenli preslenmesinde optimum presleme basıncı literatürde genellikle 400 MPa olarak belirtilmiştir [35, 36].

Soğuk izostatik presleme (CIP), tek eksenli kalıpla sıkıştırmada karşılaşılan gözenekliliğin homojen olmaması sorununun aşılması için tozların çok eksenli sıkıştırılması





için üretilmiş bir sistemdir. Sistem, oda sıcaklığında çalışır ve tozları elastik bir kalıp içinde şekillendirir. Elastik kalıp içine konan numune bir yağ içine daldırılır ve yağ haznesi sıkıştırılır (Şekil 8). Parça üzerine gelen basınç bütün yönlerden eşit düzeyde olduğu için gözeneklilik bütün noktalarda aynıdır. CIP ile 1400 MPa üzerinde basınçlara çıkılabilir; ancak genellikle 420 MPa altındaki basınçlarla çalışılır [37]. Anderson ve arkadaşları, saf alüminyum tozlarını 200 MPa basınçla soğuk izostatik presledikleri çalışmada %93 teorik yoğunluğa [38], Al-Cu-Fe tozlarında ise 280 MPa basınçla izostatik presleyerek %90 teorik yoğunluğa [39] ulaşmışlardır. Tek eksenli preslemede görülen kalıp duvarı ile kompakt arasında görülen sürtünme izostatik preslemede görülmez. Kalıp maliyeti tek eksenli presleme kalıpları kadar yüksek değildir [40].

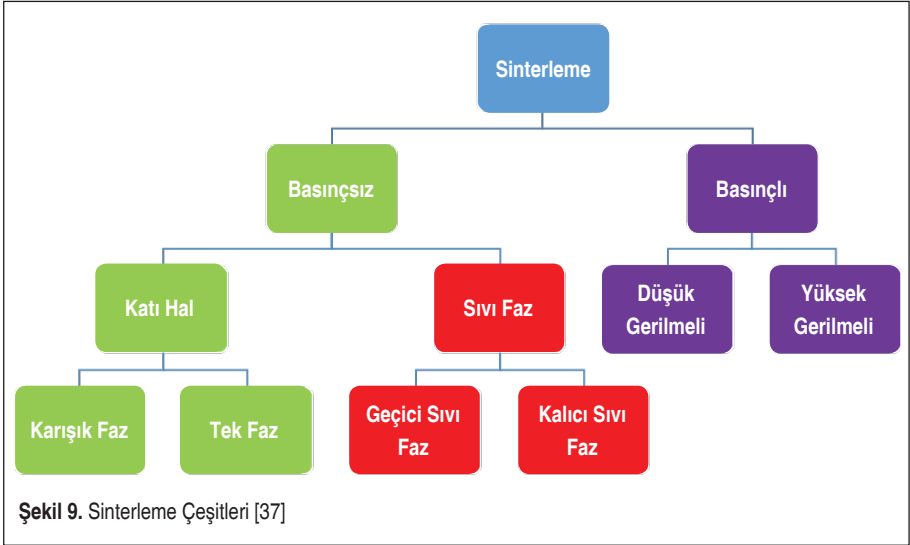
Sıcak izostatik presleme (HIP) cihazı çalışma prensibi soğuk izostatik presleme ile aynı olmakla birlikte, sıcak izostatik presleme de sıvı yerine gaz kullanılır. Kullanılan gaz genellikle argondur; ancak diğer soygazlar da kullanılabilir. HIP işlemi genelde 2200 °C sıcaklığa ve 200 MPa basınca kadar uygulanabilir. Basınç odacıkları 1,5 m çap ve 2,5 m yüksekliğe ulaşabilir. Alüminyum ve alaşımlarının sıcak izostatik preslenmesinde genellikle sıcaklık olarak 500 °C, basınç olarak 100 MPa kullanılır [41]. Bu yöntemde dezavantaj olarak numune yüzeyinin elastik kalıptan safsızlık bulaşması ve ikincil işleme temizlenmesi gerekliliği gösterilebilir. Gerek soğuk ve gerekse sıcak izostatik presleme işlemlerinde üretim hızı tek eksenli preslemeye göre oldukça düşüktür. Soğuk izostatik preslemede kalıbın kauçuk olmasından dolayı ölçü toleransları fazladır.

Alüminyum tozlarının, geleneksel yöntemler olarak kabul edilen pres-sinter, HIP ve CIP ile kolaylıkla yüksek ham yoğunluklara çıkabiliyor olması diğer yöntemlerle üretilmesini büyük oranda gerek duyulmamasına sebep olmuştur. Yapılan kısıtlı çalışmalardan birinde Kim ve arkadaşları [42] Toz Enjeksiyon Kalıplama (PIM) ile Al tozlarını kalıplamışlardır. Choudhury ve arkadaşları [43], alüminyum tozlarının PIM ile şekillendirilmesi amaçlı yeni bir bağlayıcı sistemi geliştirmiştir.

### 2.3 Sinterleme İşlemleri

Sinterleme işlemi, toz parçacıkların birbirine bağlanmasını sağlayan, böylece dayanımlarını artıran, yüzey alanlarını düşüren bir ısıl süreçtir [37]. Sinterleme işlemleri sinterlenecek malzemeye göre ve sinterleme sürecine göre değişik şekillerde yapılabilir (Şekil 9).

Sinterleme işlemi yüksek sıcaklıklarda atom difüzyonu mekanizmasıyla gerçekleşen bir işlemdir. Birim hacimdeki parçacık miktarı arttıkça, o birim hacimdeki yüzey enerjisi artar. Bu nedenle, daha fazla yüzey alanına sahip parçalar daha kolay sinterlenir. Sinterleme işlemi, oluşturulmuş yüksek serbest enerjiye sahip toz kompaktı, daha az gözenekli rijit bir cisme çevirme işlemidir [45]. Bazı özel malzemeler dışında bü-



tün tozmetal parçalar uygun bir sıcaklıkta sinterlenir. Kompaktlama sonucunda parça, sürtünmeden dolayı oluşan fiziksel yapışma etkisiyle, elle tutulacak kadar sağlam bir yapıdadır. Buna rağmen bütün parçacıklar yapıda bağımsız biçimde kalmıştır. Sinterleme işlemlerinde parçacıklar arası temas noktalarından başlayarak oluşan difüzyon olayları vasıtasıyla, ham parçanın yüksek dayanımlı bir nihai ürüne ulaşması amaçlanır.

Katı faz sinterleme, tek fazlı sistemlerde veya birbiri içinde çözünmeyen sistemlerde partiküllerin temas noktalarından atom difüzyonu ile gerçekleşen sinterleme mekanizmasıyla sıvı faz sinterleme parçacıklar arasındaki boşlukları doldurabilecek bir sıvı faz oluşumunun sinterlemeyi hızlandırması ve yoğunlaşma miktarını artırması esasına dayanır. Alüminyum alaşımlarında sıvı faz sinterleme sıklıkla kullanılmaktadır.

### 2.3.1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Tabakası

Alüminyum ve alaşımlarının sinterlenmesinde en büyük problem, toz parçacıklarının yüzeyinde üretimden gelen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakasının partiküller arasında difüzyonun oluşmasını engellemesidir. Alüminyum tozları hangi yöntemle üretilirse üretilsin, açık atmosfere çıktığı anda alüminyumun oksijene olan yüksek afinitesinden dolayı yüzeylerinde oksit tabakası oluşması kaçınılmaz olur [46]. Birçok metalin yüzey oksidini hidrojen altında sinterleyerek su buharı olarak sistemden atmak mümkündür. Ancak termodinamik açıdan bakıldığında, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ü indirgemek için kullanılacak hidrojenin 600 °C'de çiğ noktasının <-140 olması gerekir. Ancak -140'dan küçük bir çiğ noktası veya 10<sup>-50</sup> atm kısmi basınca ulaşılması mümkün olmadığından alüminyum yü-



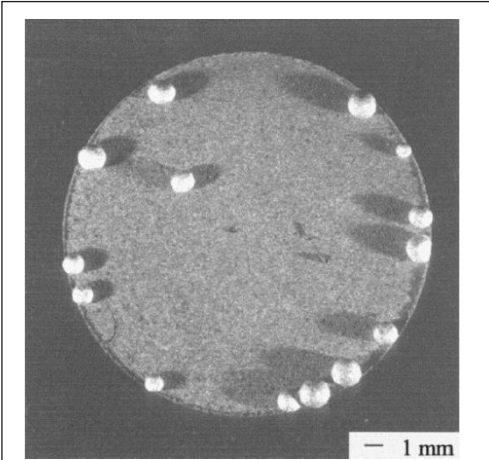
zeyindeki oksijenin kullanılan atmosfer (hidrojen) vasıtasıyla indirgenmesi mümkün değildir [47].  $Al_2O_3$ 'ün oluşması için  $100\text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $10^{-145}$  atm,  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $10^{-39}$  atm kısmi basınç yeterlidir [48]. Bu kısmi basınç değerlerine gerek vakum ve gerekse koruyucu atmosfer kullanılarak ulaşılması ise mümkün değildir.

Oksit tabakasının kalınlığı üretildiği andaki sıcaklık, saklama koşulları, özellikle de saklandığı ortamdaki neme bağlı olarak değişmektedir [46]. Külçe alüminyum yüzeyindeki oksit kalınlığı  $10\text{-}20\text{ \AA}$ 'dur. Alüminyum yüzeyindeki oksit genellikle amorfudur [49] ve nemlidir [46, 50]. Oksit  $350\text{ }^\circ\text{C}$  üzeri sıcaklıklarda tavlınırsa  $\gamma\text{-}Al_2O_3$  yapısında kristallenir. Oksit tabakası düşük ergime derecesine sahip metallerin katı faz sinterlenmesini engelleyici etki gösterir [51, 52]. Ancak tozların yüzeyindeki oksit tabakası alüminyumun havayla temasını keser ve patlayıcı özelliklerinin azalmasını sağlar [53].

Alüminyum tozları yüzeyindeki oksit tabakası, sıvı faz sinterleme sırasında ıslatma açısını artırarak sinterlemeyi olumsuz yönde etkiler [54]. Islatma açısının artması ile oluşan zayıf ıslatma davranışı dolayısıyla kompaktlarda şişme ve sıvı fazın kompakt dışına çıkması (Şekil 10) çoğunlukla gözlenmektedir [55]. Liu ve arkadaşları [56], şekillendirilmemiş ve dolayısıyla plastik deformasyona uğramamış tozların yüzeyindeki oksidin de alüminyum ve alümina arasındaki termal genleşme farkından dolayı kırılabileceğini ileri sürmüştür. Alüminyumun termal genleşme katsayısı  $27,4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  iken alüminanın termal genleşme katsayısı bunun yaklaşık  $1/4$ 'ü kadardır ( $7,4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ). Bu yüzden, sıcaklık artışıyla birlikte parçacıkların yüzeyindeki oksit tabakasında büyük bir gerilme meydana gelir [57]. Yapılan hesaplamalara göre,  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'de oksit tabakası üzerindeki gerilme yaklaşık  $4000\text{ MPa}$ 'dır ve bu gerilme

oksit tabakasının kırılması için yeterlidir. Küresel parçalardaki oksidin kırılması için sıcaklığın  $67\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkarılması yeterlidir. Düzensiz şekilli parçalarda gerilimin farklı noktalarda yoğunlaşması dolayısıyla oluşan farklılıkların oksit tabakasının kırılması için daha elverişli olduğu literatürde belirtilmiştir [56].

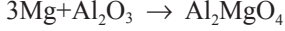
Alüminyum tozları üzerindeki oksit tabakasının elimine edilmesi için en sık kullanılan yöntemlerden biri de oksijene afinitesi alüminyumdan daha fazla olan bir alaşım elementi ilavesi ile oksit fazının indirgenme-



**Şekil 10.** Al-9Sn Alaşımında  $620\text{ }^\circ\text{C}$ 'de Sinterleme Sonrası Kompakt Dışına Çıkan Al-Sn Ötektik Fazı [52]



sidir. Bu amaçla en sık kullanılan element magnezyumdur [23, 33, 58, 59]. Alüminyum tozları yüzeyindeki oksidin magnezyum tarafından indirgenmesi aşağıdaki reaksiyona göre gerçekleşir [52].



Bu sebeple, toz metal alüminyum alaşımlarının bileşiminde genellikle magnezyum bulunmaktadır (Tablo 1).

### 2.3.2 Koruyucu Atmosfer

Alüminyum ve alaşımlarının sinterlenmesinde en önemli konulardan biri sinterleme atmosferinin seçimidir. Alüminyumun oksijene karşı afinitesinin yüksek olması açık atmosferde yapılan sinterleme işlemlerinde, alüminyum parçacıkları üzerinde alüminyum oksit tabakası oluşumuna sebep olmaktadır. Bu nedenle alüminyum alaşımları genel olarak bir koruyucu atmosfer altında sinterlenebilmektedir. Pieczonka, Alumix 431D (Al5.8Zn1.6Cu2.6Mg) tozları ile yaptığı çalışmada [60] azot, argon ve %95 azot - %5 hidrojen karışımını koruyucu atmosfer olarak kullanmış ve en iyi sonuçlara azot gazı ile ulaşmıştır. Aynı zamanda Pieczonka [60], kullanılan koruyucu atmosferin sinterleme mekanizmasını etkilemezken, oluşan genleşme ve büzülme miktarlarını değiştirdiğini tespit etmiştir. Başka bir çalışmada [61] ise en yüksek eğme dayanımı değerlerine azot atmosferinde sinterleme ile ulaşıldığını belirtmiştir (Tablo 2). Literatürdeki bazı çalışmalarda [61–65] da azotun en iyi koruyucu atmosfer olduğu ve azot kullanılması ile daha yüksek yoğunluklara ulaşılacağı rapor edilmiştir. Schaffer ve arkadaşları [65], azot atmosferinde sinterleme esnasında alüminyum partikül yüzeylerinde AlN tabakası oluştuğunu ve yüksek sıcaklıklarda oluşan sıvı fazın AlN tabakasını ıslatma açısının Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakasına göre daha düşük olmasına bağlamışlardır.

**Tablo 2.** %99,5 Safiyette Al Tozlarının Sinterlenmesinde Koruyucu Atmosfer Etkisi [61]

Sinterleme Atmosferi	Eğme Dayanımı (MPa)
N <sub>2</sub>	243,1
N <sub>2</sub> /%5H <sub>2</sub>	123,2
Ar	164,7
Ham Kompakt	21,5

### 2.4 TM Alüminyum Alaşım Sistemleri

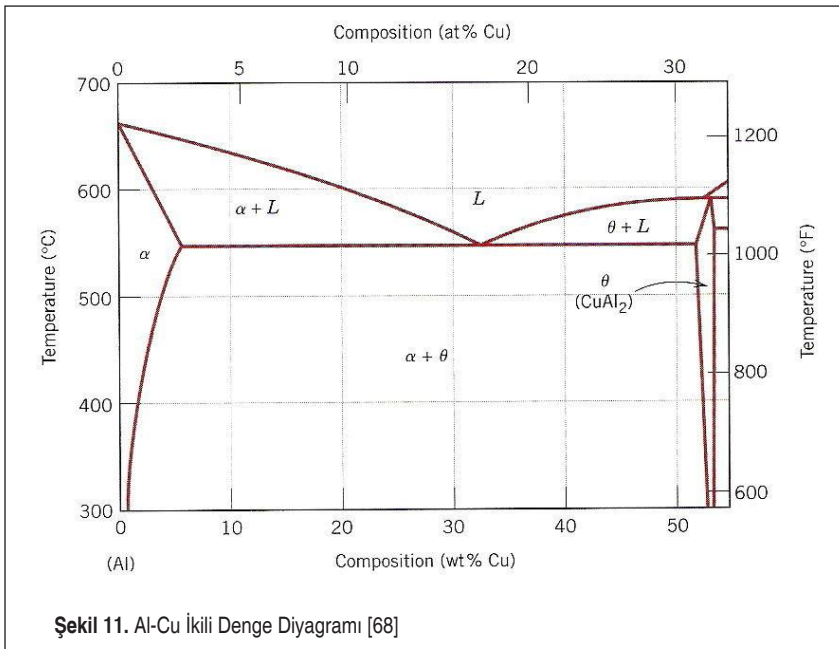
Tozmetal alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri genellikle döküm ve işlenmiş alüminyum alaşımlarına benzerdir.



### 2.4.1 Al-Cu TM Alaşımları

Bakır ticari alüminyum alaşımlarında özellikle ısıl işlemle dayanım artışına imkan verdiği için sıklıkla kullanılan bir alaşım elementidir. Al-Cu alaşımları günümüzde tozmetal alüminyum alaşımları içinde en çok dikkat çeken alaşımlardır. Al-Cu ikili denge diyagramına göre (Şekil 11), ötektik sıcaklık olan 548 °C alüminyum içinde ağırlıkça %5,65 bakır çözünür. Elementel olarak hazırlanmış bir karışımda sıcaklık artışı ile birlikte bakır alüminyum içine yayılır. İki alüminyum atomu bir bakır atomu ile bileşik oluşturarak  $Al_2Cu$  intermetalini oluşturur. Denge sağlanana kadar yapıda difüzyon devam eder. Ötektik bileşimdeki (%33 Cu-%67 Al) bölgeler ötektik sıcaklığa ulaşıncaya ergir ve ilk sıvı faz oluşur [66]. Dolayısıyla ilk ergime Al- $Al_2Cu$  tane sınırlarında meydana gelir. Dolayısıyla 548 °C üzerinde yapılan tüm sinterleme işlemleri sıvı faz sinterlemedir. Al-Cu ikili sisteminde sinterleme işlemlerinde görülecek sorunlardan biri bakır ve alüminyumun birbirini içindeki difüzyon hızlarının farklı olmasından dolayı oluşacak Kirkendall tipi gözeneklerdir [66, 67].

Al-Cu TM alaşımları literatürde geniş bir şekilde incelenmiştir. Al-Cu alaşımları üzerine yapılan çalışmalarda genellikle sinter şartlarının ve hammadde alaşımının sinter sonrası özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kehl ve Fischmeister [69], atomize alüminyum ve elektrolize bakırın sinterlenmesi üzerine ilk çalışmalardan birini ortaya koymuşlardır. Pickens [14], Al-Cu tozmetal alaşımlarıyla ilgili ilk çalışmalardan biri olan



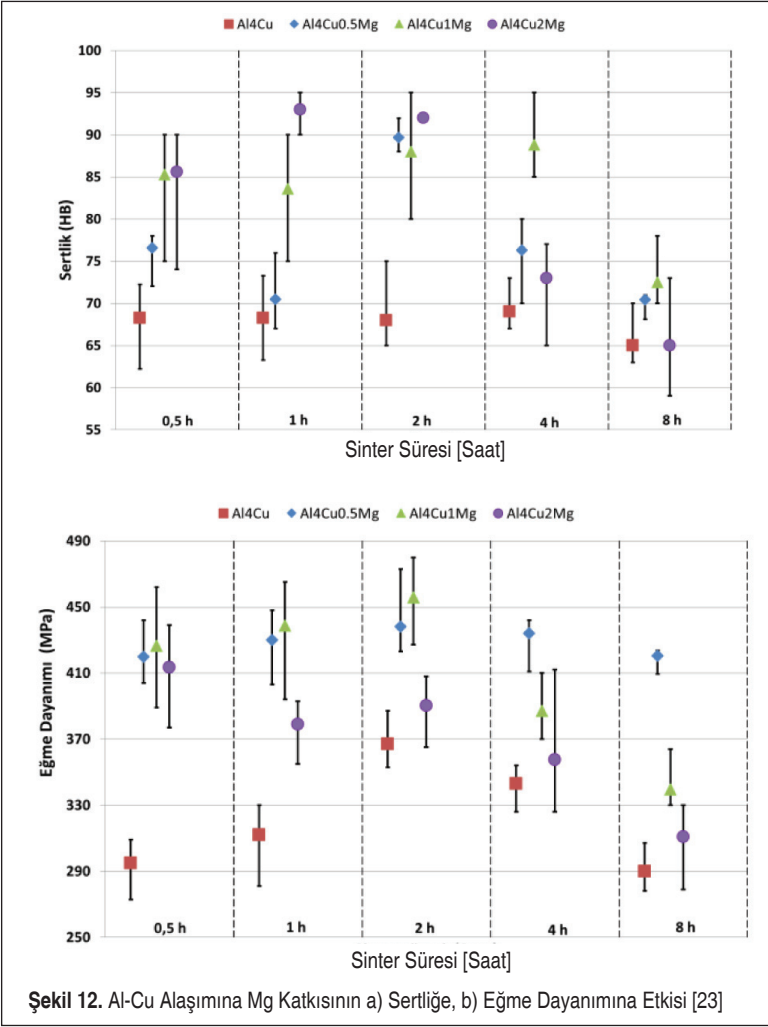


makalesinde 2712 serisi alaşımı incelemiştir. Upadhyaya ve arkadaşları [70] ise 2712 alaşımının mikrodalga sinterleme teknolojisi ile tozmetal bir malzeme haline dönüşümünü incelerken, Chelluri, aynı alaşım tozlarını dinamik manyetik sıkıştırma adını verdiği bir sistemle tam yoğunlukta sinterlemeyi başarmıştır. 2712 alaşımı üzerine yapılan başka bir çalışmada Min ve arkadaşları [71], şekillendirme basıncı ve sinter sıcaklığının mikroyapı üzerine etkisini incelemişler ve en yüksek yoğunluğa 610 °C'de 10 saat sinterleme sonucu ulaşmışlardır. Chang ve arkadaşları [72, 73], saf alüminyum tozlarının sinter sonrası özelliklerini incelemiş sonrasında bu tozlara % 6 bakır ve % 3 bakır ekleyerek farklı atmosferler altındaki sinter sonucu oluşan mikroyapıları incelemişlerdir. Başka bir çalışmada [74] ise Al<sub>4</sub>.4Cu0.5Mg0.6Si elementel karışımının termal analizleri irdelenmiştir. Durmuş ve Meriç [75] ise önalaşımli 2014 tozlarının sinter ve ısıt işlem sonrası davranışlarını mikroyapısal olarak ve sertlik bakımından incelerken, Navas ve arkadaşları, [76] aynı alaşıma TiC ve VC katarak kompozit oluşturmuşlardır. 2014 önalaşımli tozları ile yapılan başka bir çalışma [77], bu tozlara ilave edilen Al-Si önalaşımli tozlarının ıslatma açısını düşürerek yoğunlaşmayı artırdığını ortaya koyarken, Sellars ve arkadaşları [78], aynı alaşıma SiC ekleyerek kompozit oluşturmuş ve oluşturulan kompozitin mekanik özelliklerini incelemişlerdir.

Spigarelli ve arkadaşları, önalaşımli 2014 tozlarının [79] ve 2024 tozlarının [80] sinter sonrası sürünme davranışını incelemişlerdir. 2014 tozmetal alaşımı ile başka bir kompozit çalışmasını da Swanson ve arkadaşları [81] yapmıştır ve %25 SiC katkılı kompoziti başarıyla üretmişlerdir. Xiang ve arkadaşları [82], 2024 önalaşımli tozlarına demir ve nikel katkısı ile yaşlanma davranışında azalma tespit etmişler ve oluşan intermetaliklerle ilgili ayrıntılı bilgi vermişlerdir. Anderson yaptığı çalışmada [83], yeni bir gaz atomizasyon yöntemi oluşturmuş ve bu yöntemle oluşturduğu alaşımların sinterlenme özellikleri üzerinde durmuştur. Benzer şekilde, Ridder ve Shechtman da önalaşımli Al-Cu tozları üretimi üzerine bir çalışma [84] yapmışlardır. Kaftelen ve arkadaşları [85] ise Al-4Cu esaslı kompozit oluşturmak için önce alaşıma TiC eklemiş, sonrasında oluşan ergiyiği atomize etmişlerdir. Benzer bir kompozit yapısına Pathak ve arkadaşları [86], Al<sub>4</sub>Cu tozlarına TiN tozları ekleyerek sinterleme sonucu ulaşmışlardır. Rainforth ve arkadaşları [87], önalaşımli 2124 alaşımın; Bishop ve arkadaşları [88] ise 2014 alaşımının kuru aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Savitskii ve arkadaşları ise Al-Cu alaşımlarının sinterlenmesinde tozların tane boyutunun [89] ve çözünebilirlik değerlerinin kompaktların genişleme büzülme davranışları üzerinde çalışmalar yapmışlardır.

2024 alaşımı üzerine yapılan çalışmalara örnek olarak Erde ve arkadaşlarının [90] sinter ve ekstrüzyon davranışlarını incelediği, Badini ve arkadaşlarının [91] yaşlanma davranışını incelediği, Momeni ve arkadaşlarının [92] sinter ve yoğunluk ilişkisini incelediği çalışmalar gösterilebilir. Zhang ve arkadaşları [93], atomize alüminyum ve elektrolize bakır tozları ile ürettikleri Al<sub>4</sub>.5Cu1.8Mg alaşımının mikro-





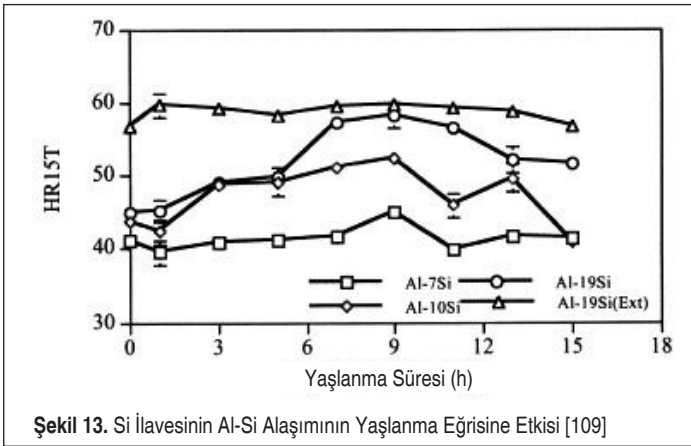
yapısal özelliklerini irdelemişlerdir. Dhokey ve arkadaşları [94], elementel tozlarla ürettikleri  $Al_{4.5}Cu_{1Si}0.8Mg$  alaşımında toz karıştırma şartlarının sinter sonrası mikroyapıya etkisini incelemişlerdir. Laska ve Kazior [95], bazı 2XXX serisi alaşımların sinterleme esnasında boyut değişimlerini ve yoğunluk değerlerine etkisini incelemişlerdir. Simchi ve Vetl [96],  $Al_{4.5}Cu$  alaşımının; Meluch ve Chang [97] ise  $Al_{4.5}Cu_{0.5Mg}0.6Si$  alaşımının sıcak preslenme özellikleri üzerine çalışmalar yapmış ve sıcak preslenme ile daha yüksek yoğunluk elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Kurt ve arkadaşları [23, 33, 35, 59, 66, 98], Mg katkısı ve Si katkısının Al-Cu elementel karışımlarının mekanik özelliklerine artışa sebep olduğunu rapor etmişlerdir (Şekil 12).

Martin ve Castro [99, 100], 2XXX serisi alaşımlarda sinterleme atmosferi ve sıcaklığının mikroyapı ve sertlik değerleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Kim ve Lee [101], Al4.4Cu önalaşımına SiC whiskerler ekleyerek yaptıkları çalışmada termal analizler ve TEM çalışmalarıyla whiskerler etrafında dislokasyonlarda yığılma tespit etmişlerdir. Sarkar ve Lisagor [102], 2124 önalaşımına %0,5 ila %1,5 Mn eklemiş, düşük mangan ilavesinde dayanımda büyük artışlar tespit etmişlerdir.

#### 2.4.2 Al-Si TM Alaşımları

Alüminyum silisyum TM alaşımları yüksek aşınma dayanımı, yüksek dayanım, düşük termal genleşme gibi özelliklerinden dolayı tercih edilen malzemelerdir. Hiperötektik Al-Si alaşımlarının geleneksel döküm teknikleri ile üretiminde, silisyumun geniş birincil silisyum fazı olarak katılması mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden, döküm yöntemi ile üretilen Al-Si alaşımlarında alaşım elementi olarak eklenebilecek silisyum miktarı sınırlıdır. Bu sebeple bu alaşımların TM yöntemi ile üretimi döküm yöntemine nazaran üstünlükler sunmaktadır [103].

TM ile Al-Si alaşımı üretimi konusunda öncü çalışmalardan biri 1965 yılında Dixon ve Skelly tarafından yapılmış ve çalışma sonucunda, ağırlıkça %25, 35 ve 45 Si içeren önalaşımın sıcak preslenmesi ve ekstrüzyonu ile yüksek dayanım ve sertlik değerlerine ulaşılmıştır [104]. Akechi ve arkadaşlarının [105] 1985 yılında yaptıkları çalışmada, hızlı katılaşmış (Rapid Solidified) Al-Si-Fe önalaşımın tozlarından soğuk presleme, sıcak işlem ve dövme işlemleri ile benzer bileşimdeki döküm alaşımlarından daha yüksek dayanım gösteren TM alaşım üretilmiştir. Al-17Si-6Fe-4.5Cu-0.5Mg (Ağ.%) bileşimindeki tozların sıcak ekstrüzyonu ile yapılan bir çalışmada mikroyapıda Al<sub>3</sub>FeSi, Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe ve Al<sub>4</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>7</sub> fazları tespit edilmiştir [106]. Schubert vd., Ecka Alumix 231 tozlarının sinterlenmesi ile T1 ısıl işlemi sonrasında 231 MPa çekme dayanımı ve 100 HB sertliğe yapay yaşlandırma sonrası 340 MPa çekme dayanımı ve 140 HB sertliğe ulaşılmıştır [28]. Casellas vd., Al-14Si alaşımında en



yüksek sertlik değerine (102 HB) 560 °C'de 85 dakika sinterleme ile ulaşımlardır [107]. Kennedy, Al7Si0.3Mg alaşımlarının elementel tozlarla oluşturarak sinterlemiş ve 99 MPa akma dayanımına 138 MPa çekme dayanımına ulaşmıştır [108]. Gupta ve Ling [109], alüminyuma yapılan silisyum ilavesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemişler ve ötektik-üstü ve ötektik-altı alaşımların metalürjik karakterizasyonunu gerçekleştirmişlerdir (Şekil 13). Elde ettikleri sonuçlara göre, silisyum ilavesi sertlik ve yaşılanma kabiliyetinde artışa neden olmuştur.

Lee ve Hong, Al-19Si alaşımlarına Ce ve Ni ilavesi sonrası yaptıkları ekstrüzyon işlemleri sonucunda 730 MPa'ya kadar çekme dayanımı elde etmişlerdir [110]. Bae vd., Al5Si tozmetal alaşımlarının sinter sonrası çekme dayanımının yaklaşık 450 MPa olarak tespit etmişlerdir [111].

### 2.4.3 Al-Mg TM Alaşımları

Bölüm 2.3.1'de belirtildiği üzere magnezyum alüminyum, üzerindeki oksit tabakasının indirgenmesinde sıklıkla kullanılan bir elementtir. Magnezyumun birincil alaşım elementi olarak kullanıldığı ticari TM alüminyum alaşımları ALPOCO 6061, ECKART Alumix 321, Alumix 431, ALCAN 69 ve 76, ALCOA 601 ve 602 sayılabilir. Belirtilen alaşımlardan 6061 ile ilgili en kapsamlı çalışmalardan birini German ve çalışma arkadaşları [112] yapmış; belirtilen alaşımların mekanik özelliklerine presleme basıncının, ısıtma hızının, sinterleme sıcaklığının ve sinterleme süresinin etkisini ortaya koymuşlardır (Tablo 3). Çalışma sonucunda, en yüksek eğme dayanımı ve sertlik değeri için en yüksek basınçta presleme, en düşük sıcaklıkta sinterleme, en yavaş ısıtma ve en kısa sinter süresinin gerektiğini, en yüksek çekme dayanımı ve % uzama değeri için, en uzun sinterleme süresi, en yavaş ısıtma hızı, en yüksek presleme basıncının gerekli olduğu ortaya çıkmıştır [112].

**Tablo 3.** 6061 TM Alaşımlarının Mekanik Özelliklerine Proses Parametrelerinin Etkisi [112]

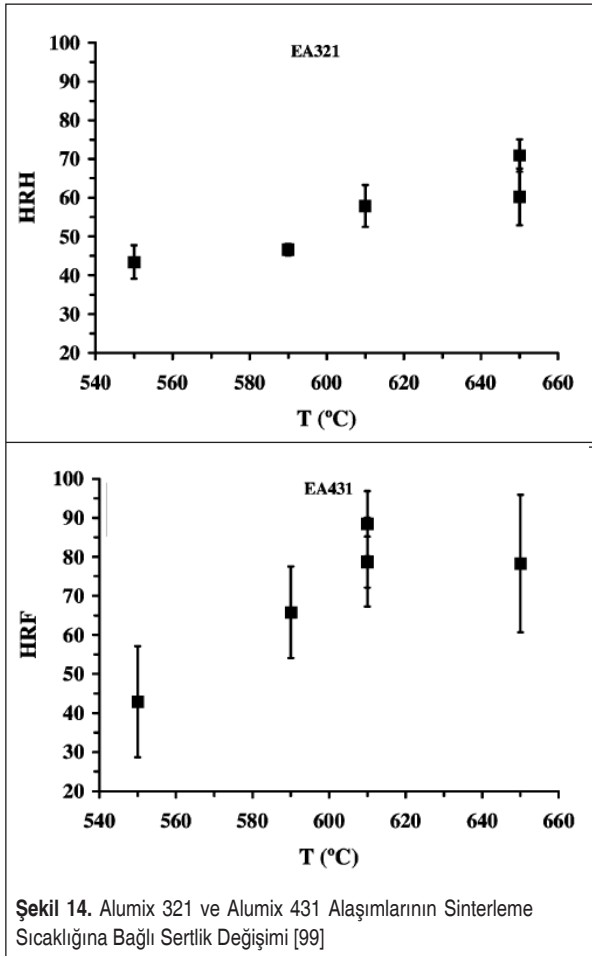
Deney No	Presleme Basıncı	Ham Yoğunluk (%)	Sinter Sıcaklığı (°C)	Isıtma Hızı (°C/dk)	Sinter Süresi (dk)	Yoğunluk (%)	Sertlik (HV)	Uzama (%)	Çekme Dayanımı (MPa)
1	550	91	610	1	10	95	41	9	101
2	110	72	610	10	20	80	25	1	32
3	330	87	610	5	30	92	32	10	130
4	330	87	630	5	10	96	29	6	75
5	550	91	630	10	20	96	41	17	107
6	110	72	630	1	30	74	22	5	116
7	110	72	650	5	10	81	23	7	119
8	330	88	650	1	20	89	28	9	127
9	550	91	650	10	30	96	39	18	131



**Tablo 4.** Alumix 321 Alaşımının T6 Isıl İşlemi Sonrası Mekanik Özellikleri [115]

Presleme Basıncı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
100	192±66	0,5±0,3
200	241±11	0,5±0,1
300	249±15	0,6±0,1
400	252±19	0,7±0,2

6061 alaşımı ile yapılan başka bir çalışmada [113], elementel olarak hazırlanan karışıma sinterleme katkısı mikro düzeyde Sn, Ag veya Pb ilavesi yapılmış ve farklı presleme basınçları ve sinterleme sıcaklıklarının özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, ağırlıkça %0,12 Pb ilavesi ile çekme dayanımının 266°dan



**Şekil 14.** Alumix 321 ve Alumix 431 Alaşımının Sinterleme Sıcaklığına Bağlı Sertlik Değişimi [99]



322'ye çıktığı fakat % uzamanın 12'den 9'a düştüğü görülmüştür. Sercombe [114], 6061 alaşımına yapılacak %0,5 Sn ve %0,1 Pb katkısının sıvı fazın partikülleri ıslatmasına olumlu etki yapacağını rapor etmiştir. Al-Mg alaşımının başka bir türü olan Alumix 321 alaşımı ile ilgili olarak yapılan çalışmada [115], 100-400 MPa arasında basınçla preslenen tozların ısıtılmadan ve T6 ısıtma işlemi (Yapay Yaşlandırma) sonrasındaki özellikleri kıyaslanmıştır (Tablo 4).

Martin ve Castro, Alumix 321 ve Alumix 431 alaşımını 20 dakika azot atmosferinde farklı sıcaklıklarda sinterlemişler ve alaşımların optimum sinter sıcaklıklarına ulaşmayı amaçlamışlardır [99]. Alumix 321 alaşımında daha düşük miktarda magnezyum bulunması sebebiyle 660 °C'de sertlik artışı gözlemlenirken, Alumix 431 alaşımında 620 °C üzerindeki sıcaklıkta yapılan sinterleme sertlikte düşmeye sebep olmuştur (Şekil 14).

### 3. SONUÇ

Toz metalurjisi ile üretilen alüminyum parçalar endüstriyel uygulamalar için gerekli ihtiyaçları karşılayabilecek potansiyele sahip malzemelerdir. İstenilen özellikleri karşılamak amacıyla elementel tozları değişik bileşimlerde karıştırarak yeni alaşımlar üretilebilmesi yöntemin en büyük avantajlarından biridir. TM sektörünün en büyük müşterisi konumunda olan otomotiv sektöründe otomobil ağırlığının düşürülmesi amacıyla alüminyum alaşımlarının kullanım oranı günden güne artmaktadır. Yeni geliştirilen alaşımlar ve sinter sonrası işlemler (Isıl İşlem, Deformasyon vs.) ile üretilecek daha yüksek dayanımlı alaşımlar ile önümüzdeki yıllarda alüminyum TM parçaların endüstride daha geniş kullanım alanları bulacağı öngörülmektedir.

### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, büyük oranda “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-Cu Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi” başlıklı doktora tezinden derlenmiştir. Çalışmanın esas alındığı doktora tezi Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 2009-50-02-20 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar bu desteğinden dolayı SAÜ-BAPK'a teşekkür eder. Ayrıca yazarlardan biri (AG) çalışmaya katkılarından dolayı İpek Gökçe'ye teşekkür eder.

### KAYNAKÇA

1. **Altenpohl, D. G.** 1980. Present Structure and Future Trends in Key Materials Industries. Materials in World Perspective: Assessment of Resources, Technologies and Trends for Key Materials Industries, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Heidelberg p. 21-126.
2. **Newkirk, J. W.** 2003. Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes, vol. 1, Marcel Dekker Inc., New York.
3. **Scamans, G.** 2009. “The Future of Light Metals,” Materials Technology, vol. 24, no. 3, p. 129-30.



4. Capral Aluminium. 2008. "Aluminium and Aluminium Alloys - Characteristic Advantages and Beneficial Properties of Aluminium Extrusions," p. 1–12.
5. **Ghassemieh, E.** 2011. "Materials in Automotive Application , State of the Art and Prospects,"New Trends and Developments in Automotive Industry, p. 365–94.
6. **Miller, W., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A., De Smet, P., Haszler, a., et al.** 2000. "Recent Development in Aluminium Alloys for The Automotive Industry," Materials Science and Engineering: A, vol. 280, no.1, p. 37–49.
7. **Hirsch, J.** 2004. "Automotive Trends in Aluminium-The European Perspective," Materials Forum, vol. 28, no. 3, p. 15–23.
8. **Hirsch, J.** 2011. "Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design," Materials Transactions, vol. 52, no. 5, p. 815–823.
9. **Pinto, A. S. A. F.** 2009." Evolution of Weight , Fuel Consumption and CO2 of Automobiles," MSc Thesis, Universidade Tecnica de Lisboa, Lisbon.
10. **Cheah, L., Evans, C., Bandivadekar, A., Heywood, J.** 2009. "Factor of Two: Halving the Fuel Consumption of New u.s. Automobiles by 2035," no. 9, p. 49–71.
11. **Helms, H., Lambrecht, U.** 2004. "Energy Savings by lightweighting (Final report)," IFEU-Institute for Energy and Environmental Research, no. 01, p. 103.
12. **German, R. M.** 2016. Sintering Science : An Historical Perspective Sintering Science: German Materials Technology, California.
13. **Ramakrishnan, P.** 1983. "History of Powder Metallurgy," Indian Journal of History of Science, vol.18, no.1, p. 109–14.
14. **Pickens, J. R.**1981. "Aluminium Powder Metallurgy Technology for High-Strength Applications," Journal of Materials Science, vol.16, no. 6, p. 1437–57.
15. **Dowson, G., Whittaker, D.** 2008. Introduction to Powder Metallurgy the Process and its Products, European Powder Metallurgy Association, London.
16. **Moon, J. R.** 2007. Introduction to PM, A Residential Training Course for Young Materials Engineers, Course Booklet, European Powder Metallurgy Association, London.
17. **Tengzelius, J.** 2007. "A Pressing Need to Broadcast Virtues of PM Processing," Metal Powder Report, vol. 62, no. 10, p. 28–32.
18. **Upadhyaya, G. S.** 1999. Sintered Metallic and Ceramic Materials: Preparation, Properties and Applications, Chichester, New York.
19. **Schubert, T., Weißgärber, T., Kieback, B., Balzer, H., Neubing, H. C., Baum, U., et al.,** 2005. "Aluminium PM is a Challenge that Industry Can Overcome" Metal Powder Report, vol. 60, no. 3, p. 32–7.
20. **Fujiki, A.** 2001. "Present State and Future Prospects of Powder Metallurgy Parts for Automotive Applications," Materials Chemistry and Physics, vol. 67, no. 1–3, p. 298–306.
21. **Jangg, G., Danninger, H., Schroder, K., Abhari, K., Neubing, H., Seyrkammer, J.** 1996. "PM Aluminum Camshaft Belt Pulleys for," vol. 89, p. 179–89.
22. **Davis, J. R.** 1993. ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys, 978-0-87170-496-2, 3rd ed., ASM International, Ohio.



23. **Gökçe, A.** 2013. "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-Cu Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi," PhD Thesis, Sakarya University, Sakarya.
24. **Schaffer, G.B.** 2004. "Powder Processed Aluminium Alloys," *Materials Forum*, vol. 28, p. 65–74.
25. **Bauccio, M.** 1993. *ASM Metals Reference Book*, 9780871704788, ASM international, OHIO.
26. **Ünal, A., Leon, D., Gurganus, T., Hildeman, G.** 1998. "Production of Aluminum and Aluminum-Alloy Powder," *ASM Handbook, Powder Metal Technologies and Applications*, vol. 7, p. 148–59.
27. **Moreno, M. F., González Oliver, C.J.R.** 2011. "Densification of Al Powder and Al-Cu Matrix Composite (Reinforced with 15% Saffil Short Fibres) During Axial Cold Compaction," *Powder Technology*, vol. 206, no. 3, p. 297–305.
28. **Schubert, T., Weißgärber, T., Kieback, B., Balzer, H., Neubing, H. C., Baum, U., et al.** 2004. *P/M Aluminium Structural Parts for Automotive Application*. In *Euro PM 2004, European Powder Metallurgy Association* (Editor: Danninger, H.) Vienna, p. 627–32.
29. **Eksi, A. K., Acar, A. N., Ekicibil, A.** 2015. "Some Transport Properties of Alumix-431 Materials by Prepared P / M Method," vol. 3, no. 5, p. 253–8.
30. **Bidulský, R., Grande, M. A., Bidulská, J., Kočíško, R., Kvačkaj, T.** 2011. "An Evaluation of Severe Plastic Deformation on the Porosity Characteristics of Powder Metallurgy Aluminium Alloys Al-Mg-Si-Cu-Fe and Al-Zn-Mg-Cu," *Aluminium Alloys, Theory and Applications*, Prof. Tibor Kvačkaj (Ed.), 978-953-307-244-9, InTech Publication, Croatia.
31. **Walker, J. C., Rainforth, W. M., Jones, H.** 2005. "Lubricated Sliding Wear Behaviour of Aluminium Alloy Composites," *Wear*, vol. 259, no. 1–6, p. 577–89.
32. **Youseffi, M., Showaiter, N.** 2006. "PM Processing of Elemental and Prealloyed 6061 Aluminium Alloy With and Without Common Lubricants And Sintering Aids," *Powder Metallurgy*, vol. 49, no. 3, p. 240–52.
33. **Gökçe, A., Findik, F., Kurt, A. O.** 2013. "Effects of Mg Content on Aging Behavior of Al4CuXMg PM Alloy," *Materials and Design*, vol. 46, p. 524–31.
34. **Boland, C. D., Hexemer, R. L., Donaldson, I. W., Bishop, D. P.** 2013. "Industrial Processing of a Novel Al-Cu-Mg Powder Metallurgy Alloy," *Materials Science and Engineering A*, vol. 559, p. 902–8.
35. **Gökçe, A., Findik, F., Kurt, A.O.** 2016. "Sintering and Aging Behaviours of Al4CuXMg PM Alloy," *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 55, no. 4, p. 391–401.
36. **Boland, C. D., Paul Bishop, D., Hexemer, R. L., Donaldson, I. W.** 2011. "Development of an Aluminum PM Alloy for "Press-Sinter-Size" Technology," *International Journal of Powder Metallurgy* (Princeton, New Jersey), vol. 47, no. 1, p. 39–48.
37. **German, R. M.** 2005. *A - Z of Powder Metallurgy*, Elsevier, Michigan.
38. **Tang, F., Anderson, I. E., Biner, S. B.** 2002. "Solid State Sintering and Consolidation of Al Powders and Al Matrix Composites," *Journal of Light Metals*, vol. 2, no. 4, p. 201–14.
39. **Tang, F., Anderson, I. E., Gnapel-Herold, T., Prask, H.** 2004. "Pure Al Matrix Composites Produced by Vacuum Hot Pressing: Tensile Properties and Strengthening Mechanisms," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 383, no. 2, p. 362–73.



40. **Price, P. E., Kohler, S. P.** Cold Isostatic Pressing of Metal Powders. ASM Handbook Volume 7, Powder Metal Technologies and Applications, ASM international, Ohio.
41. **Atkinson, H. V., Davies, S.** 2000. "Fundamental Aspects of Hot Isostatic Pressing: An Overview," Metallurgical and Materials Transactions A, vol.31, no.12, p. 2981–3000.
42. **Kim, J. S., Jiang, K., Chang, I.** 2006. "A Net Shape Process for Metallic Microcomponent Fabrication Using Al And Cu Micro/Nano Powders," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 16, no. 1, p. 48.
43. **Choudhury, I. A., Azuddin, M., Yun, C. X.** 2013. "Investigation of Powder and Binder Mixing Mechanism in Metal Injection Molding," International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering, vol. 2013. Rajshahi, Bangladesh.
44. Kyocera Global. <http://global.kyocera.com/fcworld/first/process03.html>, son erişim tarihi: 02.02.2016.
45. **Schatt, W., Association, Wieters, K. P.** 1997. Powder Metallurgy: Processing and Materials, European Powder Metallurgy Association, Shrewsbury.
46. **Nylund, A., Olefjord, I.** 1993. "Surface-Analysis of Air Exposed Rapidly Solidified Aluminum Powder," Powder Metallurgy, vol. 36, no. 3, p. 193–7.
47. **Lumley, R. N., Sercombe, T. B., Schaffer, G. M.** 1999. "Surface Oxide and The Role of Magnesium During The Sintering of Aluminum," Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 30, no. 2, p. 457–63.
48. **Kowalski, L., Korevaar, B. M., Duszczyk, J.** 1992. "Some New Aspects Of The Theory of Oxidation and Degassing of Aluminium-Based Alloy Powders," Journal of Materials Science, vol. 27, no. 10, p. 2770–80.
49. **Wysong, W. S.** 1947. "Thin Oxide Films on Aluminum," The Journal of Physical Chemistry, vol. 51, no. 5, p. 1087–103.
50. **Kim, Y. W., Griffith, W., Froes, F.** 1985. "Surface Oxides," Journal of Metals, vol. 8, p. 27–33.
51. **Smart, R., Ellwood, E.** 1958. "Sintering of Tin Powder," Nature, vol.182, p. 1638–40.
52. **Schaffer, G. B., Sercombe, T. B., Lumley, R. N.** 2001. "Liquid Phase Sintering of Aluminium Alloys," Materials Chemistry and Physics, vol. 67, no. 1–3, p. 85–91.
53. **MacAskill, I. A., Hexemer, R. L., Donaldson, I. W., Bishop, D. P.** 2010. "Effects Of Magnesium, Tin and Nitrogen on The Sintering Response of Aluminum Powder," Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, no. 15, p. 2252–60.
54. **Sercombe, T. B.** 1998. "Non-Conventional Sintered Aluminium Powder Alloys," PhD Thesis, The University of Queensland, Brisbane.
55. **German, R. M.** 1996. Sintering Theory and Practice, 047105786X, John Wiley & Sons Inc, Chicago.
56. **Liu, Z. Y., Sercombe, T. B., Schaffer, G. B.** 2007. "The Effect of Particle Shape on The Sintering of Aluminum," Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, vol. 38, no. 6, p. 1351–7.
57. **Miyake, S.** 2005. Novel Materials Processing by Advanced Electromagnetic Energy Sources: Proceedings of the International Symposium on Novel Materials Processing by Advanced Electromagnetic Energy Sources (MAPEES'04), Elsevier Science, Osaka, Japan.





58. **Kondoh, K., Kimura, A., Watanabe, R.** 2001. "Effect of Mg on Sintering Phenomenon of Aluminium Alloy Powder Particle," Powder Metallurgy, vol. 44, no. 2, p. 161-4.
59. **Gökçe, A., Findik, F., Kurt, A. O.** 2011. "Microstructural Examination and Properties of Premixed Al-Cu-Mg Powder Metallurgy Alloy," Materials Characterization, vol. 62, no. 7, p. 730-5.
60. **Pieczonka, T., Kazior, J., Szexczyk-Nykiel, A., Hebda, M., Nykiel, M.** 2012. "Effect of Atmosphere on Sintering of Alumix 431D Powder," Powder Metallurgy, vol. 55, no. 5, p. 354-60.
61. **Pieczonka, T., Schubert, T., Baunack, S., Kieback, B.** 2005. "Sintering Behaviour of Aluminium in Different Atmospheres," no. August 2016, p. 5-8.
62. **Schaffer, G. B., Hall, B. J.** 2002. "The Influence of The Atmosphere on The Sintering of Aluminum," Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 33, no. 10, p. 3279-84.
63. **Yan, M., Yu, P., Schaffer, G. B., Qian, M.** 2010. "Secondary Phases And Interfaces in a Nitrogen-Atmosphere Sintered Al Alloy: Transmission Electron Microscopy Evidence for the Formation of Aln During Liquid Phase Sintering," Acta Materialia, vol.58, no. 17, p. 5667-74.
64. **Pieczonka, T., Schubert, T., Baunack, S., Kieback, B.** 2008. "Dimensional Behaviour of Aluminium Sintered in Different Atmospheres," Materials Science and Engineering A, vol. 478, no. 1-2, p. 251-6.
65. **Schaffer, G. B., Hall, B. J., Bonner, S. J., Huo, S. H., Sercombe, T. B.** 2006. "The Effect of the Atmosphere and the Role of Pore Filling on the Sintering of Aluminium," Acta Materialia, vol. 54, no. 1, p. 131-8.
66. **Gökçe, A., Fındık, F., Kurt, A. O.** 2014. Effects of Sintering Temperature and Time on the Properties of Al-Cu PM Alloy. In 7th International Powder Metallurgy Conference and Exhibition (Editors: Rahmi, Ü., Yusuf, U., Mehmet, T.), Turkish Powder Metallurgy Association, Ankara.
67. **Fuentes, J. J., Rodriguez, J. A., Herrera, E. J.** 2010. "Processing of Mechanically Alloyed Aluminum Powder: A Metallographic Study," Materials Characterization, vol. 61, no. 4, p. 386-95.
68. Amazonaws.com <http://s3.amazonaws.com/chegg.media.images/board/ec1/ec1b410b-4f86-4fdb-9722-8a8a7996e18a-original.png>, son erişim tarihi: 02.02.2017.
69. **Fischmeister, H. F., Kehl, W.** 1980. "Liquid Phase Sintering of Al-Cu Compacts," Powder Metallurgy, vol. 23, no. 3, p. 113-9.
70. **Padmavathi, C., Agarwal, D., Upadhyaya, A.** 2015, "Microwave Sintering of Aluminium Alloys," [https://www.mri.psu.edu/sites/default/files/file\\_attach/162.pdf](https://www.mri.psu.edu/sites/default/files/file_attach/162.pdf), son erişim tarihi: 02.02.2017, p. 153-157.
71. **Min, K. H., Kang, S. P., Lee, B. H., Lee, J. K., Kim, Y. Do.** 2006. "Liquid Phase Sintering of the Commercial 2xxx Series Al Blended Powder," Journal of Alloys and Composites, vol. 419, no. 1-2, p. 290-293.
72. **Cook, R., Chang, I.T.H., Falticeanu, C.L.** 2007. "Aluminium and Aluminium Alloy Powders for P/M Applications," Materials Science Forum, vol. 534-536, p. 773-776.
73. **Kim, J., Chang, I. T., Falticeanu, C. L., Davies, G. J., Jiang, K. C.** 2007. "A Study of



- Debinding Behavior and Microstructural Development of Sintered Al-Cu-Sn Alloy,” vol. 536, p. 769–772.
74. **Padmavathi, C., Upadhyaya, A.** 2011. “Sintering Behaviour and Mechanical Properties Of Al-Cu-Mg-Si-Sn Aluminum Alloy,” Transactions of the Indian Institute of Metals, vol. 64, no. 4–5, p. 345–57.
  75. **Durmuş, H. K., Meriç, C.** 2007. “Age-hardening Behavior of Powder Metallurgy AA2014 Alloy,” Materials and Design, vol. 28, no. 3, p. 982–6.
  76. **Ruiz-Navas, E. M., Fogagnolo, J. B., Velasco, F., Ruiz-Prieto, J. M., Froyen, L.** 2006. “One Step Production of Aluminium Matrix Composite Powders by Mechanical Alloying,” Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 37, no. 11, p. 2114–20.
  77. **Delgado, M. L., Ruiz-Navas, E. M., Gordo, E., Torralba, J. M.** 2005. “Enhancement of Liquid Phase Sintering Through Al-Si Additions to Al-Cu Systems,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 162–163, no. SPEC. ISS., p. 280–5.
  78. **Carvalho, M. H., Marcelo, T., Carvalhinhos, H., Sellars, C. M.** 1992. “Extrusion and Mechanical Properties of Mixed Powder and Spray Co-Deposited Al 2014/Sic Metal Matrix Composites,” Journal of Materials Science, vol. 27, no. 8, p. 2101–9.
  79. **Bardi, F., Cabibbo, M., Evangelista, E., Spigarelli, S., Vukcevic, M.** 2003. “An Analysis of Hot Deformation of an Al-Cu-Mg Alloy Produced by Powder Metallurgy,” Mater. Sci. Engng A, vol. 339, p. 43–52.
  80. **Spigarellp, S., Langdon, T. G., Angeles, L.** 1997. “Creep Behavior of an Aluminum 2024 Alloy Produced By Powder Metallurgy,” vol. 45, no. 2, p. 529–40.
  81. **Chou, S.** 1988. “Mechanical Behavior of Silicon Carbide / 2014 Aluminum Composite,” In Testing Technology of Metal Matrix Composites, ASTM STP 964, (Editors: P. R. Di Giovanni and N. R. Adsit), American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
  82. **Xiang, S., Matsuki, K., Takatsuji, N., Yokote, T., Kusui, J., Yokoe, K.** 1999. “Investigation of the Age Hardening Behavior of PM 2024Al-Fe-Ni Alloys and the Effect of Consolidation Conditions,” Journal of Materials Science, vol. 34, no. 8, p. 1953–8.
  83. **Miller, M. K.** 2001. “Determining the Role of Surfaces and Interfaces in the Powder Metallurgy Processing of Aluminum Alloy Powders,” Surface and Interface Analysis, vol. 31, no. 7, p. 599–608.
  84. **Ridder, S. D., Shechtman, D.** 1986. “Microstructure of Supercooled Submicrometre Aluminum-Copper Alloy Powder,” In Rapidly Solidified Powder Aluminum Alloys (Editors: H. P. Mahy, J. R. Schroeder, K. A. Greene, W. T. Benzing), ASTM, Baltimore, p. 252–9.
  85. **Kaftelen, H., Henein, H., Ovecoglu, M. L.** 2013. “Fabrication of TiC and ZrC Reinforced Al-4 wt% Cu Composite Droplets Using Impulse Atomization,” Journal of Composite Materials, vol.47, no.5, p. 587–601.
  86. **Ray, A. K., Venkateswarlu, K., Chaudhury, S. K., Das, S. K., Ravi Kumar, B., Pat-hak, L. C.** 2002. “Fabrication of TiN Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites Through a Powder Metallurgical Route,” Materials Science and Engineering A, vol. 338, no.1–2, p. 160–5.



87. **Ghazali, M. J., Rainforth, W. M., Jones, H.** 2005. "Dry Sliding Wear Behaviour of Some Wrought, Rapidly Solidified Powder Metallurgy Aluminium Alloys," *Wear*, vol. 259, no.1–6, p. 490–500.
88. **Bishop, D. P., Li, X. Y., Tandon, K. N., Caley, W. F.** 1998. "Dry sliding Wear Behaviour of Aluminum Alloy 2014 Microalloyed with Sn and Ag," *Wear*, vol. 222, no. 2, p. 84–92.
89. **Savitskii, A. P., Afanas'ev, O. B., Gopienko, V. G., Martsunova, L. S., Romanov, G. N., Zayats, T. L.** 1986. "Effect of Aluminum Particle Size on the Volume Changes Experienced by Compacts From a Mixture of Aluminum and Copper Powders During Liquid-Phase Sintering," *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 25, no. 9, p. 721–5.
90. **Lianxi, H., Zuyan, L., Erde, W.** 2002. "Microstructure and Mechanical Properties of 2024 Aluminum Alloy Consolidated From Rapidly Solidified Alloy Powders," *Materials Science and Engineering A*, vol. 323, no. 1–2, p. 213–7.
91. **Badini, G., Marino, F., Verne, E., Guo, X. B.** 1995. "Aging Investigation on 2024/SiC Composite and 2024 Alloy," *Metallurgical Science and Technology*, vol. 13, no. 1, p. 29–38.
92. **Momeni, H., Razavi, H., Shabestari, S.G.** 2011. "Effect of Supersolidus Liquid Phase Sintering on the Microstructure and Densification of the Al-Cu-Mg Pre- Alloyed Powder," vol. 8, no. 2, p. 10–7.
93. **Zhang, Q., Xiao, B. L., Liu, Z. Y., Ma, Z. Y.** 2011. "Microstructure Evolution and Elemental Diffusion of SiCp/Al-Cu-Mg Composites Prepared From Elemental Powder During Hot Pressing," *Journal of Materials Science*, vol. 46, no. 21, p. 6783–93.
94. **Dhokey, N. B., Athavale, V. A., Narkhede, N., Kamble, M.** 2013. "Effect of Processing Conditions on Transient Liquid Phase Sintering of Premixed Aluminium Alloy Powders," *Advanced Materials Letters*, vol. 4, no. 3, p. 235–40.
95. **Laska, M., Kazior, J.** 2012. "Influence of Various Process Parameters On The Density Of Sintered Aluminium Alloys," *Acta Polytechnica*, vol. 52, no. 4, p. 93–5.
96. **Simchi, A., Veltl, G.** 2003. "Investigation of Warm Compaction And Sintering Behaviour Of Aluminium Alloys," *Powder Metallurgy*, vol. 46, no. 2, p. 159–64.
97. **Meluch, L., Chang, I. T. H.** 2009. "Study of Warm Compaction of Alumix 123 L," *Powder Metallurgy*, vol. 53, no. 4, p. 323–8.
98. **Toyran, O., Gökçe, A., Kurt, A. O.** 2011. "Effects of Micro Level Si Addition on The Properties of Aluminium PM Alloy," In *Proceedings of The 6th International Powder Metallurgy Conference and Exhibition* (Editors: Türker, M., Kalkanlı, A., Uslan, İ., Demir, T., Usta, Y., Dericioğlu, A.), Turkish Powder Metallurgy Association, Ankara.
99. **Martín, J. M., Castro, F.** 2003. "Liquid Phase Sintering of P/M Aluminium Alloys: Effect of Processing Conditions," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 143–144, no. 1, p. 814–21.
100. **Jose M, M., Francisco, C.** 2007. "Sintering Response and Microstructural Evolution of an Al-Cu-Mg-Si Premix," *International Journal of Powder Metallurgy*, vol. 43, no. 6, p. 59–69.
101. **Kim, T. S., Kim, T. H., Oh, K. H., Lee, H. I.** 1992. "Suppression of Theta Formation



- in the SiC Whisker-reinforced Al-4 wt % Cu Composites,” *Journal of Materials Science*, vol.27, p. 2599–605.
102. **Sarkar, B., W. B. L.** 1986. “Thermomechanical Treatment of 2124 PM Aluminum Alloys with Low and High Dispersion Levels,” In *Rapidly Solidified Powder Aluminum Alloys*. ASTM STP 890 (Editors: M. E. Fine and E. A. Starke, Jr.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
  103. **Heard, D. W., Donaldson, I. W., Bishop, D. P.** 2009. “Metallurgical Assessment of a Hypereutectic Aluminum-Silicon P/M Alloy,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 18–19, p. 5902–11.
  104. **Dixon, C. F., Skelly, H. M.** 1965. “Hypereutectic Aluminum–Silicon Alloys Produced by Powder Metallurgy Techniques,” *International Journal of Powder Metallurgy* (Princeton, New Jersey), vol. 1, no. 4, p. 28–36.
  105. **Akechi, K., Odani, Y., Kuroishi, N.** 1985. “High Strength Aluminum Alloys From Powder Metallurgy,” *Sumitomo Electric Technical Review*, no. 24.
  106. **Shen, J., Xie, Z., Gao, Y., Zhou, B., Li, Q., Su, Z., et al.** 2001. “Microstructure Characteristics of a Hypereutectic Al-Si Alloy Manufactured by Rapid Solidification/Powder Metallurgy Process,” *Journal of Materials Science Letters*, vol. 20, no. 16, p. 1513–5.
  107. **Casellas, D., Beltran, A., Prado, J. M. M., Larson, A., Romero, A.** 2004. “Microstructural Effects on the Dry Wear Resistance of Powder Metallurgy Al-Si Alloys,” *Wear*, vol. 257, no. 7–8, p. 730–9.
  108. **Kennedy, A. R.** 2002. “The Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-B<sub>4</sub>C Metal Matrix Composites,” *Journal of Materials Science*, vol. 37, no. 2, p. 317–23.
  109. **Gupta, M., Ling, S.** 1999. “Microstructure and Mechanical Properties of Hypo/Hypereutectic Al–Si Alloys Synthesized Using a Near-Net Shape Forming Technique,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 287, no. 1, p. 284–94.
  110. **Lee, T. H., Hong, S. J.** 2009. “Microstructure and Mechanical Properties of Al–Si–X Alloys Fabricated by Gas Atomization and Extrusion Process,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 487, no. 1, p. 218–24.
  111. **Choi, H. J., Shin, J. H., Min, B. H., Bae, D. H.** 2010. “Deformation Behavior of Al–Si Alloy Based Nanocomposites Reinforced With Carbon Nanotubes,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 2, 327–329.
  112. **Arockiasamy, A., German, R. M., Wang, P. T., Horstemeyer, M. F., Morgan, W., Park, S. J., et al.** 2011. “Sintering Behaviour of Al-6061 Powder Produced by Rapid Solidification Process,” *Powder Metallurgy*, vol. 54, no. 3, p. 354–9.
  113. **Showalter, N., Youseffi, M.** 2008. “Compaction, Sintering and Mechanical Properties of Elemental 6061 Al Powder with and without Sintering Aids,” *Materials and Design*, vol. 29, no. 4, p. 752–62.
  114. **Sercombe, T. B.** 2003. “On the Sintering of Uncompacted, Pre-Alloyed Al Powder Alloys,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 341, no. 1–2, p. 163–8.
  115. **Ibrahim, A., Bishop, D. P., Kipouros, G. J.** 2015. “Sinterability and Characterization of Commercial Aluminum Powder Metallurgy Alloy Alumix 321,” *Powder Technology*, vol. 279, p. 106–12.

# MÜHENDİS VE MAKİNA DERGİSİ YAZIM ESASLARI

**Mühendis ve Makina** dergisi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından, ülke sanayisinin, toplumun, Odamıza üye meslek disiplinlerinin ve meslektaşlarımızın bilimsel, teknik ve mesleki konularda bilgi gereksinimlerini karşılamak, bilimsel ve teknik yönde gelişimlerine katkıda bulunmak üzere düzenli aylık periyotlarla yayımlanan mesleki teknik bir yayın organıdır. "Mühendis ve Makina Dergisine" makina mühendisliği alanında aşağıda nitelikleri açıklanmış yazılar Türkçe ve İngilizce olarak kabul edilmektedir.

**Araştırma Makalesi:** Orijinal bir araştırmayı bulgu ve sonuçlarıyla yansıtan yazılardır. Çalışmanın bilime katkısı olmalıdır.

**Tarama Makalesi:** Yeterli sayıda bilimsel makaleyi tarayıp, konuyu bugünkü bilgi ve teknoloji düzeyinde özetleyen, değerlendirme yapan ve bulguları karşılaştırarak yorumlayan yazılardır.

## SUNUŞ FORMATI

1. Yazı tümüyle (metin, çizelgeler, denklemler, çizimler) bilgisayarda düzenlenmeli ve baskıya hazır biçimde teslim edilmelidir. Yazı, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Word ortamında, 10 punto (ana başlık 15 punto) Times New Roman font kullanılarak, bir aralıkla yazılmalıdır.
2. Çizimler (şekiller) ve çizelgelerle (tablolar) birlikte, makaleler 25 sayfadan, kısa bildirimler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır.
3. Yazı, Online Makale Yönetim Sistemi (OMYS) üzerinden gerekli kayıtlar oluşturularak gönderilmelidir. Yüklenen makale, "makale adının ilk 2 ya da 3 kelimesi" şeklinde adlandırılmalıdır. OMYs'ye yüklenen makalede yazar bilgileri bulunmamalı, yazar bilgileri için ayrıca bir kapak sayfası oluşturularak sisteme yüklenmelidir. Kapakta makale adı ve yazar iletişim bilgileri (adı soyadı, adresi, e-postası, varsa akademik unvanı) yer almalıdır.
4. Metin yalın bir dil ve anlatımla yazılmalı, Türkçe yazım kurallarına uygun olmalı, üçüncü tekil şahıs ve edilgen fiiller kullanılmalı, devrik cümleler içermemelidir.
5. Başlık mümkün olduğunca kısa (en çok 100 harf) ve açık olmalı, içeriği yansıtabilmelidir. İngilizce başlıktaki kelimeler ilk harfleri büyük ve gramer kurallarına uygun şekilde yazılmalıdır.
6. Bölümler (i) öz ve anahtar kelimeler, (ii) abstract ve keywords (İngilizce başlık, öz ve anahtar kelimeler), (iii) ana metin, (iv) semboller, (v) teşekkür (gerekliyse) ve (vi) kaynaklar sırası içinde düzenlenmelidir.
7. Öz (ve abstract) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 100 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç tane Türkçe ve İngilizce anahtar kelime verilmelidir. Türkçe ve İngilizce Başlık, Öz (abstract) ve anahtar kelimeler (keywords) birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır.
8. Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralandırılmalıdır (TS 1212 ISO 2145).
9. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalı, ayrıca metnin sonunda (Kaynaklardan önce) tüm semboller alfabetik sırayla (önce Latin alfabesi, sonra Yunan alfabesi) listelenmelidir.
10. Denklemler numaralandırılmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir.
11. Fotoğraflar tarayıcıdan geçirilerek çözünürlüğü en az 300 dpi olacak şekilde ve jpeg formatında bilgisayar ortamına aktarılmalıdır. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli, numara ve başlıklar çizim (şekil) ve fotoğrafların altına, çizelgelerin (tablo) üstüne yazılmalıdır.
12. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır.
13. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarasıyla kaynak belirtilmelidir.
14. Teşekkür metni olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir.
15. Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

**Kaynak bir makale ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yıl. "makalenin tam başlığı," derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları.

**Örnek 1:** Kaçar, E. N., Erbay, L. B. 2013. "Isı Değiştiricilerin Tasarımına Bir Bakış," Mühendis ve Makina, cilt 54, sayı 644, s.14-43.

**Örnek 2:** Kaçar, E. N., Erbay, L. B. 2013. "A Design Review For Heat Exchangers," Engineer and Machinery, vol. 54, no. 644, p.14-43.

**Kaynak bir kitap ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yayımlandığı yıl. kitabın adı, varsa cilt numarası, varsa editörü, yayın veya ISBN no, yayın evi, yayımlandığı yer.

**Örnek:** Lazzarin, R., Nalini, L. 2013. Havanın Nemlendirilmesi, ISBN: 978-605-01-0441-7, MMO/599, TMMOB MMO Yayını, İzmir.

**Kaynak bildiri ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yıl. "bildirinin adı," konferansın adı, tarihi, yapıldığı yer.

**Kaynak tez ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi. yıl. "tezin adı," derecesi, sunulduğu kurum, şehir.

**Kaynak rapor ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yıl. raporun adı, türü, yayın numarası, kuruluşun adı, yayımlandığı yer.

**Kaynak internet adresi ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yıl. "yazının adı," internet bağlantısı, son erişim tarihi.

## YAYIN İLKELERİ

1. Yazıların telif hakkı devri, dergi internet sayfasında sunulan form doldurulup imzalanmak suretiyle alınır. İmzalı *Telif Hakkı Devir Formu*'nu göndermeyen yazarların yayınları değerlendirmeye alınmaz.
2. Her yazı, konusuyla ilgili en az iki hakeme gönderilir. Hakem görüşlerinde belirtilen eksikler yazarlar tarafından tamamlandıktan sonra, dergide yayımlanabilecek nitelikte olanlar belirlenir ve yazara bilgisi verilir. Yazıların son hali yazarları tarafından düzenlenerek yayın sekreterine Online Makale Yönetim Sistemi (OMYS) üzerinden iletilir. Dergide basıldığı haliyle makale içinde bulunabilecek hataların sorumluluğu yazarlara aittir.
3. Yazar isimleri hakemlere bildirilmediği gibi, yazar/lar/a yazının hangi hakemlere gönderildiği de hiç bir şekilde bildirilmez. Yayınlanmayan yazılar istenildiğinde hakem raporlarıyla birlikte hakem isimleri belirtilmeden yazar/lar/a geri gönderilir.
4. Yayın Kurulu hakemlerden gelen eleştiriler doğrultusunda yazının derginin bir başka bölümünde yayımlanmasının uygun olduğuna karar verebilir ve bu kararı yazar/lar/ın onayına sunar. Yazar/lar/ın da uygun görmesi durumunda, yazı önerilen bölümde yayımlanır.
5. Dergiye gönderilen yazıların 'Yazım Esasları'na uygun olması gerekir. Esaslara uygunluk göstermeyen yazılar değerlendirmeye alınmadan yeniden düzenlenmesi için yazar/lar/a iade edilir.
6. Yayımlanan yazılar için yazar/lar/a ve değerlendirme yapan hakemlere derginin o sayısından birer kopya gönderilir.
7. Verilen süre içinde kendisine gönderilen yazıyı değerlendirmeyen ve dergi yayınında aksamaya neden olan hakemin, Yazı Değerlendirme (Hakem) Kurulu üyeliği gözden geçirilir.
8. Yayın Kurulu, gerekli gördüğü durumlarda yeni Yazı Değerlendirme (Hakem) Kurulu üyeleri atayabilir.
9. Araştırma ve tarama makalelerindeki görüşler yazarına, çevirilerden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.
10. Yazılar başka süreli yayınlarda yayımlanmamış olmalıdır. Herhangi bir toplantıda tebliğ olarak sunulmuş veya sunulacak ise bu açık olarak belirtilmelidir.
11. Hakem değerlendirme raporuna katılmayan yazar makalesini geri çekme hakkına sahiptir. Ancak geri çekme gerekçesini yazılı olarak yayın kuruluna sunmalıdır.
12. Dergideki yazılardan kaynak göstererek alıntı yapılabilir.
13. Yazılar için telif ücreti ödenmemektedir.

Makalelerin gönderimi ve hakem tarafından değerlendirilmesi süreçlerinde yaşanabilecek zaman kayıplarını ve maliyetleri azaltmak için makalelerinizi lütfen; [omys.mmo.org.tr/muhendismakina](http://omys.mmo.org.tr/muhendismakina) linkindeki sistem üzerinden gönderiniz.

# ABOUT ENGINEER AND MACHINERY JOURNAL AND ITS WRITING PRINCIPLES

Engineer and Machinery Journal is a vocational and technical publication that is published on a monthly basis and aims at providing our country's industry, society, and disciplines and colleagues who are members of Chamber with their scientific, technical and vocational knowledge needs, as well as to contribute to their scientific, and technical development. The English and Turkish articles on mechanical engineering field with the following qualities written in the format stated below are accepted to "Engineers and Machinery Journal".

**Research Article:** It must reflect an authentic research with its findings and results. The research must contribute to science.

**Literature Review Article:** They must review an adequate number of scientific articles, summarize and evaluate the subject according to current knowledge and technological level, and compare their findings before interpreting them.

## PRESENTATION FORMAT:

1. The whole article (text, tables, equations, drawings) must be typed and arranged on computer and delivered as ready for publication. The article must be written on an A4 (210x297 mm) paper, via Word MS, in 10 font size (heading must be in 15 font size) of Times New Roman with single space.
2. Articles including their drawings and tables must not exceed 25 pages and short papers must not exceed 4 pages.
3. Articles must be sent via registration on Online Article Management System (OMYS). The uploaded article must be named as "article\_the first 2 or 3 words of the title of article". The articles uploaded on OMYS should not contain any information about the author. The information about the author must be presented in a separate cover page, which must be also uploaded on the system. The cover page must demonstrate the name of the article and contact information of the author (name, surname, address, e-mail, academic title if there is one).
4. The article must be written in a plain language and style. It must comply with the spelling rules of the language used; third-person singular and deponent verbs must be used, whereas; inverted sentences must not be employed.
5. The title of the article must be clear and as short as possible (100 characters to the maximum) and also reflect the content. The first letters of English titles must be in capitals and titles must be written according to grammatical rules.
6. Chapters must be arranged in the following order: (i) abstract and keywords (in Turkish), (ii) abstract ve keywords (in English), (iii) main text, (iv) symbols, (v) acknowledgment (if necessary), and (vi) references.
7. Abstract must briefly define the objective, scope, method, and results of the study and must not exceed 100 words. At least three English and Turkish keywords must be provided. The first page must include the title in both Turkish and English, the abstract, and keywords; the main text must start from the second page.
8. The titles of chapters and sub-chapters must be numbered (TS 1212 ISO 2145).
9. Symbols must be employed according to international use; each symbol must be defined at their first use in the text; at the end of the article (before References), all symbols used must be listed in alphabetical order (Latin Alphabet first, Greek alphabet second).
10. Equations must be numbered and these numbers must be indicated in parantheses at the end of line.
11. Photographs must be scanned, and transferred to computers in jpeg format with a solution of 300 dpi at least. Drawings, tables, and photographs must be integrated into the text; each of them must be given a number and title; numbers and titles must be written under drawings (figures) and photographs, and above tables.
12. Only SI units must be used in articles.
13. As required by ethnical rules, citations must be presented in quotes and its reference must be demonstrated via a reference number.

14. Acknowledgments must be as brief as possible and state the people and institutions having contributed to the study.
15. References must be numbered via brackets in the text; in the list of references, they must be indicated according to their order in the text. The references must include the following information:
  - If reference is an article:** Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "full title of the article," name of the journal, volume, issue, start and end page.
  - If reference is a book:** Author's surname, initial of his/her name., other authors. year of publication. name of the book, volume number (if available), editor (if available), publication or ISBN no, publishing house, place of publication.
  - If reference is an paper:** Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "name of the paper," name of the conference, date, place.
  - If reference is a thesis:** Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "name of the thesis," degree, presented institution, city.
  - If reference is a report:** Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. name of the report, type of the report, publication number, name of the institution, place of publication.
  - If reference is a website:** Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "name of the article," internet address, last date of access.day.month.year

## PRINCIPLES OF PUBLICATION

1. The copyrights of articles are transferred by signing the form presented on the website of the journal. The articles of authors, who have not signed and sent the *Form for Transfer of Copyrights*, will not be taken into consideration.
2. Each article is sent to at least two arbitrators, who are experts in the subject of article. After authors revise their articles based on the suggestions of arbitrators, the ones that are deemed appropriate to be published on the journal are determined and authors are notified. The final version of articles are organized and sent by authors to the secretary of publication via Online Article Management System (OMYS). The errors that may be found in the article following its publication are the responsibility of the author.
3. Neither arbitrators are notified of the names of the authors, nor authors are notified of the names of arbitrators. The unpublished articles are sent back to authors with arbitration reports, upon author's request.
4. The Publication Committee may decide that the article be published in another section of the journal, based on the suggestions of arbitrators and may present their decision for the approval of author(s). If also deemed appropriate by author(s), the article is published on the presumed section.
5. The articles sent to the Journal must comply with the "Principles of Writing". The articles not complying with these principles will be returned to the author(s) for revision, without being evaluated.
6. A copy of the issue of the journal is sent to the authors of articles published in that issue and the arbitrators who evaluated those articles.
7. The membership to the Article Assessment Committee of the arbitrator, who have not evaluated the article within the due time and thereby caused delay in the publication of the journal, is reviewed.
8. The Publication Committee may appoint new members to the Article Assessment Committee, if/when they deem necessary.
9. The views stated in the research and literature review articles are the responsibility of the author, whereas; the consequences which may result from its translation are the responsibility of the translator.
10. The articles must be not published on any other periodical publications. It should be clearly stated if the articles were presented or are planned to be presented as a paper in any meeting.
11. The author(s), who do not agree with the report of the arbitrators, may withdraw his/her article. However, the author(s) must present the reason behind his/her withdrawal to the publication committee in a written manner.
12. It is allowed to cite the articles published in the journal as long as the source is stated.
13. A royalty (a fee for copyrights) is not paid for articles.

Please send your articles via the system at [omys.mmo.org.tr/muhendismakina](http://omys.mmo.org.tr/muhendismakina), in order to minimize the costs and time loss, which may result from the process of sending articles and evaluation by arbitrators.