

## İLERİ MÜHENDİSLİK ÇALIŞMALARINI VE TEKNOLOJİLERİ DERGİSİ

### Yakıt Hücreli Mikro-kojenerasyon Sistemlerinin Eysel Kullanım Açısından İncelenmesi

Aşkın YILDIZ<sup>1</sup> , Ümit ÜNVER<sup>\*2</sup> 

<sup>1</sup>Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Yalova, 77200, Türkiye

<sup>2</sup>Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yalova, 77200, Türkiye

Derleme Makalesi, Geliş Tarihi: 25.06.2021, Kabul Tarihi: 21.10.2021

#### Özet

Enerji kaynaklarını büyük oranda ithal eden ülkemizde, gelecek nesillere yaşanabilir bir ülke ve dünya bırakmak için enerjiyi verimli kullanmak ve çevreyi korumak son derece önemlidir. Enerji kayıp sebeplerinden biri iletim kayıplarıdır. Bütün dünyada bu kaybın önüne geçmek için “dağıtık enerji üretimi” yöntemi teşvik edilmektedir. Bu yöntemde enerji mikro-kojenerasyon ve benzeri uygulamalarla, kullanılacağı yerde üretilmektedir. Bu çalışmanın amacı, yerinde üretimin en verimli örneklerinden birisi olan, yakıt hücreli mikro-kojenerasyon uygulamalarının teknik ve ekonomik değerlendirmesini yapan geniş bir literatür araştırması ile ilgili bilim alanına katkıda bulunmaktır. Bunun için mikro-kojenerasyon tanımı ve literatürdeki mikro-kojenerasyon çeşitleri ve karşılaştırmaları yapılmış, evsel uygulamalar için hidrojen yakıt hücresi çeşitleri detaylandırılmıştır. Ayrıca evsel yakıt hücresi tipi seçimi için bilgiler verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikro-kojenerasyon, Yakıt hücresi, Enerji verimliliği, Binalarda enerji verimliliği, Sıfır enerji bina.

### Investigation of Fuel Cell Micro-cogeneration Systems for Domestic Use

#### Abstract

Turkey imports the bulk of its energy needs. It is extremely important to use energy efficiently and economically and to protect the environment, to leave a better country and world to future generations. Some of the energy losses are because of transmission losses. Distributed "energy generation" method is encouraged to prevent this loss all over the world. In this method, energy is produced at the location of end user by micro-cogeneration and similar applications. The aim of this study is to contribute to the related science area with an extensive literature research that makes technical and economic evaluation of fuel cell micro-cogeneration applications, which is one of the most efficient examples of on-site production. For this aim, the definition of micro-cogeneration and the types and comparisons of micro-cogeneration through the literature is given. Hydrogen fuel cell types for domestic applications are detailed and information for domestic fuel cell type selection is conducted.

**Keywords:** Micro-cogeneration, Fuel cell, Energy efficiency, Energy efficiency in buildings, Zero energy buildings.

\*Sorumlu yazar umit.unver@yalova.edu.tr, <sup>1</sup>askin.yildiz.77@gmail.com

## 1. GİRİŞ

5627 sayılı Enerji Verimliliği kanununda enerji verimliliği “Enerjinin etkin kullanılması, israfının önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin üretiminde, iletiminde ve kullanımında verimliliğin artırılmasıdır” şeklinde tanımlanmıştır (Enerji Verimliliği Kanunu, 2007). Kojenerasyon sistemleri, ısı ve elektrik ve/veya mekanik enerjinin aynı tesiste eş zamanlı olarak üretilerek enerji verimliliği kanunundaki amaçları karşılamaktadır (Unver ve Kilic, 2007). Temel olarak bir güç çevriminde, çevreye atılan ısının da değerlendirilerek, hem elektrik hem de ısı enerjisi üretilmesidir. Bu tür çevrimlerde, geleneksel çevrimlere göre yakıt tüketimi ve salınım azalmaktadır (Ünver ve Kılıç, 2005). Enerji tüketildiği yerde üretilmekte, iletim ve dağıtım yatırımları ve enerji kayıpları azalmaktadır. Kesintisiz ve kaliteli enerji sağlanmaktadır. Kojenerasyon tesisleri enerjinin etkin kullanımı, enerji maliyetinin düşürülmesi ve çevrenin korunması açısından çok önemlidir. Bu tesislerde üretilen enerji düşük karbonludur (Özenir, 2019).

Mikro-kojenerasyon ya da Mikro-Birleşik Isı-Güç Sistemleri (micro-CHP) sistemleri 50 kW’a kadar güçte olan tek bir enerji kaynağından aynı anda ısı ve elektrik üreten tesislerdir. Bu sistemlerde üretimin yeterli olmadığı durumda veya ihtiyaç olduğunda şebekeden elektrik satın alınabilmekte, üretim ihtiyaçtan fazla olduğunda ise, mevzuata uygun şekilde, şebekeye satılabilmektedir.

Bu çalışmada mikro-CHP çeşitleri, yakıt hücresi çeşitleri hakkında detaylı bir literatür taraması sunulmaktadır. Yakıt hücreleri ve mikro-CHP uygulamalarında çalışma parametreleri, verim, en uygun koşullar, performans, enerji tasarrufu, çevresel değerlendirme, boyut, ağırlık, ilk yatırım ve geri dönüş süresi için literatür araştırması yapılmıştır.

Mikro-CHP uygulamaları genel olarak 3 başlık altında incelenmektedir (Sungur vd., 2017).

a) Motorlu Bazlı Kojenerasyon: En çok tercih edilen sistemlerdir. İçten yanmalı veya dıştan yanmalı motorlar kullanılır. Mekanik enerji ile elektrik elde edilir, egzozdan çıkan atık ısı değerlendirilerek elektrik ve ısı elde edilir.

b) Türbin Bazlı Kojenerasyon (Mikro-türbin): Gaz türbini ve buhar türbini,

c) Yakıt Pili Bazlı Kojenerasyon: PEMFC, SOFC, MCFC, PAFC

Güç santrallerinde üretilen enerji, son kullanıcıya iletilene kadar kayba uğramaktadır (Unver vd., 2018; Ünver ve Kilic, 2014). İletim kayıplarının önüne geçmek için önerilen çözümlerden birisi de enerjiyi, dağıtık sistemlerle (Nuroğlu, 2011) kullanılacağı yerde üretmek, mikro sistemlerle enerji ihtiyacına çözümler sunmaktır. Yerinde üretimin en iyi örneklerinden biri mikro-CHP uygulamalarıdır. Üretici sayısının artması ve dağılması açısından, mikro kojenerasyon sistemlerinin ülkemizde de araştırılması, prototip uygulamalarının yapılması, hem enerji arz güvenliği açısından, hem arz sürekliliği açısından önem arz etmektedir.

Mikro-CHP ilgili, özellikle yerli literatür oldukça sınırlıdır ve genel olarak Mikro-kojenerasyon sistemlerinin tanım ve tarifleri verilmektedir. Bu çalışmada, mikro-CHP konusuyla ilgili bilim alanına yönelik katkı sağlamak amaçlanmıştır. Mikro-CHP uygulamasının enerji verimliliğine, evlerde elektrik ve ısı enerjisi üretimine katkısı, coğrafi konuma ve ülkeye, yakıt türüne, üretilen enerji fiyatı gibi parametrelere göre değerlendirilmiş, bina cinsine göre mikro kojenerasyon sistemi seçimine yönelik bilgiler verilmiştir.

## 2. MİKRO KOJENERASYON SİSTEMLERİ

### 2.1. İçten ve Dıştan Yanmalı Motorlar

Kullanım ve bakım kolaylığı sağlaması, geniş güç seçeneği sunması gibi avantajlarından dolayı, konut veya küçük güç ihtiyacı olan işletmeler için sıklıkla tercih edilirler. İçten yanmalı sistemlerin tipik örnekleri Otto (benzinli otomobil motoru), Diesel, Stirling ve Atkinson motorlarıdır. Küçük güç gerektiren, otomobil motoru kullanılan uygulamalarda elektriksel verim önemli oranda azalmaz (Capaldi, 2016). Otomobil motorlarına alternatif bir uygulama da Atkinson çevrimiyle çalışan içten yanmalı motor prototipleridir. Bu tür motorların elektrik veriminin %35, termal verimin %66,3, toplam verimin %97,8 e kadar çıkabileceği deneysel olarak gösterilmiştir (Capaldi, 2014).

8 kW sıcak su ve 1 kW elektrik tüketen doğalgazlı bir evde kullanımı araştırmak için üretilen Stirling tipi bir deney motorunun termal verimi, 30°C-70°C arası su giriş sıcaklığına bağlı olarak, %90-%84 arası değişmektedir (Valenti vd., 2014a). İş akışkanı olarak Nitrojen yerine Helyum kullanılması durumunda performans artabilir. Dıştan yanmalı motorlarda on-off çalışma koşullarının elektriksel verim üzerindeki olumsuz etkisi %0,7 civarındadır. Verim düşüşünü engellemek için start-stop sayısının düşürülmesi tavsiye edilmektedir (Valenti vd., 2014b).

İçten yanmalı motorlardan gaz motorları uygulamaları, %27 ±%3 elektrik verimi, %60 ±%5 toplam verim oranlarıyla, evsel kullanımlar için oldukça umut vadeden sistemlerdir (Wit ve Näslund, 2011).

## 2.2. Mikro-Türbin Uygulamaları

Mikro türbin uygulamalarının en yaygın örnekleri buhar veya gaz türbinli motorlardır. Bu tür türbinlerin tipik uygulamalarında üretilen elektrik enerjisinin maliyeti 0.079 USD olarak hesaplanmaktadır (Gokcek, 2017). Boyutları küçük olduğundan düşük titreşim, daha az gürültü gibi avantajları vardır. Ancak işletme maliyetleri yüksek ve elektrik verimi yakıt hücreli kojenerasyon sistemleriyle kıyaslandığında biraz daha düşüktür (Klonowicz vd., 2017). Bu tür motorlarda verimi artırmak için türbin giriş havasının soğutulması tavsiye edilmektedir (Unver & Kilic, 2017). Ancak soğutmanın mekanik sıkıştırılmalı soğutma çevrimi ile yapılması sisteme bazı ekstra maliyetler ve yükler getirir. Bu yüzden, soğutma işleminden elde edilecek kazancı artırmak için yenilenebilir enerji kaynakları ile soğutma tavsiye edilmektedir (Unver vd., 2018).

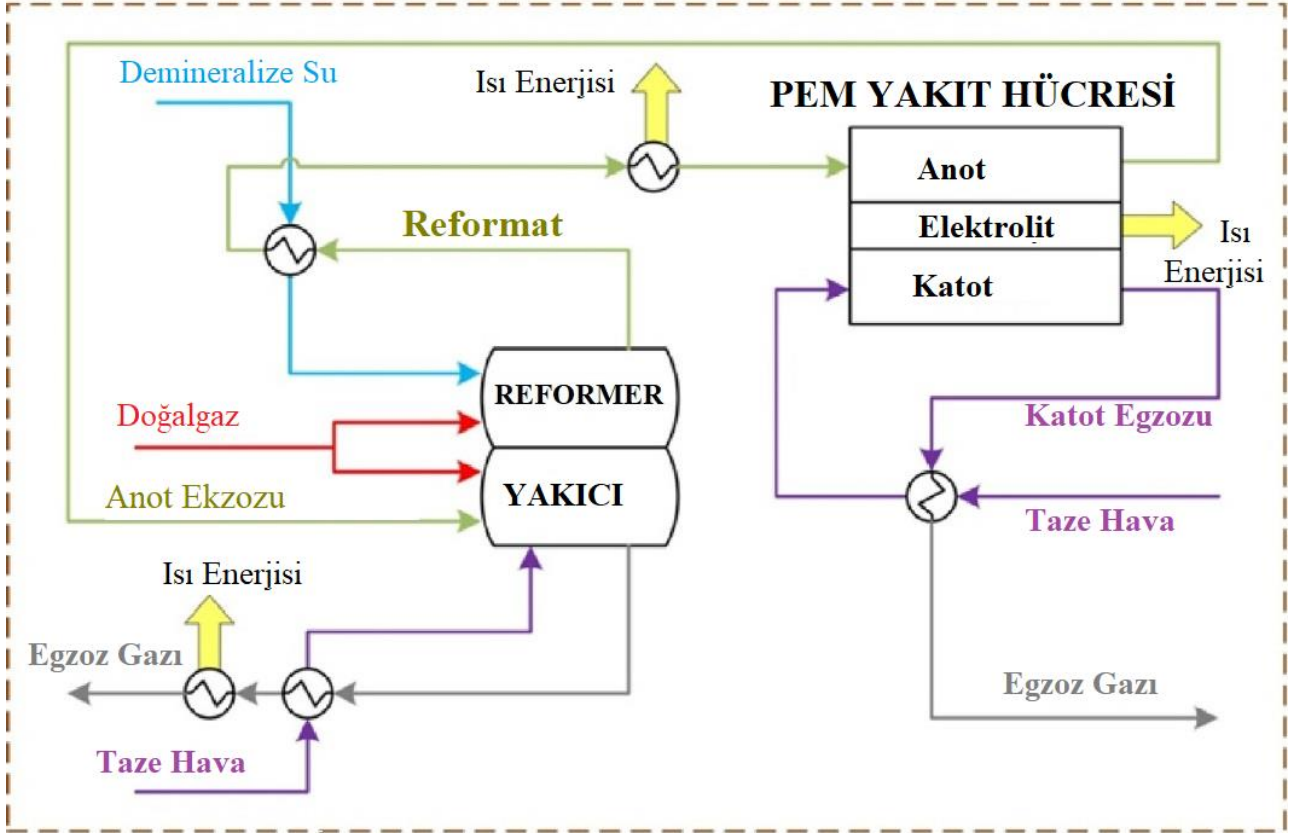
## 2.3. Yakıt Hücresi Çeşitleri ve Uygulamaları

a) PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell): En gelişmiş teknolojidir ve dünyada %90 ile en geniş kullanım alanına sahiptir. Japonya'da Enefarm projesi kapsamında konut ısıtma sistemlerinde kullanılması teşvik edilmektedir. Araştırma-geliştirme çalışmalarıyla ve kitlesel kullanımla verim, dayanıklılık, güvenlik artmıştır (Dodds vd., 2015). PEMFC sistemlerinin Napoli vd. (2015) tarafından verilen şematik gösterimi şekil 1 de verilmiştir.

b) SOFC (Solid Oksit Fuel Cell): Endüstri ve konutlarda, yüksek sıcaklıklarda kullanılan yakıt hücreleridir. Dünya'da kullanım oranı %10'a ulaşmıştır. SOFC yüksek elektriksel verime ve yakıt esnekliğine sahiptir. Ancak diğer yakıt hücresi çeşitlerine göre daha yüksek sıcaklıkta çalışmaktadır ve bu durum bazı sınırlamalara sebep olabilmektedir. SOFC Yakıt hücreleri start-stop operasyonlarına duyarlıdır ve sıcak olmaları gereklidir. Çıkış tarafında talep yoksa çıkış gücünü düşürür. Yakıt hücrelerinde malzeme ömür ve performans düşme problemine karşın SOFC kullanımı avantajlıdır (Dodds vd., 2015). SOFC yakıt hücreli sistem yüksek sıcaklıkta çalıştığından egzoz çıkışına micro-türbin kullanılırsa ilave elektrik üretilebilir. Napoli vd. (2015) tarafından incelenen SOFC sisteminin şematik gösterimi Şekil 2 de verilmiştir.

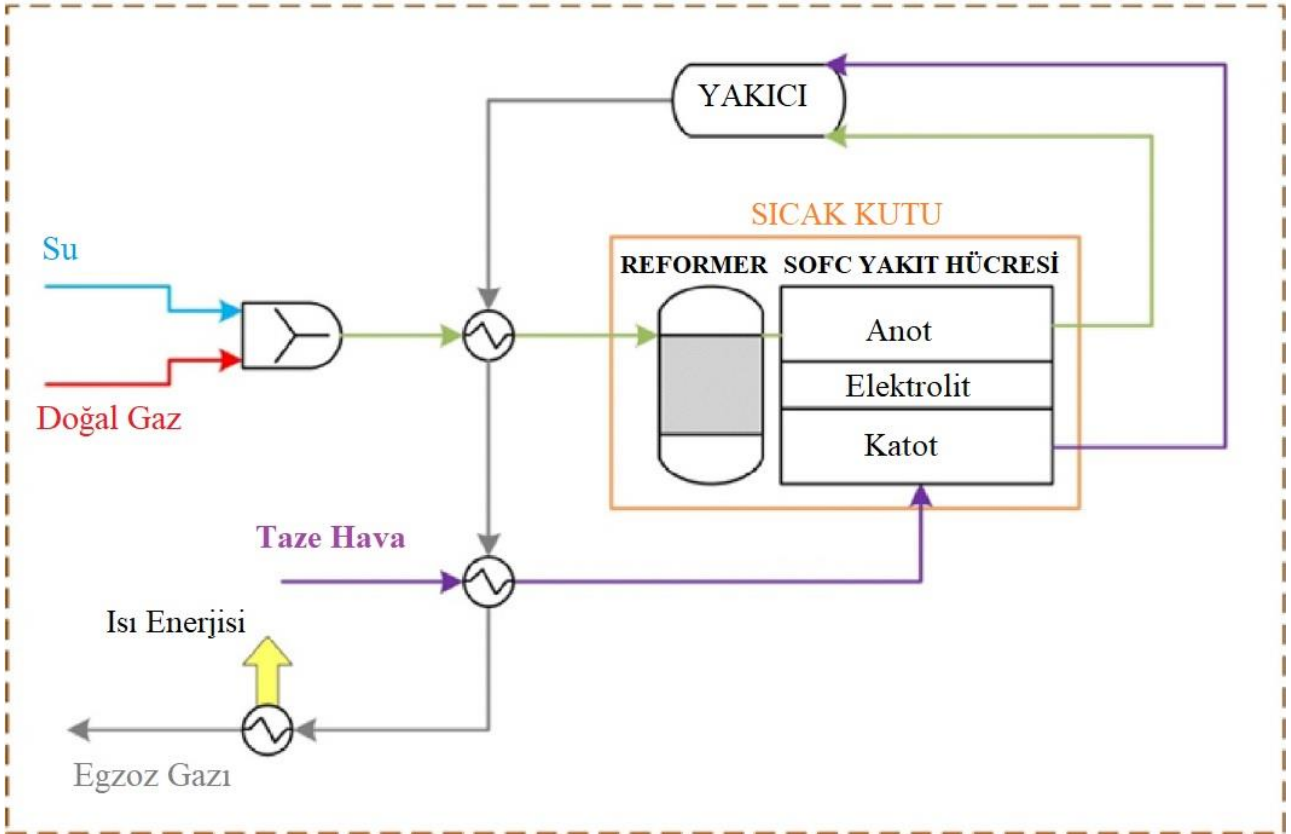
c) MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell): Yüksek sıcaklıkta çalışan, konutlarda ve endüstride kullanılan yakıt hücresi çeşididir. En çok yüksek güç gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Düşük maliyetlidir ancak düşük ömür ve düşük güç yoğunluğuna sahiptir. Şekil 2 de Mehrpooya vd. (2020) çalışmasında incelenen MCFC yakıt hücresi ile çalışan bir kojenerasyon sisteminin şematik gösterimi verilmiştir.

## PEMFC

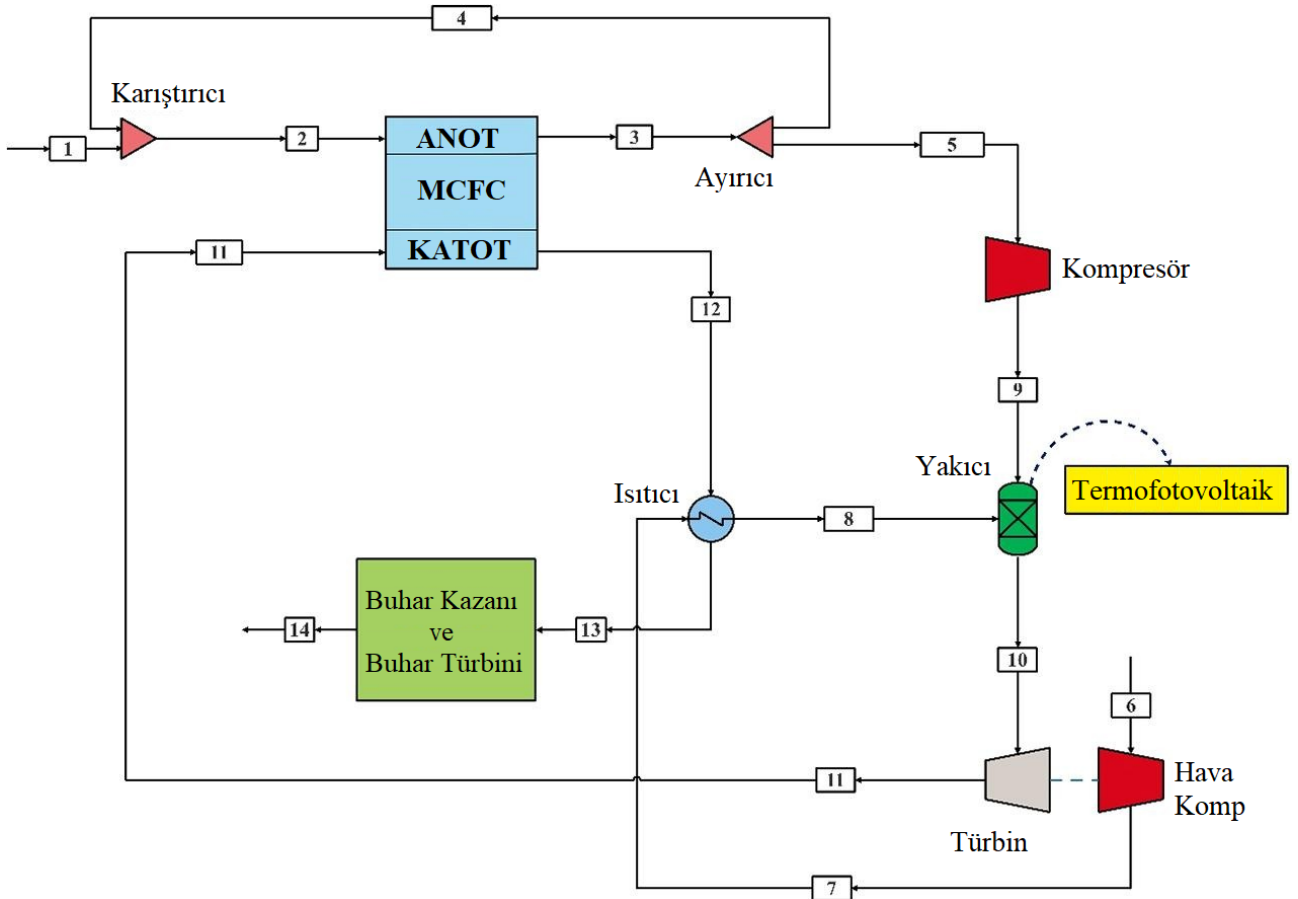


Şekil 1. PEMFC Mikro-CHP sisteminin şematik gösterimi (Napoli vd., 2015)

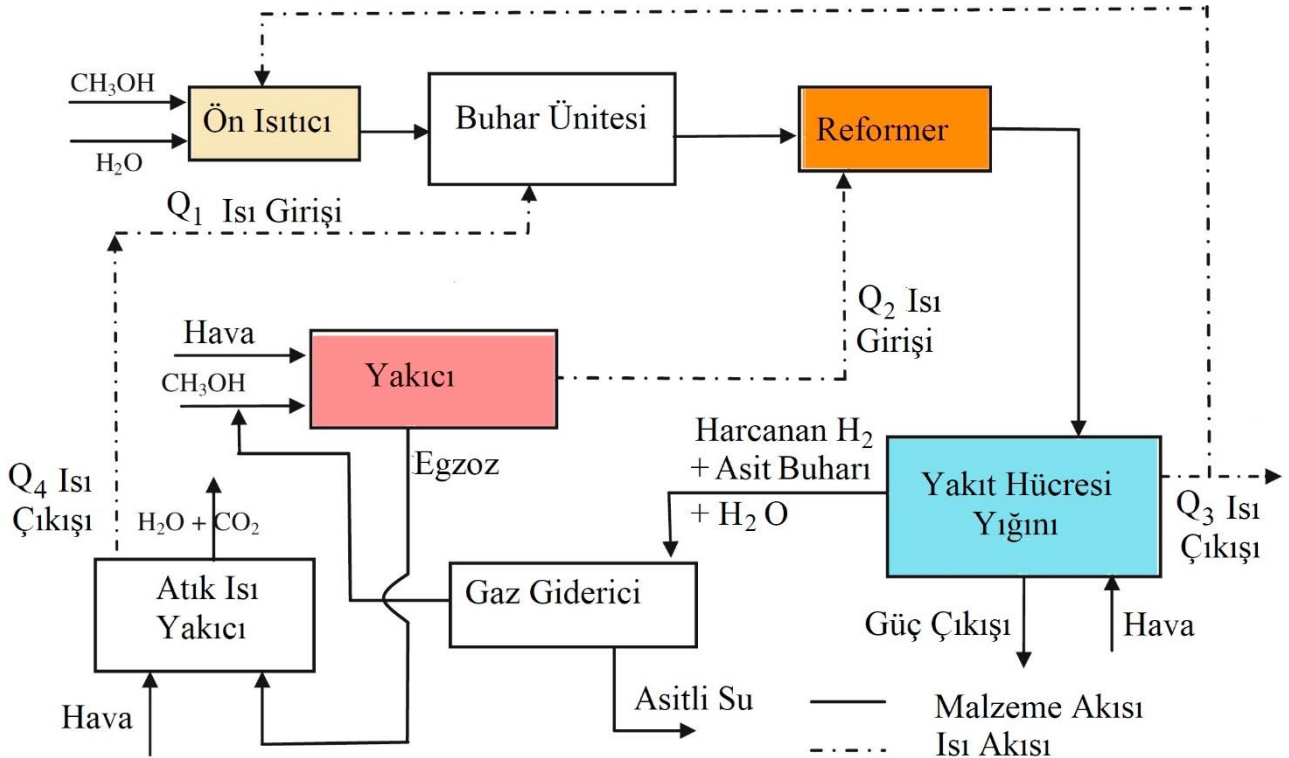
## SOFC



Şekil 2. SOFC (Solid oxide fuel cells) yakıt hücreli micro-CHP sisteminin şematik gösterimi (Napoli vd., 2015)



Şekil 3. MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells) yakıt hücreli kojenerasyon sisteminin şematik gösterimi (Mehrpooya, 2020)



Şekil 4. PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) yakıt hücreli kojenerasyon sisteminin şematik gösterimi (Pareta, 2011)

d) PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell): Isıtmada ilk kullanılan yakıt pilidir.1970'lerden beri ticari olarak kullanılmaktadır ancak konutlarda kullanılmamaktadır.

Tipik 1kW yakıt hücresi 150-200 kg'dır ve 2 m<sup>2</sup> alan gerektirir. 300-400 kW için 22-36 m<sup>2</sup>, 30-35 ton olmak üzere bir konteyner gerektirir.

### 3. YAKIT HÜCRELİ MİKRO-KOJENERASYON SİSTEMLERİ

Hidrojen yakıt hücreli sistemlerde, motor ve türbinli uygulamalardaki gibi hareketli mekanik donanımlar yoktur ve yanma olmadan elektrokimyasal işlemlerle hidrojen ve oksijenden enerji üretilir. Yakıt hücreleri yüksek verimlilik, düşük karbon salınım, düşük gürültü, primer enerji tasarrufu, yüksek güç yoğunluğu ve modüler tasarım gibi özelliklere sahiptir (Dodds vd., 2015).

PEMFC tipi yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklıkları 160 °C civarındadır. Küçük güçlü olan yakıt hücreleri, yalıtım durumuna göre 15-20 °C sıcaklığındaki şebeke suyunu 40 ile 60 °C arasına çıkarabilmektedir (Devrim & Yapıcı, 2018). Tek hane için tasarlanan sistemlerden uygulamada, 40 A civarında akım yoğunluğu ve %76 toplam verim elde edildiği belirtilmektedir (Cozzolino vd., 2011). Bu tür yakıt hücrelerinin katalog verimleri %95 e kadar ulaşmaktadır (*Energy Matters*, 2014).

#### 3.1. Sistemi Etkileyen Parametreler ve Faktörler

Küçük güçlü evsel mikro-kojenerasyon sistemlerinde hidrojen gaz basıncı verime önemli bir etkide bulunmazken, nem ve akım yoğunluğu arttığında omik kayıplar artmakta ve verim azalmaktadır (Arsalis, 2019; Romdhane vd., 2018). Bununla beraber, yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklığı arttığında elektriksel verimin arttığı, termal verimin düştüğü gözlenmektedir (Jannelli vd., 2013). Küçük güçlü yakıt hücreleri için tavsiye edilen uygun koşulların 2 atm. basınç, 378,15 K sıcaklık ve %58 nem olduğu belirtilmektedir (Barelli vd., 2011). Yakıt hücrelerinin verim ve kullanım ömürlerini artırmaya yönelik çalışmalarda, ilave batarya kullanımının sistem performansını arttıracığı ifade edilmektedir (Taccani vd., 2017).

SOFC tipi evsel mikro-kojenerasyon sistem performansı, sıcak su ve alan ısıtma suyu dönüş sıcaklığından etkilenir. Depo edilen sıcak su sıcaklığı düşürülürse yakıt hücresi çıkış sıcaklığı ve enerji tasarrufu artar (Windeknecht ve Tzscheutschler, 2015). Bu tür sistemlerin biyogazla çalıştırıldığında, %3-7 arası daha fazla elektriksel verim elde etmek için, iki

yakıt hücresinin seri bağlanmaları tavsiye edilmektedir (Kupecki vd., 2015).

Literatürde PEMFC ve SOFC tipi kojenerasyon uygulamaları için aralıklı ve kısmi yüklü çalışma, yardımcı güç tüketimi ve akış-dönüş sıcaklıkları değişimi nedeniyle simülasyon ve deneysel çalışmalar arasında %10'a varan verim farkı olduğu ifade edilmektedir (Dodds vd., 2015).

Yakıt hücreli mikro-CHP sistemlerinde, ünitenin hep sıcak kaldığı sıcak başlangıç modunun, ünitenin soğumasına izin veren soğuk başlangıç çalışma rejiminde daha avantajlı olduğu, dakikada 70 W' tan düşük rampa limitleri olduğunda sistemin ekonomik performansının olumsuz etkilendiği belirtilmektedir (Vijay ve Hawkes, 2018).

Yakıt hücreleri termodinamik ve elektrokimyasal doğaları gereği ani ısı ve elektrik talebine hızlı cevap veremez. Çıkış voltajını artırmak için gereken iyileştirme mekanik nedenlerden dolayı verim alınamamasına sebep olur. Yakıt hücresi DC çıkış verir. Çıkış voltajı üzerinde dönüştürücü ile çalışarak voltaj düzenlemesi yapılabilir. Çok kademeli yükseltici DC/DC dönüştürücü kullanılabilir. Literatürde DC/DC yükseltici dönüştürücü kullanımının voltaj dalgalanmalarını azalttığı ve yakıt hücresinin ömrünü arttırdığını göstermişlerdir (Cao vd., 2020).

#### 3.2. Sistemin Konutlarda Uygulanması

Bina uygulamalarında PEMFC ve SOFC tipi mikro-kojenerasyon sistemlerinin, elektrik verimini tarif eden PES (Primer Energy Saving, Birincil Enerji Tasarruf) katsayısı endüstriyel kullanıma göre daha az olmaktadır (Napoli vd., 2015). Evsel Mikro-kojenerasyon sistemlerinin verimini artırmak için sistem ısı pompası ile takviye edilebilir, ancak bu da ilk yatırım maliyetini artırır (Sorace vd., 2017).

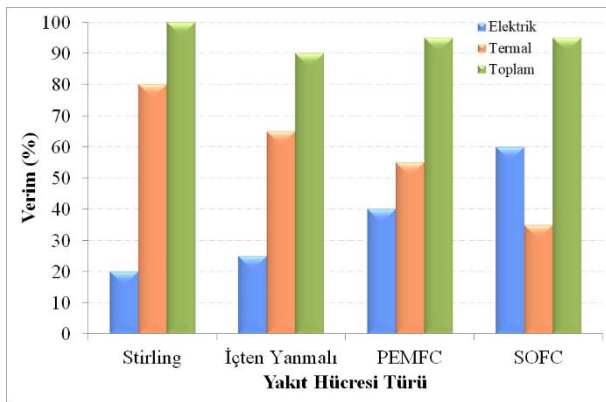
Konutlarda mikro-CHP uygulamalarında maliyeti düşürmek için tavsiye edilen başka bir önemli nokta da sisteme mümkün olduğu kadar çok hane bağlanmasıdır. Hane sayısı arttıkça hem hane başına düşen maliyetler azalmakta hem de sistemin verimi artmaktadır (Di Marcoberardino vd., 2019). Mikro-kojenerasyon sistemlerinin farklı ülkeler için kıyaslaması oldukça zor bir çalışmadır. Kıyaslama için asıl sorunun ülkelerde farklı sistemlerin kullanılması, sertifikalandırılması ve enerji fiyat tarifeleridir (Angrisani vd., 2014). Örneğin İngiltere ve Hollanda'da gibi ülkelerde İspanya ve İtalya'ya göre doğal gaz fiyatı düşük olduğundan,

sistem termal kullanım için daha uygun olmaktadır (Di Marcoberardino vd., 2019).

Evsel mikro-CHP uygulamalarında, konutun tüm enerji taleplerinin dikkate alınması gerekir, sistemin mümkün olduğu kadar anlık start-stop yapmadan çalıştırılması, daha yüksek verim elde etmek için önemlidir (Adam vd., 2018). PEMFC devreye girme süresi yaklaşık 30 saniyedir. SOFC türü sistemler ise 10 saat gibi uzun bir sürede devreye girer. PEMFC’de güç yoğunluğu SOFC’de akım yoğunluğu fazladır. Akım yoğunluğu artışı elektriksel verimi düşürmektedir. Giriş hidrojen basıncı verimi değiştirmemektedir. Çalışma sıcaklığı arttıkça elektriksel verim yükselmekte termal verim düşmektedir (Arsalis, 2019). Bu yüzden evsel kojenerasyon uygulamaları tasarlanırken değişken kullanım koşullarının da dikkate alınması şiddetle tavsiye edilir (Dorer vd., 2005). Yakıt hücresinin 1 saatlik çalışma modelleri, ani yük değişimlerini yakalayamamakta ve pratikte gerçek verimin ve talebe göre cevabın anlaşılmasını engellemektedir. Adam vd., (2018), 5 dakikalık periyotlar halinde çalışma modeli uygulanabilirse, ani yük değişimlerinde daha stabil bir çalışma performansı elde edilebilir sonucuna ulaşmışlardır.

**Tablo 1.** Mikro-CHP sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri (Energy Matters, 2014)

	Stirling	İçten Yanmalı	PEMFC	SOFC
Perakende Fiyatın Şimdiki Değeri (€/kW)	10000	15000	15000	17000
Perakende Fiyatın Gelecek Değeri (€/kW)			3000	



**Şekil 5.** Yakıt hücresi CHP sistemlerinin elektrik ve termal verimleri

Evsel kullanıma uygun şekilde dizayn edilen bir Micro-CHP sistemi İngiltere koşullarında yılda yaklaşık 10276,5 £ tasarruf sağlayabilir (Dodds vd., 2015), %56 ya kadar daha az salınma sebep olur (Elmer vd., 2015). Yakıt hücresinin doğal gaz kombisi ile yarışabilmesi için maliyetinin kW başına 3500-6000 £ olması gerekir, bu da ancak devlet teşviki ile sağlanabilir (Adam vd., 2018). Evsel kullanım için (Energy Matters, 2014) tarafından tarif edilen farklı tip Micro-CHP sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri 2014 yılı fiyatlarıyla Tablo 1’de verilmektedir. Kojenerasyon sistemlerinin verim değerleri ise Şekil 5’te verilmektedir. Tablo 1 ve Şekil 1 birlikte değerlendirildiğinde teorik olarak en yüksek verimi sağlayan ve en uygun fiyatlı olan Stirling motorunun en uygun seçenek olduğu görülmektedir.

Yalova ile benzer bir iklim bölgesinde, kış mevsiminde, ortalama 3+1 bir evin enerji ihtiyacını karşılamak için yaklaşık aylık 200 m<sup>3</sup> ≈ 2100 kWh doğalgaz ve genel kullanım için 300 kWh elektrik tüketilir. Evsel kullanım için tavsiye edilen nominal güç 8,5 kWhe (Ashari vd., 2012), ve elektrik / termal enerji oranının yaklaşık 1/7 civarındadır (Valenti vd., 2014a). Ortalama tüketim göz önüne alındığında Tablo 1’e göre hangi sistem seçilirse seçilsin, mikro-CHP sistemi, kombi vb. bir ısıtma sistemiyle desteklenmediği takdirde ısınma ihtiyacını karşılayamamaktadır. Bu durumda sistem ihtiyaçlarının önceden doğru belirlenmesinin önemi ön plana çıkmaktadır.

### 3.3. Karbon Salınımı

Enerji üretim sistemlerinde karbon salınım yoğunluğu, yakıt hücresi için 8-20 g CO<sub>2</sub>/kW h, solar PV için 40-80 g CO<sub>2</sub>/ kW h, nükleer fizyon için 10-30 g CO<sub>2</sub>/kW h’dur (Dodds vd., 2015). Mikro-CHP sistemlerinde, termal enerji depolanmasıyla, termal talebin düşük olduğu durumda enerji üretiminde CO<sub>2</sub> salınımının %11,3 oranında azaldığı gözlenmiştir (Adam vd., 2013). SOFC yakıt hücresi yakıt tüketimini düşürmek ve ısı-güç oranını düzenlemek için hidrojen ve doğal gaz karışımı kullanılması tavsiye edilmektedir (Lamas vd., 2013).

#### 4. TARTIŞMA

Mikro-CHP sistemlerinin seçiminde ve uygulamasında yük profili (ısı-güç oranı), hava koşulları, tüketici davranışı, konut tipi, kaynak mevcudiyeti, yakıt fiyatları, altyapı gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Evsel veya endüstriyel kullanım için, tercih edilme durumuna etki edebilecek bazı önemli parametreler Tablo 2’de sunulmaktadır. Tek konut için yapılacak mikro-kojenerasyon yatırımı için, ilk yatırım maliyetleri ve kullanım kolaylığı açısından değerlendirildiğinde, motor bazlı sistemlerin daha cazip olduğu görülmektedir.

İçten yanmalı motorlar, mekanik olarak yapımı ve bakım onarımı en kolay ve ucuz olan sistemlerdir. İçten yanmalı motorlarda elektrik verim %35, termal verim %65, toplam verim %90 civarındadır (Capaldi, 2014). Bu yüzden evsel kullanımlar için daha cazip olmaktadır. Diğer bir deyişle, tek veya az sayıda konut için bu tür sistemler tavsiye edilmektedir. Dıştan yanmalı motorlarda verimi, giriş suyu sıcaklığının yüksekliği ve sistemin start-stop sayısı düşürdüğünden, bu tür sistemlerin sürekli çalışabileceği endüstriyel uygulamalar için kullanılması tavsiye edilmektedir. Bununla birlikte mikro-CHP endüstriyel işletmeler açısından küçük boyut, gürültü ve titreşim azlığı avantajlarına, düşük elektrik verimi dezavantajına sahiptir.

Yakıt hücreli mikro-kojenerasyon sisteminde diğer sistemlerdeki mekanik donanım ve yanma işlemi bulunmamaktadır. Primer enerji tüketimi ve CO2 salınımı yakıt hücresi kullanımıyla düşmektedir. İlk yatırım maliyeti yüksek olduğundan, faydalanacak hane sayısı arttıkça maliyet azalmakta, kazanç artmaktadır (Arsalis, 2019). Bu yüzden, mümkün olduğu kadar hane sayısının fazla olduğu site vb. uygulamalar için tavsiye edilmelidir.

Yakıt hücreli mikro-CHP sisteminde hedefe göre elektrik üretimi, ısı üretimi veya birlikte çalışma kullanılmalıdır. Elektrik üretim uygulamasında maliyet yüksektir, şebekeye elektrik alışverişi azalır ancak ısı ihtiyacı için yardımcı ısıtma, ısı depolama gereklidir. Isı üretim uygulamasında elektrik şebekesine bağımlılık vardır ancak maliyet daha düşüktür (Arsalis, 2019). Yakıt hücresinin tipine göre evsel veya sanayi tipi uygulamaları mevcuttur.

**Tablo 2.** Mikro-kojenerasyon uygulamaları

	<b>Motor bazlı</b>	<b>Türbin bazlı</b>	<b>Yakıt pili bazlı</b>
<b>Düşük emisyon</b>	x	x	x
<b>Yenilenebilir enerji</b>		x	x
<b>Elektrik talebi</b>	x	x	x
<b>Geri dönüşüm</b>	x	x	x
<b>Su tüketimi</b>	x	x	x
<b>Elektriksel verim</b>	%28-42	%25-30	%35-60
<b>Gürültü</b>	x	x	-
<b>Sağlamlık</b>	x	x	x
<b>İlk yatırım maliyet</b>	normal	yüksek	yüksek
<b>Esneklik</b>	-	-	x
<b>Yenilik</b>			x
<b>Primer enerji tasarrufu</b>	x	x	x

#### 5. SONUÇLAR

Gerek dağıtık sistemlerle enerjinin kullanılacağı yerde üretilerek iletim kayıplarının azaltılması, gerekse enerji üretiminde yüksek verim elde ederek sera gazı salınımlarının minimuma indirilmesi için mikro-kojenerasyon sistemlerinin ülkemizde de yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu konudaki araştırmaların ülkemizde de sıklaşması ve artırılması tavsiye edilmektedir. Bu derleme çalışmasında elde edilen sonuçlar;

- Avrupa’da evsel mikro-CHP sistemlerinin yaygınlaşması için 3000 € hedef konulmaktadır.
- Bu sistemlerin ülkemizde de yaygın şekilde kullanılabilmesi için fiyatının Avrupa için hedeflenen rakamın altında olması ve kombiye alternatif olabilmesi, üretiminin ülkemizde yapılması tavsiye edilmektedir.
- Üretimin ve teknolojinin ülkemizde üretilmesi için mikro-CHP sistemleriyle ilgili çalışmaların artması gerekmektedir.



## KISALTMALAR

Micro-CHP: Mikro Combined Heat and Power

ORC : Organic Rankine Cycle

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell

SOFC : Solid Oxide Fuel Cell

MCFC : Molten Carbon Fuel Cell

PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell

PES : Primer Energy Saving

HTPEM: High Temp Polymer Electrolid Membrane

## KAYNAKLAR

Adam A., Fraga E. S., Brett D. J. L. (2013). Modelling and optimisation in terms of CO<sub>2</sub> emissions of a solid oxide fuel cell based micro-CHP system in a four bedroom house in London. *Energy Procedia*, 42, 201–209.

Adam A., Fraga E. S., Brett D. J. L. (2018). A modelling study for the integration of a PEMFC micro-CHP in domestic building services design. *Applied Energy*, 225(March), 85–97.

Angrisani G., Marrasso E., Roselli C., Sasso M. (2014). A review on microcogeneration national testing procedures. *Energy Procedia*, 45, 1372–1381.

Arsalis A. (2019). A comprehensive review of fuel cell-based micro-combined-heat-and-power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105(February), 391–414.

Ashari G. R., Ehyaei M. A., Mozafari A., Atabi F., Hajidavalloo E., Shalhaf S. (2012). Exergy, economic, and environmental analysis of a PEM fuel cell power system to meet electrical and thermal energy needs of residential buildings. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 9(5), 1–11.

Barelli L., Bidini G., Gallorini F., Ottaviano A. (2011). An energetic-exergetic analysis of a residential CHP system based on PEM fuel cell. *Applied Energy*, 88(12), 4334–4342.

Cao Y., Li Y., Zhang G., Jermstiparsert K., Nasser, M. (2020). An efficient terminal voltage control for PEMFC based on an improved version of whale optimization algorithm. *Energy Reports*, 6, 530–542.

Capaldi P. (2014). A high efficiency 10 kWe microcogenerator based on an Atkinson cycle internal combustion engine. *Applied Thermal Engineering*, 71(2), 913–920.

Capaldi P. (2016). A high efficiency 20 kWe microcogeneration unit based on a turbocharged automotive gas engine. *Applied Thermal Engineering*, 109, 803–808.

Cozzolino R., Cicconardi S. P., Galloni E., Minutillo M., Perna A. (2011). Theoretical and experimental investigations on thermal management of a PEMFC stack. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 8030–8037.

Devrim Y., Yapıcı E. Ö. (2018). Yüksek Sıcaklık Proton Değişim Membran Yakıt Hücresi Mikro-Kojenerasyon Uygulamasının Deneysel Ve Teorik İncelenmesi. *J. of Thermal Science and Technology*, 38(1), 73–82.

Di Marcoberardino G., Chiarabaglio L., Manzolini G., Campanari S. (2019). A Techno-economic comparison of micro-cogeneration systems based on polymer electrolyte membrane fuel cell for residential applications. *Applied Energy*, 239(March 2018), 692–705.

Dodds P. E., Staffell I., Hawkes A. D., Li F., Grünewald P., McDowall W., Ekins P. (2015). Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(5), 2065–2083.

Dorer V., Weber R., Weber A. (2005). Performance assessment of fuel cell micro-cogeneration systems for residential buildings. *Energy and Buildings*, 37(11 SPEC. ISS.), 1132–1146.

Enerji Verimliliği Kanunu, Resmin Gazete. Kanun No:5627 (2007).

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*, 90, 1082–1089.

Gokcek M. (2017). Waste To Energy : Exploitation of Landfill Gas in. *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 6(2), 710–716.

Jannelli E., Minutillo M., Perna A. (2013). Analyzing microcogeneration systems based on LT-PEMFC and HT-PEMFC by energy balances. *Applied Energy*, 108, 82–91.

- Klonowicz P., Witanowski Ł., Jędrzejewski Ł., Suchocki T., Lampart P. (2017). A turbine based domestic micro ORC system. *Energy Procedia*, 129, 923–930.
- Kupecki J., Skrzypkiewicz M., Wierzbicki M., Stepien M. (2015). Analysis of a Micro-CHP Unit with in-series SOFC Stacks Fed by Biogas. *Energy Procedia*, 75, 2021–2026.
- Kupecki J., Bdyda K. (2013). Mathematical model of a plate fin heat exchanger operating under solid oxide fuel cell working conditions. *Archives of thermodynamics*, 34(4), 3–21.
- Lamas J., Shimizu H., Matsumura E., Senda J. (2013). Fuel consumption analysis of a residential cogeneration system using a solid oxide fuel cell with regulation of heat to power ratio. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(36), 16338–16343.
- Mehrpooya M., Khodayari R., Moosavian S. A., Dadak A. (2020). Optimal design of molten carbonate fuel cell combined cycle power plant and thermophotovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 221, 113177.
- Micro-CHP potential analysis European level report Partner Name: Energy Matters (Sayı December). (2014).
- Napoli R., Gandiglio M., Lanzini A., Santarelli M. (2015). Techno-economic analysis of PEMFC and SOFC micro-CHP fuel cell systems for the residential sector. *Energy and Buildings*, 103, 131–146.
- Nuroğlu F. M. (2011). Dağıtılmış Üretim İçeren Dağıtım Şebekelerinde Merkezi Koordinasyon Rölisi Tasarımı. Kocaeli Üniversitesi.
- Özenir A. (2019). Kojenerasyon enerji verimliliği. V. Enerji Verimliliği Günleri, 1–14.
- Pareta M., Choudhury S. R., Somaiah B., Rangarajan J., Matre N., Palande J. (2011). Methanol reformer integrated phosphoric acid fuel cell (PAFC) based compact plant for field deployment. *International journal of hydrogen energy*, 36(22), 14771-14778.
- Romdhane J., Louahia H., Marion M. (2018). Dynamic modeling of an eco-neighborhood integrated micro-CHP based on PEMFC: Performance and economic analyses. *Energy and Buildings*, 166, 93–108.
- Sorace M., Gandiglio M., Santarelli M. (2017). Modeling and techno-economic analysis of the integration of a FC-based micro-CHP system for residential application with a heat pump. *Energy*, 120(2016), 262–275.
- Sungur B., Özdoğan M., Topaloğlu B., Namlı L. (2017). Küresel Enerji Tüketimi Bağlamında Mikro Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi Technical and Economical Evaluation of Micro-Cogeneration Systems in the Context of Global Energy Consumption. *Mühendis ve Makina*, 58(686), 1–20.
- Taccani R., Chinese T., Zuliani N. (2017). Performance analysis of a micro CHP system based on high temperature PEM fuel cells subjected to degradation. *Energy Procedia*, 126, 421–428.
- Unver U., Kilic M. (2007). Second law based thermoeconomic analysis of combined cycle power plants considering the effects of environmental temperature and load variations. *International Journal of Energy Research*, 31(2), 148–157.
- Ünver Ü., Kılıç M. (2005). Çevre Sıcaklığının Bir Kombine Çevrim Güç Santralinin Performansına Etkisi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık F., 49–58.
- Unver U, Kelesoglu A. Kilic M. (2018). A Novel Method For Prediction Of Gas Turbine Power Production Degree-Day Method. *Thermal Science*, 22(Suppl. 3), 809–817.
- Unver U., Kilic M. (2014). Performance estimation of gas turbine system via degree-day method. İçinde I. Dincer, A. Midilli, & H. Kucuk (Ed.), *Progress in Exergy, Energy, and the Environment*. Springer Cham.
- Unver U., Kilic M. (2017). Influence of environmental temperature on exergetic parameters of a combined cycle power plant. *International Journal of Exergy*, 22(1), 73–88.
- Unver U., Mert M. S., Direk M., Yuksel F., Kilic M. (2018). Design of an Inlet Air-Cooling System for a Gas Turbine Power Plant. İçinde F. Aloui & I. Dincer (Ed.), *Exergy for A Better Environment and Improved Sustainability 1* (ss. 1089–1100). Springer, Cham.

Valenti G., Campanari S., Silva P., Fergnani N., Ravidà A., Di Marcoberardino G., Macchi E. (2014). Modeling and testing of a micro-cogeneration Stirling engine under diverse conditions of the working fluid. *Energy Procedia*, 61, 484–487.

Valenti Gianluca, Silva P., Fergnani N., Di Marcoberardino G., Campanari S., Macchi E. (2014). Experimental and numerical study of a micro-cogeneration Stirling engine for residential applications. *Energy Procedia*, 45, 1235–1244.

Vijay A., Hawkes A. (2018). Impact of dynamic aspects on economics of fuel cell based micro cogeneration in low carbon futures. *Energy*, 155, 874–886.

Windeknecht M., Tzscheutschler P. (2015). Optimization of the heat output of high temperature fuel cell micro-CHP in single family homes. *Energy Procedia*, 78, 2160–2165.

Wit J. de, Näslund M. (2011). Mini and Micro Cogeneration. İçinde Danish Gas Technology Centre, ICCI.