

YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİNİN TİCARİ BİNALARDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

İbrahim Utku BAŞYAZICI

ÖZET

Sınırlı fosil enerji kaynaklarına rağmen artan enerji talebine paralel olarak ortaya çıkan çevresel problemler alternatif enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu kılmaktadır. İnsanoğlu artık gündelik yaşamına enerji verimliliği ilkesinin yerine sürdürülebilirlik kavramı sokmak ve bu perspektifle çevreye duyarlı enerji teknolojilerini pratik yaşama uyarlamak zorundadır. Yakıt pili teknolojisi de bu bakış açısıyla incelenmesi gereken bir teknolojidir.

Yakıt pili teknolojisinin temel ilkelerinin ortaya konulmasının üzerinden 100 yıldan fazla zaman geçmesine rağmen binalarda kullanılacak sabit yakıt pillerinin gelişimi diğer yakıt pili uygulamalarına kıyasla yavaş ilerlemektedir. Orta ve küçük ölçekte kurulabilecek bir yakıt pili sistemi 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 trijenerasyon teknolojisine yüksek performanslı bir alternatif oluşturur. Klasik gaz yakıclı 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 imkanı belirtilmesi gereken diğer avantajlardır.

Bu çalışmada ilk kurulum ve işletme maliyetleri, enerji verimliliği, teknolojik kısıtlamalar gibi tasarım parametreleri ve sürdürülebilirlik prensibi doğrultusunda yakıt pili teknolojisinin bina iklimlendirme ve güç sistemlerine entegrasyonu mevcut uygulama örnekleri üzerinden irdelenmeye çalışılacaktır.

Anahtar Sözcükler: Sabit yakıt pili, fosforik asit yakıt pili, trijenerasyon, absorpsiyonlu soğutma

ABSTRACT

Emerging environmental problems as a consequence of growing energy demand despite limited fossil energy resources requires the use of alternative energy sources. Mankind now has to put sustainability concept in place of energy efficiency principles in their everyday life and has to adapt environmentally sensitive energy technologies to practical life. Fuel cell technology should also be reviewed with this perspective.

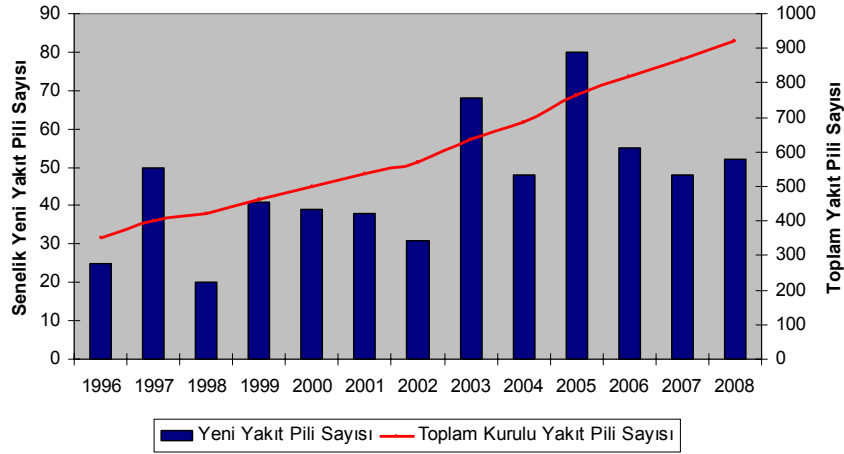
Although 100 years passed after introducing fuel cell technology, development of stationary fuel cell applications shows slow progress compared to other fuel cell applications. Medium and small scale fuel cell system that can be installed for a building can meet electric power needs at high efficiency and through the use of waste heat they can also be used in hot water production and in cooling by utilizing absorption chillers. In consequence, fuel cell technology creates a high efficiency alternative to trigeneration technology. Emission rates are quite lower compared to conventional combustion based cogeneration systems. In case of using hydrogen as fuel, electric energy can be produced with zero emission. Low noise levels in operation compared to conventional systems, no limitation by Carnot efficiency, high part load efficiencies, modular design options are other advantages of fuel cells which needs to be emphasized.

In this study, integration of fuel cell technology to the building HVAC and power systems will be evaluated via existing application examples in accordance with design parameters like first investment and operational costs, energy efficiency technological restrictions and sustainability principle.

Keywords: Stationary fuel cell, phosphoric acid fuel cell, trigeneration, absorption cooling

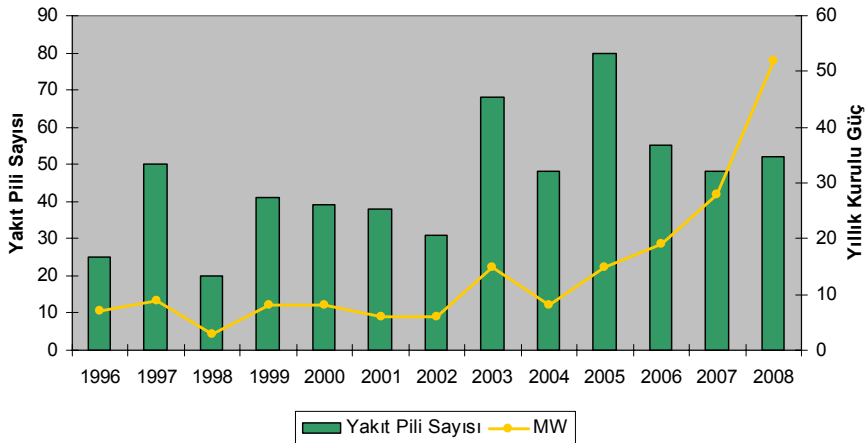
1. GİRİŞ

Yakıt pili teknolojisinin temel prensipleri William Grove tarafından 1839 yılında ortaya konulmuştur. Ancak yakıt pillerine olan ilgi, uzay araştırmalarının yarattığı ivme sonrası son 30–40 yılda yoğunlaşmıştır. Özellikle geçtiğimiz 10 -15 yılda sera gazı emisyonlarındaki hızlı artış fosil yakıtlara alternatif enerji teknolojilerinin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu yaklaşımla değerlendirilmesi gereken yakıt pillerinin kullanımı ve geliştirilmesinde otomotiv sektörü başta rol oynamaktadır. Ancak son yıllarda Amerika ve kısıtlı doğal enerji kaynaklarına sahip Almanya ve Japonya'da da ticari binalar için geliştirilmiş yakıt pili uygulamaları hayata geçirilmiştir. 2008 yılı itibariyle toplam sabit yakıt pili sayısı ve 1996–2008 yılları arasındaki yıllık artış miktarı Şekil-1'de verilmiştir.



Şekil 1. 10kW'tan Büyük Sabit Yakıt Pili Uygulamalarının Yıllık Artışı ve Toplam Sabit Yakıt Pili Sayısı [1]

Binalarda kullanılan yakıt pilleri tipleri ve uygulamalar çeşitlilik göstermekte, kurulu sabit yakıt pillerinin sayısı ise gün geçtikçe artmaktadır. Şekil-2'de yıllık sabit yakıt pili sayısına bağlı kurulu yakıt pili kapasitelerindeki artış görülmektedir.

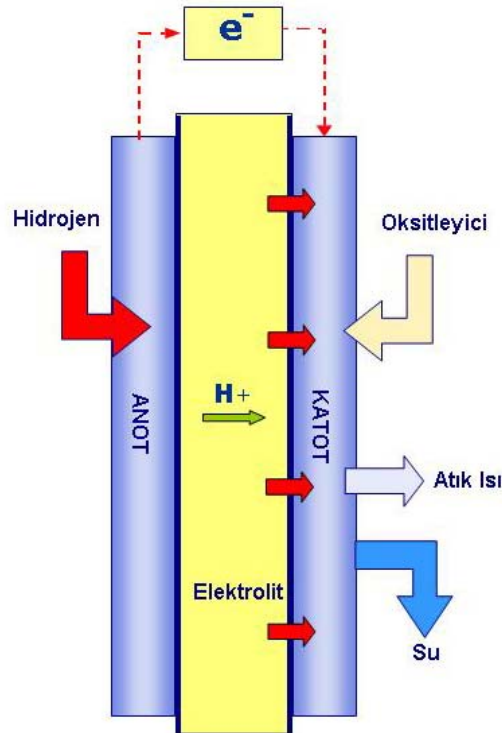


Şekil 2. Yıllık Toplam Kurulu Sabit Yakıt Pili Kapasitesi [1]

Bu çalışmada, özellikle son 15 yılda diğer sabit yakıt pili uygulamalarına kıyasla, ticari ve teknolojik açıdan belli bir olgunluğa erişen fosforik asitli yakıt pilleri ele alınacak, ticari binalarda kullanılabilecek diğer yakıt pili tiplerinin de genel değerlendirilmesi yapılacaktır. Fosforik asitli yakıt pilleri ekzotermik reaksiyon sonucu açığa çıkan ısıdan yararlanılması yoluyla trijenerasyon dahil olmak üzere pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Yakıt pillerinin trijenerasyon ile birlikte değerlendirilmesi küresel sürdürülebilirlik açısından daha anlamlı bir manzara ortaya çıkarmaktadır. Özellikle yakıt olarak direkt hidrojen kullanılması durumunda birincil enerjiden yararlanma oranı artarken sıfır emisyon ile elektrik enerjisi ve ısı üretilebilmektedir.

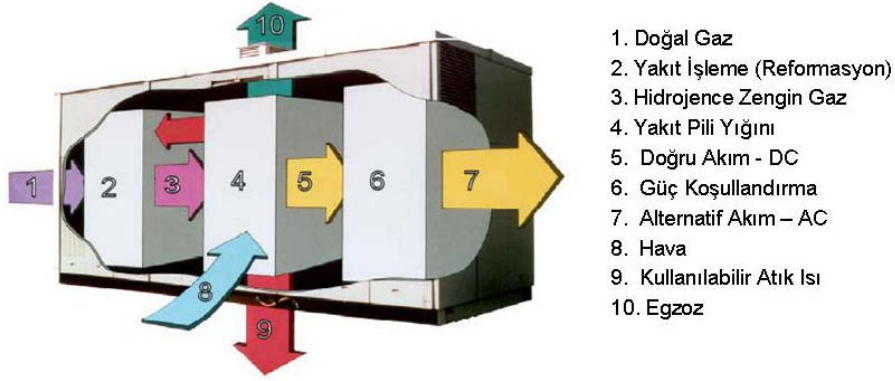
2.YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİNE GENEL BAKIŞ

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



Şekil 3. Yakıt Pili Temel Çalışma Prensibi

Yukarıda açıklanan temel prensip, reaksiyon ürünleri değişebilmekle birlikte, tüm yakıt pilleri için hemen-hemen aynıdır. Fakat bina uygulamaları söz konusu olduğunda hidrojenin genel bir servis sağlayıcıdan temini genellikle mümkün değildir. Bu nedenle aynı prensiple çalışan fakat hidrojeni karbon temelli yakıtlardan dönüştürerek elde eden yakıt pili uygulamaları geliştirilmiştir. Tipik bir ticari yakıt pili ünitesi yakıt işleme ünitesi, sülfür ayırma ünitesi, güç koşullandırma ünitesi, ısı ve su yönetim sistemleri ile kontrol sisteminden oluşur.

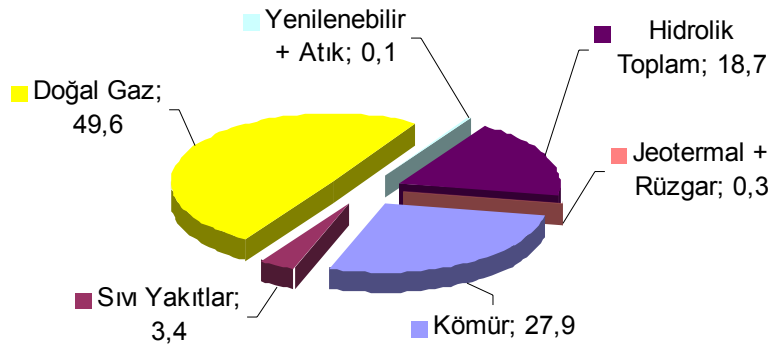


Şekil 4. Ticari Yakıt Pili Uygulaması [2]

Fosforik asitli ticari bir yakıt pili sisteminin temel elemanları Şekil-4'te şematik olarak verilmiştir. Hidrojenin dahili veya harici bir reformasyon ünitesi ile doğal gazdan dönüştürülerek elde edilmesi, doğal gazın çok kolay ulaşılabilir bir yakıt olması nedeniyle en genel yöntemdir. Ancak anaerobik çürütücüler ile çalışan arıtma tesislerinde üretilen gazların kullanımı gibi çok farklı uygulamalarda bulunmaktadır. Yakıt olarak direkt hidrojen yerine doğal gaz kullanılması durumunda bile, yakıt pilleri elektrokimyasal yapıları nedeniyle geleneksel yanma temelli enerji üretim tesislerine kıyasla daha verimli ve emisyon parametreleri açısından daha temiz enerji üretim araçlarıdır. Hidrojen dışındaki yakıtlarla çalışmanın yarattığı temel problem doğalgaza sonradan eklenen sülfür gibi yakıtın içerisindeki elektrokimyasal proseste istenmeyen diğer bileşenlerin ayrılmasıdır. Ticari yakıt pilleri yakıt içerisindeki istenmeyen bileşenleri ayıracak donanım ile birlikte temin edilirler.

Tüm yakıt pilleri doğru akım üretirler ancak bina uygulamaları söz konusu olduğunda alternatif akıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle sabit yakıt pilleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için invertörler içerirler. 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 pili kontrol sistemi basit bir kazan otomasyonu gibi algılanmamalıdır. Yakıt pillerinin sık devreye girip çıkması yakıt pili yığınının ömrünü azalttığından istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle yakıt pilleri yüksek performanslı entegre kontrol sistemlerine ihtiyaç duyarlar.

Birincil enerjiden yararlanma oranını arttırmak için yakıt pillerinin kojenerasyon veya trijenerasyon mantığı içerisinde kullanılmaları en uygundur. TEİAŞ 2007 yılı verilerine göre elektrik üretiminde birincil enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı Şekil - 6'da verilmiştir. 2007 yılı verileri dikkate alındığında dışa bağımlı olduğumuz doğal gazın elektrik üretimindeki payı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretiminde kullanılma oranının düşüklüğü dikkat çekicidir. Yine TEİAŞ 2007 verilerine göre toplam şebeke kayıplarının oranı ise %14,5'tir.[3]



Şekil 5. Türkiye'de Birincil Enerji Kaynaklarının Elektrik Üretiminde Kullanımının Yüzdesele Dağılımı [3]

Ülkemizde doğalgaz çevrim santrallerinde atık ısıdan da buhar türbinleri ile yararlanılması durumunda %50 gibi bir verimle elektrik üretilebilmekte, dolayısıyla ciddi bir ekonomik kayıp olmaktadır. TEİAŞ verileri bu perspektif ile incelendiğinde satın alınan doğal gazın büyük oranda kullanılmadan atık ısı olarak atmosfere salındığı görülür. Doğal gaz dışındaki fosil yakıtlar ile çalıştırılan klasik bileşik ısı güç üretim uygulamaları ise birincil enerjiden yararlanma oranını arttırmakla birlikte emisyon oranları yakıt pillerine kıyasla daha yüksek, verimleri ise Carnot verimi ile sınırlı olduğundan daha düşüktür. Yakıt pilleri ise kısmi yüklerde bile yaklaşık olarak tam yük veriminde çalışırlar. Sonuç olarak bakıldığında yakıt pillerinin geleneksel enerji üretim yöntemlerine kıyasla küresel sürdürülebilirlik ve sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından daha avantajlı olduğu görülür.

Yakıt pillerinin verimlerinin geleneksel sistemlere kıyasla daha avantajlı olmasının en önemli nedeni kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünde hareketli bir parça kullanılmayıdır. Dolayısıyla sürtünmeden kaynaklı tersinmezlikler yakıt pilinde söz konusu değildir. Hareketli parça bulunmayışı yakıt pillerini geleneksel uygulamalara kıyasla daha güvenilir yapar. Geleneksel kojenerasyon uygulamaları oturma alanları ve gürültü seviyeleri açısından da yakıt pillerine kıyasla dezavantajlıdır. Ticari yakıt pilleri sessiz çalıştıklarından enerji merkezinin konumlandırılmasında ciddi bir esneklik sağlar.

3. YAKIT PİLİ TİPLERİ VE BİNALARDA KULLANIMI

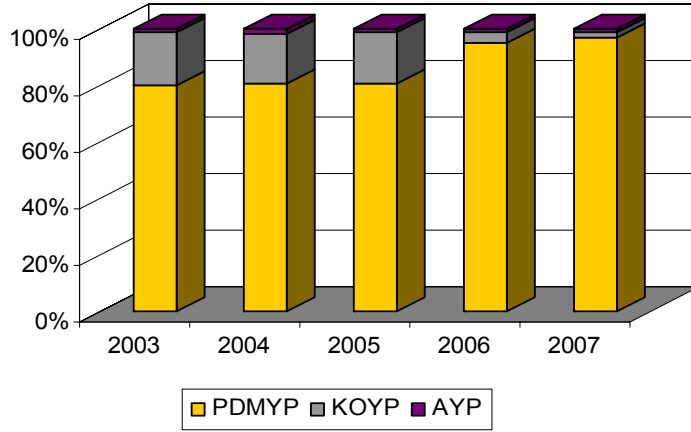
Binalarda kullanılan veya bu amaçla geliştirilmekte olan 5 çeşit yakıt pili uygulaması bulunmaktadır. Yakıt pilleri genellikle kullanılan elektrolitin tipine göre isimlendirilirler. Bunlar sırasıyla;

- Proton Değişim Membranlı Yakıt Pilleri (PDMYP)
- Alkali Yakıt Pilleri (AYP)
- Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP)
- Erişmiş Karbonat Yakıt Pilleri (EKYP)
- Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)

Yukarıda sıralanan erimiş karbonat yakıt pilleri ve katı oksitli yakıt pillerinin ticari uygulamaları geliştirilmiş olmasına rağmen sadece fosforik asitli yakıt pillerinin gerçek anlamda ticari uygulamaları bulunmaktadır. Aşağıda sırasıyla yakıt pilleri ve genel uygulama alanları incelenmiştir.

3.1 Proton Değişim Membranlı Yakıt Pilleri (PDMYP)

Proton değişim membranlı yakıt pilleri elektrolit olarak katı polimer kullanır. Çalışma sıcaklıkları düşüktür (80°C) ve polimer elektrot korozyon riskini ortadan kaldırmaktadır. İlk çalıştırma ataletleri düşük olduğundan diğer yakıt pillerine kıyasla daha kısa sürelerde devreye alınabilirler. Çalışma sıcaklıklarının düşük olması harici yakıt reformasyonu gerektirir ancak aynı nedenle izolasyon gereksinimleri de azdır [4]. Proton değişim membranlı yakıt pillerinin özellikle küçük çaplı ticari ve evsel kojenerasyon uygulamaları dikkat çekicidir. Aşağıdaki diyagram incelendiğinde 10kW altı yakıt pili uygulamalarının ağırlıklı olarak proton değişim membranlı yakıt pillerinden oluştuğu görülür.



Şekil 6. Kullanılan Teknolojiye Göre 10kW'tan Küçük Yakıt Pillerinin Oransal Dağılımı [1]

Konut uygulamalarında proton değişim hücreli yakıt pillerine olan ilgi gittikçe artmaktadır. Özellikle Almanya'da "Hidrojen ve Yakıt Pili Teknolojisi Geliştirme Programı-2006" çerçevesinde 1- 5kW arası yakıt pillerinin geliştirilmesi teşvik edilmekte ve 2020 yılı vizyonu olarak her yıl 72.000 evsel ünitenin 1,700 € /kW maliyetle üretimi hedeflenmektedir [1]. Japonya ve Kanada da küçük ölçekli yakıt pillerinin kullanımı ve geliştirilmesi teşvik edilmektedir.

3.2 Alkali Yakıt Pilleri (AYP)

Alkali yakıt pilleri üretimi en ucuz yakıt pili ve ilk olarak Apollo uzay programı için geliştirilmiştir. Alkali yakıt pilleri saf hidrojene ihtiyaç duymaktadır ve havadaki karbondioksit yakıt piline girmeden önce ayrılmıştır [4]. Bu iki temel engel ve yaygın bir hidrojen altyapısının olmayışı bu yakıt pillerinin binalarda kullanımını ve bu yöndeki teknolojik gelişmeleri şimdilik yavaşlatmaktadır.

3.3 Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP)

Fosforik asit yakıt pilleri ticari açıdan en başarılı ve pek çok saha koşulunda test edilmiş yakıt pilleridir. Günümüz itibarıyla bina uygulamaları için alt ısı değerine göre %42 elektrik üretim verimiyle çalışan 400kW'lık paket fosforik yakıt pili üniteleri temin edilebilmekte ve bunların paralel çalıştırılması ile daha yüksek kapasitelere çıkılabilmektedir. Bugüne kadar denenmiş en büyük fosforik asit yakıt pili uygulaması Tokyo Elektrik Tarafından. 1991 – 1997 yılları arasında 230.000 işletilmiş olan 11MW'lık yakıt pili güç santralidir [5].



Şekil 7. 6 Adet Paralel Olarak Çalışan 200kW'lık Fosforik Asitli Yakıt Pilleri [1]

Konsantre fosforik asit elektrolit ile çalışan fosforik asit yakıt pillerinin işletme sıcaklıkları 150 – 200°C'dir. Soğutucu olarak hava veya su kullanılabilir. Fosforik asitli yakıt pillerinin CO₂ kontaminasyonuna duyarlılıkları azdır ancak karbonmonoksit'e karşı daha hassastırlar [4]. Bunun en önemli avantajı yakıt reformasyonu maliyetinin düşmesi ve arıtma tesislerinden elde edilen yüksek kontaminasyon riski bulunan çeşitli gazlar ile çalışabilme imkânı sağlamasıdır. Bunun tipik örneklerinden birisi arıtma tesislerinde anaerobik çürütme prosesi sonucunda açığa çıkan gazların kullanımınıdır. Burada açığa çıkan gazlar hacimsel olarak yaklaşık %65 – 70 metan (CH₄), % 25 -30 oranında karbondioksit (CO₂), az miktardan sülfür bileşenleri ile diğer gazlardan oluşur. Almanya Colonge'de 200kWe kapasitesinde ticari bir fosforik asit yakıt pili ünitesi arıtma tesisine başarıyla entegre edilmiş ve anaerobik çürütme prosesi sonucu açığa çıkan gazlar bir ön şartlandırma ünitesinde geçirilerek yakıt pilinde kullanılmıştır. 2004 yılı verilerine göre yakıt pili arıtma tesisinin elektrik ihtiyacının %50'sini karşılamaktadır [5].

3.4 Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (EKYP)

Elektrolit olarak erimiş karbonat tuzu karışımı kullanan bu yakıt pilleri 650°C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışırlar. Yakıt pili performansı çalışma sıcaklığına oldukça bağlıdır. Bugün artık 250kWe kapasitesindeki ticari üniteler temin edilebilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda çalışıldığından dahili gaz reformasyonu mümkündür. Dahili gaz reformasyonu ilk yatırım maliyetinin düşmesine yardımcı olur. Gelecekte bu ürünlerin piyasaya daha yoğun bir şekilde penetrasyonu ile ilk yatırım maliyetleri fosforik asitli yakıt pillerinin aleyhine değişebilir. Yüksek sıcaklık çalışmaları nedeniyle büyük çaplı kojenerasyon uygulamaları için uygundur. Ancak kullanılan sıvı elektrot oldukça koroziftir. Yüksek sıcaklıkta çalışma bazı materyal problemlerini de beraberinde getirir. Amerika, Japonya ve Almanya'da çeşitli erimiş karbonat yakıt pili uygulamaları bulunmaktadır [4].

3.5 Katı Oksit Yakıt Pilleri (KOYP)

Katı oksitli yakıt pilleri yaklaşık 1000°C sıcaklığında çalışırlar. Bu yüksek çalışma sıcaklığı erimiş karbonatlı yakıt pilleri gibi dahili yakıt reformasyonuna izin verir ve atık ısı yüksek kapasitede türbinleri çevirmek için kullanılabilir. Yüksek çalışması sıcaklığının yarattığı temel sorunlarda birisi uzun devreye alma süreleridir. Isı kayıplarını önlemek ve personeli korumak için ciddi ısı yalıtımı gereksinimi vardır. Üst ısıl değere göre verimleri oldukça yüksektir. Verim değerleri %45 -60 arasında olabilir. Katı oksitli yakıt pilleri yüksek kapasiteli kojenerasyon potansiyelleri nedeniyle gelecek sabit yakıt pili uygulamalarının en önemli adaylarındadır[4].

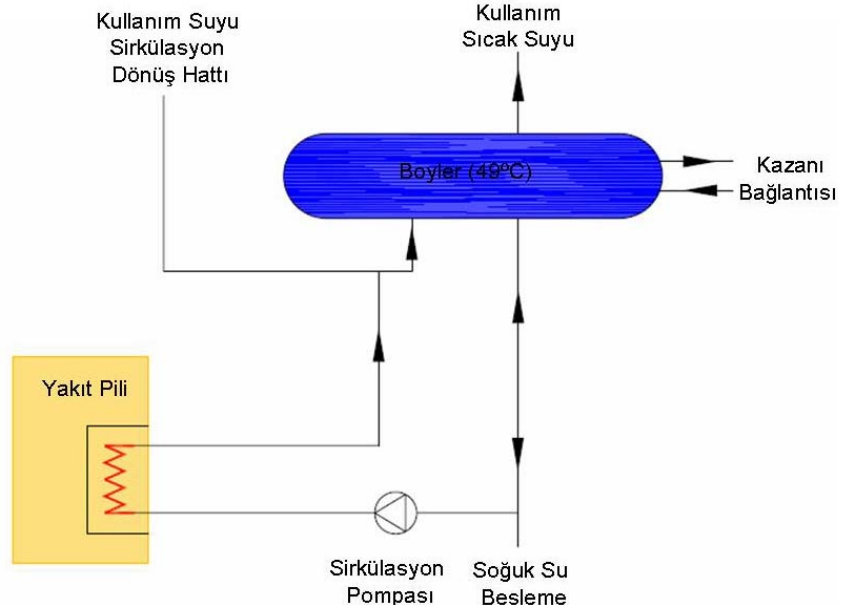
4. YAKIT PİLLERİ İÇİN PRATİK UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Bu bölümde yakıt pillerinin binalarda kullanımı ile ilgili mevcut uygulamalardan yola çıkarak okuyucuya genel bir bakış açısı kazandırılması amaçlanmıştır. İncelenen yakıt pili uygulamaları bugüne kadar özellikle Amerika'da pratik tecrübesi yapılan yüzme havuzları, kışlalar, endüstriyel mutfak ve çamaşırhaneler ile ofis binaları gibi farklı fonksiyonlara sahip yapılardaki fosforik asit yakıt pili uygulamalarını içermektedir [6]. Ele alınan örneklerden sağlanan veriler ve işletme deneyimleri mevcut ticari fosforik asitli yakıt pillerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır.

4.1 Kullanım Sıcak Suyu Üretimi

200kWe elektriksel, 263kW ısıl kapasitede ticari bir fosforik asitli yakıt pili ihtiyaç duyulan baz elektrik yükünün karşılanmasının yanında kullanım sıcak suyu talebinin karşılanması veya mevcut sistemlerin desteklenmesi amacıyla kullanılabilir. Şekil-9'da fosforik asitli bir yakıt pili için şematik uygulama detayı verilmiştir. Burada sıcak su ihtiyacı olmadığı zaman boylerdeki su yakıt piline geri döndürülerek boyler ve sirkülasyon hattı su sıcaklığının sabit tutulması sağlanmaktadır. Yakıt pili ayar değeri ise kazanın biraz üzerinde tutularak sıcak su talebi olduğunda öncelikle yakıt pilinden yararlanılmaktadır. Sıcak su

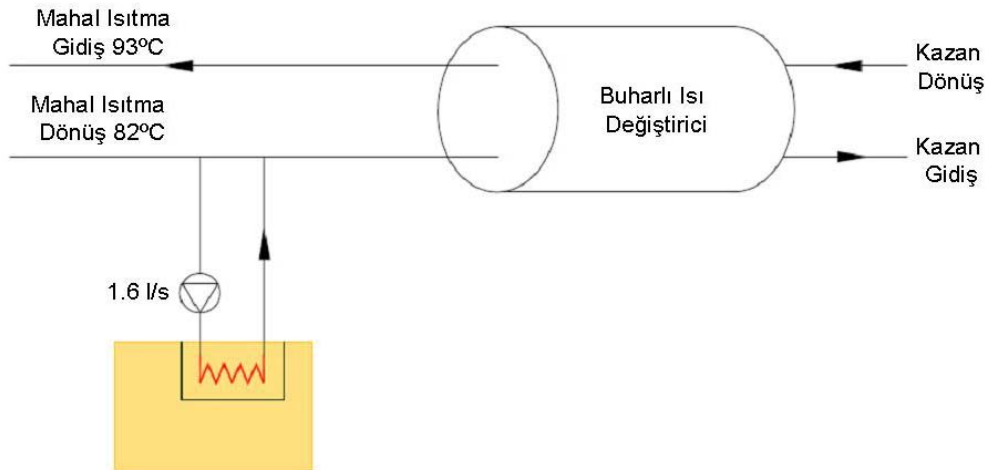
talebinin yakıt pili tarafından sağlanamaması durumunda ise kazan devreye girmektedir. 12°C soğuk su giriş sıcaklığı için yakıt pili yaklaşık olarak 250kW ısı kapasite sağlayabilmektedir.



Şekil 8. Fosforik Asit Yakıt Pili Kullanım Sıcak Suyu Uygulaması [6]

4.2 Mahal Isıtması

Fosforik asitli bir yakıt pilinin mevcut bir buharlı ısıtma sistemine entegrasyonu Şekil 10'da şematize edilmiştir. Sisteme ilave edilen 1,6 l/s'lik pompa ısıtma hattı üzerinden geri dönen suyu yakıt pili üzerinden çevirerek tekrar sisteme göndermektedir. Yakıt pili devresinin yeterli ısıtmayı sağlaması durumunda mevcut buharlı ısıtma sistemine ihtiyaç duyulmamaktadır.

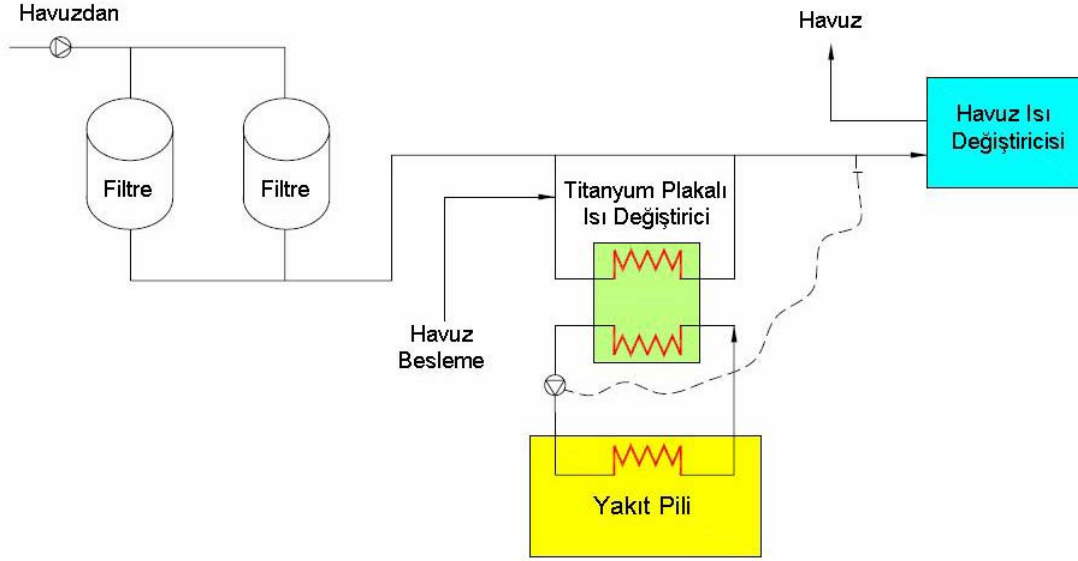


Şekil 9. Mevcut Bir Buharlı Isıtma Sistemine Yakıt Pili Entegrasyonu [6]

4.4 Yüzme Havuzu Isıtması

Yakıt pillerinin ısıtma amaçlı uygulamalarına bir örnekte havuz suyu ısıtılmasıdır. Aşağıda ele alınan uygulamada yakıt pili devresi havuz suyu ısı değiştiricisinden önce konumlandırılarak ön ısıtma

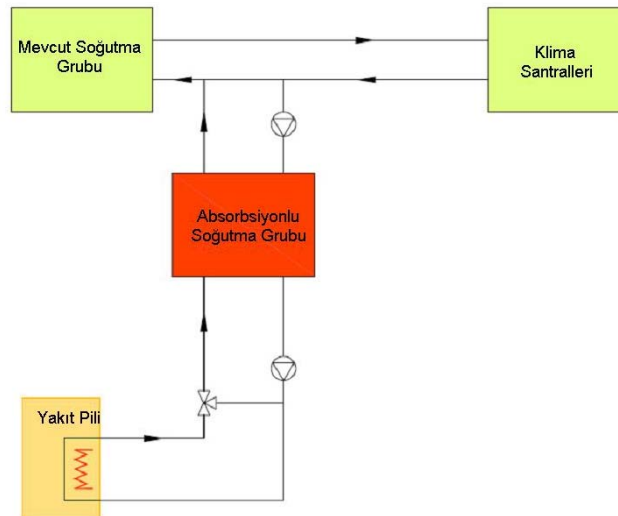
yapılmıştır. Burada yakıt pili öncelikle elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Havuzun kesikli çalışması birincil enerjiden yararlanma verimini düşürecektir. Yakıt pili ile kojenerasyon veya ısıtma uygulamalarında birincil enerjinin verimli kullanımı açısından sürekli ısıtma veya sıcak su ihtiyacı olan yapılar daha avantajlıdır.



Şekil 10. Yakıt Pili İle Havuz Suyu Isıtılması [6]

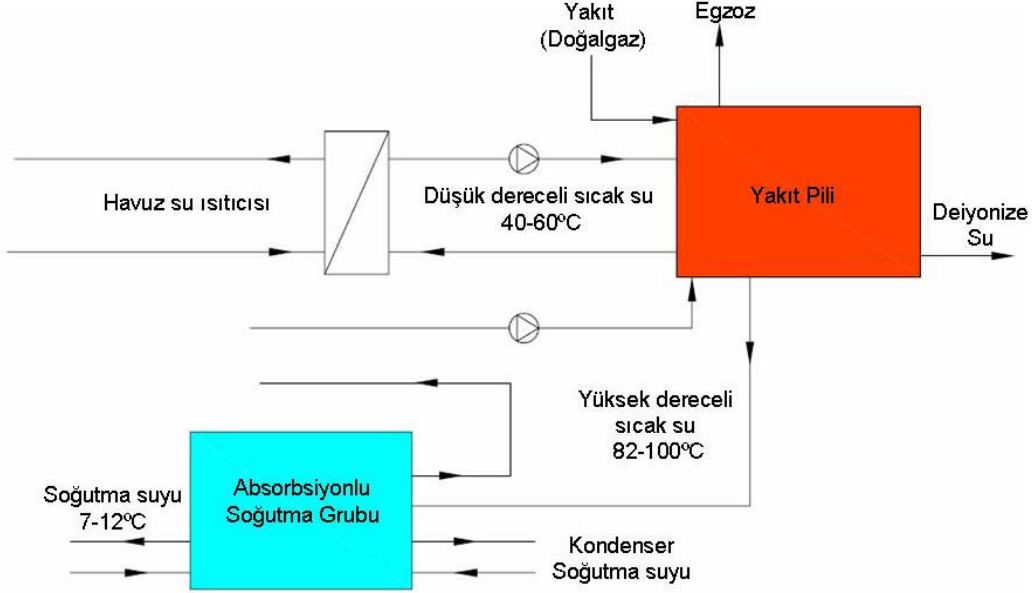
4.5 Absorbsiyonlu Soğutma

Yakıt pilinin absorbsiyonlu soğutma grubu yardımıyla konvansiyonel bir soğutma grubuna entegrasyonu Şekil-12 verilmiştir. Burada absorbsiyonlu soğutma grubu ön soğutma yaparak konvansiyonel soğutma grubu üzerindeki yükün azalmasını sağlamaktadır. Bu örnekte absorbsiyonlu soğutma grubunu çalıştırmak için yakıt pilinin yüksek sıcaklıkta dışarı attığı ısıdan yararlanılmıştır. Yakıt pili sistemi tasarlanırken ele alınan binanın ısıtma, soğutma ve elektrik yüklerinin mevsimlik dağılımı çıkarılmalıdır. Bu çalışma sonucunda ortaya çıkacak yük profiline göre optimum bir sistem seçimi yapılarak yakıt pili sisteminin baz elektrik veya ısıtma yüküne göre tasarımı yapılabilir ya da yakıt pillerinin paralel çalıştırılması ile yüksek kapasite ihtiyaçları karşılanabilir.



Şekil 11. Yakıt Pilinin Absorbsiyonlu Soğutma Uygulaması [6]

Şekil-13'te ise yine havuz ısıtması temelli bir trijenerasyon uygulaması verilmiştir. Yakıt pilinin yüksek sıcaklıktaki atık ısısı absorpsiyonlu soğutma grubunu tahrik etmekte kullanılırken, düşük sıcaklıktaki atık ısı ise havuz ısıtmasında kullanılmaktadır. Havuz işletme rejimine göre bu sistem %80 – 90 arası bir verimle ve konvansiyonel sistemlere kıyasla daha düşük emisyon değerleri ile çalıştırılabilir.

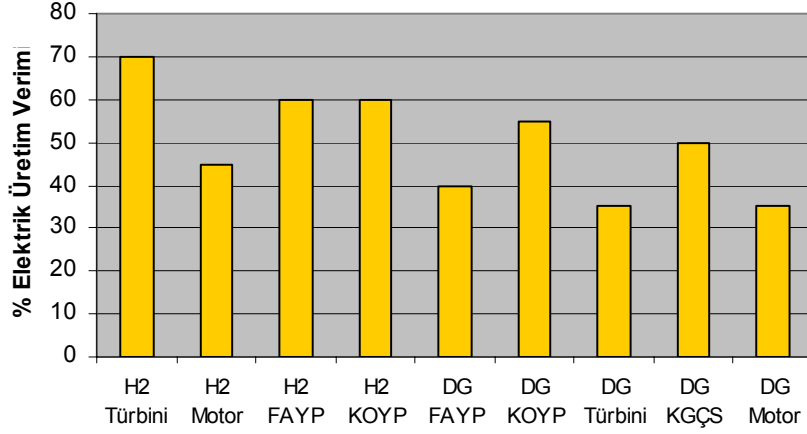


Şekil 12. Yakıt Pili İle Trijenerasyon Uygulaması [4]

5. TİCARİ YAKIT PİLİ UYGULAMALARININ GELECEĞİNİN GENEL DEĞERLENDİRMESİ

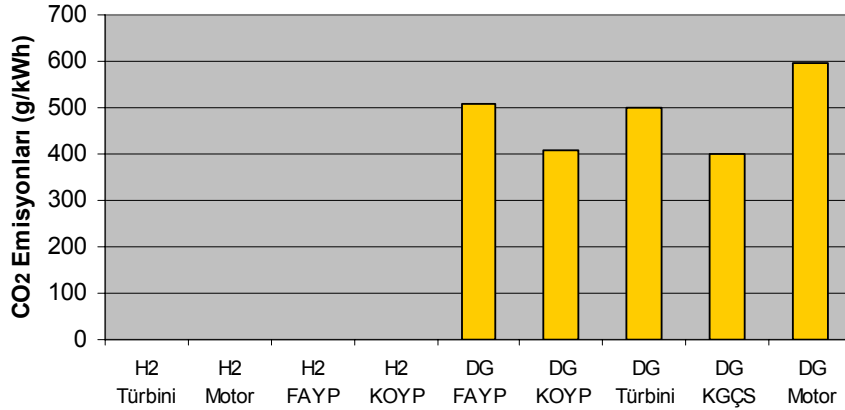
Yakıt pili teknolojisi ile ilgili mevcut pazar koşulları incelendiğinde fosforik asit yakıt pillerinin bina uygulamaları özelinde diğer yakıt pillerine kıyasla daha başarılı olduğu görülmektedir. Yakıt pili maliyetlerinin düşmesi için gerekli olan seri üretim koşullarının oluşması direkt olarak yakıt pillerinin konvansiyonel sistemlere karşı yakalayacağı ticari başarı ile ilgilidir. Mevcut eğilimler incelendiğinde önümüzdeki 10 yıl süresinde çeşitli Avrupa ülkeleri ile Amerika ve Japonya'da yakıt pili üretimi ve kullanımı konusunda aşama kaydedileceği görülmektedir.

Sera gazı emisyonlarındaki artışın önüne geçilebilmesi için uygulamaya konulan çeşitli yasal prosedürler ve Kyoto Protokolü gibi uluslar arası antlaşmalar yakıt pillerinin de içerisinde bulunduğu çeşitli temiz enerji teknolojilerini yakın ve ortada vadede daha ön plana çıkaracaktır. Çeşitli teknolojiler sadece elektrik üretim verimleri açısından karşılaştırıldığında kombine doğal gaz çevrim santralleri (KGÇS) gibi mevcut bazı teknolojilerin verimlerinin yakıt pilleri ile sıkı rekabet halinde olduğu görülmektedir.



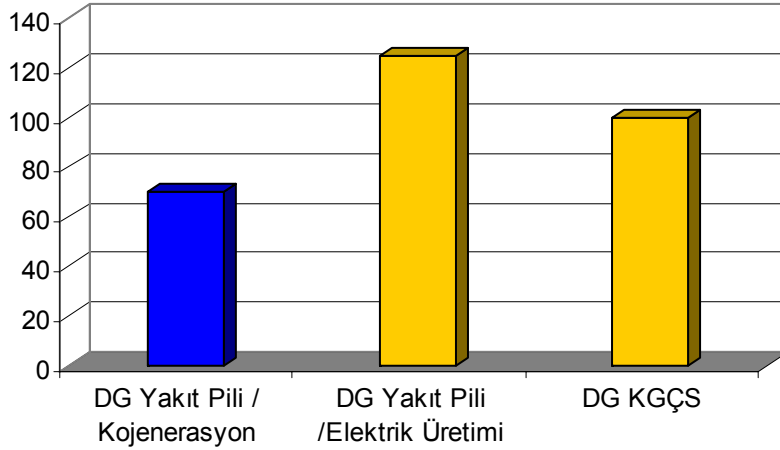
Şekil 13. Çeşitli Elektrik Üretim Teknolojilerinin Alt Isıl Değer Göre Elektrik Üretim Verimleri [7]

Doğal gaz çevrim santrallerinde atık ısı yoluyla buhar üretilmekte ve buhar daha sonra buhar türbininden geçirilerek tekrar elektrik üretilmektedir. Doğalgaz kullanan fosforik asit yakıt pillerinin elektrik üretim verimleri doğalgaz çevrim santrallerine kıyasla düşük gözükmesine rağmen yakıt pillerinin bileşik ısı güç üretimi mantığı içinde kullanılmalarıyla toplam verim %90 mertebelerine çıkmaktadır. Enerji iletim hatlarındaki kayıplarda dikkate alındığında merkezi olmayan elektrik üretiminde yakıt pillerinin sağladığı avantaj artmaktadır. Son yıllarda üzerinde durulmaya başlanan hidrojen türbinlerinin verimlerinin yüksekliği ise dikkat çekicidir. Gelecekte özellikle katı oksitli ve erimiş karbonat yakıt pillerinin ticari uygulamalarının artmasıyla konvansiyonel sistemlerle yakıt pilleri arasındaki farkın açılacağı tahmin edilmektedir.



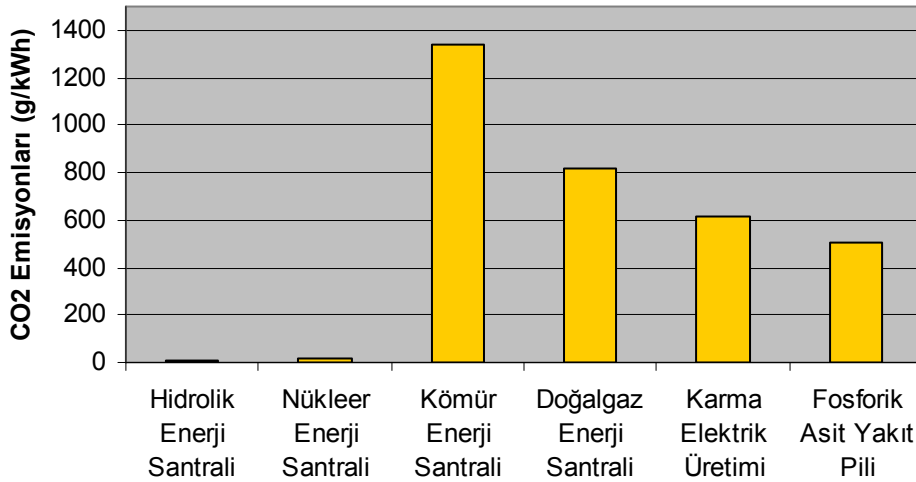
Şekil 14. Çeşitli Elektrik Üretim Teknolojilerinin CO2 Emisyonu Değerleri [7]

Yakıt pilleri CO₂ emisyonları açısından değerlendirildiğinde özellikle ticari başarı yakalamış fosforik asitli yakıt pillerinin emisyon değerlerinin doğalgaz çevrim santrallerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Karbondioksit emisyonları açısından görülen bu belirgin problem yakıt pillerinin atık ısıdan yararlanılması yoluyla aşılabilmektedir. Tipik bir yakıt pilli kojenerasyon uygulaması doğalgaz çevrim santrallerine kıyasla sera gazı emisyonlarında yaklaşık %10-30 arasında azalma sağlar [8]. Yukarıdaki karşılaştırmada merkezi güç santralinden kullanım noktasında kadar olan kayıplar dikkate alınmamıştır. Hat kayıplarının dikkate alınması durumunda kullanıcıya ulaştırılması gereken birim kilowatt elektrik enerjisi için doğalgaz çevrim santralinde daha fazla doğalgaz yakılması gerekeceğinden merkezi güç santrallerinin karbondioksit emisyonu açısından performansı düşecektir.



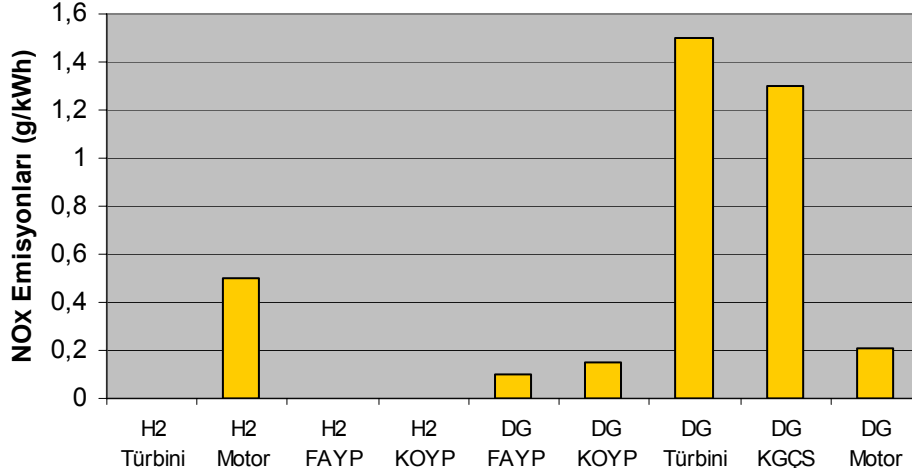
Şekil 15. Doğal Gaz Yakıt Pili Emisyon Oranlarının Yaklaşık Yüzdesele Karşılaştırması

Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği Ek-6'da verilen CO₂ emisyon parametreleri ile mevcut ticari yakıt pili uygulamalarının emisyon performansları karşılaştırıldığında, yakıt pillerinin hidrolik enerji hariç diğer uygulamalara göre emisyon değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. Bu durum yakın gelecekte BEP yönetmeliğinin yaratacağı yeni olanaklar ve zorunluluklar dikkate alındığında yakıt pili teknolojisinin Türkiye'de yerleşebilmesi açısından bir avantaj yaratabilir.



Şekil 16. FAYP CO₂ Emisyonu İle BEP Yönetmeliği Emisyon Parametrelerinin Karşılaştırılması [8]

Fosil yakıtlı merkezi güç santrallerinin NO_x salınımları açısından performansları ise oldukça düşüktür. Sülfür oksitleri ile birlikte asit yağmurlarına yol açan bu kirlenici gazların salınımdaki artışın başlıca kaynaklarından birisi de merkezi güç santralleridir. Yakıt pilleri ise hidrojen kullanılması durumunda sıfır emisyon ile enerji üretebilmektedir. Ancak merkezi bir hidrojen servisi sağlayıcısının olmayışı, hidrojenin fosil yakıtlardan veya anerobik çürütücülerin kullanılması gibi ikincil yöntemlerden üretilmesini zorunlu kılmaktadır. Hidrojen üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan sistemler yardımıyla yapılması günümüzde değerlendirilen seçeneklerden biridir. Yakıt pillerinin enerji üretiminde gerçek anlamda baskın aktörlerden biri olabilmesi muhtemelen, öncelikle taşıtlarda kullanımının yaygınlaşması ve bununla beraber hidrojen üretimi ile satışına dair belli bir altyapının gelişmesinden sonra mümkün olacaktır. Yakıt pilleri dahil düşük emisyonlu sürdürülebilir enerji çözümlerinin yaygınlaşması sadece tekil çabalarla değil sera gazı salınımının azaltılmasını zorlayıcı yasal düzenlemelerin yapılması ve aynı zamanda teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi ile mümkün olabilir.



Şekil 17. Çeşitli Elektrik Üretim Teknolojilerinin NOx Emisyonu Değerleri [7]

Yakıt pillerinin yaygın kullanımındaki temel engellerden belki de en önemlisi yüksek ilk yatırım maliyetleridir. Yakın zamanda pazara girmiş olan 400kW'lık fosforik asit yakıt pilleri için 3000 – 4000\$/kWe ilk yatırım maliyeti öngörülmektedir. Üretici firma bir önceki seri 200kW'lık fosforik asit pilleri için öngörülen 40.000 saatlik işletme ömrünün yeni nesil ünitelerde iki katına çıkacağını belirtmektedir. 200kW'lık üniteler gerçek saha koşullarında 40.000 saat ve üzeri çalışma saatlerini yakalamışlardır. Mevcut fosforik asit pili uygulamalarında yaklaşık 5 sene olan yakıt pili yığılı 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 bulduklarında maliyetleri konvansiyonel sistemler ile karşılaştırılmayacak kadar yüksektir. Fosforik asit yakıt pilleri için bakım maliyetleri ise 0.015 – 0.025\$/kWh mertebelerindedir. Fosforik asit yakıt pili üreticilerinin yıllık toplam 3000 adet ünite satışı baz alınarak öngördükleri ilk yatırım maliyeti ise 1200\$/kWe, DOE (Amerikan Enerji Bakanlığı)'nin gelecek projeksiyonu ise 1500\$/kWe'tir [4].

Fosforik asit yakıt pilleri yüksek maliyetlerine rağmen finans sektörü gibi enerji kesintilerinin maliyetinin milyon dolarları bulabildiği sektörlerde başarıyla uygulanmıştır. Bankacılık, telekomünikasyon gibi yoğun bilgi akışının olduğu sektörlerde elektrik kesintisi, voltaj dengesizlikleri ve hatlardaki kalitesizlikler nedeniyle veri kaybı yaşanması çok ciddi ekonomik kayıplara neden olabilmektedir. Yakıt pillerinin maliyeti bu gibi problemlerin maliyetinin kabul edilemediği sektörlerde önemsiz kalmaktadır. First National Bank of Omaha (Amerika) bilgi işlem merkezi fosforik asitli yakıt pillerinin tam anlamıyla ticari uygulamalarından birisidir[4]. Toplam 4 adet 200kWe kapasitesinde fosforik asit yakıt pili kesintisiz güç kaynağı olarak kullanılmış, atık ısıdan da ısıtmada yararlanılmıştır. Yakıt pillerinin her biri 57,6m³/h doğalgaz tüketmekte buna karşılık 200kWh elektrik ve 263kWh atık ısı üretmektedir. Kullanılan her bir yakıt pili ünitesinin boyutları 3m x 5,5m x 3m şeklindedir ve dâhili montaj yapılmıştır.

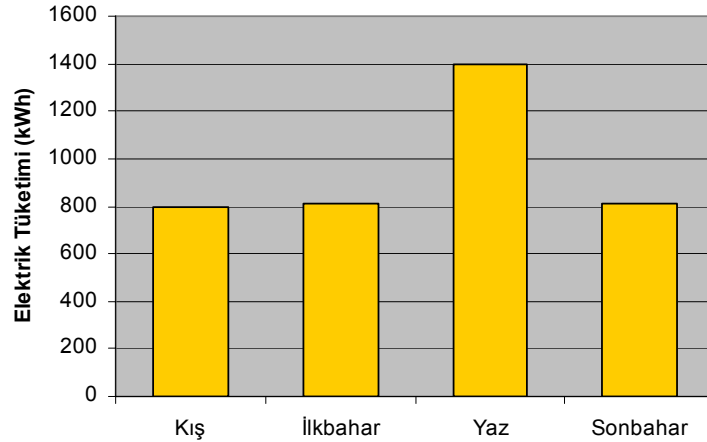


Şekil 18. Fosforik Asit Yakıt Pili Banka Bilgi İşlem Merkezi Kesintisiz Enerji Kaynağı Uygulaması [1]

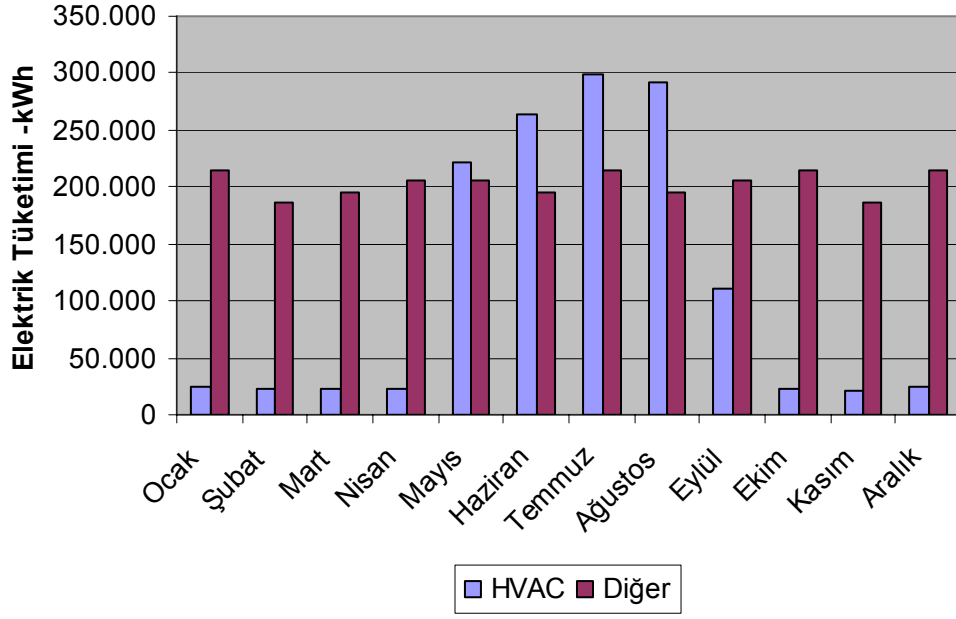
Yakıt pilleri Türkiye özelinde değerlendirildiğinde bazı özel problemler ve avantajlar ortaya çıkmaktadır. Yüksek şebeke kayıpları yakıt pili kojenerasyon uygulamaları ile azaltılabilir ve özellikle güney bölgelerimizde güneş enerjisi destekli hidrojen üretim tesislerinin kurulumu ve bunların yakıt pilleri ile entegrasyonu değerlendirilebilir. Ancak yakıt pili hiç şüphesiz yapı sektörü için çok yeni bir teknolojidir. Bakım, montaj ve işletme gereksinimlerinin karşılanması uzmanlık gerektirir. Yukarıda öngörülen ilk yatırım ve bakım masraflarının Türkiye koşullarında farklılık gösterebileceği de dikkate alınmalıdır.

6. MEVCUT BİR OFİS BİNASINA YAKIT PİLİ ENTEGRASYONU

İstanbul şartlarında toplam kapalı alanı yaklaşık 18.000m² olan, 12 katlı, taze havalı klima santrali ile iklimlendirilen ve yardımcı sistem olarak dört borulu fan-coil kullanılan bir ofis binasından yakıt pili entegrasyonu aşağıda incelenmiştir. Bina ısıtma ve soğutma yüklerini karşılamak için sırasıyla 1200kW'lık 1 adet sıcak su kazanı ve toplam 1300kW kapasitesinde 2 adet hava soğutmalı vidalı soğutma grubu seçilmiştir. Sistem ısıtma, soğutma ve elektrik yüklerinin Carrier HAP-4.4 yazılımı yardımıyla senelik simülasyonu yapılarak yük profili çıkarılmıştır. Seçilecek yakıt pili ve sistem karakteristikleri simülasyon sonuçlarına göre belirlenmiştir. Yapılan senelik simülasyonda baz elektrik yükü 800kWe olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre 400kWe kapasitesindeki iki adet ticari fosforik asit yakıt pili binanın baz elektrik yükünü karşılayabilmektedir.



Şekil 19. Mevsimlere Göre Günlük Baz Elektrik Tüketim Profilleri

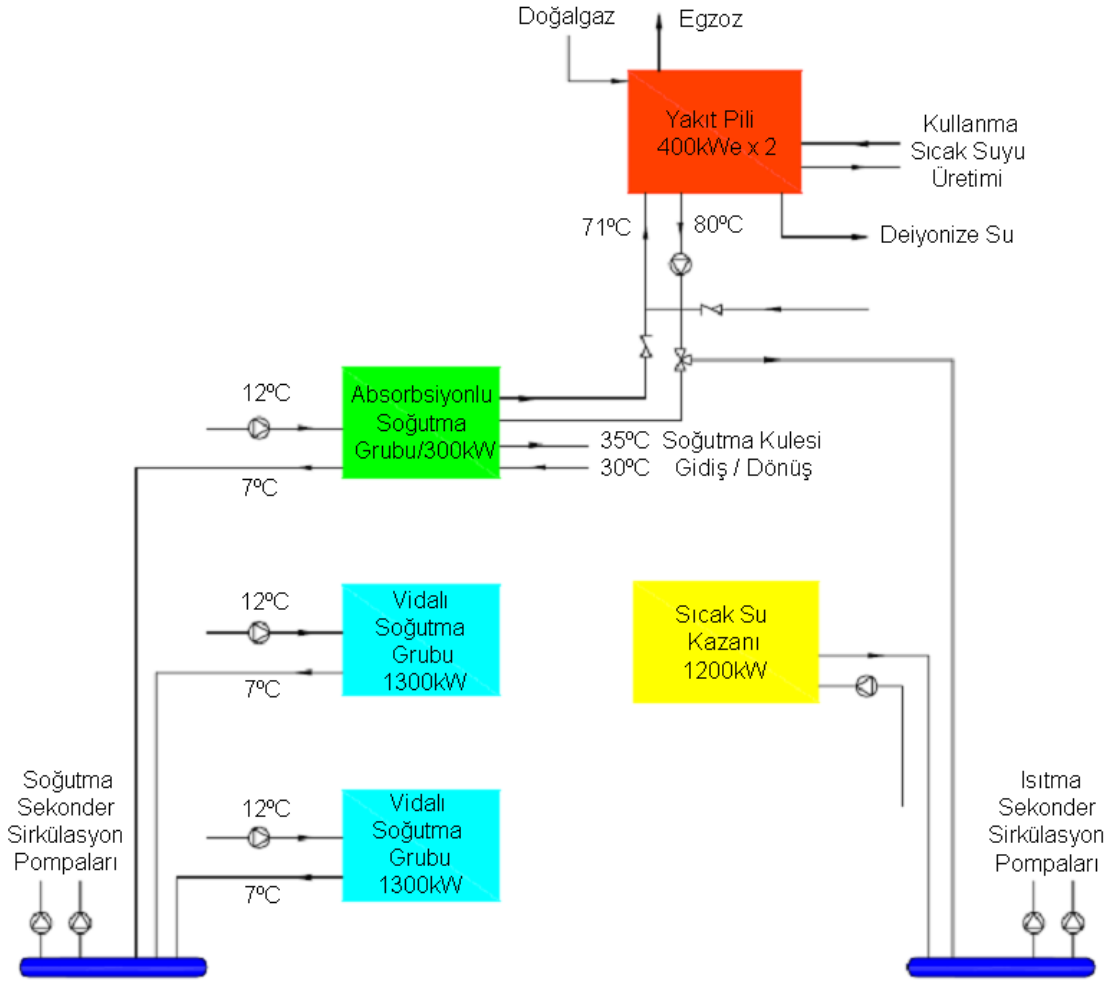


Şekil 20. Aylara Göre Toplam Elektrik Enerjisi Tüketimleri

Yakıt pillerinin binalara entegrasyonu; elektriksel yükün izlenmesi, ısı yükün izlenmesi, elektriksel baz yükün karşılanması, ısı baz yükün karşılanması gibi farklı yollarla yapılabilir. Ele alınan örnekte baz elektrik yükünün karşılanması ve atık ısıdan da trijenerasyon mantığı içerisinde yararlanılması en optimum çözüm olarak gözükmektedir. Kullanılması düşünülen yakıt pilinin karakteristikleri Tablo-1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ticari Fosforik Asit Yakıt Pili Yakıt Pili Karakteristikleri

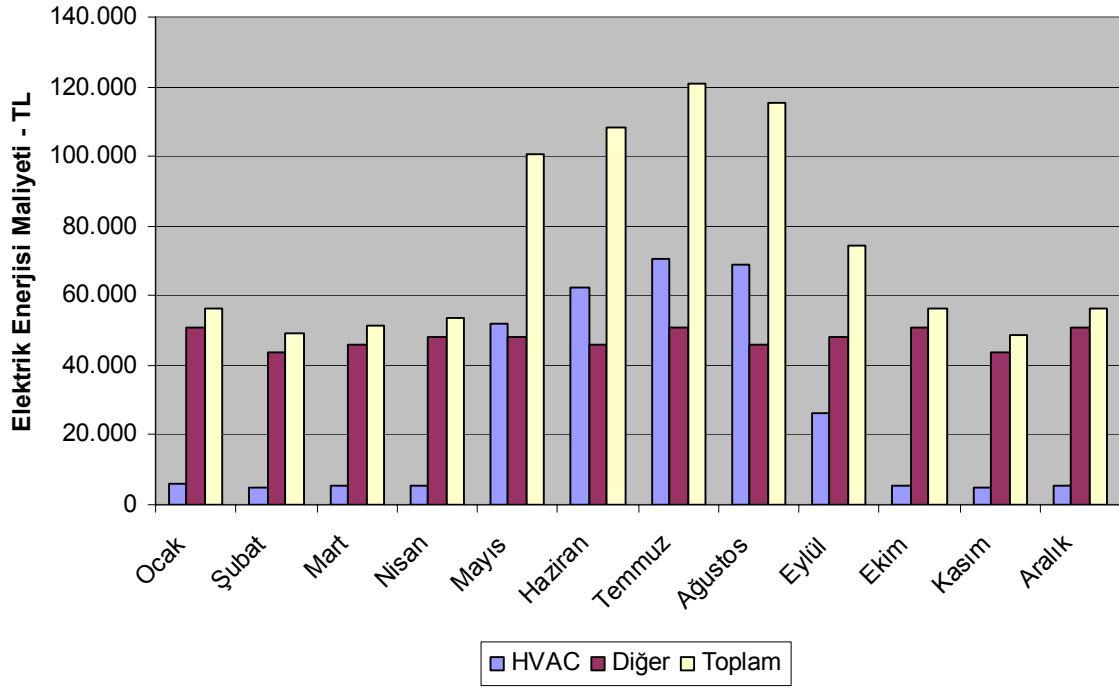
Kapasite, kWe	400
Boyut, m ² /kWe	5,5
Elektriksel Verimi	%42
Elektriksel Verimi - %50 Yükte	%42
Toplam Verim	%90
Toplam Isıl Kapasite, kWt	500
CO ₂ Emisyonu	508kg/MWh
CO Emisyonu	0.004kg/MWh
NO _x Emisyonu	0.026kg/MWh



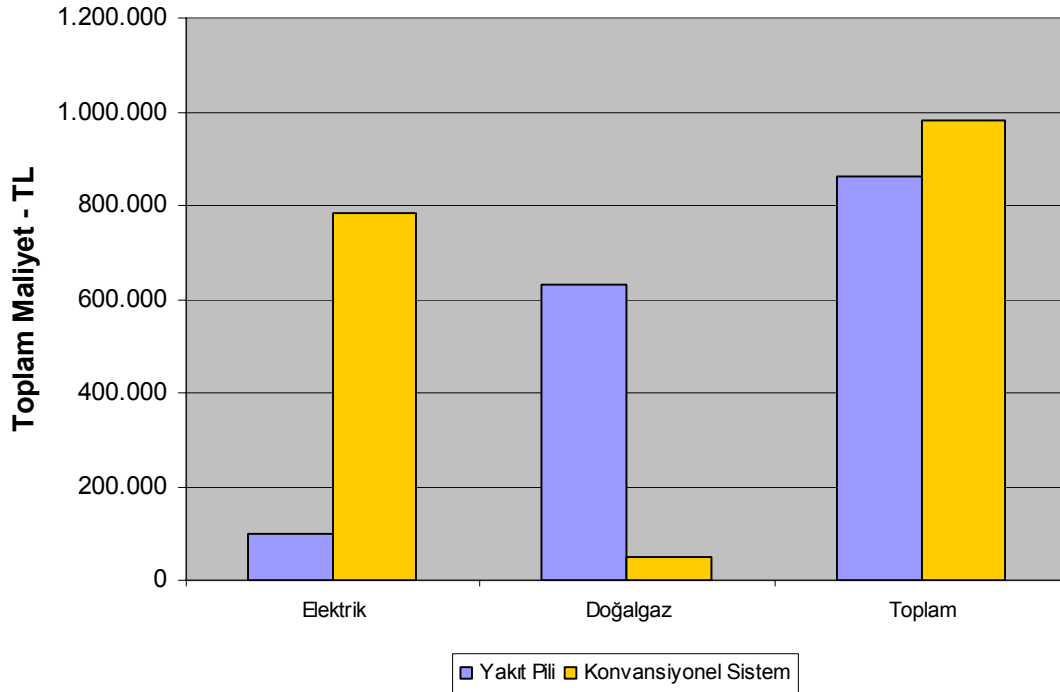
Şekil 21. Fosforik Asit Yakıt Pilinin Mevcut Isıtma / Soğutma Sistemine Entegrasyonu

400kW kapasitesindeki bir ticari fosforik asit yakıt pili 110°C dönüş suyu sıcaklığına göre 121°C 'de 230kW, 27°C dönüş suyu sıcaklığına göre 60°C 'de 270kW olmak üzere toplam 500kW ısı açığa çıkarabilir. Yüksek sıcaklık derecesindeki atık ısıdan yararlanılmaması durumunda tüm atık ısı 500kW olarak düşük sıcaklık derecesinde kullanılabilir. Yüksek sıcaklık derecesindeki atık ısının sıcak su tahrikli absorpsiyonlu soğutma grubunda kullanılmasıyla 80°C giriş 71°C dönüş suyu sıcaklığına göre yaklaşık 300kW soğutma yapılabilir. Ancak absorpsiyonlu soğutma grubunun sisteme entegrasyonu ilave bir soğutma kulesinin de kullanımını gerektirmektedir. Kışın ise her iki fosforik asit pilinden elde edilecek 80°C 'deki 460kW'lık atık ısı direkt olarak ısıtmada kullanılacaktır.

Senelik bazda yapılan saatlik simülasyon sonuçlarına göre 2009 yılı şubat ayı verileri baz alındığında aydınlatma ve diğer elektrik yükleri de dahil olmak üzere konvansiyonel sistem toplam yıllık elektrik enerjisi maliyeti yaklaşık 782.000TL, toplam yıllık elektrik ve doğalgaz maliyeti ise 980.000TL civarındadır. Yıllık CO₂ emisyonu miktarı ise 2.500.000 kg olarak bulunmuştur.



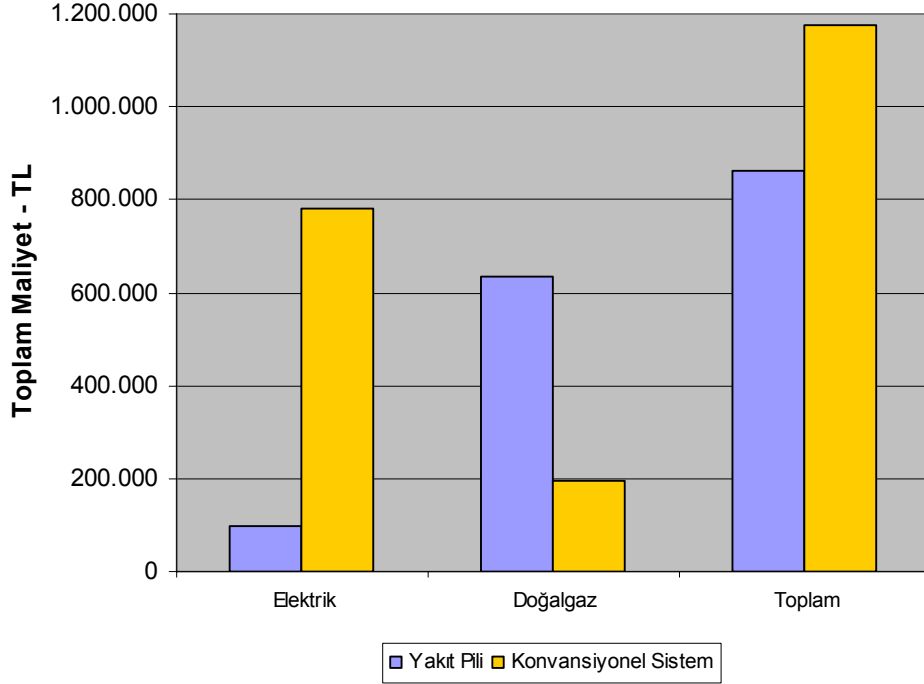
Şekil 22. Konvansiyonel Sistemde Bina Aylık Elektrik Maliyetinin Aylara Göre Dağılımı



Şekil 23. Konvansiyonel Sistem İle Yakıt Pili Trijenerasyon Sisteminin Yıllık Maliyetinin Karşılaştırılması

Yakıt pili entegrasyonu durumunda ise bina elektrik maliyeti düşmekte doğalgaz maliyeti ise artmaktadır. Toplamda ise yakıt pili trijenerasyon sistemi yaklaşık olarak senelik %12 daha az maliyetle işletilebilmektedir. Küresel sürdürülebilirlik açısından sistem performansı incelediğinde ise yakıt pili trijenerasyon sisteminin kullanılması durumunda toplam CO₂ emisyonu miktarı ise 2.500.000 kg'dan 1.895.000kg'a düşmekte yani toplam emisyon yaklaşık %24 azalmaktadır. Ancak burada belirtilmesi gereken önemli bir nokta mevcut binada merkezi bir kullanma suyu sistemi veya ihtiyacı

olmadığından yakıt pilinin düşük sıcaklıktaki atık ısısından faydalanılamadığıdır. Yakıt pilinin düşük sıcaklıktaki atık ısısından tamamiyle faydalanılabildiği düşünülürse, 540kW atık ısı ile sürekli rejimde 45°C'de (10°C giriş su sıcaklığı kabulü ile) 1,8 l/s sıcak su üretilebilmektedir. Bu genelleştirilmiş yaklaşım üzerinden sıcak su üretiminin de konvansiyonel olarak yapıldığı durum ile yakıt pilli trijenerasyon sisteminin senelik maliyeti karşılaştırıldığında, yakıt pilli trijenerasyon sisteminin senelik maliyetinin %27, CO₂ emisyonunun ise yaklaşık %37 oranında daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 24. Kullanım Sıcak Suyu İlavesi Durumunda Karşılaştırma

Ele alınan bina özelinde yakıt pilli trijenerasyon sisteminin ilk yatırım maliyeti ve geri dönüş süreleri Şubat 2009 doğalgaz ve elektrik fiyatları baz alınarak incelendiğinde yakıt pilli aleyhine dramatik bir fark ortaya çıkmaktadır. Fosforik asit yakıt pilleri için mevcut koşullarda 4000\$/kWe ilk yatırım maliyeti öngörülmektedir. Bu değer dikkate alınarak, absorpsiyonlu soğutma grubu, soğutma kulesi gibi ekipmanlarında maliyetleri ilave edildiğinde yakıt pilli trijenerasyon sisteminin geri dönüş süresi 47 yıl gibi uzun bir süre olmaktadır. Bu değerlendirme yakıt pilinin atık ısısının kullanım sıcak suyu üretiminde de kullanıldığı düşünülerek tekrar yapıldığında ise geri dönüş süresi 18 yıl olmaktadır.

7. SONUÇ

Yukarıdaki analizin sonuçları gelecek 10 yıllık perspektif içerisinde değerlendirildiğinde yakıt pillerinin ticari binalarda yaygın kullanımının, yüksek verimli yakıt pillerinin konvansiyonel sistemlere kıyasla daha rekabetçi fiyatlarla pazara girmelerine bağlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada bir ofis binası ele alınmış olmasına rağmen, yakıt pilli kojenerasyon sistemleri sürekli sıcak su veya ısı ihtiyacı olan yapılar için daha uygun olabilmektedir. Yakıt pilleri çevresel etkileri ve sera gazı emisyonları açısından konvansiyonel sistemlere kıyasla daha yüksek performanslı bir çözüm olsa bile son kullanıcının yakıt pilli gibi alternatif teknolojilerin kullanımına yönelmesi için sadece piyasa koşullarının olgunlaşması veya ilgili teknolojinin ucuzlaması değil, bu konuda kamusal teşviklerinde yapılması gereklidir. Artık insanoğlu sistem veya ekipman maliyetlerini değil, yaşamı sürdürülebilirlik maliyetini hesaplamak ya da başka bir deyişle CO₂ emisyonu ekonomisi yapmak durumundadır. Yakıt pilleri bu açıdan değerlendirildiğinde özellikle otomotiv endüstrisinin tetiklemeyle geniş bir hidrojen ekonomisinin ortaya çıkması durumunda, sıfır emisyonlu ve rekabetçi bir ısı-güç üretim aracı olabilecekleri görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.fuelcelltoday.com>
- [2] Fuel Cell Handbook, DOE, November 2004
- [3] <http://www.teias.gov.tr/ist2007/index.htm>, “ Türkiye Elektrik Üretim İletim İstatistikleri”, 2007
- [4] GALLIERS, S., “Fuel Cell Technology”,BSRIA, 2003
- [5] SAMMES,N.,BOVE,R., STAHL,K.”Phosphoric acid fuel cells:Fundamentals and applications”, Solid State&Materials Science,2004
- [6] 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
- [7] PILAVACHI, P.A, STEPHANIDIS, S.D, PAPPAS, V.A, AFGAN, N.H, “Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant Technologies” , Applied Thermal Engineering, 2008
- [8] PENNT,M., RAMESOHL, S., “Fuel cells for distributed power: benefits, barriers and perspectives”, Fuel Cell Europe, <http://assets.panda.org/downloads/stationaryfuelcellsreport.pdf>, 2003
- [9] Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, 2008
- [10] LARMINE, J., DICKS, A. “Fuel Cell Explained, 2nd Edition”, John Wiley & Sons. Inc., 2003

ÖZGEÇMİŞ**İbrahim Utku BAŞYAZICI**

1981 yılı Ankara doğumludur. 2004 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Isı-Proses dalından mezun olduktan sonra aynı bölümden yüksek lisans derecesini almıştır. Halen Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Isı-Proses doktora programına devam etmekte aynı zamanda Arup Mühendislik ve Müşavirlik firmasında mekanik tesisat sistemlerinin projelendirmesi konusunda çalışmaktadır.