Ticari Binalarda Bileşik Isı Güç Sistemi Olarak Yakıt Pili Uygulaması – Alışveriş Merkezi Örneği

İbrahim Utku BAŞYAZICI
Mak. Müh.
Doxa87
İstanbul
utku.basyazici@doxa87.com
orcid: 0000-0001-6827-6175

Özden AĞRA
Prof. Dr.
Yıldız Teknik Üniversitesi
Makine Fakültesi
Makine Mühendisliği
İstanbul
oagra@yildiz.edu.tr
orcid: 0000-0001-6041-6196

ÖZ

Hidrojen ekonomisine geçiş ile ilgili tartışmalar yakıt pili teknolojisinin binalarda kullanımının değerlendirilmesini de tekrar gündeme getirmiştir. Binalarda kullanılabilecek 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, işletme ve bakım maliyetleri, verim, teknolojik kısıtlar gibi değişkenler dikkate alınarak Fosforik Asit Yakıt Pillerin (FAYP) mevcut bir alışveriş merkezinde uygulanabilirliği değerlendirilmiş ve 400 kW kapasitesinde FAYP yakıt pili için Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyeti (BİEM) 0,05 USD/kWh olarak bulunmuştur. Bu değer karbon salımındaki %21,1 mertebesindeki azalmada dikkate alındığında yakıt pillerinin günümüz koşullarında rekabetçi ve çevre dostu bir çözüm olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler

Yakıt Pili, Fosforik Asit Yakıt Pili, Trijenerasyon, Absorpsiyonlu Soğutma, Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyeti.

Fuel Cell Cogeneration Application in Commercial Buildings: A Shopping Mall Example

ABSTRACT

The widespread adoption of fuel cell technology in buildings has been brought back into agenda as a result of the transition to a hydrogen economy discussion. The development of stationary fuel cells for use in buildings have been progressing slowly in compared to other fuel cell applications. In this regard, the debate over the hydrogen economy can be seen as an opportunity for stationary fuel cell systems. In addition to producing hot water by using waste heat and cooling with absorption chillers, a large-scale fuel cell application may efficiently meet the electrical energy needs of any building. Therefore, fuel cell technology is a high-performance alternative for trigeneration, and cogeneration powered by diesel and gas fuels. Fuel cell emission levels are low comparing the emission figures to those of traditional gas-driven combined heat and power generation systems. If hydrogen is used as a fuel, electricity can be produced with no emissions. Other advantages include the fact that fuel cells are quieter than conventional systems, that their efficiency is not constrained by Carnot efficiency, that their partial efficiency values are high, and that they may be designed in a modular basis. In this study, the feasibility of phosphoric acid fuel cells (PAFC) in an existing shopping mall was evaluated by considering factors including initial installation, operating and maintenance costs, efficiency, and technological limitations. It has been determined that a 400 kW PAFC's Levelized Cost of Energy (LCOE) is 0.05 USD/kWh. Fuel cells have the potential to be a competitive and environmentally benign option in the present scenario, as seen by the 21.1% reduction in carbon emissions.

Keywords

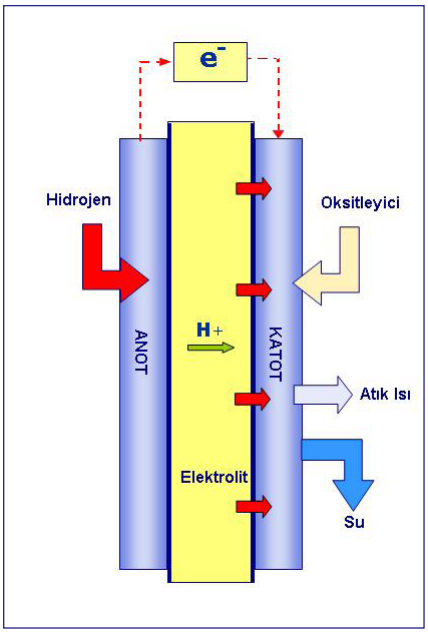
Stationary Fuel Cell, Phosphoric Acid Fuel Cell, Trigeneration, Absorption Cooling, Levelized Cost of Energy

Geliş Tarihi : 24.05.2023
Kabul Tarihi : 22.08.2023

Başyazıcı, İ. U., Ağra, Ö., Ticari Binalarda Bileşik Isı Güç Sistemi Olarak Yakıt Pili Uygulaması – Alışveriş Merkezi Örneği, Tesisat Mühendisliği Dergisi, sayı: 197, sf. 45-58, Temmuz-Ağustos 2023.

1. GİRİŞ

Yakıt pilleri temel olarak kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal cihazlardır. Bu kimyasal reaksiyon bir elektrolitin varlığında gerçekleşir. Şekil 1'de basitleştirilmiş haliyle bir yakıt pilinin en temel bileşenleri olan anot, katot ve elektrolit görülmektedir. Yakıt pilinde gaz fazındaki yakıt (hidrojen) anot tarafından, oksitleyici gaz (oksijen veya hava) ise katot tarafından beslenir. Bunun sonucunda elektrolit üzerinden iyon akışı olurken anottan katoda doğru ise elektron akışı olur ve ısı açığa çıkar. Yüksek sıcaklıklarda çalışan yakıt pillerinde açığa çıkan bu ısıdan kojenerasyon veya trijenerasyon uygulamalarında faydalanılması mümkündür. Bu çalışmada da temel olarak bir yakıt pilinin mevcut bir binaya nasıl entegre edilebileceği, faydalı atık ısıdan nasıl yararlanılabileceği, binanın elektrik talebi, ısıtma ve soğutma profili dengesinin yakıt pili seçimindeki önemi değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Yakıt pili temel çalışma prensibi [1]

Şekil 1'de açıklanan temel prensip, reaksiyon ürünleri, anot ve katot materyalleri, kullanılan elektrolitin tipi gibi detaylar değişebilmekle birlikte, tüm yakıt pilleri için hemen hemen aynıdır. Fakat bina uygulamaları söz konusu olduğunda hidrojenin genel şebeke üzerinden temini genellikle mümkün değildir. Bu nedenle aynı prensiple çalışan fakat hidrojeni karbon temelli yakıtlardan dönüştürerek elde eden yakıt pili uygulamaları geliştirilmiştir. Binalarda kullanılabilecek temel yakıt pili tipleri, avantaj ve dezavantajları aşağıda değerlendirilmiştir.

2. YAKIT PİLİ TİPİ SEÇİMİ

Farklı uygulama özelliklerine, ısı geri kazanımı, bakım ve işletme kolaylığı, verim değerleri açısından çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahip birçok farklı tipte yakıt tipi 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 Pilleri (EKYP) ve Fosforik Asit Yakıt Pilleridir (FAYP). Bu yakıt pili tipleri genel olarak kullanılan elektrolitin tipine göre isimlendirilmiştir. Kullandıkları elektrolitler farklı olmakla birlikte çalışma ilkeleri benzerdir. Bir yakıt pilinin temel çalışma prensibi, iki elementin başka bir bileşik oluşturmak için bağlandığı kimyasal bir reaksiyon etrafında şekillenir. Hidrojenin yakıt olarak kullanılması durumunda, bu genellikle oksidasyon yoluyla bir hidrojen molekülünden elektronların sıyrılmasını ve reaksiyona girerek su, elektrik ve ısı üretmek için yakıt bileşenlerinin 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.

Pahalı platinum katalizör kullanılmasına rağmen farklı ölçeklerdeki çeşitli bina uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan yakıt pili tipi FAYP tipi yakıt pilleridir [8]. 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.

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

Yakıt Pili Tipi	Verim	Çalışma Sıcaklığı	Avantajlar	Dezavantajlar
	%	°C		
Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP)	40	150-200	• Hidrojenin doğalgaz reformasyonu ile elde edilmesi durumunda yakıttaki safsızlıklara duyarlılığı daha azdır • Ticari olarak en olgun teknolojidir • Kojenerasyona uygun	• Pahalı platinum katalizöre sahip • Yakıt olarak doğal gaz kullanılması durumunda sülfüre karşı hassas
Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (EKYP)	50	600-700	• Platinum katalizör gerekmediği için maliyeti göreceli olarak düşüktür • Yüksek verimli • Hidrojen dışı yakıt kullanımı esnekliğine sahip • Kojenerasyona uygun	• Yüksek sıcaklık kaynaklı bileşenlerde korozyon • İlk çalıştırma süreleri uzun • Birim hacme karşılık güç yoğunluğu düşük
Katı Oksitli Yakıt Pilleri (KOYP)	60	500-1000	• Yüksek verim • Yakıt esnekliğine sahip • Kojenerasyona uygun • Katı elektrot kullanıyor	• Yüksek sıcaklık kaynaklı bileşenlerde korozyon • İlk çalıştırma süreleri uzun • Dur kalk tipi çalışma seçeneği kısıtlı

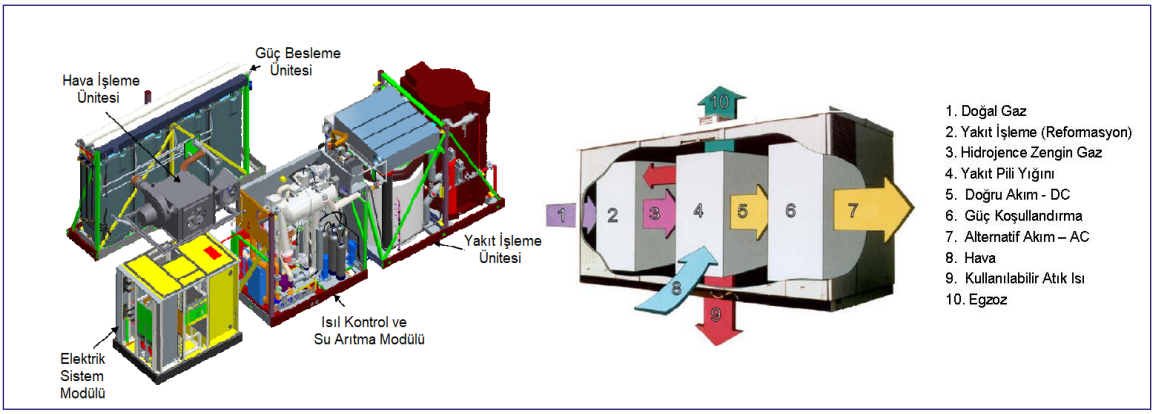
3. FOSFORİK ASİT YAKIT PİLLERİ

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 [8]. 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 açısında temel problem bu reaksiyonun temel girdisi olarak kullanılan hidrojenin günümüz koşullarında genel bir servis sağlayıcı veya şebekeden temininin kısıtlı veya mümkün olmamasıdır. Binalar söz konusu olduğunda hidrojen genellikle, yaygın doğal gaz şebekesinden faydalanılarak doğal gazdan dönüştürülerek elde edilir. Şekil 2'de hidrojeni reformasyon yoluyla doğalgazdan elde eden ticari FAYP tipi bir yakıt pili uygulamasının bileşenleri verilmiştir. Bu bileşenlerin isimlendirmesi ve detayları yakıt pili tiplerine göre değişiklik göstermekle birlikte tipik bir ticari yakıt pili; yakıt işleme ve sülfür ayırma ünitesi, güç besleme ünitesi, hava işleme ünitesi ısıl kontrol ve su artıma sistemlerinden oluşur. Şekil 2'de detayları verilen FAYP'de doğalgazı dönüştürerek hidrojen eldesiyle elektrokimyasal bir reaksiyon sonu elektrik üreten bir cihazdır. Şekil 1'de basitleştirilen kimyasal reaksiyon FAYP tipi bir yakıt pilinde fosforik asit elektrolit içerisinde platinyum bir katalizörün varlığından gerçekleşir. FAYP yakıt pillerinin temel maliyet unsurlarından birisi de bu platinyum katalizördür. Bu reaksiyon sonucunda da yine ısı açığa çıkar. Bu ısı kullanılmadığı durumda atmosfere atılmalıdır. Şekil 2 üzerinden proses aşağıdaki sırayla izlenebilir:

1. Doğalgaz girişi
2. Doğalgazın reformasyon yoluyla hidrojene dönüştürülmesi
3. Hidrojence zengin gaz çıkışı
4. Elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleştiği yakıt pili hücresi
5. Reaksiyon sonucunda oluşan doğru akımın güç koşullandırma ünitesine iletimi
6. Güç koşullandırma ünitesinde (inverter) doğru akımın alternatif akıma çevrilmesi
7. Alternatif akımın bina şebekesine beslenmesi
8. Hava girişi (4 aşamasında reaksiyona dahil olur)
9. Kullanılabilir atık ısı
10. Atmosfere atılan atık ısı (8.aşamada kullanılmaması halinde)



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

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 gazı veya LPG 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 [8]. 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 gerçekleştirmektedir.

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



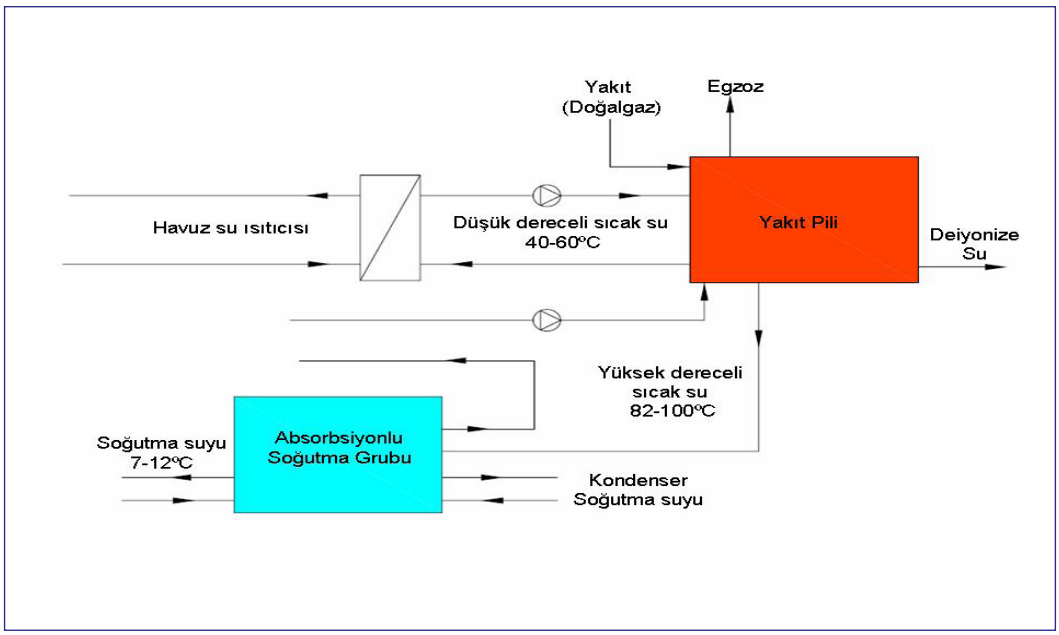
Şekil 3. 200 kWe Kapasitesine sahip FAYP tipi yakıt pili [16]

edilmesi kontrol sisteminin performansı ile ilgilidir. Yakıt pillerinin sık devreye girip çıkması yakıt pilinin hücre yapısına zarar vererek ömrünü azalttığından istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle yakıt pilleri yüksek performansta çalışmayı sağlayacak kontrol sistemlerine ihtiyaç duyarlar. 40000 saat kadar ömür öngörülen yakıt pillerinin bu süreçten sonra ana bakım maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle yakıt pili hücresinin yenilenmesi veya değiştirilmesi gerekir [8] [5].

FAYP tipi yaktı 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. Şekil 3'te de görüldüğü gibi modüler tasarımları nedeniyle kapasite kolaylıkla ölçeklenebilmektedir. FAYP tipi yakıt pillerinin uygulandığı binalar arasında hastaneler, yurt binaları, askeri barakalar, kapalı yüzme havuzları, ofis binaları, endüstriyel laboratuvarlar sıralanabilir [7]. Günümü bina uygulamaları için alt ısıl değere göre %42±2 mertebesinde elektrik üretim verimiyle çalışan, 400 kW 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 işletilmiş olan 11 MW'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 ºC'dir.
- Soğutucu olarak hava veya su kullanılabilir.
- Fosforik asitli yakıt pillerinin CO_2 kontaminasyonuna duyarlılıkları azdır. Buna karşılık yakıt pilinin temel bir unsuru olan platinyum katalizöre zarar verdiğinden karbonmonoksite karşı daha hassastırlar.
- Şebeke doğalgazı, arıtma prosesi sonucu elden edilen metan, LNG gibi hidrojen dışı yakıtların kullanılması durumunda kontaminasyon duyarlılıklarının az olması avantajlıdır. Bu özellikle yakıt reformasyonu maliyetinin düşmesine yardımcı olurken arıtma tesislerinden elde edilen yüksek kontaminasyon riski bulunan çeşitli gazlar ile de çalışabilme olanağı sağlar. Arıtma tesislerinde açığa çıkan gazlar hacimsel olarak yaklaşık %65-70 metan (CH_4), %25-30 oranında karbondioksit (CO_2), az miktardan sülfür bileşenleri ile diğer gazlardan oluşur.
- Düşük ve yüksek sıcaklık derecesinde ısı geri kazanımı mümkündür. Bu sayede Şekil 4'te şematik olarak gösterildiği gibi absorpsiyonlu soğutma veya direkt ısıtma amaçlı faydalı atık ısının kullanımı ya da trijenerasyon uygulamasının gerçekleştirilmesi mümkün olmak-



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

tadır. Atık ısının kullanılmaması durumunda atmosfere direkt egzoz ile tahliye edilmesi gereklidir.

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 kWe kapasitesindeki yakıt pilleri için 2012 yılında yapılan 1500 $/kWe [9] maliyet projeksiyonu hala gerçekleşmemiştir [2]. Bu rapor öncesinde hazırlanan çeşitli maliyet projeksiyonu çalışmalarında da optimum bir kapasite maliyet kıstası olarak bu rakam belirtilmesine rağmen arzu edilen ticari yaygınlığa ulaşılamaması üretim maliyetlerinin düşmesini engellemektedir. 400 kW'lık fosforik asit yakıt pilleri için ekipman maliyeti 4000-5000 $/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 bulunduklarından 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 günümüzde 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. Yakıt pillerinin binalarda kullanımı açısından yerel koşullar değerlendirildiğinde, bu uygulamanın ülkemize özgü avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmaktadır. Yerel olarak geniş bir hidrojen şebeke altyapısı olmamasına rağmen hidrojeninin yenilenebilir enerji kaynakları yardımıyla elektroliz yoluyla elde edilmesi ve bu tesislerin yakıt pilleri ile entegrasyonu değerlendirilebilir. Yakıt pillerinin binalarda kullanımı fikren olgunluğa erişmesine rağmen uygulama aşamasında 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 379.787m² 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 teknik özellikleri, yakıt pili sayısı, seçimi ve yakıt pilinin mevcut binaya entegrasyonu ile ilgili detaylar aşağıda verilmiştir.

4.1. Analiz Metodolojisi ve Araçlar

Vaka analizi olarak ele alınan alışveriş merkezi kompleksinde, FAYP tipi yakıt pillerinin kullanımının uygunluğunun değerlendirilebilmesi için öncelikli olarak mevcut konvansiyonel sistemin elektrik enerjisi tüketimi, ısıtma ve soğutma talebi incelenmiş ve mevcut durumu temsil eden bir baz senaryo ortaya çıkarılmıştır. Bu baz senaryo ile mevcut sisteme 1-4 adet arasında 400 kW FAYP tipi yakıt pili ilave edilen alternatif senaryolar enerji tüketimleri, karbon salımındaki azalma miktarları açısından kıyaslanmıştır. Her bir senaryo yakıt pillerinden sağlanabilir faydalı atık ısı miktarına göre boyutlandırılmış sıcak su tahrikli, COP değeri 0,7 olan absorpsiyonlu soğutma gruplarını da içermektedir.

Tablo 2. Mevcut Sisteme FAYP Entegrasyonu İçin Alternatifler

No	İşletme Senaryoları
0	Mevcut konvansiyonel sistem
1	Konvansiyonel sistem + 1 Adet 400 kW FAYP Yakıt Pili + 1 Adet 140 kW Absorpsiyonlu Soğutma Grubu
2	Konvansiyonel sistem + 2 Adet 400 kW FAYP Yakıt Pili + 1 Adet 316 kW Absorpsiyonlu Soğutma Grubu
3	Konvansiyonel sistem + 3 Adet 400 kW FAYP Yakıt Pili + 1 Adet 387 kW Absorpsiyonlu Soğutma Grubu
4	Konvansiyonel sistem + 4 Adet 400kW FAYP Yakıt Pili + 1 Adet 545 kW Absorpsiyonlu Soğutma Grubu

Optimum işletme senaryosu ise "Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyeti" metodu ile belirlenmiştir. Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyeti (BİEM) elektrik üreten sistemlerin yatırım planlaması yapılırken alternatifleri kıyaslamak için kullanılan bir ekonomik analiz yöntemidir. BİEM bir enerji santralinin ömrü boyunca elektrik üretiminin ortalama net bugünkü maliyetinin bir ölçüsüdür [17]. BİEM genel ifadesi Denklem 1'de verilmiştir.

$$\text{BİEM} = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

I_t : t yılındaki ilk yatırım maliyeti (USD)

M_t : t yılındaki İşletme ve bakım maliyeti (USD)

F_t : t yılındaki yakıt maliyeti (USD)

E_t : t yılındaki toplam elektrik üretimi (kWh)

r : İskonto oranı (%)

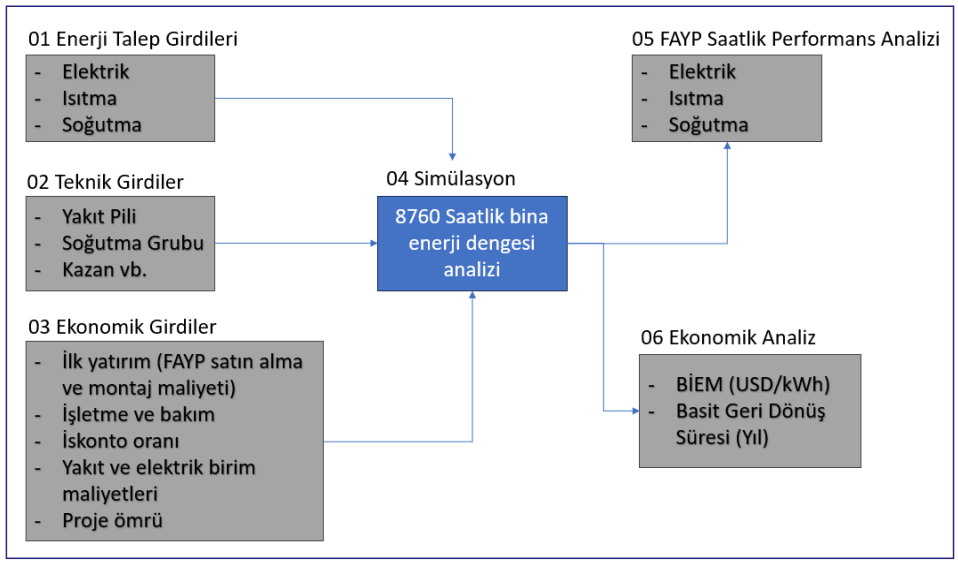
n : Projeye veya santralin ömrü (yıl)

Sistemin ekonomik analizi için kullanılan ikinci kriter ise basit geri dönüş süresidir. Basit geri dönüş süresi bir enerji verimliliği uygulamasının marjinal ek maliyetinin, bu uygulama yoluyla elde edilen yıllık enerji tasarrufu değerine bölünmesiyle elde edilen süre olarak tanımlanabilir [18].

Mevcut bina enerji simülasyon yazılımları yakıt pili gibi sistemleri direkt olarak modelleyememekte veya kısıtlı olarak modelleyebilmektedir [19], [20]. Bu nedenle her bir senaryoyu saatlik elektrik, ısıtma ve soğutma talebini dikkate alarak modelleyebilecek Microsoft Excel tabanlı simülasyon modülü geliştirilmiştir. Simülasyon modülünün genel çözüm mimarisi Şekil 5'te verilmiştir. FAYP simülasyon modülü saatlik olarak girilen enerji talebinin ne kadarının konvansiyonel sistem ne kadarının FAYP ile karşılanabileceğini bulmaktadır. Dolayısıyla FAYP simülasyon modülü yakıt pili tarafından üretilen elektrik enerjisi miktarını bina enerji talebine göre hesaplamakta ve üretilen elektrik miktarına göre oluşan faydalı atık ısının ne kadarının binanın iklimlendirme sistemi üzerindeki yükü azaltabileceğini bulmaktadır.

4.2. 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 ve 1 adet düşük kapasiteli doğalgaz yakan 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 3 ve 4'te verilmiştir.



Şekil 5. FAYP Simülasyon modülü

Tablo 3. Soğutma Grupları

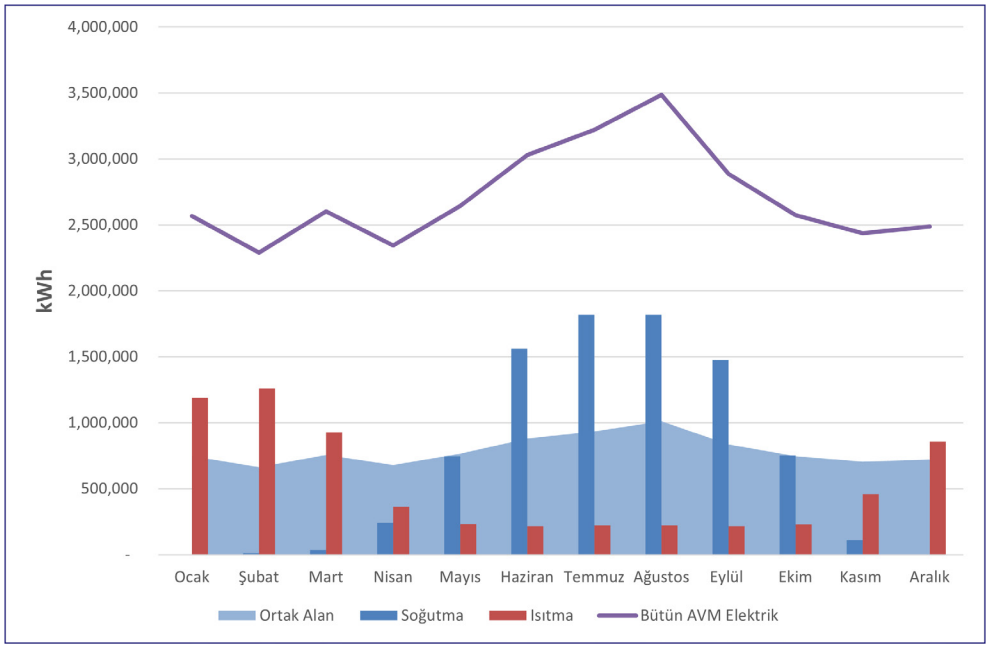
Soğutma Grubu	Soğutma Kapasitesi	Kompresör Gücü	COP	IPLV
	kW	kW		
Santrifüj Soğutma Grubu 01	3330	565	5,89	8,15
Santrifüj Soğutma Grubu 01	3330	565	5,89	8,15
Vidalı Soğutma Grubu 03	988	231	4,28	5,54

Tablo 4. Sıcak Su Kazanları

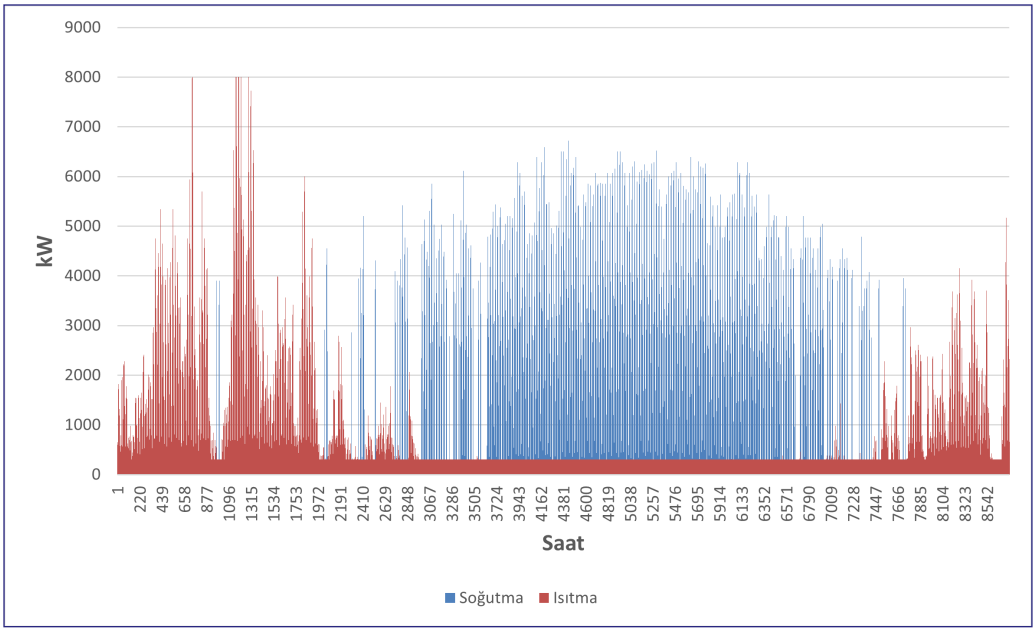
Sıcak Su Kazanı	Isıtma Kapasitesi	Brülör Kapasitesi	Verim
	kW	kW	%
Kazan 01	3500	513-5837	93,6
Kazan 02	3500	513-5837	93,6
Kazan 03	1000	90-1674	92,8

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 sezonunda kullanılan 1000kW kapasitesinde bir kazan seçimi yapılmıştır. Alışveriş merkezine ait kiralanabilir alanlar ve tüm kompleksin parçası olan konutların elektrik enerjisi, ısıtma ve soğutma talebi tek merkezden sağlanmakta ve yönetilmektedir. Kiralanabilir alanlara ait enerji tüketimleri AVM yönetimi tarafından ölçülerek kiracılara paylaştırılmaktadır.

Herhangi bir kojenerasyon sisteminden tam anlamıyla faydalanılabilmesi için sisteminin atık ısının kullanılabileceği 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 Şekil 6'da verilen aylık ve Şekil 7'de verilen saatlik ısıtma ve soğutma profili incelendiğinde bu atık ısının kullanılabileceği sürekli bir ısıtma talebi olduğu görülmektedir. Bu sürekli talep tüm yapı kompleksinin parçası olan konutların sıcak su ihtiyacından



Şekil 6. Aylık enerji talep profili (Isıtma + Soğutma + Elektrik)



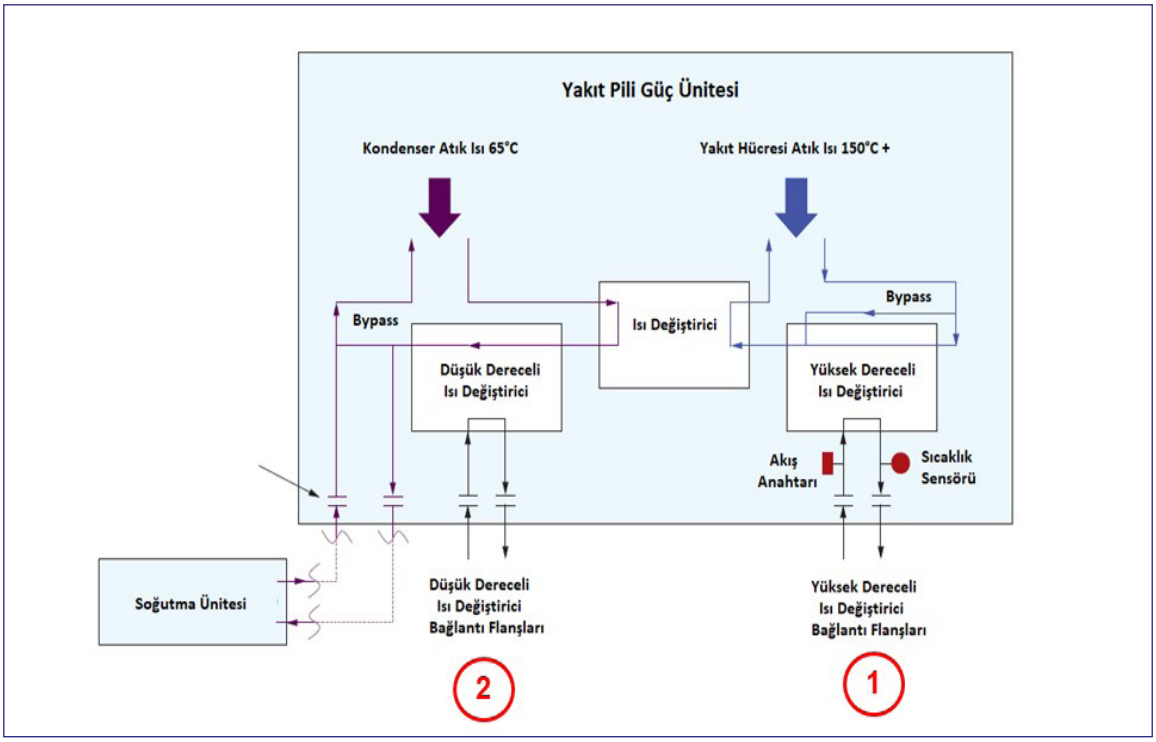
Şekil 7. Saatlik ve ısıtma soğutma talep profili

kaynaklanmaktadır. Mevcut konvansiyonel çözümde bu talebi yaz sezonu çalışan sıcak su kazanı karşılamaktadır. FAYP kullanılması durumunda bu talep yakıt pilinden sağlanan atık ısı ile karşılanabilecektir. Burada incelenen saatlik ısıtma, soğutma ve elektrik talebi verileri aynı zamanda FAYP simülasyon modülünün de ana girdisidir.

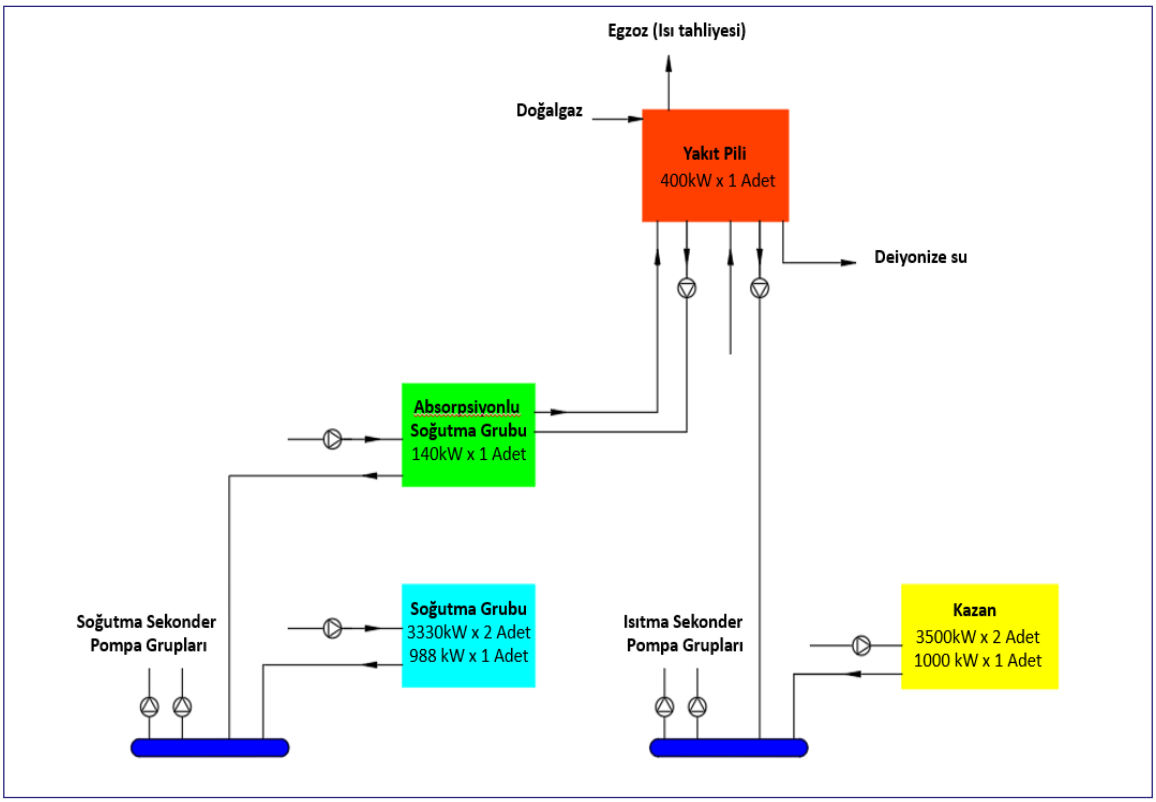
4.3. FAYP Tipi Yakıt Pilinin Konvansiyonel Sisteme Entegrasyonu

Bu çalışmada analizler 400 kW elektrik üretme kapasitesine sahip FAYP tipi yakıt pilinin performans karakteristikleri temel alınarak yapılmıştır. FAYP tipi yakıt pili 400 kW elektrik üretirken 1066 kW (üst ısıl değere göre) doğalgaz girdisine ihtiyaç durmaktadır. Şekil 8, 400 kW kapasitesindeki FAYP tipi yakıt pilinin güç ünitesinin iç yapısını şematize etmektedir. Doğalgaz yakıtlı FAYP tipi yakıt pili doğalgazı öncelikle reformasyon prosesi ile hidrojene çevirmekte reaksiyon sonucunda elektrik akımı, su ve reformasyon prosesinden kaynaklı CO_2 açığa çıkmaktadır. FAYP tipi yakıt pili iki farklı sıcaklık derecesinde ısı geri kazanım olanağı sunmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki atık ısı kaynağı yaklaşık olarak 190 kW kapasitesinde 4,1 l/s debide (giriş su sıcaklığı 79 °C, çıkış su sıcaklığı 90 °C) ısı transferine olanak vermektedir. Düşük sıcaklıktaki ısı kaynağı ise yine 3,15 l/s debide (giriş su sıcaklığı 60 °C, çıkış su sıcaklığı 80 °C) yaklaşık 264 kW kapasitesinde ısı transferine izin vermektedir [5]. Yüksek sıcaklıktaki atık ısının direk olarak kullanılmaması durumunda FAYP yakıt pili yüksek sıcaklıktaki tüm atık ısıyı dahili eşanjörü yardımıyla düşük sıcaklıkta atık ısıya çevirmektedir. Yakıt pilinin dahili eşanjörlerinin sıcak tarafı daima sıcaktır. Bu eşanjörlerden transfer edilecek ısı miktarını yakıt pilinin kendisi kontrol etmemektedir. Transfer edilebilecek ısının miktarını eşanjörün mevcut kapasitesi dahilinde kullanıcı belirlemektedir. Yakıt pilinde gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonucu açığa çıkan atık ısıdan faydalanılmaması durumunda FAYP kendi soğutma ünitesi ile bu ısıyı atmosfere atmak zorundadır. Şekil 8'de şematize edilen sistem tamamen FAYP yakıt pilinin iç yapısı ile ilgilidir. Kullanıcı yakıt pilinin "1" numaralı yüksek veya "2" numaralı düşük dereceli ısı değiştiricisi bağlantı flanşlarını kullanarak ihtiyacına göre sıcak su, ısıtma veya absorpsiyonlu soğutma talebini karşılayabilir. Şekil 3'te 200kW kapasiteli bir FAYP yakıt pilinin gerçek uygulama ve bağlantı detayları görülmektedir.

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.



Şekil 8. Yakıt pili ısı geri kazanım seçenekleri [5]



Şekil 9. Senaryo 1 basitleştirilmiş akış şeması

Toplam yakıt pili sayısı ve ilgili senaryoya göre seçilen absorpsiyonlu soğutma gruplarının kapasiteleri Tablo 2'de verilmiştir. Absorpsiyonlu soğutma grupları tek etkilidir ve tam yük COP değerleri 0,7 olarak seçilmiştir. Buna göre binada soğutma talebi olması durumunda yüksek dereceli 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. Yakıt pilinin düşük sıcaklık tarafından da mevcut sisteme bağlantı yine "2" numaralı bağlantı flanşından sağlanacaktır. Binada soğutma talebi olmaması durumunda ise tüm atık ısı yine mahal ısıtmasında veya sıcak su ısıtma talebinin karşılanmasında kullanılacaktır. Tablo 2'de verilen "Senaryo 01" için basitleştirilmiş entegrasyon şeması Şekil 9'da gösterildiği gibidir.

FAYP hesaplama modülü seçilen senaryoya göre ısıtma, soğutma ve elektrik talebinin ne kadarının yakıt pili tarafından karşılanabileceğini bularak binanın saatlik enerji dengesini hesaplamaktadır. Şekil 9 ve 10'da verilen hesaplama modülü çıktı ekranlarında yılın ilk günü Senaryo 01'e göre analiz yapılmıştır. Buna göre 400 kW kapasitesindeki yakıt pili 12:00-21:00 saatleri haricinde binanın tüm elektrik talebini karşılayabilmektedir. Bu saat aralığında FAYP yakıt pili tarafından karşılanamayan talep şebekeden çekilecektir. Aynı şekilde FAYP yakıt pili 12:00-21:00 saatleri haricinde bina ısıtma talebinin yaklaşık yarısını karşılayabilmektedir. Geri kalan ısıtma talebi ise mevcut kazanlar tarafından sağlanacaktır. Bina kış işletmesinde olduğundan soğutma talebi yoktur bu nedenle absorpsiyonlu soğutma devrede değildir.

Aynı gün için "Senaryo 02" yani 2 Adet 400kW FAYP yakıt pili ile analiz yapıldığında ikinci yakıt pilinin gün içerisinde yoğun saatlerde devreye girdiği, gece saatlerinde elektrik talebi yeterli olmadığından kapalı kaldığı görülmektedir. Bu ikinci durumda ele alınan gün için FAYP yakıt pili ile karşılanamayan ısı ve elektrik talebi oldukça azalmasına rağmen ikinci yakıt pili sürekli devrede tutulamamaktadır.

4.4. Yakıt Pili Sayısı Ve Sistem İşletme Maliyetinin Belirlenmesi

Bu çalışmada ele alınan 400 kW FAYP elektrik üretim kapasiteli yakıt pilleri, Şekil 13'de gösterildiği gibi seri bağlanmış 100 kW kapasiteli hücrelerden oluşmaktadır. Bu paket ünitelerde gerektiğinde seri bağlanarak toplam kapasite arttırılabilmektedir. Tablo 2'de verilen işletme senaryoları FAYP yakıt pillerinin ölçeklenebilir olması dikkate alınarak oluşturulmuştur.

Yakıt pilinden sağlanan atık ısıdan tam olarak faydalanabilmek için tesisin baz ısıtma, soğutma ve elektrik yükleri dikkate alınarak 1-4 adet arasında değişen sayılarda FAYP tipi yakıt pili kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonların temel amacı ele alınan binanın talep profili dikkate alınarak kullanılabilecek optimum FAYP sayısının ne olması gerektiğini belirlemektir.

Simülasyonlar kurulu kapasite başına 7000 USD/kW maliyet değeri temel alınarak yapılmıştır. Bu rakam ekipman, montaj, işçilik ve absorpsiyonlu soğutma gibi yan sistemler dahil olmak üzere toplam maliyeti yansıtmaktadır. Tablo 5'te görüldüğü gibi dört adet yakıt pili kullanılması durumunda bazı pik yük talepleri hariç olmak üzere tesisin hemen hemen tüm elektrik ihtiyacı yakıt pilleri ile karşılanabilmektedir. Fakat bu durumda Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyeti ciddi oranda artmaktadır. Bina baz elektrik yükünü karşılayacak şekilde tek FAYP ünitesi kullanılması durumunda ise yakıt pilinin tüm atık ısısından ısıtma ve soğutmada faydalanılabilmektedir. Bu durumda basit geri dönüş süresi 3,3 yıl çıkmaktadır.

Tablo 5. FAYP Yakıt Pili Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti ve Geri Dönüş Süresi

No	FAYP Yakıt Pili Sayısı	Yıllık Elektrik Talebi	Yakıt Pili Tarafından Üretilen Elektrik	Birime İngirgenmiş 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

			Bina Talebi			Elektrik Üretimi					
Ay	Gün	Saat	Bina Elektrik Talebi	Bina Soğutma Talebi	Bina Isıtma Talebi	Yakıt Pili 1	Yakıt Pili 2	Yakıt Pili 3	Yakıt Pili 4	Çalışan Yakıt Pili Sayısı	Karşılanamayan Elektrik Talebi
Ocak	1	-	330 kW	0 kW	654 kW	330 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	1	330 kW	0 kW	599 kW	330 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	2	324 kW	0 kW	543 kW	324 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	3	324 kW	0 kW	456 kW	324 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	4	312 kW	0 kW	459 kW	312 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	5	312 kW	0 kW	429 kW	312 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	6	318 kW	0 kW	563 kW	318 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	7	360 kW	0 kW	1,345 kW	360 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	8	390 kW	0 kW	1,720 kW	390 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	9	450 kW	0 kW	1,823 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	50 kW
Ocak	1	10	558 kW	0 kW	1,412 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	158 kW
Ocak	1	11	666 kW	0 kW	1,548 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	266 kW
Ocak	1	12	1,009 kW	0 kW	1,425 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	609 kW
Ocak	1	13	1,434 kW	0 kW	1,008 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	1,034 kW
Ocak	1	14	1,459 kW	0 kW	1,188 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	1,059 kW
Ocak	1	15	1,483 kW	0 kW	966 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	1,083 kW
Ocak	1	16	1,495 kW	0 kW	1,074 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	1,095 kW
Ocak	1	17	1,513 kW	0 kW	1,126 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	1,113 kW
Ocak	1	18	1,525 kW	0 kW	1,140 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	1,125 kW
Ocak	1	19	1,519 kW	0 kW	1,323 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	1,119 kW
Ocak	1	20	1,477 kW	0 kW	1,305 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	1,077 kW
Ocak	1	21	1,393 kW	0 kW	787 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	993 kW
Ocak	1	22	709 kW	0 kW	572 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	309 kW
Ocak	1	23	468 kW	0 kW	515 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	68 kW
Ocak	1	-	402 kW	0 kW	515 kW	400 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	2 kW

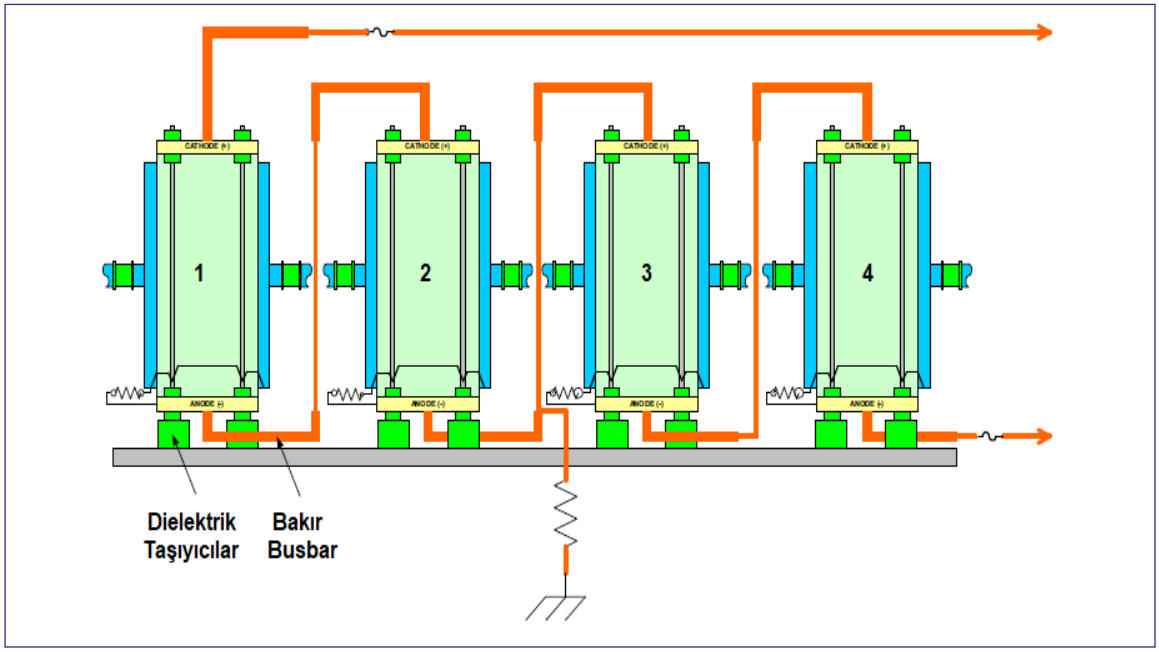
Şekil 10. FAYP Hesaplama Modülü Ekranı (Elektrik - Kış Sezonu - Senaryo 01)

			Bina Talebi			Doğalgaz Tüketimi				Isı Geri Kazanım Seçenekleri			
Ay	Gün	Saat	Bina Elektrik Talebi	Bina Soğutma Talebi	Bina Isıtma Talebi	Yakıt Pili 01	Yakıt Pili 02	Yakıt Pili 03	Yakıt Pili 04	Absopsiyonlu Soğutma	Karşılanamayan Soğutma Talebi	Isı Geri Kazanımı	Karşılanamayan Isıtma Talebi
Ocak	1	-	330 kW	0 kW	654 kW	837 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	345 kW	309 kW
Ocak	1	1	330 kW	0 kW	599 kW	837 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	345 kW	255 kW
Ocak	1	2	324 kW	0 kW	543 kW	819 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	335 kW	208 kW
Ocak	1	3	324 kW	0 kW	456 kW	819 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	335 kW	121 kW
Ocak	1	4	312 kW	0 kW	459 kW	783 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	315 kW	144 kW
Ocak	1	5	312 kW	0 kW	429 kW	783 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	315 kW	114 kW
Ocak	1	6	318 kW	0 kW	563 kW	800 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	325 kW	238 kW
Ocak	1	7	360 kW	0 kW	1,345 kW	932 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	393 kW	952 kW
Ocak	1	8	390 kW	0 kW	1,720 kW	1,031 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	439 kW	1,282 kW
Ocak	1	9	450 kW	0 kW	1,823 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	1,370 kW
Ocak	1	10	558 kW	0 kW	1,412 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	959 kW
Ocak	1	11	666 kW	0 kW	1,548 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	1,095 kW
Ocak	1	12	1,009 kW	0 kW	1,425 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	972 kW
Ocak	1	13	1,434 kW	0 kW	1,008 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	555 kW
Ocak	1	14	1,459 kW	0 kW	1,188 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	735 kW
Ocak	1	15	1,483 kW	0 kW	966 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	513 kW
Ocak	1	16	1,495 kW	0 kW	1,074 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	620 kW
Ocak	1	17	1,513 kW	0 kW	1,126 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	673 kW
Ocak	1	18	1,525 kW	0 kW	1,140 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	686 kW
Ocak	1	19	1,519 kW	0 kW	1,323 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	870 kW
Ocak	1	20	1,477 kW	0 kW	1,305 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	852 kW
Ocak	1	21	1,393 kW	0 kW	787 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	333 kW
Ocak	1	22	709 kW	0 kW	572 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	119 kW
Ocak	1	23	468 kW	0 kW	515 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	61 kW
Ocak	1	-	402 kW	0 kW	515 kW	1,064 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	453 kW	61 kW

Şekil 11. FAYP Hesaplama Modülü Ekranı (Isıtma - Kış Sezonu - Senaryo 01)

			Bina Talebi			Elektrik Üretimi					
Ay	Gün	Saat	Bina Elektrik Talebi	Bina Soğutma Talebi	Bina Isıtma Talebi	Yakıt Pili 1	Yakıt Pili 2	Yakıt Pili 3	Yakıt Pili 4	Çalışan Yakıt Pili Sayısı	Karşılanamayan Elektrik Talebi
Ocak	1	-	330 kW	0 kW	654 kW	330 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	1	330 kW	0 kW	599 kW	330 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	2	324 kW	0 kW	543 kW	324 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	3	324 kW	0 kW	456 kW	324 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	4	312 kW	0 kW	459 kW	312 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	5	312 kW	0 kW	429 kW	312 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	6	318 kW	0 kW	563 kW	318 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	7	360 kW	0 kW	1,345 kW	360 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	8	390 kW	0 kW	1,720 kW	390 kW	0 kW	0 kW	0 kW	1	0 kW
Ocak	1	9	450 kW	0 kW	1,823 kW	400 kW	50 kW	0 kW	0 kW	2	0 kW
Ocak	1	10	558 kW	0 kW	1,412 kW	400 kW	158 kW	0 kW	0 kW	2	0 kW
Ocak	1	11	666 kW	0 kW	1,548 kW	400 kW	266 kW	0 kW	0 kW	2	0 kW
Ocak	1	12	1,009 kW	0 kW	1,425 kW	400 kW	400 kW	0 kW	0 kW	2	209 kW
Ocak	1	13	1,434 kW	0 kW	1,008 kW	400 kW	400 kW	0 kW	0 kW	2	634 kW
Ocak	1	14	1,459 kW	0 kW	1,188 kW	400 kW	400 kW	0 kW	0 kW	2	659 kW
Ocak	1	15	1,483 kW	0 kW	966 kW	400 kW	400 kW	0 kW	0 kW	2	683 kW
Ocak	1	16	1,495 kW	0 kW	1,074 kW	400 kW	400 kW	0 kW	0 kW	2	695 kW
Ocak	1	17	1,513 kW	0 kW	1,126 kW	400 kW	400 kW	0 kW	0 kW	2	713 kW
Ocak	1	18	1,525 kW	0 kW	1,140 kW	400 kW	400 kW	0 kW	0 kW	2	725 kW
Ocak	1	19	1,519 kW	0 kW	1,323 kW	400 kW	400 kW	0 kW	0 kW	2	719 kW
Ocak	1	20	1,477 kW	0 kW	1,305 kW	400 kW	400 kW	0 kW	0 kW	2	677 kW
Ocak	1	21	1,393 kW	0 kW	787 kW	400 kW	400 kW	0 kW	0 kW	2	593 kW
Ocak	1	22	709 kW	0 kW	572 kW	400 kW	309 kW	0 kW	0 kW	2	0 kW
Ocak	1	23	468 kW	0 kW	515 kW	400 kW	68 kW	0 kW	0 kW	2	0 kW
Ocak	1	-	402 kW	0 kW	515 kW	400 kW	2 kW	0 kW	0 kW	2	0 kW

Şekil 12. FAYP Hesaplama Modülü Ekranı (Elektrik - Kış Sezonu - Senaryo 02)



Şekil 13. 400 kW FAYP Yakıt pili hücre yapısı [5]

Tablo 6. FAYP Yakıt Pili Senaryoları Karbon Salımı

No	FAYP Yakıt Pili Sayısı	Konvansiyonel Sistem Karbon Salımı	Yakıt Pili Senaryosu Karbon Salımı	Karbon Salımında Azalma
		$kgCO_2$	$kgCO_2$	%
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

Birime indirgenmiş elektrik maliyeti (BİEM) hesapları 10 yıllık periyot için yapılmıştır. FAYP yakıt pillerinin 40000 çalışma saati sonunda yakıt hücrelerinin değiştirilmesi gerekmektedir. BİEM 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 mertebesinin üzerinde kalmaktadır. Maliyet analizinde iskonto oranı hesapların USD bazlı olduğu dikkate alınarak %5 olarak alınmıştır.

Yukarıdaki senaryolar karbon salımı açısında değerlendirildiğinde ise tek yakıt pili ile yapılan simülasyon sonucunda karbon salımında %21,1 azalma sağlanabildiği görülmektedir. Ancak sisteme ilave edilen yeni yakıt pilleri ile yapılan simülasyonlarda karbon salımındaki azalma kısıtlı kalmıştır. Bunun sebebi ilave edilen yakıt pillerinin atık ısılarından tam olarak faydalanılamamasıdır. Konvansiyonel sistemin enerji tüketimi ve karbon salımı hesaplamaları ısıtma, soğutma ve elektrik talebi kaynaklı emisyon ve tüketimler dahil olarak hesaplanmıştır.

5. SONUÇ

Analiz sonuçlarının genel değerlendirilmesi yapıldığında geçtiğimiz 10 yılda yakıt pilleri için yapılan projeksiyonlarının gerçekleşmediği, sistem maliyetlerinin hala oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Buna rağmen özellikle güncel

elektrik fiyatlarının geldiği nokta itibariyle yakıt pilleri yüksek elektrik üretim verimleri nedeniyle ekonomik performans açısından daha anlamlı bir noktaya gelmiştir. FAYP simülasyon sonuçları incelendiğinde özellikle 1 ve 2 numaralı seçeneklerin anlamlı bir tablo ortaya çıkarabildiği, karbon salımını ciddi olarak azaltabildiği görülmektedir. Bu seçenekler için BİEM değerleri rekabetçi gözükmektedir. Aynı şekilde karbon salımı açısından da 1 ve 2 numaralı seçenekler sırasıyla %21,1 ve %26,7 oranında karbon salımını azaltabilmektedir.

Bu 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, 3nd Edition", John Wiley & Sons. Inc., 2018

[7] Holcomb, F.H., Binder M.J., Taylor W.R., Torrey J.M., Westerman J.F., "Phosproric 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] Darwis 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., Houchin, C., Marti 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.

[16] US Department of Energy, Fuel Cells Technologies Program Case Study: Fuel Cells Provide Combined Heat and Power at Verizon's Garden City Central Office, 2010.

[17] Scwarz, P.M., "Energy Economics", 1st Edition, Routledge, 2018.

[18] Conservation of Fuel and Power, Approved Document L Volume 2: Buildings Other Than Dwellings, 2010.

[19] Vesanen, T., Klobut K., Shemeikka J., "Implementation of a Fuel Cell System Model into Building Energy Simulation Software IDA-ICE", J. Fuel Cell Sci. Technol. Nov 2007, 4(4): 511-515.

[20] Henderson H. I., Karambakkam B., Boyer J., Staudt R., "An Hourly Building Simulation Model Aimed at Fuel Cell Applications", ASME 2006 4th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, 2006 Pages 741-750.