



# BİLEŞİK ISI GÜÇ SİSTEMİ OLARAK BİR ALIŞVERİŞ MERKEZİNDE YAKIT PİLİ UYGULAMASI

*Application Of A Fuel Cell Cogeneration System In A Shopping Mall*

**İbrahim Utku Başyazıcı**  
**Özden Ağra**

## ÖZET

Hidrojen ekonomisine geçiş ile ilgili tartışmalar yakıt pili teknolojisinin binalarda kullanımının değerlendirilmesini de tekrar gündeme getirmiştir. Binalarda kullanılacak sabit yakıt pillerinin gelişimi diğer yakıt pili uygulamalarına kıyasla yavaş ilerlemektedir. Hidrojen ekonomisi tartışmaları bu anlamda büyük ölçekli yakıt pili sistemleri için bir fırsat olarak görülebilir. Büyük ölçekli bir yakıt pili uygulaması herhangi bir binanın elektrik enerjisi ihtiyacını yüksek verimde karşılayabildiği gibi atık ısıdan yararlanılması yoluyla sıcak su üretiminde ve absorpsiyonlu soğutma grupları ile soğutmada da kullanılabilir. Dolayısıyla yakıt pili teknolojisi dizel veya gaz tahrikli kojenerasyon ve trijenerasyon teknolojilerine yüksek performanslı bir alternatif oluşturur. Klasik gaz tahrikli bileşik ısı güç üretimi sistemlerine kıyasla emisyon değerleri oldukça düşüktür. Yakıt olarak hidrojen kullanılması halinde sıfır emisyonla elektrik enerjisi üretilebilir. Yakıt pillerinin işletme durumunda gürültü seviyelerinin klasik sistemlere oranla oldukça düşük olması, verimlerinin Carnot verimi ile sınırlı olmaması, yüksek kısmi verim değerleri, modüler tasarım imkânı belirtilmesi gereken diğer avantajlardır. Bu çalışmada ilk kurulum ve işletme maliyetleri, enerji verimliliği, teknolojik kısıtlar gibi değişkenler dikkate alınarak Fosforik Asit Yakıt Pillerin (FAYP) mevcut bir alışveriş merkezinde uygulanabilirliği değerlendirilecektir

**Anahtar Kelimeler:** Yakıt pili, fosforik asit yakıt pili, trijenerasyon, absorpsiyonlu soğutma

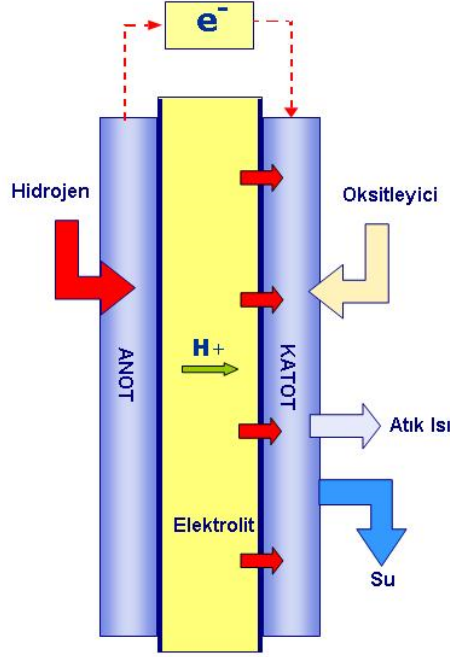
## ABSTRACT

Discussions about the transition to hydrogen economy have reintroduced the use of fuel cell technology in buildings to the agenda. In comparison to other fuel cell applications, the development of stationary fuel cells for use in buildings is progressing slowly. In this sense, the discussion over the hydrogen economy can be viewed as an opportunity for large-scale fuel cell systems. A large-scale fuel cell application can meet any building's electrical energy needs with high efficiency, as well as produce hot water by utilizing waste heat and cooling with absorption chillers. As a result, fuel cell technology is a high-performance alternative to diesel and gas-powered cogeneration and trigeneration technologies. The emission values are quite low when compared to conventional gas-driven combined heat and power generation systems. Electricity can be generated with zero emissions if hydrogen is used as a fuel. Other benefits that should be mentioned are that fuel cells have low noise levels when compared to conventional systems, their efficiency is not limited to Carnot efficiency, they have high partial efficiency values, and they have modular design options. The feasibility of deploying Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC) in an existing shopping mall will be assessed in this study by considering factors such as initial installation and operating costs, energy efficiency, and technological constraints.

**Key Words:** Stationary Fuel Cell; Stationary fuel cell, phosphoric acid fuel cell, trigeneration, absorption cooling

## 1. GİRİŞ

Yakıt pilleri temel olarak kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal cihazlardır. Kimyasal reaksiyon bir elektrolitin varlığında gerçekleşir. Bir yakıt pilinin en temel bileşenleri anot, katot ve elektrolittir. Yakıt pilinde gaz fazındaki yakıt (hidrojen) anot tarafından, oksitleyici gaz (oksijen veya hava) ise katot tarafından beslenir. Bununla birlikte sonucunda elektrolit üzerinden iyon akışı olurken anottan katoda doğru ise elektron akışı olur ve ısı açığa çıkar.



Şekil 1 Yakıt pili temel çalışma prensibi [1].

## 2. YAKIT PİLİ TİPİ SEÇİMİ

Farklı uygulama özelliklerine sahip ısı geri kazanımı, bakım ve işletme kolaylığı, verim değerleri açısından çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahip birçok farklı tipte yakıt pili tipi bulunmaktadır. Ticari ve teknolojik olgunluk seviyesi dikkate alındığında yapılarda veya bölgesel ısı ve elektrik üretimi için en uygun yakıt pili teknolojileri; yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle Katı Oksit Yakıt Pilleri (KOYP), Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri (EKYP) ve Fosforik Asit Yakıt Pilleridir (FAYP). Bu yakıt pili tipleri kullandıkları elektrolitler farklı olmakla birlikte çalışma ilkeleri benzerdir.

Bir yakıt pilinin çalışması, iki elementin başka bir bileşik oluşturmak için bağlandığı kimyasal bir reaksiyon etrafında toplanır. Hidrojenin yakıt olarak kullanılması durumunda, bu genellikle oksidasyon yoluyla bir hidrojen molekülünden elektronların sıyrılmasını ve reaksiyona girerek su, elektrik ve ısı üretmek için onları bir oksijen molekülü ile birleşmesini içerir. Bu reaksiyon, yakıt pili tipine bağlı olarak farklılaşabilir, örneğin katı oksit yakıt pillerinde oksijen, oksijen iyonlarına indirgenir. Yakıt pili tipine bağlı olarak 150-1000 °C arasında değişen sıcaklıklara ulaşılabilir. Tablo 1'de binalarda kullanımı yaygın olan temel yakıt pili tipleri temel özellikleri açısından karşılaştırılmıştır.

**Tablo 1** Yakıt Pili Seçeneklerinin Karşılaştırılması [2] [3]

Yakıt Pili Tipi	Verim %	Çalışma Sıcaklığı °C	Avantajlar	Dezavantajlar
Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP)	40	150-200	<ul style="list-style-type: none"><li>- Hidrojenin doğalgaz reformasyonu ile elde edilmesi durumunda yakıttaki safsızlıklara duyarlılığı daha azdır</li><li>- Ticari olarak en olgun teknolojidir.</li><li>- Kojenerasyona uygun</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Pahalı platinum katalizöre sahip</li><li>- Yakıt olarak doğal gaz kullanılması durumunda sülfüre karşı hassas.</li></ul>
Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (EKYP)	50	600-700	<ul style="list-style-type: none"><li>- Platinum katalizör gerekmediği için maliyeti göreceli olarak düşüktür.</li><li>- Yüksek verimli</li><li>- Hidrojen dışı yakıt kullanımı esnekliğine sahip.</li><li>- Kojenerasyona uygun.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Yüksek sıcaklık kaynaklı bileşenlerde korozyon.</li><li>- İlk çalıştırma süreleri uzun.</li><li>- Birim hacme karşılık güç yoğunluğu düşük.</li></ul>
Katı Oksitli Yakıt Pilleri (KOYP)	60	500-100	<ul style="list-style-type: none"><li>- Yüksek verim</li><li>- Yakıt esnekliğine sahip</li><li>- Kojenerasyona uygun</li><li>- Katı elektrot kullanıyor.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Yüksek sıcaklık kaynaklı bileşenlerde korozyon.</li><li>- İlk çalıştırma süreleri uzun.</li><li>- Dur kalk tipi çalışma seçeneği kısıtlı.</li></ul>

Pahalı platinum katalizör kullanılmasına rağmen farklı ölçeklerdeki çeşitli bina uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan yakıt pili tipi FAYP tipi yakıt pilleridir. FAYP tipi yakıt pilleri özellikle hidrojenin dolaylı olarak doğal gazdan elde edildiği bina uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu çalışmada da ticari uygulamalarının yaygın olması, çeşitli ölçeklerde projelerden toplanmış işletme verilerinin varlığı, doğalgaz ile çalışmaya uygunluğu gibi çeşitli avantajları dikkate alınarak FAYP tipi yakıt pilleri değerlendirilmiştir.

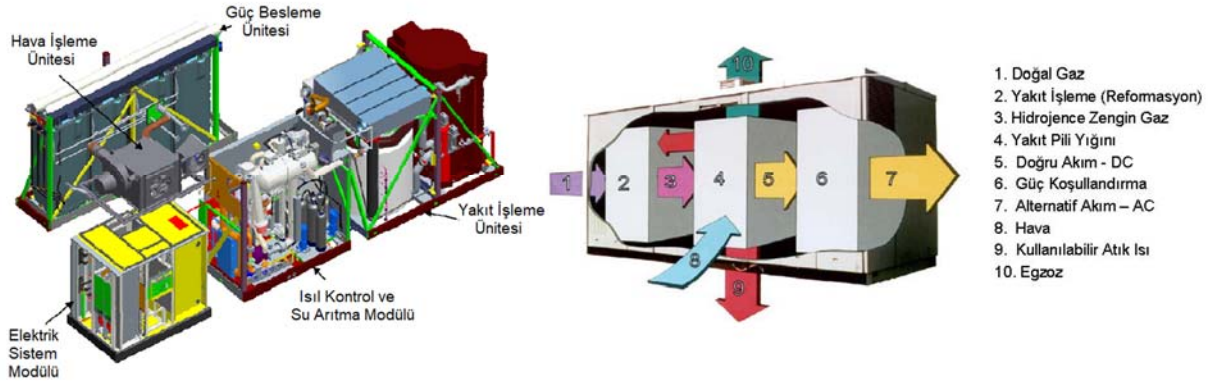
### 3. FOSFORİK ASİT YAKIT PİLLERİ

Erimiş karbonat yakıt pilleri ve katı oksitli yakıt pillerinin de ticari uygulamaları geliştirilmiş olmasına rağmen sadece fosforik asitli yakıt pilleri gerçek anlamda binalarda yaygın kullanım kazanmıştır. Bu bölümde FAYP tipi yakıt pillerinin teknik ve ekonomik faktörler dikkate alınarak genel değerlendirmesi yapılmıştır.

#### 3.1 FAYP Tipi Yakıt Pili Kullanımında Teknik Faktörlerin Değerlendirilmesi

Yukarıda açıklanan temel yakıt pili reaksiyonu reaksiyon ürünleri yakıt pilinin tipine göre değişmekle birlikte tüm yakıt pilleri için hemen hemen aynıdır. Bina uygulamaları açısından temel problem bu reaksiyonun temel girdisi olarak kullanılan hidrojenin günümüz koşullarında genel bir servis sağlayıcıdan temininin kısıtlı veya hiç mümkün olmamasıdır. Binalar söz konusu olduğunda hidrojen genellikle, yaygın doğal gaz şebekesinden faydalanılarak doğal gazdan dönüştürmek yoluyla elde edilir. Şekil 2'de hidrojeni reformasyon yoluyla doğalgazdan elde eden ticari FAYP tipi bir yakıt pili uygulamasının bileşenleri verilmiştir. Bu bileşenler yakıt pili tiplerine göre değişiklik göstermekle birlikte tipik bir ticari yakıt pili; yakıt işleme ünitesi, sülfür ayırma ünitesi, güç koşullandırma ünitesi, ısı ve su yönetim sistemleri ile kontrol sisteminden oluşur.

Hidrojenin bir reformasyon ünitesi yoluyla doğal gazdan dönüştürülerek elde edilmesi, doğal gazın çok kolay ulaşılabilir bir yakıt olması nedeniyle en genel yöntemdir. Reformasyon üniteleri modüler olduğundan şebekeden hidrojen temininin mümkün olması durumunda cihazdan ayrılabilir. Doğal gaz en yaygın alternatif olmakla birlikte arıtma tesislerinde anaerobik çürütücüler tarafından üretilen metan gazının kullanımı gibi çeşitli uygulamalarda mevcuttur. FAYP tipi yakıt pilleri yakıt olarak direkt hidrojen yerine doğal gaz kullanılması durumunda bile, konvansiyonel teknolojilere göre daha verimli ve düşük emisyonla çalışan cihazlardır. Hidrojen dışındaki yakıtlarla çalışmanın yarattığı temel problem doğalgaza sonradan eklenen sülfür gibi yakıtın içerisindeki elektrokimyasal proseste istenmeyen diğer bileşenlerin ayrılmasıdır. Yakıt işleme veya reformasyon ünitesi aynı zamanda bu işlevi gerçekleştirir.



Şekil 2 FAYP Tipi yakıt pili uygulaması [4] [5]

FAYP tipi yakıt pilleri tüm diğer yakıt pilleri gibi doğru akım üretirler ancak bina uygulamaları söz konusu olduğunda alternatif akıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu neden tipik bir FAYP ünitesi doğru akımın alternatif akıma çevrilmesi için bir inverter devresine sahip olmalıdır. Yakıt pili performansını etkileyen en önemli parametrelerden birisi kontrol sistemidir. Doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesi, istenen voltaj ve frekansın tutturulması dolayısıyla üretilen elektriğin kalitesinin garanti edilmesi kontrol sisteminin performansı ile ilgilidir. Yakıt pillerinin sık devreye girip çıkması yakıt pili yığınının ömrünü azalttığından istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle yakıt pilleri yüksek performanslı bütünlük kontrol sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Yakıt pili ana bakım maliyeti 40000 saat kadar ömür öngörülen yakıt pili hücrelerinin yenilenmesi veya değiştirilmesi ihtiyacıdır.

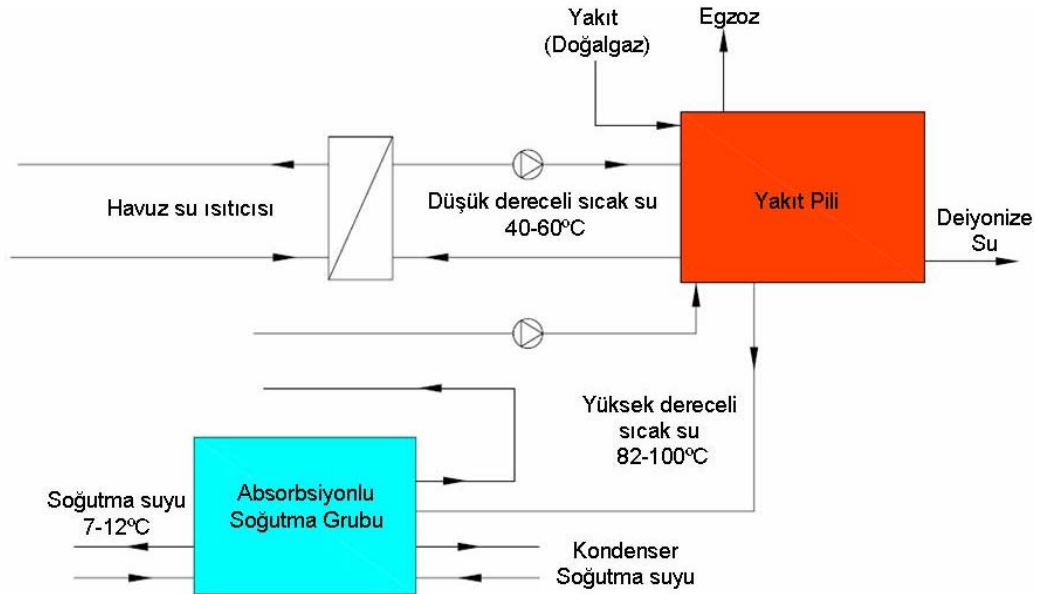


Şekil 3 400kWe Kapasitesine sahip FAYP tipi yakıt pili [6]

FAYP tipi yakıt pillerini bina uygulamaları açısından diğer yakıt pili tiplerinden ayıran en temel özellik ticari açıdan daha başarılı olmaları nedeniyle çeşitli bina tipleri ve saha koşullarında test edilmiş olmalarıdır. FAYP tipi yakıt pillerinin uygulandığı binalar arasında hastaneler, yurt binaları, askeri barakalar, kapalı yüzme havuzları, ofis binaları, endüstriyel laboratuvarlar sıralanabilir [7]. Günümüz itibarıyla bina uygulamaları için alt ısı değerine göre  $42 \pm 2$  mertebesinde elektrik üretim verimiyle çalışan, 400kW kapasitesinde paket tip fosforik yakıt pili üniteleri temin edilebilmekte ve bu paket ünitelerin ölçeklenmesi ile daha yüksek kapasitelere çıkılabilmektedir. Bugüne kadar denenmiş en büyük fosforik asit yakıt pili uygulaması Tokyo Elektrik Tarafından. 1991 – 1997 yılları arasında 230.000 saat işletilmiş olan 11MW'lık yakıt pili güç santralidir [1].

FAYP tipi yakıt pillerinin işletilmesi ile ilgili temel detaylar aşağıdaki şekilde sıralanabilir. [8].

- Fosforik asit yakıt pillerinin işletme sıcaklıkları  $150 - 200^{\circ}\text{C}$ 'dir.
- Soğutucu olarak hava veya su kullanılabilir.
- Fosforik asitli yakıt pillerinin  $\text{CO}_2$  kontaminasyonuna duyarlılıkları azdır ancak karbonmonoksit'e karşı daha hassastırlar
- Hidrojen dışı yakıtların kullanılması durumunda kontaminasyon duyarlılıklarının az olması avantajlıdır. Bu özellikle yakıt reformasyonu maliyetinin düşmesini ve arıtma tesislerinden elde edilen yüksek kontaminasyon riski bulunan çeşitli gazlar ile çalışabilme imkânı sağlamaktadır. Arıtma tesislerinde açığa çıkan gazlar hacimsel olarak yaklaşık  $65-70$  metan ( $\text{CH}_4$ ),  $25 - 30$  oranında karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ), az miktardan sülfür bileşenleri ile diğer gazlardan oluşur.
- Düşük ve yüksek sıcaklık derecesinde ısı geri kazanımı mümkündür. Bu sayede absorpsiyonlu soğutma veya direkt ısıtma amaçlı atık ısının kullanımı ya da trijenerasyon uygulamasının gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 4 Paket tip FAYP ünitesi ile tipik bir trijenerasyon uygulaması [8]

### 3.1 FAYP Tipi Kullanımında Ekonomik ve İşletme Faktörlerinin Değerlendirilmesi

Yakıt pili teknolojisi öngörülen üretim hacmi ve ticari kullanım seviyesine hala erişemediğinden pahalı bir teknolojidir. DOE (Amerikan Enerji Bakanlığı) ve Oak Ridge National Laboratory tarafında  $100 - 400\text{kWe}$  kapasitesindeki yakıt pilleri için 2012 yılında yapılan  $1500\$/\text{kWe}$  [9] maliyet projeksiyonu hala gerçekleşmemiştir.[2] Bu çalışma öncesinde de hazırlanan çeşitli rapor ve maliyet projeksiyonu çalışmalarında da optimum bir kapasite maliyet kistası olarak bu rakam belirtilmesine rağmen arzu edilen ticari yaygınlığa ulaşamaması üretim maliyetlerinin düşmesini engellemektedir.  $400\text{kW}$ 'lık fosforik asit yakıt pilleri için ekipman maliyeti  $4000-5000\$/\text{kWe}$  seviyelerindedir. İşçilik, montaj,

devreye alma, ısı geri kazanım ekipmanları dahil olmak üzere toplam ilk yatırım maliyetinin proje konumuna bağlı olarak 5000 – 7000 \$/kWe mertebelerinde olacağı tahmin edilmektedir [13] [14].

FAYP tipi yakıt pilleri gerçek saha koşullarında 40.000 saat üzerinde işletme ömrünü yakalamıştır. Mevcut fosforik asit pili uygulamalarında yaklaşık 5-7 sene olan yakıt hücresi ömrünün artması yakıt pili kullanımının yaygınlaşmasına yardımcı olacaktır. Katı oksit ve erimiş karbonat yakıt pili teknolojileri henüz deneme ve geliştirme safhasında veya yaygın ticarileşme öncesi evrelerinde bulduklarından maliyetleri bir miktar daha yüksektir. Fosforik asit yakıt pilleri için bakım maliyetleri ise 0.015 – 0.035\$/kWh mertebelerindedir [3] [13] [14].

Yakıt pili teknolojisi günümüz itibarıyla dünyanın hemen her yerinde pahalı bir teknolojidir. Binalarda yakıt pillerinin yüksek kapasite ısı ve güç kaynağı olarak kullanımı yaygın kullanım aşamasına geçemediğinden maliyetlerde öngörülen seviyelere inememiştir. Binalarda yakıt pillerinin kullanımı açısından yerel koşullar değerlendirildiğinde ülkemizin kendine özgü avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmaktadır. Yerel olarak geniş bir hidrojen şebeke altyapısı olmamasına rağmen hidrojenin yenilenebilir enerji kaynakları yardımıyla elektroliz yoluyla elde edilmesi ve bu tesislerin yakıt pilleri ile entegrasyonu değerlendirilebilir. Yakıt pillerinin binalarda kullanımı fikren olgunluğa erişmesine rağmen henüz genel kabul görmemiş, yapı sektörü için yeni bir teknolojidir. Bakım, montaj ve işletme gereksinimlerinin karşılanması uzmanlık gerektirir. Bu nedenle yukarıda öngörülen ilk yatırım, bakım ve işletme masraflarının Türkiye koşullarında öngörülerin üst bandından yer alacağı düşünülmelidir.

#### 4. ALIŞVERİŞ MERKEZİ VAKA ANALİZİ

Bu çalışmada vaka analizi olarak 379.787m<sup>2</sup> kapalı alana sahip İstanbul'da mevcut bir alışveriş merkezi ele alınmıştır. Alışveriş merkezi kompleksi içinde bulunan ofis ve konut blokları dahil olmak üzere ortak ısı ve güç merkezinden beslenen yapı gruplarını barındırmaktadır. Ana ısı ve güç merkezinin detayları aşağıda verilmiştir.

##### 3.1 Mevcut Sistemin ve Bina Enerji Talebinin İncelenmesi

Alışveriş merkezinin mevcut iklimlendirme sistemini besleyen soğutma grupları ve kazanlar tamamıyla konvansiyonel mantıkla düzenlenmiştir. Soğutma sistemi 2 adet santrifüj ve 1 adet vidalı soğutma grubundan; ısıtma sistemi ise 2 adet yüksek kapasiteli ve 1 adet düşük kapasiteli doğalgaz yakıclı çelik sıcak su kazanından oluşmaktadır. Hem soğutma hem de ısıtmada ana dağıtım pompa grupları; sabit debili primer ve değişken debili sekonder pompa grupları şeklinde düzenlenmiştir. Kazan ve soğutma gruplarının kapasiteleri Tablo 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 2 Soğutma Grupları

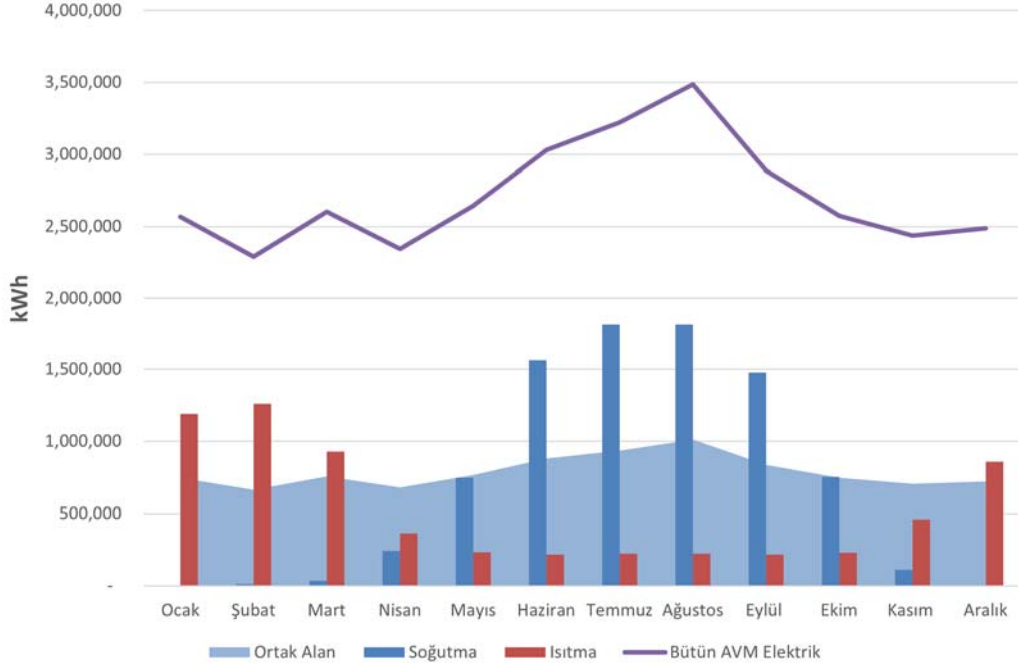
Soğutma Grubu	Soğutma Kapasitesi	Kompresör Gücü	CoP	IPLV
	kW	kW		
Santrifüj Soğutma Grubu 01	3330	565	5,89	8,15
Santrifüj Soğutma Grubu 01	3330	565	5,89	8,15
Vidalı Soğutma Grubu 03	988	231	4,28	5,54

Tablo 3 Sıcak Su Kazanları

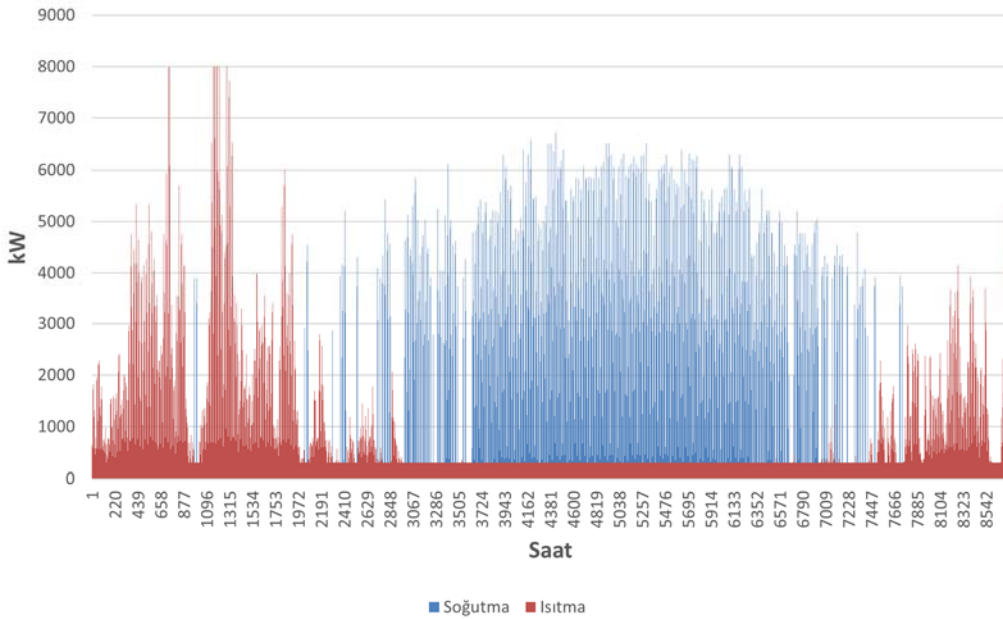
Sıcak Su Kazanı	Isıtma Kapasitesi	Brülör Kapasitesi	Verim
	kW	kW	%
Kazan 01	3500	513-5837	93,6
Kazan 02	3500	513-5837	93,6
Kazan 03	1000	90-1674	92,8



Ana ekipmanların seçimindeki temel mantığa bakıldığında eş kapasitede cihaz kullanımının tercih edilmediği görülmektedir. Kısmi yükleri karşılamak için soğutmada santrifüj soğutma gruplarından daha düşük kapasitede bir vidalı soğutma grubu, ısıtmada ise yaz kazanı olarak çalışacak 1000kW kapasitesinde bir kazan seçimi yapılmıştır. Alışveriş merkezine ait kiralanabilir alanlar, tüm kompleksin parçası olan konut ve ofis alanlarının elektrik enerjisi, ısıtma ve soğutma talebi tek merkezden sağlanmakta ve yönetilmektedir. Kiralanabilir alanlara ait enerji tüketimleri AVM yönetimi tarafından ölçülerek kiracılara paylaştırılmaktadır.



Şekil 5 Aylık enerji talep profili (Isıtma + Soğutma + Elektrik)

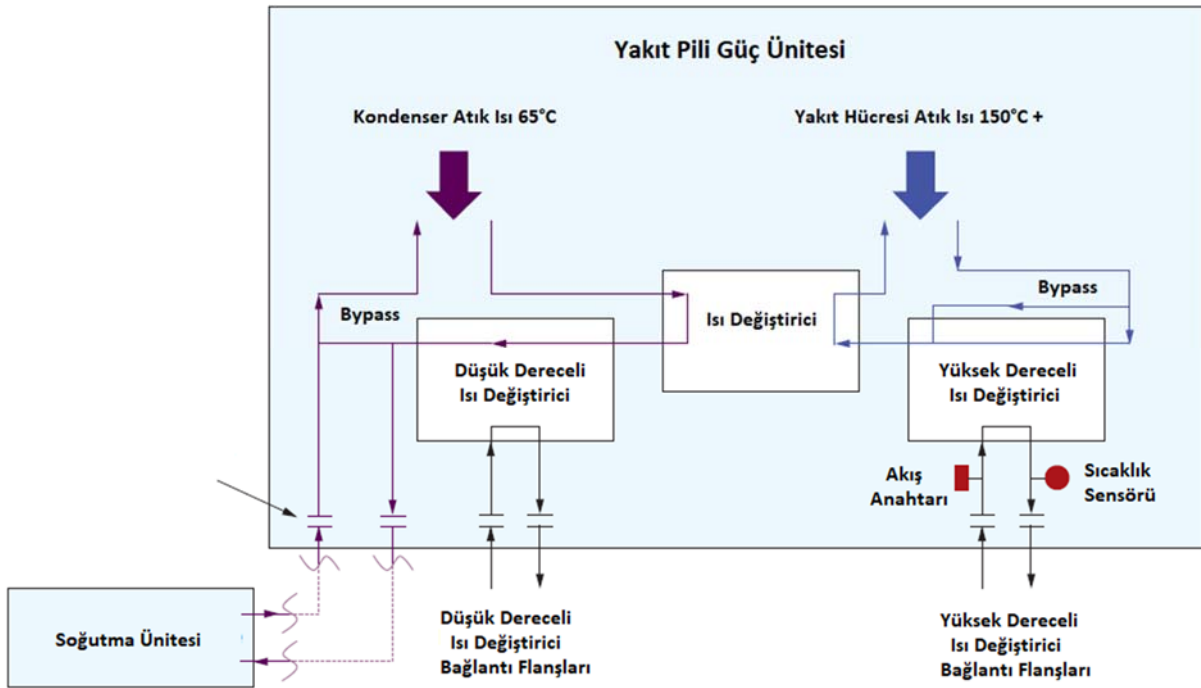


Şekil 6 Saatlik ve ısıtma soğutma talebi

Herhangi bir kojenerasyon sisteminden tam anlamıyla faydalanılabilmesi için sisteminin atık ısının kullanılabilmesi sürekli bir ısıtma veya soğutma talebi olması gerekmektedir. Bu çalışmada ele alınan FAYP tipi yakıt pilide doğalgazı reformasyon ünitesinden geçirerek hidrojen elde etmekte ekzotermik bir reaksiyon sonucunda elektrik enerjisi ve ısı açığa çıkmaktadır. Ele alınan AVM'nin ısıtma soğutma profili incelendiğinde bu atık ısının kullanılabilmesi sürekli bir ısıtma talebi olduğu görülmektedir. Bu sürekli talep AVM kompleksinin parçası olan konutların sıcak su ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Mevcut konvansiyonel çözümde bu talebi yaz sıcak su kazanı karşılamaktadır.

### 3.2 FAYP Tipi Yakıt Pilinin Konvansiyonel Sisteme Entegrasyonu

Bu çalışmada analizler 400kW elektrik üretme kapasitesine sahip FAYP tipi yakıt pilinin performans karakteristikleri temel alınarak yapılmıştır. FAYP tipi yakıt pili 400kW elektrik üretirken 1066kW (üst ısı değere göre) doğalgaz girdisine ihtiyaç duymaktadır. FAYP tipi yakıt pili iki farklı sıcaklık derecesinde ısı geri kazanım olanağı sunmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki atık ısı kaynağı 190kW kapasitesinde yaklaşık olarak 120°C sıcaklığından başlayarak ısı transferine olanak vermektedir. Düşük sıcaklıktaki ısı kaynağı ise 60°C sıcaklığından başlayarak 264kW kapasitesinde ısı transferine izin vermektedir. Yüksek sıcaklıktaki atık ısının direk kullanılmaması durumunda FAYP yakıt pili yüksek sıcaklıktaki tüm atık ısıyı dahili ısı değiştiricisi yardımıyla 60°C'de düşük sıcaklıkta atık ısıya çevirmektedir.



Şekil 7 Yakıt pili ısı geri kazanım seçenekleri [5]

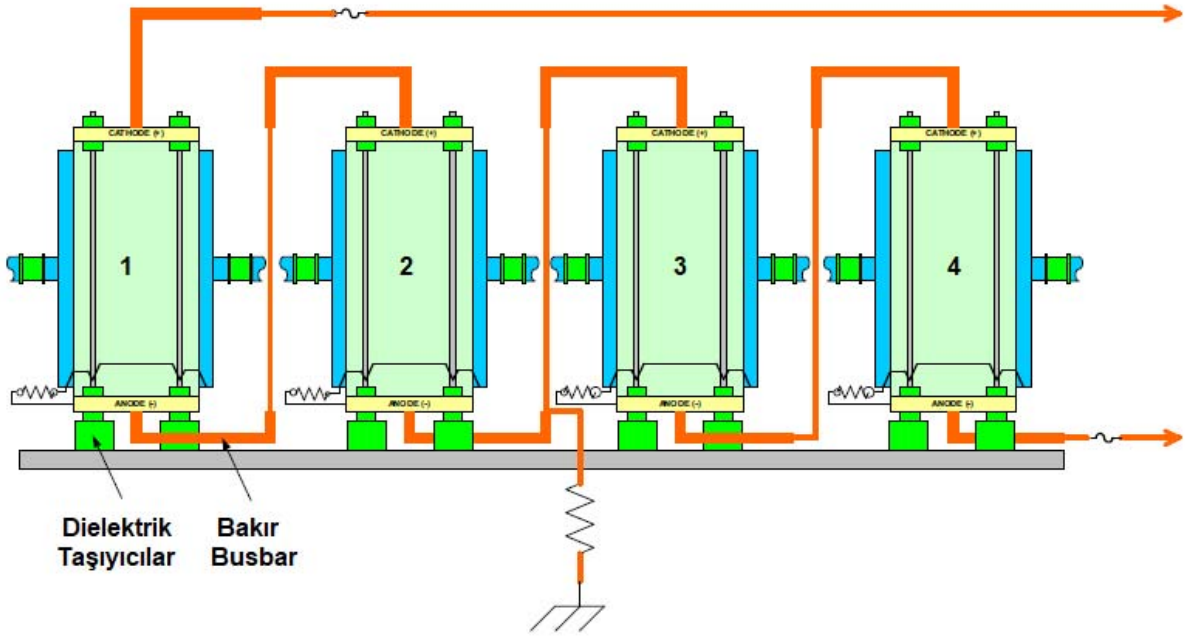
FAYP yakıt pilinin mevcut sisteme entegrasyonu için iki farklı strateji öngörülmüştür. Yüksek sıcaklıktaki atık ısı kaynağı sıcak su tahrikli absorpsiyonlu soğutma grubunu çalıştırmak için yeterli sıcaklık derecesinde atık ısı sağlayabilmektedir. Dolayısıyla binada soğutma talebi olması durumunda bu atık ısı absorpsiyonlu soğutma grubuna yönlendirilecek, santrifuj soğutma gruplarının çalışma sıklığı azaltılacaktır. Düşük sıcaklıktaki atık ısı ise direkt olarak mahal ısıtmasında veya yaz sıcak su ısıtma talebinin karşılanmasında kullanılacaktır. Binada soğutma talebi olmaması durumunda ise tüm atık ısı yine mahal ısıtmasında veya sıcak su ısıtma talebinin karşılanmasında kullanılacaktır.

### 3.3 Yakıt pili sayısı ve sistem işletme maliyetinin belirlenmesi

Bu çalışmada ele alınan 400kW FAYP elektrik üretim kapasitesindeki yakıt pili dahil olarak seri bağlanmış 100kW kapasitesinde hücreden oluşmaktadır. Bu paket ünitelerde gerektiğinde seri bağlanarak toplam kapasite artırılabilir. Yakıt pilinden sağlanan atık ısıdan tam olarak



faaylanabilmek için tesisin baz ısıtma, soğutma ve elektrik yükleri dikkate alınarak 1 – 4 adet arasında değişen sayılarda FAYP tipi yakıt pili kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır.



**Şekil 8** 400 kW FAYP Yakıt pili hücre yapısı [5]

Dört adet yakıt pili kullanılması durumunda bazı pik yük talepleri hariç olmak üzere tesisin hemen hemen tüm elektrik ihtiyacı karşılanabilmektedir. Fakat kurulu kapasite başına 7000 USD/kW (ekipman, kurulum, işçilik dahil olmak üzere) seviyesindeki ilk yatırım maliyeti bu konfigürasyonda seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyetini ciddi olarak arttırmaktadır. Bina baz elektrik yükünü karşılayacak şekilde tek FAYP ünitesi kullanılması durumunda yakıt pilinin tüm atık ısısından ısıtma ve soğutmada faydalanılabilmektedir. Bu durumda basit geri dönüş süresi 3,3 yıl çıkmaktadır.

**Tablo 4** FAYP Yakıt pili seviyelendirilmiş elektrik maliyeti ve geri dönüş süresi

No	FAYP Yakıt Pili Sayısı	Yıllık Elektrik Talebi	Yakıt Pili Tarafından Üretilen Elektrik	Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti	Geri Dönüş Süresi
		(kWh)	(kWh)	USD/(kWh)	Yıl
01	1 Adet	9,443,806	3,425,159	0,05	3,3
02	2 Adet	9,443,806	5,699,593	0,17	4,3
03	3 Adet	9,443,806	7,559,950	0,30	5,1
04	4 Adet	9,443,806	8,971,118	0,44	5,8

Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti hesapları 10 yıllık periyot için yapılmıştır. FAYP yakıt pillerinin 40000 çalışma saati sonunda yakıt hücrelerinin değiştirilmesi gerekmektedir. Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti hesabı yapılırken beşinci yılın sorunda ilk yatırımın maliyetinin %25'i ya da yaklaşık 1750 USD/kW kadar bir maliyetle FAYP ünitesinin bakıma gireceği ve hücrelerinin değiştirileceği öngörülmüştür. İşletme maliyeti ise 0,035 USD/kWh kabul edilmiştir. İlk yatırım maliyeti en düşük olan ilk seçenekte seviyelendirilmiş elektrik maliyeti güncel şebeke elektrik fiyatının yaklaşık %20'si kadardır. Bu olumlu görüntü 3 ve 4 numaralı seçeneklerde ortadan kalkmaktadır. Her iki simülasyon alternatifi de AVM'nin elektrik satın aldığı güncel şebeke elektrik fiyatı olan 0,25 USD/kWh mertebesinde kalmaktadır.

Yukarıdaki senaryolar karbon salımı açısından değerlendirildiğinde tek yakıt pili ile yapılan simülasyon sonucunda karbon salımında %21,1 azalma sağlanabilmektedir. Ancak sisteme ilave edilen yeni yakıt

pilleri ile yapılan senaryolarda karbon salımındaki azalma kısıtlı kalmıştır. Bunun sebebi ilave edilen yakıt pillerinin atık ısılarından tam olarak faydalanılamamasıdır.

**Tablo 5** FAYP Yakıt pili senaryoları karbon salımı

No	FAYP Yakıt Pili Sayısı	Konvansiyonel Sistem Karbon Salımı	Yakıt Pili Senaryosu Karbon Salımı	Karbon Salımında Azalma
		kgCO <sub>2</sub>	kgCO <sub>2</sub>	%
01	1 Adet	7,519,154.4	5,934,937.2	21,1
02	2 Adet	7,519,154.4	5,557,590.7	26,7
03	3 Adet	7,519,154.4	5,296,929.2	29,6
04	4 Adet	7,519,154.4	5,133,382.5	31,7

#### 4. SONUÇ

Analiz sonuçlarının genel değerlendirilmesi yapıldığında geçtiğimiz 10 yılda yakıt pilleri için yapılan projeksiyonlarının gerçekleşmediği, sistem maliyetlerinin hala oldukça yüksek olduğu görülmektedir. [11] [12] [13] Buna rağmen özellikle güncel elektrik fiyatlarının geldiği nokta itibarıyla yakıt pilleri bir yerinde üretim çözümü olarak yüksek elektrik üretim verimleri nedeniyle ekonomik performans açısından daha anlamlı bir noktaya gelmiştir. Özellikle 1 ve 2 numaralı seçenekler gibi bina ısı ve elektrik talebine uygun boyutlandırılmış bir yakıt pili çözümünün anlamlı bir tablo ortaya çıkarabileceği, karbon salımını ciddi olarak azaltabileceği görülmektedir.

Buna olumlu tabloya rağmen yakıt pili teknolojisinin işletme açısından uzmanlık gerektiren bir teknoloji olduğu unutulmamalıdır. Sistemin nasıl işletileceğine, kurulum detaylarına ve ısı geri kazanım karakteristiklerine göre yukarıda öngörülen maliyetlerinden sapmalar olabileceği dikkate alınmalıdır. Bu nedenle simülasyonlarda öngörülen maliyet figürlerinin en üst bandı dikkate alınmıştır. Bu çalışmada sistemin emre amadelik seviyesinin %95 altında olmadığı kabul edilmiştir. Uzun süreli arızaların ve bakım ihtiyaçlarının ortaya çıkması durumunda yukarıdaki tablonun değişebileceği dikkate alınmalıdır.

#### KAYNAKLAR

- [1] BAŞYAZICI, U., "Ticari binalarda Yakıt Pili Kullanımının Sürdürülebilirlik Perspektifiyle Değerlendirilmesi", IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir. Bildiriler Kitabı, 2010, 173-191
- [2] DODDS, P.E., STAFFELL I., HAWKES, A. D., Li, F., GRÜNEWALD, P., MCDOWALL, W., EKINS, P., "Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review", International Journal of Hydrogen Energy Volume 40, Issue 5, 9 February 2015, Pages 2065-2083
- [3] Comparison of Fuel Cell Technologies, US Department of Energy Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Fact Sheet, 2016
- [4] Fuel Cell Handbook 7th Edition, U.S. Department of Energy, November 2004
- [5] UTC Purcell Model 400 Power Product Data Application Guide, June 2012
- [6] LARMINE, J., DICKS, A. "Fuel Cell Explained, 3rd Edition", John Wiley & Sons. Inc., 2018
- [7] HOLCOMB, F.H, BINDER M.J, TAYLOR W.R, TORREY J.M, WESTERMAN J.F, "Phosphoric Acid Fuel Cells" ERDC/CERL TR-00-33, US Army Corps of Engineers, December 2000
- [8] GALLIERS, S., "Fuel Cell Technology", BSRIA, 2003
- [9] WARREN, J., DAS S., ZHANG A., Manufacturing Process Modeling of 100-400 kWe Combined Heat and Power Stationary Fuel Cell Systems, ORNL/TM-2012/230 Oak Ridge National Laboratory, July 2012
- [10] US Department of Energy, Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program: Multi-year Research, Development and Demonstration Plan. 2017: Washington DC, USA



- [11] DARWİSH M, A., “Building air conditioning system using fuel cell: Case study for Kuwait”, Applied Thermal Engineering Volume 27, Issues 17–18, December 2007, Pages 2869-2876
- [12] SPENDELOW, J., NGUYEN,T., HOUCHİNS,C., MARTİN K,E., PAPAGEORGOPOULOS D., “Medium-scale CHP Fuel Cell System Targets,”, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, March 2012
- [13] Stationary Fuel Cell Cost Trends, An assessment produced by the National Fuel Cell Research Center, May 2018
- [14] Catalog of CHP Technologies, U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership, September 2017
- [15] James, B, D., DeSantis, D, A., “Manufacturing Cost and Installed Price Analysis of Stationary Fuel Cell Systems”, Strategic Analysis Inc, Rev 3 August 2016

## ÖZGEÇMİŞ

### İbrahim Utku BAŞYAZICI

Utku Başyazıcı, 2004 Yılında Yıldız Teknik Üniversitesi makine mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Mezuniyet sonrası çeşitli yerli ve yabancı firmaların Londra ve İstanbul ofislerinde HVAC tasarım mühendisi ve yönetici olarak çalışmıştır. İngiltere, Türkiye ve Türkmenistan’da uçak bakım hangarları, spor yapıları, veri merkezleri ve yüksek binalar, metro sistemleri gibi farklı özelliklerde pek çok projede çalışma şansı yakalamıştır. Sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği konusundaki çalışmalarına paralel olarak 2012 yılında BREEAM uluslararası denetçisi sertifikasını almaya hak kazanmıştır. 2015 yılında çok disiplinli bir tasarım stüdyosu olarak Doxa87 firmasını kurmuştur. Ulusal ve uluslararası kongrelerde yayınlanmış makaleleri ve TTMD tarafından basılmış “Jet Fanlı Otopark Havalandırma Sistemi HAD Analizi Kılavuzu” isimli bir kitabı bulunmaktadır.

### Özden AĞRA

Prof. Dr. Özden AĞRA Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde çeşitli temel makine mühendisliği dersleri vermekte, lisans-lisansüstü öğrencilerin tez çalışmalarına danışmanlık yapmakta ve çeşitli endüstriyel Ar-Ge projelerinde sanayi kuruluşları ile birlikte çalışmaktadır. 2007 yılında Doktora derecesini Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden almış ve o zamandan beri çeşitli kademelerde görev yapmaktadır. Uzmanlık alanları termodinamik, ısı eşanjörleri, iki fazlı akış ve HVAC’dir.