



Derleme / Review

Enerji Verimli Binalar İçin Yakıt Pili Kojenerasyon Sistemlerinin İncelenmesi

Mesut YILMAZOĞLU^{1a*}, Aybüke TİMOÇİN^{2b}, Ayşe ŞENLİK^{2c}, Kübra AL^{2d}, Ümit ÜNVER^{3e}

¹ Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 77200 Yalova/TÜRKİYE

² Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 77200 Yalova/TÜRKİYE

³ Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü 77200, Yalova/TÜRKİYE

mesut.yilmazoglu@yalova.edu.tr

Received/Geliş: 05.02.2021

Accepted/Kabul: 17.03.2021

Öz: Ülkemizde en yoğun enerji tüketimi, sanayi uygulamalarından sonra binalarda meydana gelmektedir. Binalarda enerji, günlük elektronik ev aletlerinin çalıştırılması ve ısınma ihtiyacının giderilmesi gibi birincil ihtiyaçlar için tüketilmektedir. Binalarda kullanılan enerjiden tasarruf potansiyeli, toplam tüketimin % 15'i civarındadır. Kojenerasyon sistemleri, elektrik ve ısı enerjisini eşzamanlı üretebildiklerinden binalar için yüksek enerji verimliliğine sahip, cazip bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu makalede, binalara yönelik kojenerasyon sistemleriyle ilgili detaylı bir literatür taraması yapılmış, binalar için kojenerasyon tipleri tanımlanmış ve farklı yakıt pili türlerinin binalarda kojenerasyon uygulamaları incelenmiştir. Yakıt pili sistemlerinin gürültü ve titreşim probleminin olmaması, çok az yer kaplaması ve binalarda kolayca uygulanabilir olması nedeniyle sıklıkla tercih edildiği belirlenmiştir. Çalışmada binalarda yakıt pili kojenerasyon teknolojilerinin kullanılmasıyla yüksek enerji verimi sağlandığı ve kojenerasyon sistemleri sayesinde CO₂, NO_x, CO ve kirlilik kaynağı komponent emisyonlarının önemli ölçüde azaltıldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji verimliliği, Binalarda enerji verimliliği, Sıfır enerjili bina, Kojenerasyon, Yakıt pili.

Investigation of Fuel-Cell Cogeneration Systems for Energy Efficient Buildings

Abstract: In our country, the most intense energy consumption occurs in buildings after industrial applications. Energy in buildings is consumed for primary needs such as operating daily electronic household appliances and meeting the need for heating. The energy saving potential used in buildings is around 15% of the total consumption. Cogeneration systems stand out as an attractive alternative with high energy efficiency for buildings, as they can generate electricity and heat energy simultaneously. In this paper, a detailed literature review on cogeneration systems for buildings was made, cogeneration types for buildings were introduced, and cogeneration applications of different fuel cell types in buildings were examined. It has been determined that fuel cell systems are frequently preferred because they do not have noise and vibration problems, take up little space and can be easily applied in buildings. In the study, it was determined that high energy efficiency was achieved with the use of fuel cell cogeneration technologies in buildings, and CO₂, NO_x, CO and pollution source component emissions were significantly reduced by cogeneration systems.

Keywords: Energy efficiency, Energy efficiency in buildings, Net zero energy buildings, Cogeneration, Fuel cell.

1. Giriş

Geçen yüzyılın sonuna kadar bütün ülkeler enerjinin temini, üretimi ve tüketimi dahil ekolojik dengenin korunmasına yönelik yatırımdan uzak politikalar benimsemişlerdir [1]. Enerji temininde

Bu makaleye atıf yapmak için

Yılmazoğlu M., Timoçin A., Şenlik A., Al K., Ünver Ü., "Enerji Verimli Binalar İçin Yakıt Pili Kojenerasyon Sistemlerinin İncelenmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8 (2); 766-781.

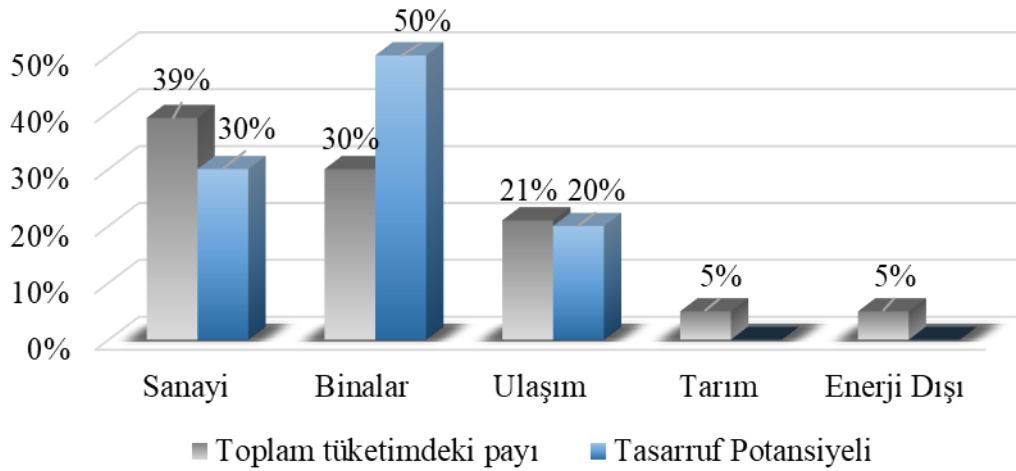
How to cite this article

Yılmazoğlu M., Timoçin A., Şenlik A., Al K., Ünver Ü., "Investigation of Fuel-Cell Cogeneration Systems for Energy Efficient Buildings" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8 (2); 766-781.

ORCID ID: *0000-0001-9556-341X; *0000-0001-5201-5245; *0000-0002-6968-6181

geleneksel fosil yakıtların yaygın olarak kullanılması, hava kirliliği ve küresel ısınma gibi ciddi problemlere yol açmış, bu olumsuz tablo da daha temiz ve daha verimli enerji kaynaklarına yönelimi kaçınılmaz kılmıştır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi arttırmak ve mevcut enerji kaynaklarını en verimli şekilde kullanmak hem politik hem akademik tüm çevreler tarafından önem arz eden bir konu haline gelmiştir [2, 3].

Şekil 1’de Türkiye’de enerjinin sektörlere göre tüketim payları ve tasarruf potansiyelleri sunulmaktadır. Toplam enerji tüketim payı dağılımına bakıldığında, enerji tüketimi, endüstriyel tesisler, binalar, ulaşım sektörü, tarım uygulamaları ve enerji dışı uygulamalar olmak üzere beş temel alanda değerlendirilmektedir. Türkiye’de enerjinin sektörlere göre toplam tüketim payı dağılımına bakıldığında ilk sırayı endüstriyel tesisler yani sanayi uygulamaları almakta ve sanayide kullanılan enerjinin toplam tüketim payının %30’u kadar tasarruf sağlanabilmektedir (Şekil 1) [4, 5]. Bu durumda endüstriyel uygulamalarda enerji tasarruf potansiyeli %11,7 olarak hesaplanmaktadır. Sanayiden sonra en yoğun enerji tüketimi binalarda görülmekte, binalarda kullanılan enerjinin de toplam tüketimdeki payından %50’ye varan tasarruf sağlanabilmektedir [6]. Binalardaki tasarruf potansiyel miktarı ise %15 olarak hesaplanmıştır. Binalarda uygulanabilecek enerji tasarruf miktarının diğer sektörlere göre daha fazla olduğu Şekil 1’de görülmektedir. Tüm bu bilgiler dikkate alındığında, enerji tüketiminde büyük paya sahip binalarda enerji tasarruf potansiyeli de oldukça yüksektir [7, 8].



Şekil 1. Türkiye’de enerjinin sektörlere göre toplam tüketimdeki payı ve tasarruf potansiyeli

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de toplam tüketilen enerjinin önemli kısmı binalarda konfor sağlamak amacıyla ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma alanlarında kullanılmaktadır [9, 10]. Binalarda harcanan veya harcanabileceği ön görülen ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma gibi hizmetlerin m² veya kişi başına kWh birimi enerji miktarı, binaların enerji performansı olarak nitelendirilmektedir [11]. Binalarda kullanılan enerjinin yaklaşık % 65’i ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde harcanmaktadır [12]. Özyurt ve Karabalık (2009), Türkiye’de 2009 yılında toplam bina sayısının 8,5 milyon civarında olduğunu, bu binaların % 86’sının mesken olarak kullanıldığını ve bu değerler dikkate alınarak konutlarda ~7 milyar dolar enerji tasarrufu yapılabileceğini ifade etmişlerdir [4]. 2018 yılına kadar geçen süreçte bina sayısı 18 milyona ulaşmış, enerji tasarruf potansiyeli de paralel olarak artmıştır [13].

Enerji tüketiminin, sanayi işletmelerinde üretim niteliğini ve miktarını, binalarda ise hizmet kalitesini düşürmeden asgari seviyeye indirilmesine enerji verimliliği denir [14]. Enerji verimliliği konusunda bina sektörü için önerilen çözümlerden birisi, “net sıfır enerjili bina” yaklaşımıdır. Net sıfır enerji şartını sağlamak için kullanılan en uygun sistemler ise ısı pompaları [15] ve

kojenerasyon sistemleridir. Kojenerasyon sistemlerinin tercih edilmesinin başlıca nedenleri [16, 17, 18];

- i. Enerji tasarrufunun sağlanması,
- ii. Elektrik enerjisi ve kullanılabilir ısının aynı tesiste birlikte üretilebiliyor olması,
- iii. Enerji üretiminin, tüketimin olduğu yerde yapılmasıyla şebeke kayıplarının azaltılması,
- iv. Kirletici gaz salınımlarının minimize edilmesi ve
- v. Enerji arz güvenliğine katkı sağlanmasıdır.

Binalarda uygulanan kojenerasyon sistemleri arasında mikro türbinler, motorlar ve yakıt pili teknolojileri bulunmakta ve bu uygulamaların enerji verimliliğini ciddi oranda arttırdığı belirtilmektedir [19, 20, 21].

Yakıt pilleri üzerine yapılan ilk çalışmalar, 1838 yılında Sir William Grove tarafından gerçekleştirilmiş ve ilk yakıt pili prototipi 'H₂-O₂ pili' olarak adlandırılmıştır. 1939 yılında Thomas Bacon tarafından yapılan gözenekli metal elektrotlu alkali yakıt pili araştırmalarının düşük maliyetli sistemler ortaya çıkarması, yakıt pillerinin günümüzde birçok uygulama alanında yaygın olarak tercih edilmelerinin ve verimli, düşük maliyetli yakıt pili sistemlerinin geliştirilmesi konusunda giderek artan araştırma faaliyetlerinin sebebi olarak görülmektedir [22, 23]. Genel olarak kullanılan beş tür yakıt pili teknolojisi;

1. Proton değişim membranlı yakıt pilleri (PDMYP),
2. Alkali yakıt pilleri (AYP),
3. Fosforik asit yakıt pilleri (FAYP),
4. Katı oksitli yakıt pilleri (KOYP),
5. Erimiş karbonat yakıt pilleridir (EKYP) [24].

Bu çalışmada sunulan yakıt pili teknolojilerine ait temel parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere verimliliği en yüksek olan Proton Değişim Membranlı Yakıt Pilleri (PDMYP) ve Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP) olurken en az verimliliğe sahip hücre türü Katı Oksitli Yakıt Pili (KOYP)'dir. PDMYP'nin düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi, doğal gaz yakıtını yaygın olarak kullanması, enerji verimliliği ve güç yoğunluğunun yüksek olması bu tür yakıt pillerinin tercih edilmesini bir adım öne çıkarmaktadır. PDMYP'lerde güç yoğunluğu daha yüksek olmasına rağmen ticari olarak FAYP'lere oranla daha az kullanılmaktadır. Bunun nedeni PDMYP'lerde kullanılan özel membran maliyetinin yüksek olmasıdır [25]. FAYP'nin diğer yöntemlere göre daha yüksek verimde olmasının temel nedeni kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünde katı elektrolit yerine kullanılan sıvı fosforik asitin sergilediği yüksek iletim performansdır [26].

Yakıt pilleri, kirletici madde yaymadan büyük ölçekte elektrik üretebilen sistemlerdir. Mevcut enerji senaryosunda, enerji temini ve kullanımında en önemli iki özellik yüksek verimlilik ve ekolojik uyumdur. Yakıt pilleri, kirletici atık içermeyen, yüksek verime sahip sistemler olarak bu iki gereksinimi de karşılar. Onları çeşitli kullanımlara uygun kılan özelliklere sahip farklı tipte yakıt hücreleri vardır. Özellikleri ve sistem parametreleri Tablo 1'de karşılaştırılan temel yakıt pili sistemleri, uygulamada ısı ve güç döngüleri ile ilişkilendirilerek daha da geliştirilmiştir. Yüksek çalışma sıcaklığına sahip hücreler, sistemi daha verimli hale getirmek için egzoz sıcak suyunu kullanan kojenerasyonlu çevrimlerde kullanılmaktadır. Kojenerasyon, ılık su gerektiren proseslerde hücreden yan ürün olarak çıkan su kullanılarak gerçekleştirilir. Bunun yanı sıra sistemler, mikro gaz türbinleri ile de kombine kullanılabilir.

Bu çalışmada, genel olarak kojenerasyon sistemleri hakkında bilgi verilmiş, binalarda uygulanan kojenerasyon sistemleri detaylı olarak incelenmiş ve yakıt pili ile entegre kojenerasyon sistemlerinin enerji verimliliğine katkısı araştırılmıştır. Bu çalışma, farklı yakıt pili türleri ile entegre kojenerasyon sistemlerinin konut/mesken/bina uygulamalarına yer veren ayrıntılı bir literatür taraması içermektedir. Çalışmanın temel amacı, binalarda kullanılmak üzere, geleneksel fosil yakıtların kullanımını azaltan, daha çevreci, ekosisteme minimum zararla enerji üreten sistemlerin tanıtılması ile sıfır enerjili binalar konsepti kapsamında binalarda enerji verimliliği konusunda literatüre katkı sunmaktır.

Tablo 1. Yakıt pili türlerinin özelliklerinin sınıflandırılması.

Parametreler	Proton Değişim Membranlı Yakıt Pilleri	Katı Oksitli Yakıt Pili	Fosforik Asit Yakıt Pilleri	Alkali Yakıt Pilleri	Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri	Referanslar
Verim (%)	80	40-65	90	70	50-60	[27]
Güç Yoğunluğu (W/kg)	350-1500	15-20	120-180	35-105	30-40	[28]
Sıcaklık (°C)	20-100	1000	150-200	65-220	600-1000	[29, 30]
Yakıt	Doğal gaz, hidrojen, işlenmiş metanol	Hidrojen, karbon monoksit	Doğal gaz, işlenmiş metanol	Saf hidrojen	Doğal gaz, kömür gazı ve saf olmayan gazlar	[31]
Katalizör	Platin	Perovskit	Platin	Platin	Nikel	[32]
Kullanım Alanı	Konutlar veya Siteler	Konutlar, Siteler, Ticari Binalar, Güç Santralleri	Ticari binalar ve Güç Santralleri	Siteler	Ticari binalar ve Güç Santralleri	[31]

2. Kojenerasyon Sistemleri

Kömür, petrol, doğal gaz veya sıvılaştırılmış gaz, biyokütle ve güneş gibi tek bir enerji akışından, elektrik ve termal enerjiyi birlikte üretmek için kullanılan sistemlere kojenerasyon sistemleri denir [33]. Üst çevrimde elektrik elde edildikten sonra atık ısının tekrar elektrik üretmek için kullanılması veya ısı olarak kullanılmasına imkân sağlayan sistemler kombine ısı ve güç (Combined Heat Power, CHP) sistemleri olarak adlandırılır [34]. Uygulamada iki farklı enerji formunun ayrı ayrı üretilmesi maliyet ve performans açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Sadece elektrik üreten bir motor veya gaz türbini kullanıldığı takdirde sistem verimi % 30-40 arasındayken, kojenerasyon sistemleri kullanıldığında verim % 75-90'a yükselmektedir [35]. Yüksek verime sahip olan kojenerasyon sistemleri, büyüklüklerine bağlı olarak, 1,5-3 yıl gibi kısa bir zaman diliminde ilk yatırım maliyetini karşılamaktadır [36].

Kojenerasyon sistemleri güç aralıkları dikkate alınarak sınıflandırıldığında, 1-5 kW arası mini, 5-50 kW arası mikro, 50 kW- 1 MW güç aralığında olan sistemler ise küçük ölçekli olarak adlandırılmaktadır [37, 38]. Genel kullanım alanları konut, ticari/endüstriyel ve bölgesel olarak ayrılmaktadır. Konutlardaki uygulamalar; büyük siteler, hastaneler, oteller, alışveriş merkezleri, okullar ve üniversitelerdir [36]. Konut, alışveriş merkezi, hastane gibi kamu ve hizmet binalarında tüketilen enerjinin ülkemizde toplam enerji tüketimindeki payı oldukça yüksektir [39]. Ticari ve

endüstriyel uygulamalarda genel olarak büyük ölçekli kojenerasyon sistemleri kullanılmaktadır. Enerji piyasasındaki gelişmeler ile rekabetin artması küçük ölçekli kombine ısı güç sistemlerine talebi artırmaktadır [40]. Bu nedenle binalardaki enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması önem arz etmektedir [39].

Buker ve Kaplan (2019) yaptıkları çalışmada, 137 daireli çok katlı konut binasında uygulanan mikro kojenerasyon sisteminde % 87 çevrim verimi elde etmiş, daire başına aylık 22,10 \$ ortalama ekonomik getiri elde edilebileceğini belirtmişlerdir [41]. Mahlia ve Chan (2010) yakıt pili ile birincil enerji kullanımının % 35 e kadar azaltılabileceğini bildirmişlerdir [42]. Marcoberardino ve ark. (2019) PDMYP kojenerasyon sisteminin kullanımında en iyi elektrik ve termal verimin sırasıyla % 42,9 ve % 60,9 olduğunu ve toplam verimin % 85-88 arasında olduğunu raporlamışlardır [43]. Baniyadi ve Alemrajabi (2010) 215 kW kapasiteli bir KOYP kojenerasyon sisteminin, 4600 m² alana sahip bir otelin eş zamanlı enerji üretimi ve ısı geri kazanım döngüsü için maksimum %83 verimliliğe ulaşabileceğini belirtmişlerdir [44]. Zink ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada binalarda kullanılan KOYP ısıtma ve soğutma sisteminin verimliliğini incelemişlerdir. Araştırma sonuçları, binalarda elektrik enerjisi, ısıtma ve/veya soğutma enerjisi üretimi için farklı modlardaki sistem verimliliğinin %87'nin üzerinde olabileceğini göstermektedir [45]. Colson ve arkadaşlarının (2011) yaptıkları çalışmada, 500 konutlu bir yerleşim bölgesinin elektrik ve sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla MATLAB/Simulink programı kullanarak 1 MW'lık KOYP kojenerasyon enerji santrali değerlendirilmesi yapılmıştır. Sonuçlar Amerika Birleşik Devletleri'ndeki geleneksel güç dağılımına göre karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları, üretim uygulamaları için KOYP teknolojisinin kombine ısı ve güç sistemlerine uygun olduğunu ve kirlenici salınımını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir [46]. Elmer ve ark. (2015) ise İngiltere'de yaptıkları çalışmada, KOYP mikro kombine ısı ve güç çevrimiyle, yıllık kirlenici salınımında % 56, sistem maliyetinde ise % 177'ye varan düşüşün mümkün olabileceğini belirtmişlerdir [47].

2.1. Dıştan ve İçten Yanmalı Motorlar

Kojenerasyon sistemlerinde kullanılan motorlar, içten ve dıştan yanmalı olmak üzere iki çeşittir. Kojenerasyon ve ısı pompası uygulamalarında elektrik enerjisi elde etmek için kullanılmaktadır [48]. Bu motorlar, ısıtma talebi olduğu zamanlarda elektrik enerjisi üretmek için devreye alınırken, ısıtma ihtiyacı olmadığı durumlarda elektrik enerjisini şebekeden çekmektedir. İçten yanmalı motorlar uzun süredir kullanılan teknolojilerdir ve diğer sistemlere göre bakımları kolaydır. Aynı zamanda, mikro kojenerasyon uygulamalarında kolaylıkla uygulanan ve önerilen sistemlerdir. Hidrojen, propan, biyokütle gibi alternatif kaynakların kullanımıyla ön plana çıkmaktadır [26]. Dıştan yanmalı motorların içten yanmalı motorlara göre daha basit bir yapısı ve çalışma mekanizması vardır. Ayrıca dıştan yanmalı motorlar büyük hacimde düşük güçler üreterek alçak basınçlarda da çalışabilmektedir. Dıştan yanmalı motorların en bilinen örnekleri Stirling ve buhar motorlarıdır. Stirling motorları yüksek verim, yakıt esnekliği, düşük emisyon, düşük gürültü/titreşim seviyeleri ve kısmi yükte iyi performans gibi nitelikleri sayesinde iyi bir alternatiftir [9]. Verimleri içten yanmalı motorlardan ve dizel motorlardan daha yüksektir. Bu makinalarda fosil kaynaklı yakıtlara ek olarak biyokütle ve hidrojen gazı da kullanılmaktadır. Binalarda kullanılan bu kojenerasyon sistemlerinin verimleri %75-85 arasında ve CO_2 ve NO_x emisyon değerleri düşüktür [49].

2.2. Gaz ve Buhar Türbinleri

Binalar için mikro kojenerasyon sistemlerinde buhar ve gaz türbinleri kullanılır. Türbini düşük basınçla terk eden buhar, binalarda, fabrikalarda ve santral sistemlerinde ısı ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir [26]. En yaygın elektriksel güç aralığı, 25-250 kW arasındadır [50]. Gaz türbinlerinden çıkan yanma ürünü gazların atmosfere atılması ve sıcak gazın sisteme tekrar

kazandırılmaması, çevrimin ısı verimini düşürmektedir [51]. Yakıt olarak genellikle doğalgaz tercih edilmekte ayrıca fuel oil veya motorin de kullanılmaktadır [52]. Türbinden çıkan gazların, sıcaklığı yüksek olduğundan, bu tür çevrimler yüksek sıcaklık uygulamalarında da kullanılabilir [53]. Gaz türbinlerinin buhar türbinlerine göre tercih edilme sebepleri [54, 55];

- i. kapladığı alanın daha küçük olması,
- ii. kullanılan yakıtların çeşitli olması,
- iii. bakım sürelerinin kısa olması,
- iv. düşük hava sıcaklıklarında üretim yapılabilmesi ve
- v. montajın ve devreye alma işinin kolay olmasıdır.

2.3. Yakıt Pili Uygulamaları

Yakıt pili uygulamaları da kojenerasyon türlerinden biri olup, gelişmekte olan bir pazara sahiptir. Binaların enerji ihtiyacı, elektrik ve termal yük olarak ikiye ayrılır. Bu iki talebin en verimli şekilde karşılanması yakıt pili kojenerasyonu ile mümkündür. Bu teknolojiye elektrik yükü, yanma olmadan, kullanılan enerji kaynağının ve oksitleyicilerin sahip olduğu kimyasal enerjinin elektrot-elektrolitten oluşan bir sistem aracılığıyla dönüşümünden karşılanmaktadır [31]. Termal yük ise, reaksiyonlar sonucunda açığa çıkan suyun bir ısı değiştiriciden geçirilmesiyle elde edilen ısı enerjisiyle karşılanmaktadır. Yakıt pillerinin çalışma prensibi, hidrojen ve oksijenin bir araya gelmesi sonucu ortaya çıkan enerjinin elektrik enerjisine dönüşmesi temeline dayanır. Bu durumun gerçekleşmesi ile bileşenler arasındaki kimyasal enerji, doğrudan elektrik enerjisine dönüşmüş olur [56].

Yakıt pillerinde kullanılan ana yakıt hidrojendir. Bunun yanı sıra doğalgaz, metan, hava gazı, metanol ve LPG gibi yakıtlar da kullanılabilir. Ek iletim hattı ve dağıtım şebekesine gerek olmadığından iletim ve dağıtım kayıplarını da ciddi ölçüde azaltan yakıt pilleri, verimleri yüksek olduğu için, enerji maliyetini de azaltmaktadır. Bir yakıt pili uygulaması ile CO_2 yoğunluğu %49, NO_x emisyonu %91, CO konsantrasyonu % 68 ve buharlaşabilen bileşenler %93 oranında azaltılabilmektedir [57]. Örneğin Maleki (2019) çalışmasında Japonya'da 1kW'lık yakıt hücrelerinin kullanımı ile hane başına yıllık 750-1250 kg CO_2 emisyon salınımı düşüşünün sağlanabildiğini bildirmiştir [58]. Ülkemizdeki bina yoğunluğu göz önünde bulundurulduğunda yakıt pili kojenerasyon sistemi kullanıldığı takdirde toplam kirletici gaz salınımının ciddi oranda azalacağı ön görülmektedir. Yakıt pili kojenerasyon sistemlerinin en önemli avantajları; gürültü ve titreşim probleminin olmaması, apartman, hastane ve otel gibi binalarda kolayca uygulanabilirliği, çok az yer kaplaması, verimliliklerinin oldukça yüksek olması, hareketli parça olmadığı için daha az bakım gerektirmesi, yakıt hücresinden CO_2 emisyonu yerine su geri dönüşü olması ve dolayısıyla kirlilik içermemesi ve fosil yakıtlara ihtiyaç olmadığı için ekonomik olmasıdır [56, 59].

Binalarda kullanılan en yaygın yakıt pili türleri, proton değişim membranlı yakıt pili (PDMYP) ve fosforik asit yakıt pilleridir (FAYP). Bunların yanı sıra alkali yakıt pilleri (AYP), katı oksitli yakıt pilleri (KOYP) ve erimiş karbonat yakıt pilleri (EKYP) gibi türleri de bina uygulamalarında kullanılmaktadır [30].

2.3.1. Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PDMYP)

PDMYP sistemlerinin çalışma sıcaklıkları 20 °C ile 100 °C arası değişmektedir ve 60°C-80°C aralığında kullanımı daha yoğundur. Daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında, hem nem ve su kontrolünün yitilmesi hem de proton iletken membranın termomekanik degradasyonu nedeniyle

sistemde performans kaybı gerçekleşir [60]. Membranlar suya doymuş şartlarda ve düşük sıcaklıklarda yüksek iletken özellik gösterdiklerinden farklı katalizörler kullanılması gerekir. PDMYP sistemlerinde güç üretim aralıkları 50W ile 250kW arasında değişmektedir. Evsel ve küçük ticari binalarda genellikle 10 kW'ın altındaki yakıt pili uygulamalarında kullanılırlar [61].

PDMYP, yüksek güç yoğunluğuna sahip olmakla birlikte düşük sıcaklıklarda çalışması sonucunda yüksek verim sağlamaktadır. Yaklaşık % 40'ı elektriksel verim olmak üzere %80 civarında toplam verim sağlar. Özel katalizörlerin (platin, Pt) ve ticari membran yapılarının (Nafion) kullanılmasından dolayı PDMYP maliyeti yüksektir. Elektrolit membrana sahip olan PDMYP'nin yüksek nemlilikte ve suya doymuş şartlarda proton iletkenliği artmakta ve bu durum hücre enerji verimliliğini artırmaktadır [62]. Sahip oldukları yüksek verim sayesinde, binalardaki kojenerasyon sistemlerinde ve otomobillerde tercih edilirler. Ayrıca çalışma esnasında gürültü oluşturmaması ve saf suyun dışında atık oluşturmamasından dolayı bu uygulama alanlarında tercih edilen hücrelerdir [61, 63].

Son yıllarda özellikle otomobil üreticileri, nispeten düşük çalışma sıcaklığı, yüksek güç yoğunluğu ve iyi başlangıç performansı nedeniyle, elektrikli araçların tahrik kaynağı olarak PDMYP sistemlerini kullanmaktadırlar. Bunun yanı sıra PDMYP sistemleri, sıcak kullanım suyu ısıtmasında ve/veya evin merkezi ısıtması için kullanılan elektrik üretiminden atık ısıyı geri kazanarak yakıt gazını faydalı enerjiye dönüştürmede çok verimli olduğu için konut kojenerasyon sistemleri için de umut vericidir. Hwang ve Zou (2010) özel olarak tasarlanmış bir termal kontrol sistemi ve uygun kontrol algoritmasına sahip bir mikro denetleyiciyi, bir PDMYP sistemine entegre ederek, yüksek kalitede elektrik ve sıcak su sağlayan bir PDMYP kojenerasyon sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde, termal kontrol sistemi yalnızca yakıt pili çalışma sıcaklığını kontrol etmekle kalmamış, aynı zamanda yakıt pili yığını tarafından dağıtılan ısıyı da geri kazanmıştır. Bu çalışmada sunulan yakıt pili kojenerasyon sisteminde harici yüklerin yakıt pili kojenerasyon sisteminin verimliliği üzerindeki etkileri de incelenmiş, ısı ve güç kombinasyonu ile maksimum sistem verimliliğinin % 81 gibi oldukça yüksek bir değere ulaştığı görülmüştür. Standart PDMYP sistemlerinin yanı sıra, kullanılan proton iletken membran matrislerinin yüksek sıcaklık dayanımına sahip olduğu ve yüksek sıcaklıklarda susuz ortamda dahi yüksek iletkenlik gösteren PDMYP sistemleri de kojenerasyon sistemleri için oldukça uygundur [64]. Colpan ve arkadaşları (2020), kojenerasyon uygulamalarında kullanılmak üzere, 160-200 °C arasında çalışan yüksek sıcaklık PDMYP sistemlerine dayalı doğal gaz beslemeli entegre bir enerji sistemi için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, elektrokimyasal ve termodinamik (enerji ve ekserji analizleri dahil) prensipleri kullanarak temel işletim parametrelerinin (buhar-karbon oranı, yakıt pili çalışma sıcaklığı ve anot stokiyometrik oranı) sistem performansı (elektrik, kojenerasyon ve enerji verimliliği) üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, entegre sistemin performansını etkileyen en etkili parametrenin anot stokiyometrik oranı olduğunu ve elektriksel, kojenerasyon ve enerji verimlerinin sırasıyla % 26,20, % 70,34 ve % 26,74 olduğunu göstermiştir [65]. Minutillo ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada PDMYP teknolojisine dayalı bir doğal gaz buharlı reformdan oluşan bir reform ünitesi (RFU) ve bir güç ünitesi arasındaki entegrasyona dayalı mikro kojenerasyon sistemlerinin performans analizini sunmuşlardır. Çalışma, güç ünitesi olarak üç farklı sıcaklıkta çalışan PDMYP sistemi göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Daha düşük sıcaklıkta standart hücre koşullarında (67 °C) çalışan, Nafion membranlı PDMYP sisteminin yanı sıra farklı membran matrisleriyle 160 °C ve 180 °C'de çalışan iki ayrı PDMYP yüksek sıcaklık sistemi de karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yüksek sıcaklıklarda çalışan entegre PDMYP kojenerasyon sistemlerinin yüksek elektrik verimliliği (% 40) ve kojenerasyon verimliliği (%79) ile işletildiğini göstermiştir. Sonuç olarak, tasarım kriterleri belirlenerek, maksimum 2,5 kW elektrik gücü sağlayabilen güç birimlerinin boyutlandırılması gerçekleştirilmiş ve bu ölçekte bir sistemin İtalya'da ortalama bir meskenin elektrik ve termal enerji talebini karşıladığı bildirilmiştir. Bu sonuçlara göre, PDMYP sistemlerinin standart hücre işletim şartlarına ek olarak, yüksek sıcaklık

uygulamalarında da binalarda kojenerasyon sistemleri için popüler, verimli bir alternatif olabileceği değerlendirilmektedir [66].

2.3.2. Alkali yakıt pili (AYP)

AYP, yakıt olarak hidrojen ve elektrolit olarak KOH çözeltisi kullanılan hücrelerdir [66]. Yakıt olarak sadece hidrojen kullanılmasından dolayı düşük maliyetli yakıt pilleridir [30]. Hastane, okul, havaalanları gibi büyük binalarda kullanılır [68]. Ancak günümüzde, AYP kullanımı otomotive veya bina kojenerasyon uygulamalarında diğer yakıt pili türlerine göre kısıtlıdır. AYP'nin çalışma sıcaklık aralığı 65 °C – 220 °C arasında değişmekte ve genel olarak 80 °C'de çalışmaktadır. Ayrıca bu yakıt hücreleri, elektrik üretimi yapabileceği gibi içilebilir su üretimi de yapmaktadır [69]. Yakıt pilinde kullanılmak için saf hidrojene ihtiyaç duyulması, hidrojenin tehlikeli bir gaz olması ve saf halinin elde edilmesinin zor olması bu sistemin binalarda kojenerasyon sistemlerinde diğer yakıt pillerine oranla daha az kullanılmasına neden olmaktadır [30].

Zhang ve ark. (2014) bir AYP, bir termoelektrik jeneratör ve bir rejeneratörden oluşan hibrit bir sistem öne sürmüşlerdir. Bu sistemde AYP yakıt hidrojendeki kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine ve termal enerjiye dönüştürmekte ve ardından açığa çıkan termal enerji de termoelektrik jeneratörle elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Söz konusu çalışmada, hibrit sistemin her bir elemanındaki temel tersinmez kayıplar karakterize edilmiş ve sistemin tüm elemanlarının verimliliği ve güç çıkışı için sayısal ifadeler türetilmiştir. AYP'nin çalışma akımı yoğunluğu ile termoelektrik jeneratörün boyutsuz akımı arasındaki temel ilişki elde edilmiş ve buradan termoelektrik jeneratörün işlevini uyguladığı AYP'nin optimum çalışma akımı yoğunluğu bölgesi belirlenmiştir. Böyle bir hibrit sistem kullanılarak, AYP'nin eşdeğer maksimum güç yoğunluğu % 23'e kadar artırılmıştır. İşletim akımı yoğunluğu, çalışma sıcaklığı, ısı iletkenliği ve entegre parametrenin hibrit sistemin performansı üzerindeki etkileri ortaya çıkarılmıştır [70].

2.3.3. Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)

FAYP, elektrolit sıvı olarak %100 fosforik asit kullanan hücrelerdir. Bu hücrelerde fosforik asit, elektrotların arasında gözenekli bir yapının içinde bulunur [71]. Kimyasal ve elektrokimyasal kararlılıkları yüksektir [72]. Çalışma sıcaklıkları genel olarak 150°C ile 200°C arası değişmektedir. Daha düşük sıcaklıklarda asit iletkenliği azalır. FAYP, ekzotermik reaksiyon sonucu oluşan ısı ile birçok uygulamada kullanılmaktadır. Toplam ısıl kapasiteleri de ortalama 500 kW'tır. Bu hücrelerin elektriksel verimleri % 40 civarında iken toplam verimleri % 90'lardadır [27]. Suyun basıncını düşürmesi ve kontrol kolaylığı sağlaması, yakıt olarak doğalgaz kullanılması evsel ve ticari binalarda tercih edilme sebeplerindedir [23]. Günümüzde Amerika, Almanya ve Japonya gibi ülkelerde hastane ve otellerde fosforik asit yakıt pili uygulamaları görülmektedir [27].

Elektrik üretimine ek olarak, FAYP önemli miktarda atık ısı üretir. Zhang ve ark. (2018) üretilen atık ısıyı geri kazanmak için, temel olarak bir FAYP, bir termoelektrik jeneratör ve bir termoelektrik soğutucudan oluşan hibrit bir sistem önermişlerdir. Çalışmada sistem içindeki termodinamik ve elektrokimyasal tersinmez kayıplar dikkate alınarak, termoelektrik elemanın boyutsuz elektrik akımı ile FAYP'nin akım yoğunluğu arasında analitik bir ilişki elde edilmiş, hibrit sistemin güç yoğunluğu ve verimliliği için analitik formüller türetilmiştir. Çalışılan sistem için performans parametrelerini değerlendiren özellikler ve optimum kriterler ortaya çıkarıldığında, hibrit sistemin güç yoğunluğunun ve verimliliğinin bağımsız bir FAYP'den sırasıyla %2,3 ve %2,8 daha fazla olduğu görülmüştür. Mevcut hibrit sistemin uygulanabilir ve etkili olduğu bulunmuştur. FAYP sistemleri, yüksek egzoz sıcaklığına sahip gazlar üretmez, ancak çalışırken üretilen sıcak su, bir kojenerasyon sisteminde veya banyo için ekipman sterilizasyonu ve ısıtma suyu için

kullanılabilir [73]. Castilho, (2004) Brezilya'da bir hastanede elektrik enerjisi üretmek için FAYP sistemi kullanıldığını, üretilen yaklaşık 15000 litre suyun, bu döngünün verimliliğini artıran ve sıcak su gerektiren tüm süreçlerde ve yerlerde kullanıldığını bildirmiştir [74]. FAYP sistemine dayalı kojenerasyon uygulamalarının güncel kullanımda en verimli örneği, konutların ısıtılması için ısı ve elektrik enerjisine ek olarak sıcak su sağlayan, bir konut binasına kurulan Octagon Projesi örneğidir. Bu projede kullanılan hücre, 400 kW güç üreten Pure Cell 400'dür. Söz konusu çalışmada, konut sektöründeki orta ölçekli kombine ısı ve güç sistemlerinin ekonomik ve çevresel potansiyeli, New York City'deki bir apartman binasına 400 kW ölçekli FAYP tabanlı bir kombine ısı-güç sistemi uygulanarak değerlendirilmiştir [75]. Sistemde elektrik ve termal yük takibi simülasyon bazlı analizler ile gerçekleştirilmiştir. Teknik ve ekonomik analizler, sistemin New York City'deki şebeke fiyatları göz önüne alındığında 10 yıl içinde kullanıcılara ekonomik olarak fayda sağlayabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, şehir şebekesinin CO₂ emisyon faktörü çok düşük olduğundan (300 g/kWh), bu sistem CO₂ emisyonunu artırmakta, ilave karbon nötralizasyon sistemi gerektirmektedir.

2.3.4. Katı Oksitli Yakıt Pili (KOYP)

Yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle endüstride daha sık kullanılmaktadır. KOYP genel olarak nikel ve özel seramiklerden oluşmaktadır. Elektrolit olarak stabilize edilmiş zirkonyum kullanılmaktadır [76]. KOYP çalışma koşullarının ~1000 °C olduğu için pahalı katalizör kullanımına gerek kalmadan kullanılabilirler [27]. Yakıt olarak hidrojen ve karbon monoksit tercih edilmesiyle birlikte 1-10 kW konutlarda, birkaç MW güç üretiminde ve 25-250 MW yük aralığı ise ticari alanlarda kullanılmaktadır [29]. Çoğu araştırma-geliştirme faaliyetlerinde, 100 kW ve üzerindeki talepler için kullanılmakta ve mikro kojenerasyon uygulamalarında % 50'den daha fazla verimlilik sağlamaktadır [77].

Katı oksitli yakıt pilinin avantajları;

- i. Sessiz ve temiz çalışması
- ii. Şarj olma süresinin kısa olması
- iii. Ağırlıklarının ve kapladığı hacimlerin düşük olması
- iv. Parça sayılarının az olmasıdır [78].

Enerji tasarruflu ve düşük emisyonlu KOYP ile kombine ısı ve güç sistemi, gelecekteki ticari uygulamalarda ve binalarda uygulanacak umut verici bir elektrik ve termal enerji üretim teknolojisidir. Neimaster ve Sleiti (2013), kW ve MW ölçekli KOYP kojenerasyon sistemlerini, yıllık işletme maliyetlerini düşürme ve CO₂ emisyonlarını azaltma potansiyelini değerlendirmek için orta ölçekli (7000 m²) bir ofis binasının enerji simülasyon modeline entegre etmişlerdir. Çalışmada, optimize edilmiş 175 kW'lık bir KOYP kojenerasyon sistemi, temel bir ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemine göre yıllık hizmet maliyetlerini % 14,5'e kadar düşürmüştür. Ayrıca, optimize edilmiş KOYP kojenerasyon sistemleri ile potansiyel CO₂ emisyonları % 62'ye düşmüştür [79]. KOYP sistemlerindeki umut verici gelişmelere dayanarak, sistemin subtropikal iklimde konutlarda kullanımı için bir mikro kojenerasyon sisteminde ana taşıyıcı olarak kullanıldığı örnek çalışma Fong ve Lee (2016) tarafından sunulmuştur. Soğutma talebinin olduğu uygulamalarda, ısı ile çalışan soğutma ekipmanının doğal olarak düşük enerji performansı nedeniyle geleneksel trijenerasyon tasarımı uygulamak güçtür. Buna ek olarak, elektrik ve gaz arasındaki fiyat farkı çok belirgin değilse, ekonomik fizibilite de önem kazanmaktadır. Sunulan çalışmada KOYP tabanlı mikro kojenerasyon yaklaşımı ile üretilen güç hem klima hem de elektrikli cihazlar için kullanılırken, atık ısı su ısıtma için geri kazanılmıştır. Sonunda, özellikle sıcak-nemli mevsimde bina soğutma, ısıtma ve güç taleplerinin karşılanabileceği görülmüştür. Enerji ve çevresel faydalarını en üst düzeye çıkarmak için, termal enerji depolaması için optimum bir tasarım ve kontrol gerçekleştirilmiş, KOYP ile hazırlanan mikro kojenerasyon sisteminin geleneksel sisteme

göre yıllık birincil enerji tüketiminde % 26,0 ve CO₂ emisyonunda ise % 30,8 oranında azalmayı sağlayabileceği belirtilmiştir [80]. Bir diğer çalışmada, KOYP ile sıkıştırılmış hava ve turboşarjın bir kombinasyonuna dayanan yeni bir entegre sistem, binalar için eşzamanlı sıcak su kullanımı ve güç üretimi için sunulmuştur [81]. Çalışma kapsamında, enerji, ekserji ve emisyonlar, genel sistem performansını değerlendirmek için parametrik analiz yoluyla ölçülmüştür. Analiz edilen senaryo için sonuçlar, yoğun olmayan dönemde 4 saat boyunca 272 kW'lık bir güç üretiminin yanı sıra en yüksek talep dönemlerinde 7 saat boyunca 407 kW'lık bir güç üretimini mümkün kılmıştır. Entegre sistem için enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %78 ve %58' olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, önerilen entegre sistemin toplam emisyonları, tekil KOYP sistemine kıyasla 0,06 kg CO₂/kWh azalmıştır. Dairesel bir KOYP sistemi ile entegre soğutma, ısıtma ve güç sisteminde gerçekleştirilen kojenerasyon performansı İran Tahran'da bir eğitim binasında (900 m²) değerlendirilmiştir [82]. 120 kW üretim kapasitesine sahip KOYP'nin net elektrik enerjisi verimliliğinin yaklaşık % 45 olduğu gösterilmiştir. Hibrit sistemin elektriksel soğutma verimliliği % 58, elektriksel ısıtma verimliliği % 60 olarak gösterilmiştir. Ekonomik analiz, hibrit kojenerasyon sistemindeki yüksek verimlilik değerlerine ve büyük kirleticilerin önemli ölçüde azalmasına rağmen, geri ödeme süresinin 8,3 yıl olarak tahmin edildiğini göstermiştir. Özetle, tüm bu güncel uygulamalar da dikkate alındığında KOYP sistemlerine dayalı kojenerasyon sistemlerinin ilk yatırım ve kurulum maliyetleri, yakın gelecekte yüksek performanslı orta sıcaklık KOYP sistemlerinin geliştirilmesiyle azalacaktır. Bu maliyet dezavantajının da giderilmesiyle, KOYP kojenerasyon sistemleri verimli ve düşük emisyonlu alternatif güç ve termal enerji kaynağı olarak binalar, endüstriyel uygulamalar ve daha birçok alanda yaygın şekilde kullanılabilir olacaktır.

2.3.5. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP)

EKYP'lerde yaygın olarak seramik bir matris içerisinde elektrolit olarak alkali metallerin (potasyum karbonat-lityum karbonat veya sodyum karbonat-lityum karbonat) erimiş karbonat karışımları kullanılmaktadır [32]. Birçok hidrokarbon (metan ve karbon monoksit) ve hidrojen yakıt olarak kullanılabilir [83]. Yakıttaki hidrojen ayrışması pil içerisinde gerçekleşmekte ve bu durum maliyete olumlu olarak yansımaktadır [77]. Çalışma koşullarının yüksek sıcaklıklarda (600-1000 °C) olması nedeniyle elektrot katalizörü olarak platin kullanma zorunluluğu yoktur [84]. Teorik verimleri yüksek olmasına rağmen ticari sistemlerde pratikte verimleri % 45-55 aralığında elektrik enerjisi verimliliği gösterilmekte ve yüksek kalitede atık ısı kullanılarak enerji verimliliği % 70 seviyelerine kadar yükselmektedir [85]. Nikel elektrotlar yeterli aktiviteyi gösterdiği için pahalı elektro-katalizör kullanılmaması erimiş karbonat yakıt pillerinin en önemli avantajlarından biridir [28].

Silveira ve ark. (2001) çalışmalarında klasik EKYP kojenerasyon sistemlerinin fiili ticarileştirilmesini ve geliştirilmesini dikkate almışlardır. Çalışmada, enerji analizi, yakıt pili kojenerasyon sisteminin verimliliğinin, elektrik verimliliği (% 42) ve termal verimlilik (% 44) toplamı olan % 86 olduğunu göstermiştir. Bu rakamlar, EKYP türü kojenerasyon sistemlerinin, verim açısından, diğer kojenerasyon sistemleriyle rekabet edebilecek seviyeye geldiğini göstermektedir [86]. Utgikar ve ark. (1995) tam yükte çalışan bir gaz türbini kojenerasyon sisteminin yakıt kullanım ve ikinci kanun verimliliklerini sırasıyla % 82,6 ve % 33 olduğunu bildirmişlerdir. Enerji ve ekserji açısında yapılan karşılaştırmalar, yakıt pili kojenerasyon sisteminin diğer kojenerasyon sistemlerinden daha verimli olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte ekonomik analizler, yatırım maliyeti 1000 ila 1500 US \$/kW arasında olan EKYP sistemlerinin 3-5 yıl geri kazanım süresiyle, ekonomik fizibilite sunduğunu da göstermektedir [87].

2.4. Binalarda Kullanılan Diğer Kojenerasyon Uygulamaları

Kojenerasyon sistemlerinde doğal gaz, biyogaz, LPG, hidrojen, işlenmemiş metanol, güneş enerjisi ve saf olmayan gazlar vb. kullanılmaktadır. Konutlardaki mikro kojenerasyon sistemleri, birincil enerji tüketimini ve kirletici emisyonu azaltmaktadır. Ayrıca çevresel yararları ile enerji verimliliğini de sağlamaktadır. Bu sistemler sayesinde elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımındaki kayıpları ve pik yük sorunlarını azaltma imkânı olmaktadır [88]. Mikro kojenerasyon sistemlerinin içten ve dıştan yanmalı motorlar, buhar ve gaz türbinleri (mikro türbinler) ve yakıt pili çeşitleri bulunmaktadır [89]. Günümüzde genellikle içten yanmalı motorlar kullanılmakta olup dıştan yanmalı motorlar (stirling), mikro türbinler ve yakıt pilleri geniş ölçüde ticarileşmemiş ve araştırma aşamasında olan teknolojilerdir. Bununla beraber kojenerasyon sistemlerinin içinde yakıt pillerinin elektriksel enerji verimi diğerlerinden daha yüksek, gürültü seviyeleri ise daha düşük olduğu görülmektedir [13].

Bu da konutlarda kullanım açısından avantaj sağlamaktadır. Tablo 2’de görüleceği üzere yakıt pili dışındaki teknolojilerin, elektriksel gücü birbirlerinden farklı olup toplam enerji verimleri genellikle aynı seviyededir [19].

Tablo 2. Binalarda kullanılan yakıt pili dışındaki kojenerasyon sistemleri

	İçten Yanmalı Motorlar	Dıştan Yanmalı Motorlar	Mikro Türbinler
Elektrik Gücü (KW)	10-200	2-50	25-250
Elektrik Verimi	25-45	15-35	25-30
Bakım Süresi (saat)	5000-20000	~5000	20000-30000
Toplam Verim	75-85	75-85	75-85
Elektrik Güç/Termal Güç	0,5-1,1	0,3-0,7	0,5-0,6
Çıkış Sıcaklığı (°C)	85-100	60-80	85-100

5. Sonuç ve Öneriler

Enerjide dışa bağımlılığın düşürülmesi, enerji maliyetinin ve çevre kirliliğinin azaltılması, arz güvenliğinin sağlanması amacıyla enerji verimliliğine yönelim her geçen gün artmaktadır. Bu yüzden yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji verimliliği önem kazanmıştır. Enerjinin yoğun olarak kullanıldığı binalarda, enerji verimliliği ve tasarrufunu arttırmaya yönelik çalışmalardan en önemlilerinden biri kojenerasyon sistemleri ve yakıt pili teknolojileridir. Kojenerasyon uygulamalarının verimleri, ısı ve elektrik birlikte üretildiğinde %75-90 aralığında olmaktadır.

Yakıt pillerinin veriminin yüksek ve çevre dostu bir alternatif enerji üretim kaynağı olması, kapladığı alan, gürültü ve titreşimin az olması binalarda tercih edilebilirliğini arttırmaktadır. Yakıt pili uygulamalarında; CO_2 yoğunluğu %49, NO_x emisyonu %91, CO konsantrasyonu %68 ve buharlaşabilen bileşenler %93 oranında azaltılabilmektedir. Kojenerasyon sistemlerde kullanılan yakıt pili teknolojisinin binalarda enerji verimliliğine katkısı büyüktür. Bu yüzden, 20 milyona yaklaşan yapı stoku göz önüne alınarak, bu alanda devlet teşvik ve yatırımlarının artırılmasının, çevresel problemler ve enerjide dışa bağımlılık konularıyla mücadelede olumlu katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Yakıt pillerinde en verimli sistem FAYP olmasına rağmen güç yoğunluğu en fazla olan sistem, PDMYP'dir. PDMYP düşük sıcaklıklara ve yakıt esnekliğine sahip olması nedeniyle binalarda enerji üretimi için en çok tercih edilen yakıt pili sistemidir. KOYP, yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle endüstriyel proseslerde güç üretmek için kullanılmaktadır. AYP'nin binalarda kullanılan diğer yakıt pili türlerine göre daha az tercih edilmesinin nedeni yakıt olarak saf hidrojenin kullanılmasıdır. EKYP'nin yüksek sıcaklıkta çalışması, diğer yakıt teknolojilerine oranla daha az verime sahip olmaları ve genel olarak güç santrallerinde tercih edilmesinden dolayı binalardaki uygulamaları azınlıktadır.

Yazar(lar)ın Katkıları

MY, AT, AŞ, KA ve ÜÜ çalışmalarını yaptı ve makaleyi yazdı. Yazarlar makalenin son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Akbulut, G., Küresel Değişimler Bağlamında Dünya Enerji Kaynakları, Sorunlar ve Türkiye. Sosyal Bilimler Dergisi/Journal of Social Sciences, 2008, 32(1), 117-137.
- [2]. Bahçeci, S., Daldaban, F., Dağıtım Şebekelerinde Güneş Panelleri ve Enerji Depolama Sistemi Uygulaması. El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2017, 4(3), 308-313.
- [3]. Demir, H., Çıracı, G., Kaya, R., Ünver, Ü., Aydınlatmada Enerji Verimliliği: Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Durum Değerlendirmesi. Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering, 2020, 25 (3), 1637-1652.
- [4]. Özyurt, G., Karabalık, K., Enerji Verimliliği, Binaların Enerji Performansı ve Türkiye'deki Durum. TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye Mühendislik Haberleri, 2009, 457(54), 32-34.
- [5]. Ünver, U., Kara, O., Energy Efficiency by Determining the Production Process with the Lowest Energy Consumption in a Steel Forging Facility. Journal of Cleaner Production., 2019, 215, 1362-1370.
- [6]. Kılıç, G. A., Al, K., Dağtekin, E., Ünver U., Technical, Economic and Environmental Investigation of Grid-Independent Hybrid Energy Systems Applicability: A Case Study, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2020, 1-16.
- [7]. Aydın, Ö., Binalarda Enerji Verimliliği Kapsamında Yapılan Projelerin Değerlendirilmesi: Türkiye Örneği. Mimarlık ve Yaşam, 2019, 4(1), 55-68.
- [8]. Ünver, Ü., Adıgüzel, E., Adıgüzel, E., Çivi, S., Roshanaei, K., Türkiye'deki İklim Bölgelerine Göre Binalarda Isı Yalıtım Uygulamaları. İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi , 2020, 1 (2) , 171-187.
- [9]. Yılmaz, Z., Akıllı Binalar Ve Yenilenebilir Enerji. Tesisat Mühendisliği Dergisi, 2006, (91), 7-15.
- [10]. Erbyık, H., Çatal, T., Durukan, S., Topaloğlu, D. G., Ünver, Ü., Assessment of Yalova University Campus According to LEED V.4 Certification System. Environmental Research and Technology, 2021, 1(2), 1-17.
- [11]. Özüpak, Ö. S., Ticari Binalarda Enerji Performans Kriterlerinin Belirlenmesi Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, 2008.
- [12]. Lam, J. C., Wan, K. K., Tsang, C. L., Yang, L., Building Energy Efficiency in Different Climates. Energy Conversion and Management, 2008, 49(8), 2354-2366.
- [13]. Sağlam, S., Üniversite Öğrencilerinin Çok Katlı Bina ve Gökdelenler Hakkındaki Düşünceleri. Third Sector Social Economic Review, 2018, 53(3), 1323.

- [14]. Goswami, D. Y., Kreith, F. (Eds.), *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*. Crc Press, 2007.
- [15]. Kara, Ö., Yurtçu, M., Keleşoğlu, A., Küçükkaya, E., Ünver, Ü, “A Heatpump System Design for Yalova University”, 2018 3rd International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), 26-29 June 2018, Split-Croatia. ISBN: 978-1-5386-6296-0.
- [16]. Pravadalıoğlu, S., “Yerinde Enerji Üretimi- Kojenerasyon Sistemleri”. II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, 24-27 Kasım 2011, İzmir, Türkiye, https://www.emo.org.tr/ekler/04aa4e179069a80_ek.pdf Son Erişim: 29.01.2021.
- [17]. Colmenar-Santos, A., Rosales-Asensio, E., Borge-Diez, D., Blanes-Peiró, J.J., District Heating and Cogeneration in the Eu-28: Current Situation, Potential and Proposed Energy Strategy for Its Generalisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62, 621–639.
- [18]. Rosato, A., Sibilio, S., Ciampi, G., Dynamic Performance Assessment of a Building-Integrated Cogeneration System for an Italian Residential Application. *Energy and Buildings*, 2013, 64, 343–358.
- [19]. Silveira, J. L., Gomes, L. A., Fuel Cell Cogeneration System: A Case of Technoeconomic Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1999, 3(2-3), 233-242.
- [20]. Demirçivi, T., Motorlu Kojenerasyon Sistemleri Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999.
- [21]. Ho, J. C., Chua, K. J., Chou, S. K., Performance Study of A Microturbine System for Cogeneration Application. *Renewable Energy*, 2004, 29(7), 1121-1133.
- [22]. Fuel Cell Hand Book 5. Basım. Eg&G Services Parsons,Inc. Ekim 2000.
- [23]. Yılmaz, A., Ünvar, S., Ekmen, M., Aydın, S., Yakıt Pili Teknolojisi. *Technological Applied Sciences*, 2017, 12(4), 185-192.
- [24]. O'hayre, R., Cha, S. W., Colella, W., & Prinz, F. B., *Fuel Cell Fundamentals*. John Wiley & Sons, 2016.
- [25]. Yılmazoğlu, M., PEM Yakıt Hücreleri için Sülfone Polieter Eter Keton (sPEEK) Elektrolitlerin Sentezi ve Karakterizasyonu: Sülfonasyon Derecesi Etkisi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2020 7 (2), 424-435.
- [26]. Isa, N. M., Tan, C. W., Yatim, A. H. M., A Comprehensive Review of Cogeneration System In A Microgrid: A Perspective From Architecture and Operating System. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81, 2236-2263.
- [27]. Yılmaz, A., Deviren, H., Fosforik Yakıt Hücresinin Ticari Binalarda Kullanımı <https://www.batman.edu.tr/Files/Scientific/7874ab68-e51f-4f14-a70c-e76f57f418dd.pdf>. Son erişim: 30.01.2021.
- [28]. Şenol, R., Üçgül, İ., Acar, M., Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makine*, 2006, 47 (563), 37-50.
- [29]. Choudhury, A., Chandra, H., & Arora, A., Application of Solid Oxide Fuel Cell Technology For Power Generation—A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20, 430-442.
- [30]. Başyazıcı, U. İ., Yakıt Pili Teknolojisinin Ticari Binalarda Kullanılabilirliğinin Sürdürülebilirlik Perspektifiyle Değerlendirilmesi. IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir. *Bildiriler Kitabı*, 2010, 173-191.
- [31]. Çavuşoğlu, A. Yakıt Pilleri ve Kullanım Alanları, Yüksek Lisans Tezi Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2006.
- [32]. Aykut, A. Ş., Yakıt Pillerinin Termo-Ekonomik Analizi Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
- [33]. Ünver, Ü., Kılıç, M., “Bir Kombine Çevrim Güç Santralinin Termodinamik Analizi”, *Mühendis ve Makine*, 2005, 46(545), 47-56.
- [34]. Onovwiona, H. I., Ugursal, V. I., Residential Cogeneration Systems: Review of The Current Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006, 10(5), 389-431

- [35]. Sivrioğlu, M., Yurdakul, M., Aydoğan, A., İç, Y. T., Büyük Ticari Yapılarda Kurulacak Kojenerasyon Sistemlerinin Ekonomik Açıldan Alternatif Sistemlerle Karşılaştırılması. Çankaya Üniversitesi Bilim ve Mühendislik Dergisi, 2011, 8(1) 135-151.
- [36]. Doğan, H., Yılankırkan, N., Türkiye'nin Enerji Verimliliği Potansiyeli ve Projeksiyonu. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 2015, 3(1), 375-384.
- [37]. Evren, N. E. Bina Enerji Performansını Artıracak Alternatif Isıtma Sistemi Uygulamalarının Doğal Gaz ve Elektrik Piyasalarına Etkileri. TESKON Binalarda Enerji Performansı Sempozyumu. 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi– 8-11 Nisan 2015/İzmir. Bildiriler Kitabı 1303-1309.
- [38]. Ünver, Ü., Kılıç, M., Çevre Sıcaklığının Bir Kombine Çevrim Güç Santralinin Performansına Etkisi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2005, 10 (1), 49-58.
- [39]. RüŐen, S. E., Topçu, M. A., Celep, G. K., Çeltek, S. A., RüŐen, A., Üniversite Kampüs Binaları için Enerji Etüdü: Örnek Çalışma. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2018, 33(2), 83-92.
- [40]. Kaplan, M., & Büker, M. S., Konutlarda Paket Tipi Kojenerasyon ile Yerde Enerji Üretimi–Konya Őartlarında Uygulama. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2019, 7(4), 749-767.
- [41]. Buker, M. S., Kaplan, M., Performance Investigation of A Residential Type Micro-Cogeneration System–Energy and Economic Analysis. In 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (Ismsıt), 2019, p. 1-9.
- [42]. Mahlia, T. M. I., Chan, P. L., Life Cycle Cost Analysis of Fuel Cell Based Cogeneration System for Residential Application İn Malaysia. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15 (1), 416–426.
- [43]. Di Marcoberardino, G., Chiarabaglio, L., Manzolini, G., Campanari, S., A Techno-Economic Comparison of Micro-Cogeneration Systems Based On Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell For Residential Applications. Applied Energy, 2019, 239, 692–705.
- [44]. Baniyadi, E., Alemrajabi, A. A., Fuel Cell Energy Generation and Recovery Cycle Analysis for Residential Application. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(17), 9460–9467.
- [45]. Zink, F., Lu, Y., & Schaefer, L., A Solid Oxide Fuel Cell System for Buildings. Energy Conversion and Management, 2007, 48(3), 809–818.
- [46]. Colson, C. M., Nehrir, M. H., Evaluating the Benefits of a Hybrid Solid Oxide Fuel Cell Combined Heat and Power Plant for Energy Sustainability and Emissions Avoidance. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1), 140–148.
- [47]. Elmer, T., Worall, M., Wu, S., Riffat, S. B., Emission and Economic Performance Assessment of A Solid Oxide Fuel Cell Micro-Combined Heat and Power System İn A Domestic Building. Applied Thermal Engineering, 2015, 90, 1082–1089.
- [48]. Sungur, B., Özdoğan, M., Topaloğlu, B., Namlı, L., Küresel Enerji Tüketimi Bağlamında Mikro Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi. Mühendis ve Makina, 2017, 58 (686), 1-20.
- [49]. Onovwiona, H. I., Ugursal, V. I., Fung, A. S., Modeling of İnternal Combustion Engine Based Cogeneration Systems for Residential Applications. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(5-6), 848-861.
- [50]. Pilavachi, P. A., Mini-and Micro-Gas Turbines for Combined Heat and Power. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(18), 2003-2014.
- [51]. Çetin, B., Gaz Türbinlerinin Optimal Performans Analizi, Doğuş Üniversitesi Dergisi (1), 2006, 59-71.
- [52]. Gökhan, A., Kömür Yakıtlı Bir Enerji Santralının Enerji-Finansal Değerlendirmesi Ve Zonguldak İli İçin Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul, 2018.
- [53]. Ünver, U., Kılıç, M., Second Law Based Thermoeconomic Analysis of Combined Cycle Power Plants Considering The Effects of Environmental Temperature and Load Variations, Int. J. of Energy Research, 2007, 31(2), 148-157.

- [54]. Değirmencioğlu, H. A., Kojenerasyon Sistemleri. Ege Bölgesi Enerji Forumu, Denizli, 2009, 12-13.
- [55]. Unver U and Kilic M., Influence of Environmental Temperature on Exergetic Parameters of a Combined Cycle Power Plant. *International Journal of Exergy*, 2017, 22(1), pp: 73-88.
- [56]. Ural Z., Gençoğlu, M. T., Yakıt Pillerinin Konutsal Uygulamalarda Kullanımı. V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu 2009 – Diyarbakır. *Bildiriler Kitabı* 149-154.
- [57]. Öztop, H., Çıtlak, A., Yakıt Pili Kojenerasyon Sistemlerinin Evsel ve Ticari Binalarda Uygulamaları. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 2004, (82), 39-48.
- [58]. Maleki, A., Optimal Operation of a Grid-Connected Fuel Cell Based Combined Heat and Power Systems Using Particle Swarm Optimization for Residential Sector. *International Journal of Ambient Energy*, 2019, 1-20.
- [59]. Das, V., Padmanaban, S., Venkitesamy, K., Selvamuthukumaran, R., Blaabjerg, F., Siano, P., Recent Advances and Challenges of Fuel Cell Based Power System Architectures and Control—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 73, 10-18.
- [60]. Şefkat, G., Özel, M. A., Pem Yakıt Pilinin Simulink Modeli ve Analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 2018, 23(2), 351-366.
- [61]. Karanfil, G., Proton Değişim Membran Yakıt Hücreleri: Termodinamiği, Bileşenleri ve Uygulama Alanları. *Mühendis ve Makina*, 2020, 61 (698), 57-76.
- [62]. Aydın, M., Pem Yakıt Pilinin İki Boyutlu Modellemesi Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü, İTÜ İstanbul, 2007.
- [63]. Dinçer, K., Pem Yakıt Hücresinin Katod Tarafı Performansının Geliştirilmesi. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 2014, 13(2), 38-49.
- [64]. Hwang, J. J., Zou, M. L., Development of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Cogeneration System, *Journal of Power Sources*, 2010, 195(9), 2579-2585.
- [65]. Colpan, C.O., Nalbant, Y., Devrim, Y., Energy and Exergy Performance Assessments of a High temperature-proton exchange membrane Fuel Cell Based Integrated Cogeneration System, *International Journal of Hydrogen*, 2020, 45(5), 3584-3594.
- [66]. Minutillo, M., Jannelli, E., Perna, A., Analyzing Microcogeneration Systems Based on LT-PEMFC and HT-PEMFC by Energy Balances, *Applied Energy*, 2013, 108, 82-91.
- [67]. Zengin, Y., Yakıt Hücresinde Hidrojen Tüketiminin Zamana Bağlı Değişiminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 2019.
- [68]. Yeşilata, B., Demir, F., Fotovoltaik ve Yakıt Pili Birleşik Sisteminin Analizi. *Isı Bilimi Ve Tekniği Dergisi*, 2006, 26 (1), 37-44.
- [69]. Ekiz, A., Pem Tipi Yakıt Pilleri İçin Çift Kutuplu Akış Plakalarının Modellenmesi Yüksek Lisans Tezi, Tobb Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [70]. Zhang, P., Yang, P., Zhu, Y., Zhang, H., Hu, Z., Zhang, J., Performance Evaluation of an Alkaline Fuel Cell/Thermoelectric Generator Hybrid System, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(22), 11756-11762.
- [71]. Şahin, F., Sülfolanmış Maleik Anhidrit-Stiren Ardışık Kopolimer Membranının Proton Değişim Membran Yakıt Hücresi Performansının İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, 2011.
- [72]. Kırılı, F., Proton Değişimli Membranlı Yakıt Hücrelerinin Matematiksel Modeli Üzerine Bir Değerlendirme Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2008.
- [73]. Zhang, H., Wu, M., Zhao, J., Wang, F., Yuan, J., Performance Analyzes of an Integrated Phosphoric Acid Fuel Cell and Thermoelectric Device System for Power and Cooling Cogeneration, *International Journal of Refrigeration*, 2018, 89, 61-6.
- [74]. Castilho, A. L., Giancesini, M. A., Rodrigues, R. “Estudo de Caso da Implantação da Célula a Combustível no Hospital Erasto Gaertner.” *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*, 2004, 1-120. Curitiba. Brazil.

- [75]. Ito, H., Economic and Environmental Assessment of Phosphoric Acid Fuel Cell-Based Combined Heat and Power System for an Apartment Complex, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(23),15449-15463.
- [76]. Sariboğa, V., Katı Oksit Yakıt Hücreleri için $Ce_{0.8}Sm_{0.2}O_{1.9}$ Esaslı Elektrolit Malzemelerinin Hazırlanmasında Değişik Aminoasit Yakma Ajanlarının Karşılaştırılması, *El-Çezeri Journal of Science and Engineering*, 2020, 7(3), 1293-1308.
- [77]. Aki, H., The Penetration of Micro Chp in Residential Dwellings in Japan. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, p1-4.
- [78]. Erden, E., Katı Oksit Yakıt Pilleri İçin Bi_2O_3 Katkılı Katı Elektrolit-Katot Malzemelerin Sentezi ve Karakterizasyonu Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2019.
- [79]. Neimaster, E. J. Sleiti, A.K., Potential of SOFC CHP Systems for Energy-Efficient Commercial Buildings, *Energy and Buildings*, 2013, 61,153-160.
- [80]. Fong, K.F., Lee, C.K., System Analysis and Appraisal of SOFC-Primed Micro Cogeneration for Residential Application İn Subtropical Region *Energy and Buildings*, 2016, 128(15), 819-826.
- [81]. Roushenas, R., Razmi, A. R., Soltani, M., Torabi, M., Dusseault, M. B. Jatin Nathwani, Thermo-environmental Analysis of a Novel Cogeneration System Based on Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) and Compressed air Energy Storage (CAES) Coupled with Turbocharger *Applied Thermal Engineering*, 2020, 181, 25, 115978.
- [82]. Mehrpooya, M., Sadeghzadeh, M., Rahimi, A., Pouriman, M., Technical performance analysis of a combined cooling heating and power (CCHP) system based on solid oxide fuel cell (SOFC) technology – A building application, *Energy Conversion and Management*, 2019, 198, 111767.
- [83]. Nişancı, F. G., Biyokömür Yakıtı Kullanılan Doğrudan Karbon Yakıt Piliinin Modellenmesi Doktora Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, 2019.
- [84]. Baranak, M., Ergimiş Karbonatlı Yakıt Piliinin Modellenmesi Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ, İstanbul, 2004.
- [85]. Murugan, S., Horák, B., A review of micro combined heat and power systems for residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 64, 144–162.
- [86]. Silveira, J. L., Leal, E. M., Ragonha Jr, L. F., Analysis of a molten carbonate fuel cell: cogeneration to produce electricity and cold water, *Energy*, 2001, 26(10), 891-904.
- [87]. Utgikar, P. S., Dubey, S. P., Prasada Rao, P. J., Thermoeconomic analysis of gas turbine cogeneration plant — a case study, *J. Power Energy, Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1995, 209, 45-54.
- [88]. Dorer, V., Weber, A., Energy and CO₂ Emissions Performance Assessment of Residential Micro-Cogeneration Systems with Dynamic Whole-Building Simulation Programs. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(3), 648-657.
- [89]. Sungur, B., Özdoğan, M., Topaloğlu, B., Namlı, L., Küresel Enerji Tüketimi Bağlamında Mikro Kojenerasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 2017, 58 (686), 1-20.