

Küresel Enerji Tüketimi Bağlamında Mikro Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi

Bilal Sungur ¹

Muhammet Özdoğan ²

Bahattin Topaloğlu ^{*3}

Lütfü Namı ⁴

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

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

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

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

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

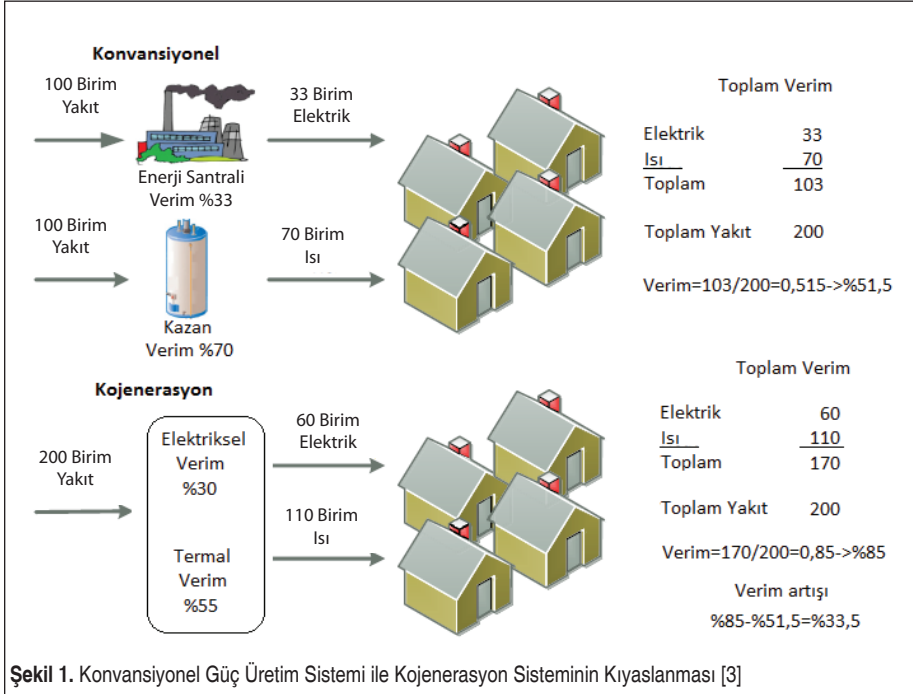


1. GİRİŞ

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_{el}’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.

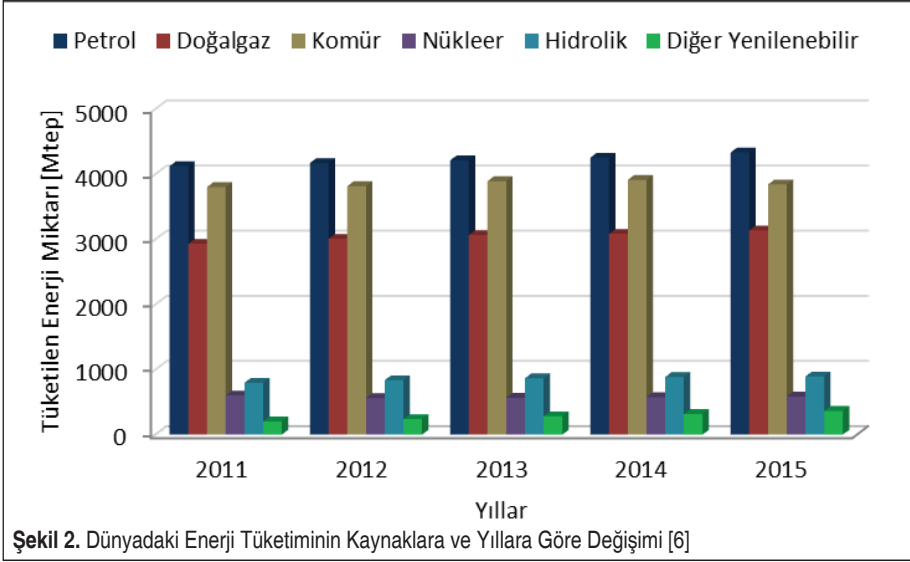
Dünyadaki enerji tüketiminin kaynaklara ve yıllara göre değişimi sütun grafiği şeklinde Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, 2011-2015 yılları arasına bakıldığında, dünyadaki enerji tüketiminin genel trend olarak her geçen yıl arttığı görülmektedir.

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



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

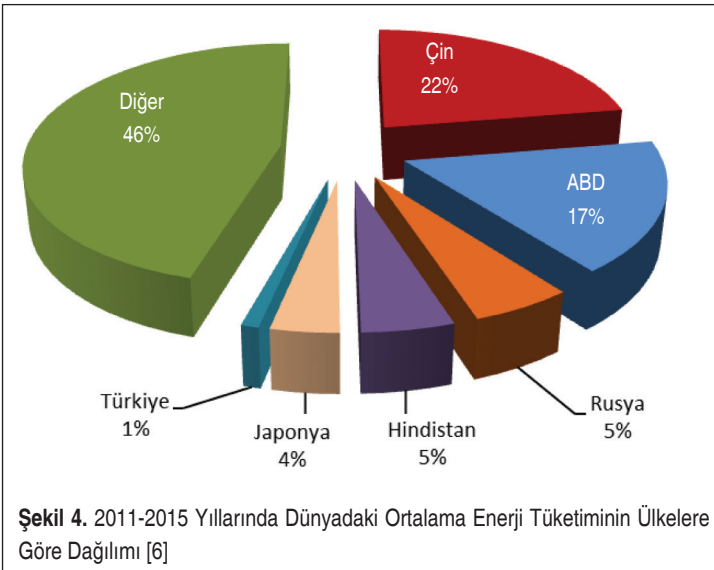
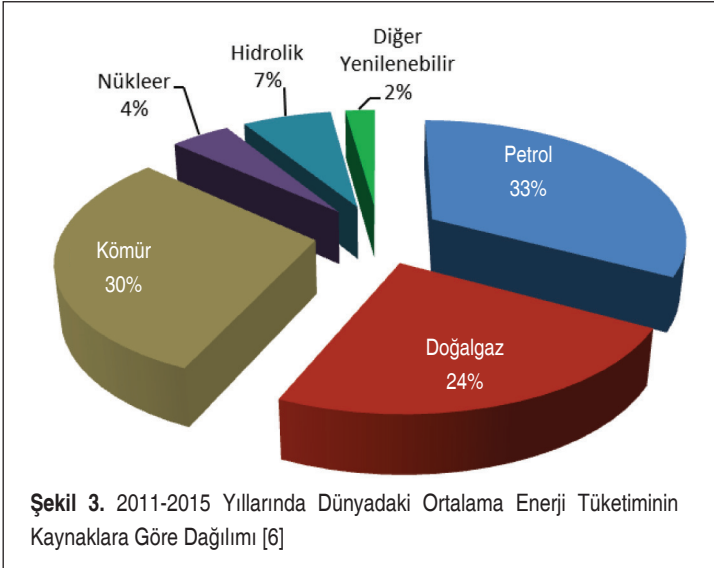


Petrol, doğalgaz, hidrolik ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimin her yıl arttığı şekilde görülmektedir. Kömür kaynaklı enerji tüketimi ise 2011 yılından 2014 yılına kadar artmış, 2015 yılında ise bir önceki yıla göre azalmıştır. Nükleer enerji tüketimi incelendiğinde, 2012 yılında 2011 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.

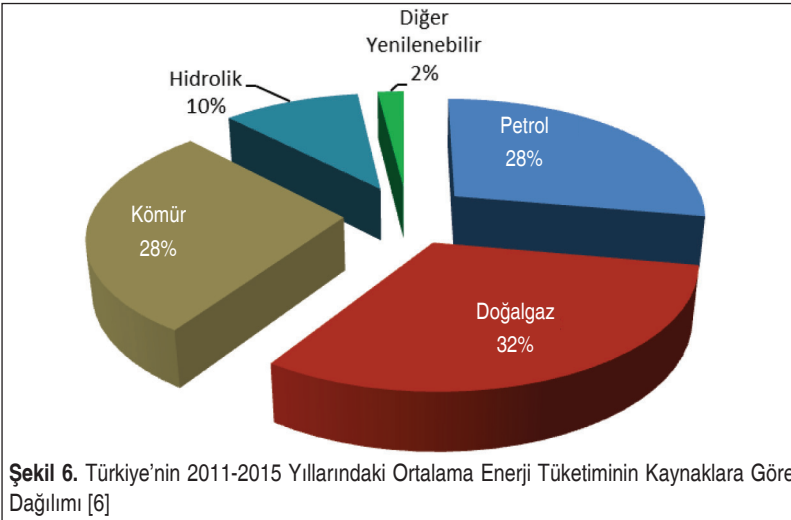
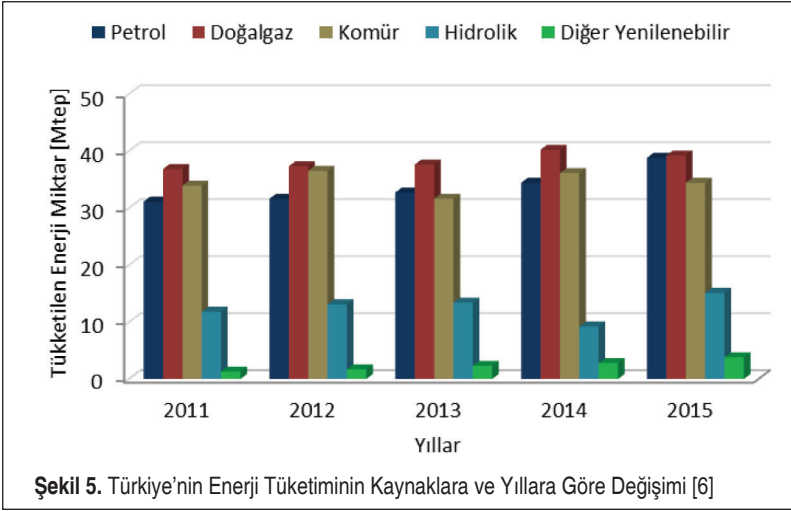
2011-2015 yıllarındaki ortalama enerji tüketiminde en yüksek paya sahip ilk 5 ülke ve Türkiye için dağılım grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, Çin Halk Cumhuriyeti'nin %22 ile dünyadaki enerji tüketiminde en yüksek paya sahip olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla, ABD %17, Rusya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

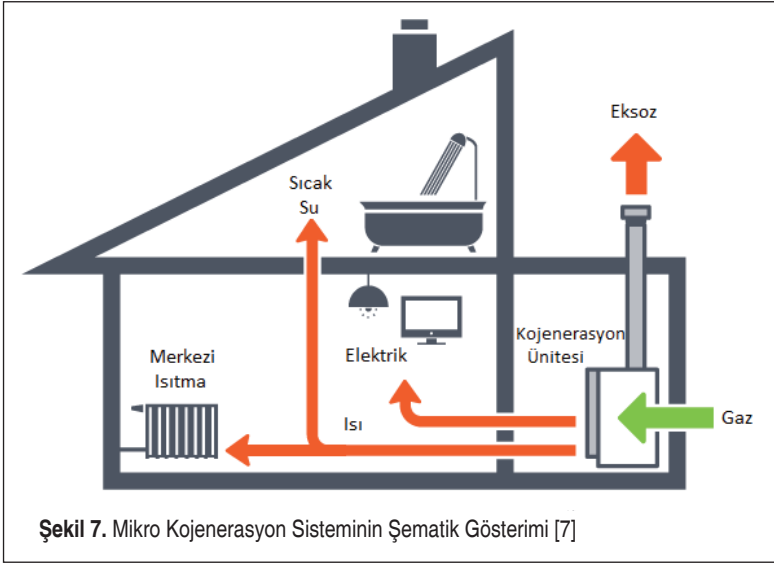
Şekil 3 ve Şekil 6 birlikte incelendiğinde, dünyada enerji tüketimi en fazla petrol kay-



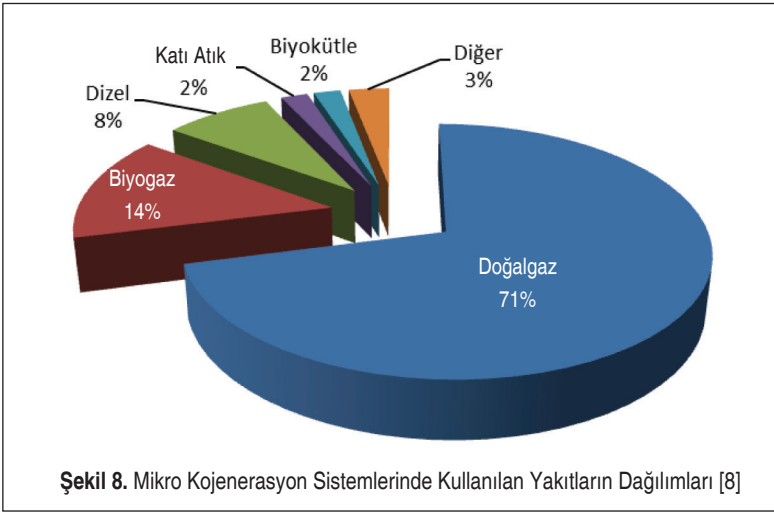
naklıyken, Türkiye’de en fazla doğalgaz kaynaklı olmaktadır. Dünyada enerji tüketiminin yaklaşık %4’lük kısmı nükleer kaynaklardan elde edilirken, Türkiye’de nükleer kaynaklı enerji tüketimi yoktur. Toplam yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimdeki payı dünyada yaklaşık %9 iken Türkiye’de bu değer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



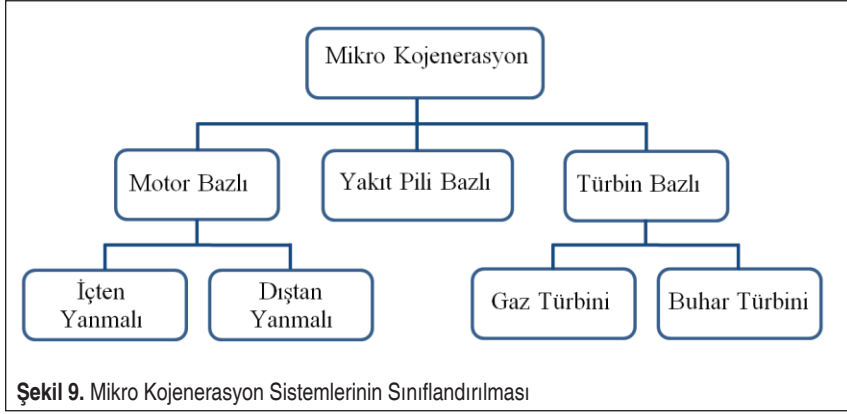
Şekil 7. Mikro Kojenerasyon Sisteminin Şematik Gösterimi [7]



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.

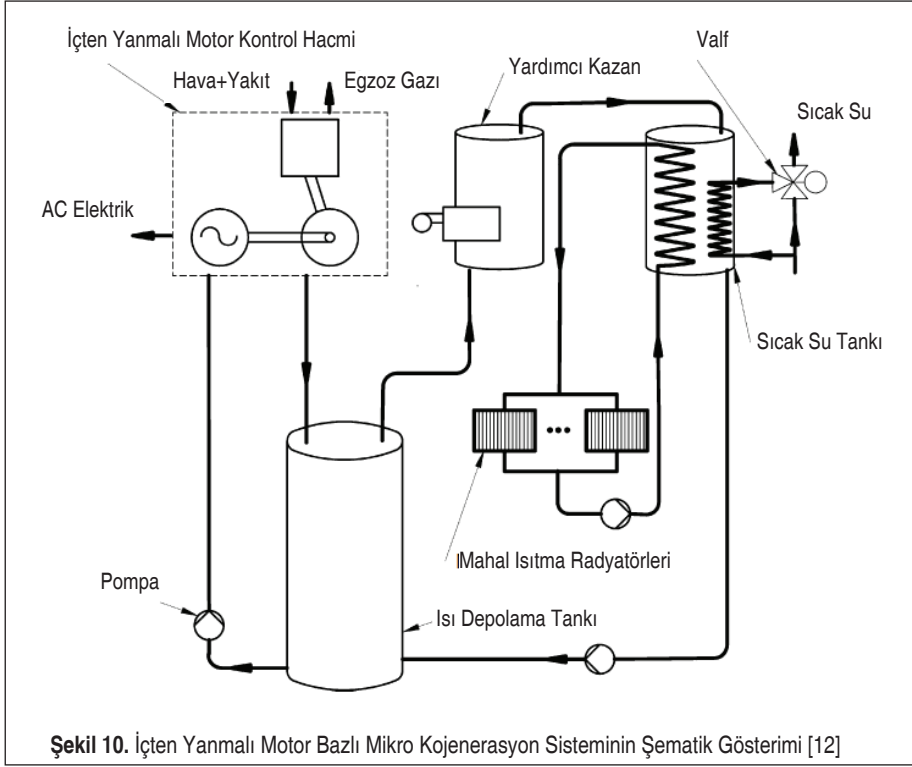
Motor bazlı sistemlerde içten yanmalı motorlarda enerji kaynağı olarak sıvı veya gaz yakıtlar kullanılırken, dıştan yanmalı motorlarda herhangi bir yakıt türü veya herhangi bir ısı kaynağı (güneş gibi) kullanılabilir. Yakıt pili bazlı sistemlerde enerji kaynağı olarak hidrojen veya hidrokarbon içeren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



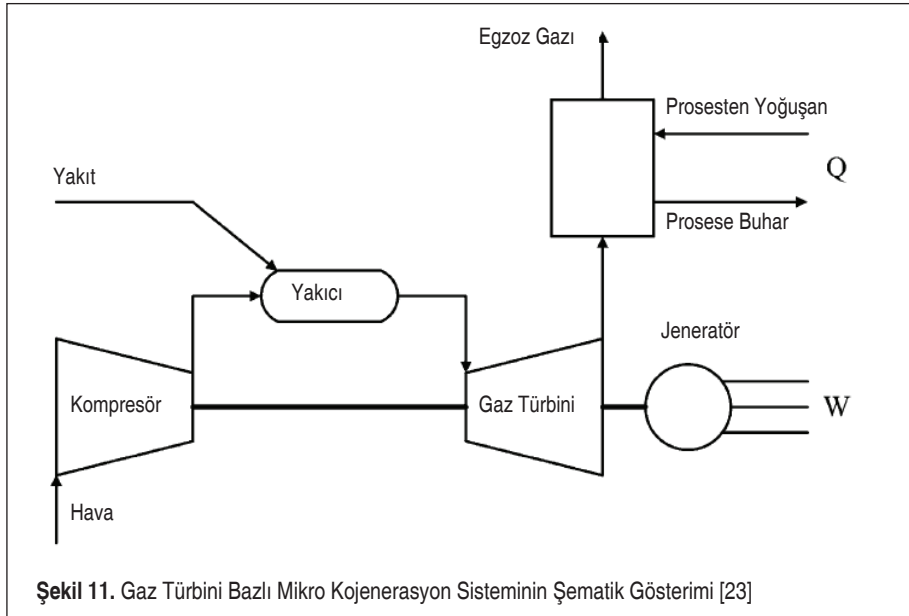
bilinir. Mikro türbinler, türbin teknolojisinin daha küçük ölçeklerde geliştirilmiş halidir ve bu türbinler iki bölüme ayrılabilir: gaz türbinleri ve buhar türbinleri.

3.2.1 Gaz Türbinleri

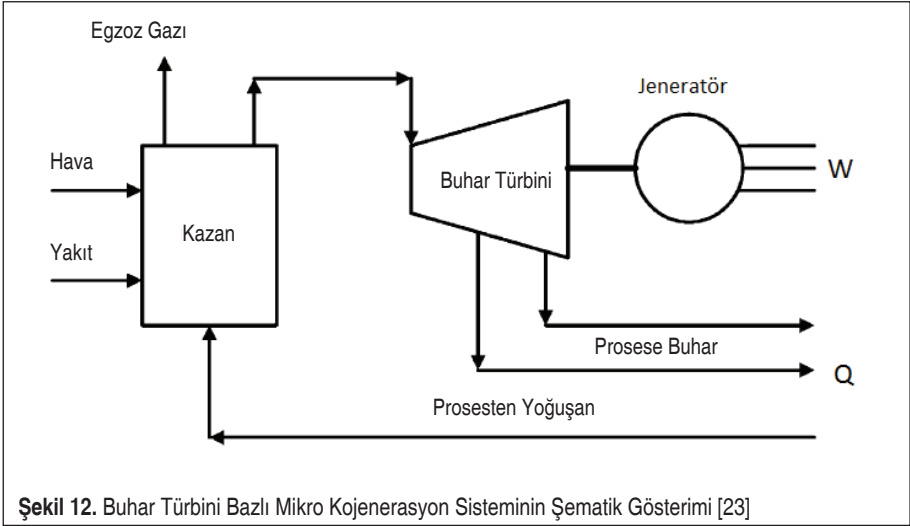
Gaz türbinlerinin çalışma prensipleri buhar türbinlerine benzerdir. Ancak gaz türbinlerinde su buharı yerine yüksek sıcaklık ve basınçta gaz kullanılır. Yanma sonucu oluşan gazın doğrudan türbin içine girerek kanatları döndürmesi sonucu mekanik enerji üretilir. Mikro gaz türbinleri, küçük ölçekli enerji 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



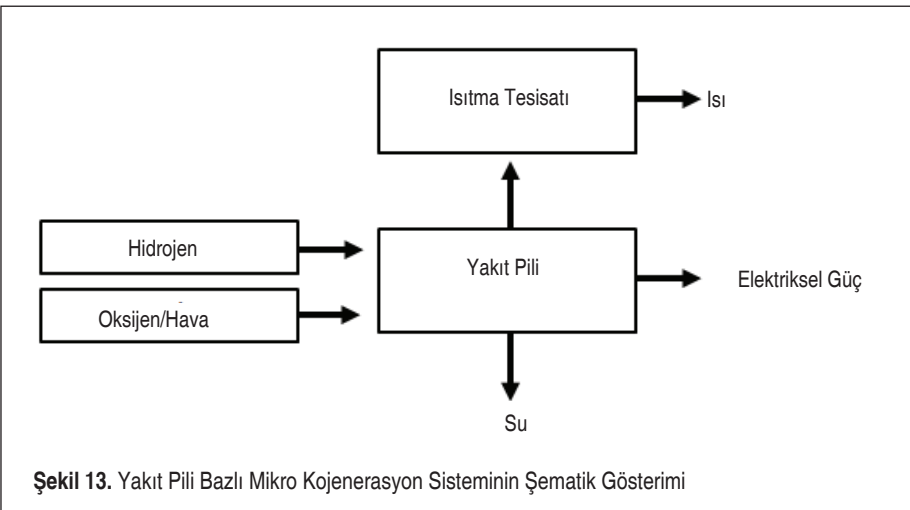
Şekil 11. Gaz Türbini Bazlı Mikro Kojenerasyon Sisteminin Şematik Gösterimi [23]



[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. **Ciocolanti, 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.