

YAKIT HÜCRELERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ, ÇALIŞMA PRENSİPLERİ VE BUGÜNKÜ DURUMU

Atilla BIYIKOĞLU

*Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü,
Maltepe 06570 Ankara, biyik@mmf.gazi.edu.tr*

ÖZET

Son yıllarda, alternatif yakıtların önem kazanması ve kirlenici emisyonların azaltılmasına yönelik önlemlerin alınmaya başlanması, yakıt hücrelerine olan ilgiyi giderek artırmaktadır. Bu çalışmada, öncelikle, yakıt hücrelerinin ilk keşfinden günümüze kadar olan tarihsel gelişimi anlatılarak, genel yapısı, tipleri ve çalışma prensipleri ayrıntılı olarak ele alındı. Daha sonra, yakıt hücrelerini sınıflandırma yöntemlerinden bahsedilerek, bugün ulaşılmış olduğu seviye ve karşılaşılan problemler özet olarak sunuldu. Son olarak, yakıt hücrelerindeki teknolojik gelişmeleri içeren makalelerin, 1995-2002 yılları arasında yürütülen modelleme çalışmalarının ve uygulama alanlarına göre sınıflandırılan çalışmaların bazıları tablolar halinde verildi.

Anahtar Kelimeler: Yakıt hücreleri, hidrojen, bugünkü durum, teknolojik gelişmeler, modelleme

HISTORICAL DEVELOPMENT, WORKING PRINCIPLES AND STATE-OF- THE-ART OF FUEL CELLS

ABSTRACT

In the last years, the attention on the fuel cells has been gradually increased due to getting alternative fuels more important and starting to be taken precautions on the reduction of polluting emissions. In this study, first, the historical development of fuel cells from its first invention to present was described and their general structure, types and working principles were treated in detail. Then, classification methods of fuel cells were mentioned and the state of the art and the problems facing about fuel cells were briefly presented. Finally, some of the articles including technological progress, the modelling studies conducted between 1995 and 2002, and the studies classified according to their application areas were given in tables.

Keywords: Fuel cells, hydrogen, state of the art, technological developments, modelling

1. GİRİŞ

Yüksek teknoloji görünümüne rağmen, yakıt hücreleri, aslında bilim tarafından 150 seneyi aşkın bir süredir bilinmektedir. 1800'lerde, gelip geçici bir heves olarak düşünülmesine rağmen, yakıt hücreleri, özellikle İkinci Dünya Savaşı'ndan beri yoğun bir araştırma ve geliştirme çalışmasının konusu olmuştur.

William Robert Grove (1811-1896) (1), 1838'de iyileştirilmiş ıslak-hücre bataryasını geliştirmiştir. "Grove hücresi" olarak adlandırılan hücre, çinko sülfat içerisine çinko elektrot ve nitrik asit içerisine platin elektrot daldırılarak oluşturulmuş ve yaklaşık 1,8 volt civarında 12 amperlik akım üretmiştir. Grove (2), elektrotlardan biri sülfürik asit kabına, diğeri oksijen ve hidrojen kabına daldırılan iki platin elektrodu düzenleyerek, elektrotlar arasında sabit bir akım akacağını keşfetmiştir. Sızdırmazlığı sağlanan kaplar hem suyu hem de gazları tutmuşlardır. Grove, akım aktığı sürece, su seviyesinin her iki tüpte de arttığını belirlemiştir.

1800'de, İngiliz Bilimadamları Willam Nicholson ve Anthony Carlisle, elektrik yardımıyla suyun hidrojen ve oksijene ayrılabilceğini ispatlamışlardır. Fakat, elektrik ve su üretmek için gazların birleştirilmesi, Grove'un ifadesiyle "şimdiye kadar kaydedilmemiş ileri bir adım" olmuştur. Grove, birkaç elektrodu seri devre ile bağlayarak bileşimini ayarlamak suretiyle suyun ayrışmasını etkileyebileceğini keşfetmiştir. Bunu, "gaz bataryası" adını verdiği ve ilk yakıt hücresi olarak tanımlayabileceğimiz aygıtla başarmıştır.

Kimyager Ludwig Mond (1839-1909) (3), kariyerini, nikel arıtma ve soda üretimi gibi endüstriyel kimya teknolojilerini geliştirmeye harcamıştır. 1889'da Mond ve asistanı Charles Langer, 0,73 Volt'da elektrot metrekaresinde 6 ampere ulaşan hidrojen-oksijen yakıt hücresini gerçekleştirmişlerdir. Mond ve Langer, hücrede, delikli pilatin ve ince elektrotlar kullanmışlardır. Sıvı elektrolit kullanımında zorluklarla karşılaşmışlardır. Yalıtkan gözenekli bir malzemeye emdirilmiş yarı katı elektrolit kullanarak başarıya ulaşmışlardır. Buna verilen örnek, sulandırılmış sülfürik asit ile doyurulmuş toprak plakadır.

Friedrich Wilhelm Ostwald (1853-1932), yakıt hücrelerinin çalışma prensibinin anlaşılmasında, pek çok teorik çalışma yapmıştır. 1893 yılında, yakıt hücresinin çeşitli bileşenlerinin (elektrot, elektrolit, okside edici ve indirgeyici maddeler, anyonlar ve katyonlar) bağlantılı işlevlerini deneysel olarak belirlemiştir. Grove, gaz bataryasındaki hareketin elektrot, gaz ve elektrolit arasındaki temas noktasında meydana geldiğini kuramsal olarak düşünmüştü, fakat bu düşüncesini daha ileri götürmemiştir. Ostwald, fiziksel özellikler ve kimyasal reaksiyonlarla ilişkilendirilen çalışmasında, Grove'un gaz bataryasının işleyişini çözmüştür. Ostwald'ın yakıt hücrelerinin kimyası hakkındaki açıklamaları, daha sonraki araştırmacılara temel teşkil etmiştir.

William W. Jacques (1855-1932) (4) elektrik mühendisi ve kimyagerdir. 1896'da, Jacques, karbon elektrot ile reaksiyona giren alkali elektrolit içerisine havanın enjekte edildiği bir karbon batarya yapmıştır. Bu buluş, %82'lik verime sahip bir elektrokimyasal hareket yerine, %8 civarında verimi olan bir termo-elektrik hareketle sonuçlanmıştır.

İsviçreli Emil Baur (1873-1944) (5), yirminci yüzyılın ilk yarısı boyunca farklı tiplerdeki yakıt hücreleri üzerinde geniş çaplı araştırmalar yapmıştır. Baur'un çalışmaları, yüksek sıcaklık aygıtlarını (elektrolit olarak eriyik gümüş kullanılan) ve kil ile metal oksitten yapılmış katı elektrolit kullanan bir üniteyi içermektedir.

Francis Thomas Bacon (1904-1992) (6), 1930'lu yılların sonlarında alkali yakıt hücrelerini araştırmaya başlamıştır. 1939'da, nikel delikli kumaş elektrotlar kullanan ve 3000 psi basınç altında çalışan bir hücre yapmıştır. Bacon, II. Dünya Savaşı süresince, Kraliyet Donanmasının denizaltılarında kullanılabilir bir yakıt hücresinin geliştirilmesi üzerine çalıştı ve 1958 yılında, İngiliz "National Research Development Corporation" şirketi için 10 inç çapında elektrotları olan bir küme kullanarak alkali hücreyi çalıştırmayı başardı. Pahalı olmasına karşın, Bacon'un yakıt hücresi, Pratt&Whitney firmasının dikkatini çekecek kadar güvenilir olduğunu ispatladı. Şirket, Bacon'un yakıt hücresine, Apollo uzay aracında kullanılmak amacıyla lisans verdi.

1950'lerin sonunda, NASA, uzay görevinde kullanılmak amacıyla kompakt elektrik üretici kurmaya

başladı. NASA, yakıt hücre teknolojisi ile ilgili yüzlerce araştırmayı destekledi. Son yüzyılda, birçok üretici, içlerinde büyük araba üreticileri ve çeşitli yakıt hücre araçları ve diğer uygulamaların da olduğu yakıt hücre teknolojisini geliştirmeye yönelik araştırmaları desteklemeye devam etmektedir. Yakıt hücre enerjisi, yakın gelecekte geleneksel güç kaynaklarının, hücre telefonlarında kullanılacak mikro yakıt hücrelerinden otomobil yarışlarında kullanılacak yüksek güçlü yakıt hücrelerine kadar değişen sahalarda, yerini alması beklenmektedir.

2. YAKIT HÜCRELERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Alkali Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi: İngiliz Francis Thomas Bacon (6), Grove'un keşfinden beri bilinen asit elektrolit yerine potasyum hidroksit (KOH) kullanarak, 1930'ların sonunda alkali elektrolitlerle deneysel çalışmalara başlamıştır. KOH, asit elektrolitler kadar iyi sonuç vermiştir ve elektrotlara korozif etkisi olmamıştır. Bacon'un hücresinde de gözenekli "gaz-difüzyon elektrotlar" kullanılmıştır. Gaz-difüzyon elektrotlar, elektrot, elektrolit ve yakıt arasındaki reaksiyonun olduğu yüzey alanını artırmıştır. Ayrıca, Bacon, elektrotların içindeki ince gözeneklerden elektrolitin sızmasını önlemek için basınçlı gaz kullanmıştır. Takip eden yirmi yılı aşkın sürede, Bacon, büyük ölçekli uygulamalar yapmak için alkali hücre ile yeterli derecede ilerleme göstermiştir. Bu uygulamaların ilklerinden biri, 1008 hücreli bir kümenin çalıştırdığı, 1959 yapımı Allis-Chalmers çiftlik traktörüdür (7). 15000 Watt güce sahip traktör, 3000 pound civarındaki bir ağırlığı çekmek için yeterli güç üretmiştir. Allis-Chalmers birkaç yıllığına, yakıt hücresiyle çalışan bir golf arabası ve fork-lift yapımı üzerine bir araştırma programı sürdürmüştür. Birleşik Devletler Hava Kuvvetleri de bu programda yer almıştır.

Union Carbide, 1950 ve 1960'lı yılların sonunda alkali hücrelerle deneysel çalışmalar yapmıştır. Karl Kordesch ve meslektaşları, 1930'lu yıllarda, araştırmacı G. W. Heise ve E. A. Schumacher'in yaptığı çalışmaları geliştirerek, karbon gaz-difüzyon elektrotları olan alkali hücreler tasarlamışlardır. Birleşik Devletler Ordusu için yakıt hücresiyle çalışan bir seyyar radar seti ve motosiklet gerçekleştirmişler, ve yakıt hücresine dayalı olarak çalışacak bir denizaltı üssünün taslağını oluşturmuşlardır. Aynı sıralarda, Alman Eduard Justi, karbonil nikel matris üzerinde nikel sünger bulunan gaz-difüzyon elektrotlarını tasarlamıştır.

1960'lı yılların başlarında, uçak motor üreticisi Pratt & Whitney, Bacon'a patentlerin lisansını vermiş ve alkali hücre kullanarak Apollo uzay-aracını çalıştırmak için NASA sözleşmesini kazanmıştır. Bu başarısına rağmen, şu anda kullanılan alkali yakıt hücreleri halen çok saf hidrojen ve pahalı pilatin katalizör gerektirmektedir. Bu yüzden, alkali teknolojisi diğer yakıt hücre çeşitleriyle rekabet halindedir.

Eriyik Karbonat ve Katı Oksit Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi: Eriyik karbonat ve katı oksit yakıt hücrelerinin her ikisi de yüksek sıcaklık aygıtlarıdır. Her iki hücrenin teknik tarihi, 1950'li yılların sonlarında gözlenen büyük farklılıkla birlikte, benzer araştırma çizgisinde seyretmektedir.

1930'lu yılların sonlarında, Emil Baur (8) ve H. Preis, İsviçre'de, yüksek sıcaklıklarda çalışan katı oksit elektrolitleri ile deneysel olarak çalıştılar. Tasarımları, umulduğu kadar elektriksel iletkenliğe sahip değildi ve karbon-monoksit dahil çeşitli gazlarla elektrolitler arasında istenmeyen reaksiyonlarla karşılaşmışlardır. 1940'lu yıllarda, Rus O.K. Davtyan, iletkenliği ve mekanik mukavemeti artırmak amacıyla, sodyum karbonat, tungsten trioksit ve soda cam karışımına monazit kumu eklemiştir. Bununla birlikte, Davtyan'ın tasarımları istenmeyen kimyasal reaksiyonlar ve kısa ömür ile sonuçlanmıştır. 1950'li yılların sonunda, Pennsylvania'daki "The Hague Consolidation Coal Company (Hollanda)"ye ait Central Technical Institute'de ve New York, Schenectady'deki General Electric şirketinde katı oksit teknolojisi üzerine araştırmalar hızlanmaya başlamıştır. Hollandalı bilim adamları, G.H.J. Broers ve J.A.A. Ketelaar, önceki çalışmaları geliştirmeye başlamışlar ve o andaki katı oksitler üzerindeki sınırlamaların farklı bir kısa-dönem ilerlemesi sağladığına karar vermişlerdir. Elektrolitler yerine eritilmiş karbonat tuzları üzerine yoğunlaşmışlardır. 1960 yılında, magnezyum oksitden yapılmış gözenekli sinterlenmiş bir disk içerisinde doymuş lityum-, sodyum-, ve/veya potasyum karbonat karışımını elektrolit olarak kullanarak, altı ay çalışan bir hücre yapmışlardır. Bununla birlikte, kısmen conta malzemesiyle olan reaksiyonlar sonucu eriyik elektrolitin yavaş bir

şekilde azaldığını farketmişlerdir. Aynı sıralarda, Francis T. Bacon, "sebest eriyik" elektrolitinin her iki yüzünde iki tabakalı elektrotlar kullanarak eriyik hücre ile çalışıyordu. En az iki grup yarı-katı veya "hamur" elektrolitler ile çalışıyordu ve birçok grup katı elektrotlardan çok difüzyon elektrotlarını araştırmaktaydı. 1959 yılında, yakıt hücreleri üzerine yapılan bir tartışmada, yarı-iletkenlikle ilgili kısa-devre, erime ve göreceli yüksek iç elektrik direncini içeren katı elektrolitlerin problemlerine işaret edilmiştir. Birçok araştırmacının, eriyik karbonat yakıt hücrelerinin çok daha kısa dönemlik bir gelişme gösterdiğine inanmaya başladıkları görülmektedir. Bununla birlikte, hiçbir araştırmacı katı oksit üzerine çalışmayı bırakmamıştır. Yüksek sıcaklık hücrelerinin karbon-monoksit toleranslı olacağı ve kararlı katı elektrolit kullanacağı vaadi, az miktarda da olsa ilgi çekmeyi sürdürmüştür. Örneğin, Westinghouse araştırmacıları, 1962 yılında, zirkonyum oksit ve kalsiyum oksit kullanan bir hücre ile deneysel çalışma yapmışlardır. Şu günlerde, artan enerji fiyatları ve malzeme teknolojisindeki ilerlemeler, SOFC üzerine yapılan çalışmaları yeniden güçlendirmektedir ve son bir rapora göre yaklaşık 40 şirket bu tip yakıt hücreleri üzerine çalışmaya devam etmektedir.

Fosforik Asit Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi: Deneysel çalışma yürüten araştırmacılar, 1842'de William Grove (9)'un ilk gaz bataryasını keşfinden bu yana, asitleri elektrolit olarak kullanmışlardır. Grove sülfirik asit kullanmıştı. Fakat zayıf elektrik iletkeni olan fosforik asit çok cazip değildi, ve PAFC'lerin gelişimi diğer yakıt hücrelerinden daha yavaş ilerliyordu. 1961'de, G.V. Elmore ve H.A. Tanner, "Orta Sıcaklık Yakıt Hücreleri" isimli makalelerinde fosforik asit elektrolitlerinde yeni bir gelişmeyi tanıtmışlardır. Teflon conta içerisine gömülen %35 fosforik asit ve %65 silika tozdan oluşan bir elektrolit kullanarak deneylerini gerçekleştirdiklerini açıklamışlardır. Sülfirik asitin aksine, fosforik asitlerin, hücre işletim şartları altında elektrokimyasal olarak indirgenmediklerini belirtmişlerdir. Ayrıca, PAFC, saf oksijen yerine hava ile çalışmıştır. Asit hücresi, 90 miliampet/cm² akım yoğunluğunda, hiçbir bozulmaya uğramadan altı ay çalıştırılmıştır.

1963 yılında, "California Research Corporation" ve "Surface Processes Research and Development Corporation" şirketlerinin her ikisinde de, sülfirik asit elektrolitleri ile yapılan deneyler devam etmekteydi. 1960 ve 1970'lerin sonunda, elektrot malzemelerindeki büyük ilerlemeler ve diğer yakıt hücrelerinin ilerlemelerindeki gecikme, PAFC'lere yeni bir ilgi uyandırmıştır.

1960'ların ortalarında, Birleşik Devletler Ordusu, "lojistik yakıtlar" ile çalışan PAFC'ler için bir potansiyel keşfetmiştir. Lojistik yakıtlar ile kastedilmek istenen birimlere tedariki kolay olan yakıtlardır. Allis-Chalmers tarafından, "Engelhard Industries" ürünü buhar dönüştürücü ve "Varo, Inc." ürünü bir elektrik dönüştürücü kullanılarak, ordu testleri için bir hücre üretilmiştir. Bu program süresince, Engelhard'da çalışan O.J. Adlhart, "plastik kaplı elektrolit" geliştirmiştir.

Union Carbide'de Karl Kordesch ve R.F. Scarr tarafından gerçekleştirilen çalışma, "substrate ve teflon kaplı karbon tabakası kadar katalizör taşıyıcı olan karbon kağıdı" ndan yapılan ince bir elektrot elde edilmesini sağlamıştır. TARGET (Team to Advance Research for Gas Energy Transformation, Inc.) olarak bilenen bir sanayi ortaklığı, önemli derecede bazı araştırmaları desteklemiştir. Pratt & Whitney ve the American Gas Association tarafından desteklenen TARGET araştırması, 1969 yılında 15 kW civarında olan yakıt hücre santrallerinin, 1983 yılında yaklaşık 5 MW güce ulaşmasını sağlamıştır.

PEM Yakıt Hücresinin Tarihsel Gelişimi: PEM teknolojisi, 1960'lı yılların başlarında, General Elektrik'te Thomas Grubb (10) ve Leonard Niedrach'ın çalışmaları sonucunda keşfedilmiştir. "US Navy's Bureau of Ships (Elektronics Division)" ve "the US Army Signal Corps." Şirketleri, birlikte yürüttükleri bir program için küçük bir yakıt hücresi geliştirdikleri vakit, General Electric, 1960 ortalarında ilk başarılarını duyurmuşlardır. Ünite, su ve lityum hidrat karışımının ürettiği hidrojen ile çalışmaktaydı. Bu yakıt karışımı, kullanıldıktan sonra atılabilen ve hizmetteki personele kolaylıkla ulaştırılabilen metal kap içerisinde tutuluyordu. Hücre küçük ve taşınabilirdi, fakat pilatin katalizörü pahalıydı.

PEM teknolojisi, US pilotlu uzay programının ilk günlerinde NASA'nın "Gemini" projesinin bir kısmı olarak hizmet etmiştir. Başlangıçta bataryalar, "Mercury" projesinde, uzay gemisinin gücünü sağlamıştır, fakat, daha uzun süre güç kaynağı gerektiren "Apollo" projesi için güneş uçuşları

tasarlanmıştır. "Gemini" projesinin ana amacı, "Apollo" için gerekli ekipman ve prosedürü, ve yakıt hücresinin işletim testlerini içeren 14 güne kadar sona erecek olan görevleri test etmektir. General Electric yapımı PEM hücreler seçilmişti, fakat düşünülen PB2 hücre modeli, zardan oksijen sızıntısı ve iç hücre kirlenmesi gibi teknik zorlukları tekrar etmiştir. "Gemini 1"den "Gemini 4"e kadar olan seferlerde, PEM hücre yerine bataryalarla uçulmuştur.

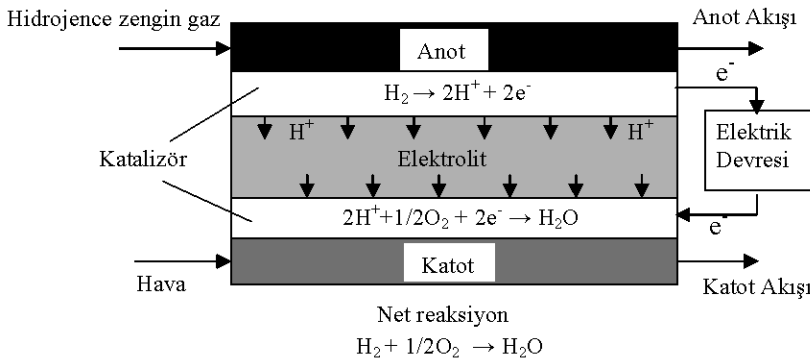
General Electric, PEM hücresini yeniden tasarlamıştır, ve yeni model P3, "Gemini 5"deki arızalar ve zayıf performansına rağmen, geriye kalan "Gemini" uçuşlarında yeterli derecede hizmet etmiştir. Bununla birlikte, "Apollo" projesinin görev planlayıcıları, uzay mekiği tasarımcılarının bir yüzyıl sonra yaptıkları gibi, hem komuta hem de güneş modülleri için alkali yakıt hücrelerini kullanmayı tercih etmişlerdir.

General Electric, PEM hücreleri üzerine çalışmaya devam etmiş ve 1970'li yılların ortalarında, denizaltı yaşam desteği için PEM su elektroliz teknolojisini geliştirerek Birleşik Devletler Donanma Oksijen Üretim Santralını kurmuştur. İngiliz Kraliyet Donanması, kendi denizaltı filosu için 1980'li yılların başında bu teknolojiyi uyarlamıştır. Diğer gruplar da PEM yakıt hücreleri araştırmaya başlamıştır. 1980'li yılların sonları ve 1990'lı yılların başlarında, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı ve Texas A&M Üniversitesi, PEM hücreleri için gerekli olan platin miktarını azaltmanın yollarını deneysel olarak araştırmışlardır.

Son zamanlarda, PEM geliştiricileri, elektroliti güçlendirmek için hücrelerine hava-geçirmez malzeme olan "Gore-Tex"i ilave etmişlerdir.

3. YAKIT HÜCRESİNİN YAPISI

Yakıt hücresi denilince akümülatör veya pil aklı gelmektedir. Her ikisi de kimyasal enerjiyi doğrudan elektriğe çevirir. Aralarındaki en önemli fark; akümülatörde, kimyasal enerji kullanımdan önce depolanmış durumdadır, yakıt hücresinde ise dış kaynaklardan enerji sağlandığı sürece elektrik üretilebilir. Yakıt hücresinin temel çalışma prensibi su-hidroliz reaksiyonunun ters çevrilmesinden ibarettir (bkz. Şekil 1).

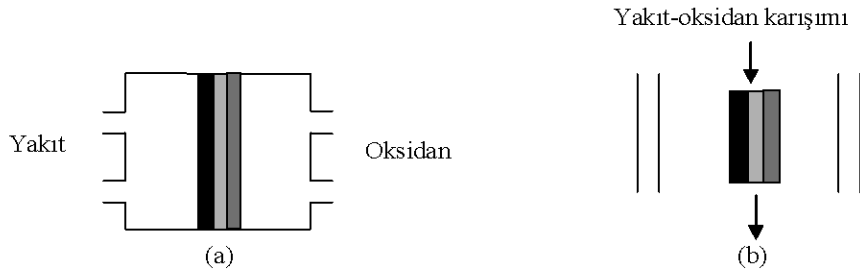


Şekil 1. Yakıt hücresinin çalışma prensibi (PAFC)

Anottaki hidrojenin katalitik oksidasyonu ve katotdaki oksijenin indirgenmesi elektrotlar arasında potansiyel farkı yaratır. Eğer elektrotlar arasında yalıtım sağlayan elektrolit, iyonik kütle ve şarj aktarımına izin verirse, bu potansiyel farkı dış bir devrede kullanılabilir. Eğer kullanılırsa, ürün olarak su elde edilir ve bu reaksiyonun kimyasal enerjisi, kutuplaşma ve direnç kayıpları dolayısıyla, elektrik ve ısı olarak serbest bırakılır. Bu işlem "Carnot" ilkesine ve getirdiği sınırlamalara tabi değildir. Sonuç olarak sadece toplam verim değil bunun yanı sıra elektriksel verim de yüksek olabilir. Yakıt hücrelerinde yakıt olarak hidrojen gazı, doğal gaz, metanol veya etanol, oksidan olarak oksijen gazı veya hava kullanılabilir. Eğer, hidrojen ve oksijen gazları yakıt-oksidan çifti olarak kullanılırsa, ürün olarak saf su elde edilir. Yakıt hücrelerinde, hidrojen içeren herhangi bir gaz karışımından üretilebilen

Yakıt kullanılabilir. Bununla birlikte, hidrojene dönüşüm bazı verim kayıplarına sebebiyet vermektedir. Bu yolla elde edilen yakıtın temizlenmesi gerekebilir. Yakıtın işleyiciye ve hücreye girmeden önce gaz temizleme işlemini gerektirmesi ve hücredeki elektro-kimyasal reaksiyonların çok temiz olması, yakıt hücre santrallerinin oldukça düşük emisyon değerlerine sahip olması sonucunu doğurmaktadır. Yakıt hücrelerinde hareketli kısımların olmayışı, gürültü ve titreşim seviyelerinin minimuma çekilmesini kolaylaştırmasının yanı sıra güvenilirliğini artırmış ve ürün maliyetini azaltmıştır.

Geleneksel yakıt hücresi, temel olarak proton (veya oksijen) ileten elektrolit ile ayrılan iki gözenekli elektrottan oluşur. Hücresinin iskeleti, Şekil 2(a)'da görüldüğü gibi, elektrotlara yakıt ve oksidan sağlayan iki hazneden oluşmaktadır. Tek hazneli yakıt hücresi ilk kez Dyer (11) tarafından ortaya atılmıştır. Şekil 2(b)'de görüldüğü gibi, geleneksel yakıt hücrelerindeki sızıntı problemini çözmek ve basit bir yapı sağlamak için tek hazne içerisine yakıt-oksidan karışımı gönderilmiştir.



Şekil 2. (a) İki hazneli ve (b) Tek hazneli yakıt hücresinin şematik görünümü

4. YAKIT HÜCRE TİPLERİ ve ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

Alkali yakıt hücresi (AFC): Konsantre potasyum hidroksit çözeltisi hem soğutucu hem de elektrolit olarak kullanılır. Bu çözelti hidroksil iyonlarını katottan anota iletir, 80°C civarında çalışır ve CO₂ zehirlenmesine hassastır.



Şekil 3. Bir Amerikan Ordu askerinin yakıt hücresiyle çalışan seyyar matkapla çalışması, 1965.

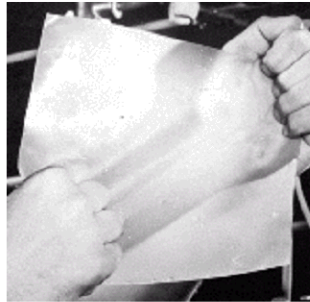
Alkali yakıt hücresinin sakıncası karbon-dioksit hassas olmasıdır. Yakıt ve oksitlenme ortamı, genellikle, alkali çözeltisiyle reaksiyona girerek karbonatları üreten karbondioksit içerir. Bu yüzden yakıt çok saf hidrojen olmalıdır ve oksijen içeren hava kaynağı karbon-dioksitten arınmış olmalıdır. Diğer dezavantajı ise yüksek maliyetidir. Sivil amaçlar için ekonomik olarak gerçekleştirilebilecek bir yakıt hücresi kurmak için halen yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Uzun dönemde, AFC'lerin daha uygun teknolojik çözüm sağlayacağı düşünülmektedir ve uygulama sahasının gelişmesi, diğer yakıt hücre sistemlerine bağlıdır. Bu yakıt hücrelerinde, hidroksil iyonları (OH⁻) katottan anota doğru hareket eder. Anotta, hidrojen gazı OH⁻ iyonları ile girdiği reaksiyon sonucu su üretilir ve elektron salınımı olur. Anotta üretilen elektronlar dış bir devreye elektrik gücü sağlar ve sonra katoda geri dönerler. Burada elektronlar oksijen ve su ile reaksiyona girerek daha fazla hidroksil iyonları üretir. Bu hidroksil iyonları elektrolit üzerinden difüzyon vasıtasıyla anota aktarılırlar.

Alkali yakıt hücrelerinin verimleri %70 değerlerine kadar ulaşmaktadır ve diğer yakıt hücreleri gibi çok az kirlilik oluştururlar. Elektriğin yanı sıra içilebilir nitelikte su ürettikleri için uzay araçlarında kullanılmaktadırlar. Şekil 3'de alkali yakıt hücresiyle çalışan seyyar bir matkap görülmektedir. Alkali hücrelerin en büyük dezavantajı çok saf hidrojen gerektirmesi veya istenmeyen kimyasal reaksiyonun, hücre içerisindeki kimyasal reaksiyonlara engel olan katı karbonat oluşturmalarıdır. Hidrojen haricindeki diğer yakıtlardan hidrojen üretim metodlarının çoğu karbon-dioksit gazı ürettikleri için, bu saf hidrojen gereksinimi alkali yakıt hücreleri üzerine olan çalışmalarını yavaşlatmaktadır. Başka bir dezavantajı ise, reaksiyonu hızlandırmak için büyük miktarlarda pahalı platin katalizör gereksinimidir.

Polimer elektrolit yakıt hücresi (PEFC, PEMFC, SPFC): Protonları anottan katoda ileten katı polimer, hidre edildiğinde elektrolit olarak kullanılır. 80-100°C sıcaklık aralığında çalışır. Hem PEMFC hem de AFC, elektrotlarda katalizör olarak platin kullanımını gerektiren sıcaklık seviyesinde çalışır. Bu sıcaklıklarda platin CO tarafından zehirlenmeye çok hassastır.

Yakıt hücrelerindeki en son gelişme PEFC'lerle olmuştur. PEFC elektrolit olarak proton ileten polimerik zar kullanmaktadır ve avantajları şunlardır: 1) Korozyon problemleri yoktur, 2) üretimleri basittir, 3) CO₂ gazına toleranslıdır, 4) hidrojen ve işlenmiş yakıtlarla çalışabilir, 5) yüksek güç yoğunlukları elde etmek mümkündür.

Yakıt hücre verimlerinin, ulaşım sektöründe kullanılan mevcut sistemlerinkinden 2.5-3 kat daha fazla olması ve ürün olarak kirletici içermemeleri, yakıt hücrelerini ulaşım sektöründe cazip hale getirmiştir. PEFC, ulaşım sektöründe kullanılan küçük birimler için en uygun yakıt hücresidir. Uzay teknolojisinde başarılı olarak kullanılmaktadır. Uygulama sınırlamaları şunlardır: 1) Elektrotların platinden veya platin içeren bileşiklerden yapılması, 2) işlenmiş yakıtlarda bulunan karbon monoksitin zehirleyici etkileri, 3) su yönetim problemleri ve 4) maliyet. Araştırma-geliştirme çalışmalarının sonucunda; platin kullanımı azaltılmıştır, karbon-monoksitin zehirleyici etkileri, seçici katalitik oksidasyon kullanılarak aşılmıştır, maliyetlerde düşüş sağlanmış ve güç artışı gerçekleşmiştir. Amerikan Enerji Bakanlığı'nın (Department of Energy, DOE) çalışmaları, seri üretimde gerçekleştirilebilecek maliyetin 50\$/kWe olduğunu ortaya koymuştur. PEFC'nin diğer bir cazip tarafı metanol ile doğrudan çalıştırılabilmesidir. Büyük araba üreticilerinin çoğu, yakıt hücresi geliştirme programlarına yoğun bir şekilde devam etmektedirler. Prototipler üretilmiş, hatta küçük otobüs filoları şehir trafiğine çıkartılmıştır. 5-6 sene içerisinde ticarileşmesi beklenmektedir.



Şekil 4. Polimer elektrolitin görünümü (the Science Service Historical Image Collection)

Şekil 4'te görüldüğü gibi, proton iletim zarı (PEM) yakıt hücreleri, çok ince ve geçirgen yaprak şeklinde polimer elektrolit ile çalışırlar. Bu zar, küçük ve hafiftir, aynı zamanda düşük sıcaklıklarda, yaklaşık olarak 80°C'de çalışır. Diğer elektrolitler, yaklaşık 1000°C, yüksek sıcaklık gerektirirler.

Zarın her iki tarafında, reaksiyonu hızlandırmak için platin katalizör kullanılır. Hidrojen atomlarının elektronları anotta çekilerek iyonize edilir ve pozitif yüklü protonlar gözenekli zarın bir ucundan yayılarak katoda yönelirler. Elektronlar, harici bir elektrik devresi vasıtasıyla, anottan katoda geçerler ve elektrik gücü temin edilir. Katotta, elektronlar, hidrojen protonları ve havadan gelen oksijen gazı, su oluşturmak için birleşirler. Proton iletim zarı elektroliti, yakıt hücresinin çalışması için, hidrojen protonlarının geçmesine izin verirken elektronların ve ağır gazların geçişini engellemek zorundadır.

PEM hücresinin verimi yaklaşık %40-50 arasındadır. Metanol veya benzin gibi yakıtların hidrojene

dönüşümü, dış bir dönüştürücü ile sağlanır. Halen 50 kW enerji üretim kapasiteli test üniteleri çalışmaktadır ve 250 kW gücündeki üniteler gelişme aşamasındadır.

Fosforik asit yakıt hücresi (PAFC): Elektrolit, protonları anottan katoda iletir ve inert gözenekli yapı tarafından hapsedilir. 200°C sıcaklık civarında çalışır. Elektrotlarda katalizör olarak platin kullanımına izin verir. Hem PAFC hem de PEFC CO₂ gazına toleranslıdır. Elektrolit olarak fosforik asit kullanır. Fosforik asit kararlı bir asittir ve temel metallerle çok çabuk reaksiyona girer. Bunun sonucu olarak, sadece platin ve platin alaşımlar elektrotların yapımında kullanılabilir. PAFC'lerin avantajı, doğal gaz veya kömür gazına dayanan yakıtların elektrodu zehirlemeden kullanılabilmesidir. Ancak, platin zehirlenmesini önlemek için karbon monoksit dönüştürülmelidir veya tamamen kaldırılmalıdır. PAFC kümeleri 30 yıldır gelişme aşamasındadır. PAFC teknolojisi, 200 kWe enerji seviyesine henüz ulaşmıştır. Şehirden uzak bölgelerde, küçük kapasiteli yerleşik güç üretiminde kullanımı avantajlıdır. Dünya çapında işletimde olan 200 kWe enerji üretim kapasitesine sahip toplam 85 adet PAFC sistemi mevcuttur. Milan'da, 1,3 MWe enerji üretim kapasiteli PAFC sistemi 1992 yılından bu yana işletilmektedir. Japonya'da, 11 MWe enerji üretim kapasiteli PAFC ünitesi 1991 yılı sonundan beri kullanılmaktadır. Doğal gazla çalışan PAFC sistemlerinin ulaşabilecek en yüksek verimi, %47 civarında, hidrojenle çalışanları ise % 60 civarında beklenmektedir. PAFC sistemlerinin 1998 yılı maliyeti 2500-5000 \$/kWe arasındadır. İşletim sıcaklıkları düşük olduğu için alt çevrim eklenerek verim artımı sağlanamamaktadır. Büyük çaplı güç üretimi yerine, düşük sıcaklık kombine ısı ve güç üretiminde ve bölge ısıtmasında kullanımı daha uygundur.

Fosforik asit yakıt hücreleri (PAFC), 150 ila 200°C sıcaklık civarında çalışırlar. İsminden de anlaşılacağı üzere PAFC'ler fosforik asiti elektrolit olarak kullanırlar. Pozitif yüklü hidrojen iyonları elektrolit vasıtasıyla anottan katoda geçerler. Anotta üretilen elektronlar dış bir elektrik devresinden geçerken elektrik gücü sağlarlar ve katoda geri dönerler. Burada, elektronlar, hidrojen iyonları ve oksijen, hücreden ürün olarak çıkacak suyu oluştururlar. Elektrotlara yerleştirilecek bir platin katalizör reaksiyonları hızlandıracaktır. Elektronlar etrafında karbon monoksit gazının oluşumu yakıt hücresinin zehirlenmesine sebep olabilir. PAFC hücrelerinin bir avantajı, 200°C sıcaklıkta % 1,5 civarında olan karbon-monoksit gazının konsantrasyonunu tolere edebilmesidir. Diğer bir avantajı ise, iletkenlik için su gerektiren diğer asit elektrolitlerinin aksine, yoğunlaştırılan fosforik asit elektrolitinin, suyun kaynama noktasının üzerinde çalışabilmesidir. Bununla birlikte, asit, hücre içerisindeki diğer bileşenlerin korozyona dayanıklı olmasını gerektirmektedir.

Yakıt hücresinde kullanılacak hidrojen bir dış dönüştürücüde hidrokarbon yakıttan elde edilir. Eğer hidrokarbon yakıt benzin seçilir ve sülfür giderilmezse elektrot katalizörüne zarar verir. PAFC'lerin verimleri ortalama % 40 ila 50 arasındadır. Eğer, atık ısı bir kombine ısı-güç üretim sisteminde tekrar kullanılırsa, verimleri yaklaşık % 80 civarına artırılabilir. 200 kW enerji üretim kapasitesine kadar olan PAFC'ler ticari amaçla kullanılmaktadır ve 11 MW kapasiteli sistemler test aşamasındadır.

Eriyik karbon yakıt hücresi (MCFC): Eriyik alkali karbon karışımını elektrolit olarak kullanır. Bu eriyik, karbon iyonları aracılığıyla katottan anota kütle ve şarj aktarımını sağlar ve inert gözenekli yapıda tutar. aktarımı, katot besleme gazına CO₂ gazının ilave edilmesini gerektirir ve daha sonra bu CO₂ gazı anotta serbest bırakılır. İşletim sıcaklığı, elektrotlarda katalizör olarak nikelin kullanımına izin veren 650°C sıcaklığı civarındadır. Eriyik karbonların kullanımı, işletim sıcaklığını 650°C'den daha yüksek değerlere ulaştırır. Bunu sonucu olarak, yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemeler kullanılmak zorundadır. Anotta Nikel, katotta ise nikel oksit elektrot kullanılabilir. Fosil yakıtlardan elde edilen yakıt gazı CO₂ ve CO içermektedir. MCFC hem CO₂ gazına duyarlıdır hem de nikel/nikel oksit elektrotların kullanımı, CO kirlenmesine bağışıklık kazandırır. MCFC'de, CO gazı CO₂ gazına, su-gaz yer değiştirme reaksiyonu ile hidrojen üreterek oksidize edilir. MCFC'de hidrojeni okside eden karbon iyonlarıdır. Bu iyonlar katotta oluşturulur. Bu yüzden, okside eden gaz CO₂ içermelidir. Pratikte, anottan çıkan gaz katoda döndürülerek CO₂ sağlanır. MCFC tasarımları, iç ve dış dönüşümlü olmak üzere iki çeşittir. 2 MWe enerji üretim kapasiteli iç dönüşümlü ve 250 kWe enerji üretim kapasiteli dış dönüşümlü sistemlerinin testleri California'da gerçekleştirilmiştir. 280 kWe enerji üretim kapasiteli sistem Almanya'da faaliyete geçirilmiştir. Bu sistemleri, 1998'de

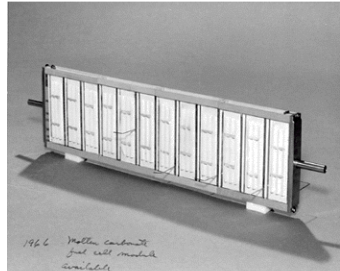
Japonya'nın Kawagoe şehrinde Kurulan 1 MWe enerji üretim kapasiteli sistem takip etmiştir. Şekil 5'de Birleşik Devletler Ordusu için 1966 yılında yapılan bir eriyik karbonat yakıt hücresinin bileşeni görülmektedir.

Eriyik karbonat yakıt hücresi (MCFC)'nde, karbonat tuzları elektrolit olarak kullanılmaktadır. 650°C sıcaklığa kadar ısıtılan tuzlar karbonat iyonlarını (CO_3) eritip anottan katoda iletilmesini sağlarlar. Anotta, hidrojen iyonlarla reaksiyona girerek su, karbon-dioksit gazı ve elektron üretir. Dış bir elektrik devresinden geçen elektronlar elektrik gücü sağlayarak katoda geri dönerler. Burada, havadan gelen oksijen ve anottan tekrar çevrime sokulan karbon-dioksit gazları, elektronlarla reaksiyona girerek elektroliti besleyen ve yakıt hücresinden akımını aktaran CO_3 iyonlarını oluşturur.

Yüksek sıcaklık MCFC'ler, ya iç yada dış dönüştürücü kullanarak çeşitli yakıtlardan hidrojen elde edebilirler. Karbon-monoksit zehirlenme olasılığının düşük sıcaklık yakıt hücrelerindeki oranla daha az olması, MCFC tipi yakıt hücrelerinde kömür kökenli yakıtların kullanılmasını daha cazip hale getirmektedir. MCFC'ler platinden daha ucuz olan nikel katalizörlerle iyi çalışmaktadır. MCFC'lerin % 60'a varan verimleri vardır ve bu verim, atık ısının kombine ısı-güç üretiminde kullanılması durumunda % 80'lere kadar ulaşabilir. Şu anda, test üniteleri 2 MW güce ulaşmışlardır, ancak tasarımlar, 50 ila 100 MW kapasiteli üniteler için yapılmıştır.

Katı-oksit hücrelerle karşılaştırıldığında eriyik karbonat teknolojisinin iki önemli zorluğu dezavantaj oluşturmaktadır. Bunlardan ilki, katıdan daha çok sıvı elektrolit ile çalışmanın karmaşık olmasıdır. Diğeri ise eriyik karbonat hücresinin içerisindeki kimyasal reaksiyondan kaynaklanmaktadır. Elektrolitten gelen karbonat iyonları anottaki reaksiyonlarda kullanılarak tükendiği için, katotta karbon-dioksit gazı enjekte edilerek bu eksikliğin karşılanması zorunlu olmaktadır.

Katı-oksit yakıt hücresi (SOFC): Genellikle elektrolit olarak, yüksek sıcaklıkta, oksijen iyonlarını katottan anota aktaran katı yitir-dengeli zirkonyum kullanılır. İşletim sıcaklığı 1000°C civarındadır. Hem elektrolit hem de elektrotlar seramik malzemedendir.



Şekil 5. Amerikan ordusu için 1966 yılında yapılmış bir eriyik karbonat yakıt hücresinin bileşeni

Bu sıcaklıkta, doğal gaz kolaylıkla hidrojene dönüştürülebildiği için yakıtın hidrojene dönüştürülmesi gereksizdir ve dönüşüm hücrede gerçekleşir. Bu işlem süresince salınan yüksek sıcaklıklı ısı, yüksek kaliteli uygulamalarda işlem ısısı olarak kullanılabilir. İmalat metodları ve yapı malzemelerinin geliştirilmesi gereklidir. SOFC'ler, 100 kWe enerji üretim kapasitesine ulaşmış durumdadır. Yüksek sıcaklık yakıt hücrelerinin her ikisi de (MCFC ve SOFC) yüksek elektrik verimi sağlamaktadır. Yüksek sıcaklık yakıt hücreleri, yüksek kalitede buhar elde edebilmek için ısılarını uygun sıcaklıklarda atarlar. Bu yüzden, yüksek sıcaklık yakıt hücrelerinin, çevrimi tamamlayacak bir gaz ve/veya buhar türbini ile birleştirilmesi uygundur. Doğal gaz ile çalışan MCFC ve SOFC sistemleri, 2-20 MWe enerji üretim kapasite aralığındaki yayılı güç ve kombine ısı ve güç uygulamaları için en uygun yakıt hücre sistemleridir. Yakıt hücre geliştiricileri, toplam maliyetleri 2000 yılında 1800 \$/kWe olan MCFC ve SOFC sistemlerinin 2010 yılına kadar 750-1000 \$/kWe mertebelerine düşeceğini tahmin etmektedir. Bu yüzden, 2010 yılından önce yüksek sıcaklık yakıt hücrelerinin büyük boyutlu güç üretiminde kullanılması düşünülmektedir. Hem MCFC hem de SOFC, büyük boyutlu güç üretiminde (>200 MWe), doğal gaz veya kömür/biyo-kütle'den elde edilen gazlarla çalıştırılabilirler. İşletim sıcaklıkları sayesinde MCFC'lerin buhar veya SOFC'lerin gaz ve buhar türbinleri ile birleştirilmeleri uygun olur. Doğal gazla çalışan MCFC veya SOFC sistemleri için %65-70 aralığında, kömürle çalışanların ise

%55 civarında net verime ulaşılması beklenmektedir. Toplam maliyetin, uzun dönemde, doğal gazla çalışan sistemler için 650-850 \$/kWe, kömürle çalışan sistemler için ise 1600-1800 \$/kWe mertebelerine ineceği tahmin edilmektedir.

Katı oksit yakıt hücresi (SOFC), sıvı yerine katı seramik elektrolit kullanır ve 1000°C'ye varan sıcaklıklarda çalışır. Diğer oksit kombinasyonları da elektrolit olarak kullanılmasına karşın zirkonyum oksit ve kalsiyum oksit karışımı kristal kafes oluşturur. Katı elektrolitin her iki tarafı, özel gözenekli elektrot malzemesiyle kaplanmıştır.

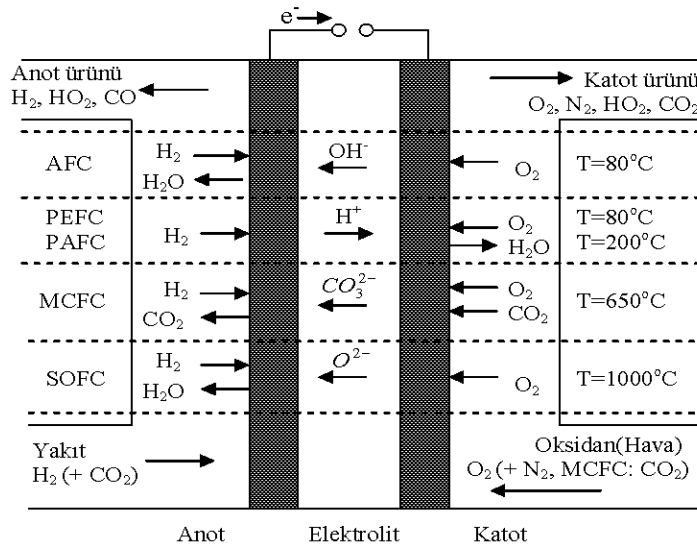
Yüksek işletim sıcaklığında, negatif yüklü oksijen iyonları kristal kafesten uzaklaşırlar. Hidrojen içeren gaz yakıt anot üzerinden geçirildiğinde, negatif yüklü oksijen iyonları, yakıtı okside etmek için elektrolit üzerinden diğer tarafa geçerler. Oksijen genellikle katotta havadan sağlanır. Anotta üretilen elektronlar, dış bir yük aracılığıyla, devreyi tamamlayıp hat boyunca elektrik gücü sağlayarak katota geçer. Verim %60 civarındadır.

SOFC, silindirik tüplerden veya daha geleneksel disk şeklindeki kümelerden oluşabilir. SOFC'ler yüksek sıcaklıklarda çalıştığı için, yakıtı hidrojen elde etmek için dönüştürücüye ihtiyaç olmaz. Bazı test üniteleri 100 kW'a varan kapasiteye sahiptir.

Şekil 6'da şematik olarak farklı yakıt hücre tiplerinin önemli özellikleri görülmektedir. Çizelge 1'de, yakıt hücre sistemlerindeki anot/katot reaksiyonları ve elektrolit içerisindeki iyon aktarımları özetlenmiştir. Hem MCFC hem de SOFC, yakıt besleme deposu olarak kullanılan H₂/CO karışımlarının oluşumunu sağlayan, su-gaz yerdeğiştirme reaksiyonunun anotta ilerlemesine izin verecek kadar yüksek sıcaklıklarda çalışırlar. Aynı zamanda belli yakıtlar, doğal gazın yeniden oluşturulması gibi, doğrudan anot haznesinde işlenebilir. MCFC ilave katalizör gerektirir. Avantajı, soğutma ihtiyacının düşük, veriminin yüksek olmasıdır.

Çizelge 1. Yakıt hücre sistemi anot/katot reaksiyonları ve elektrolit içerisindeki iyon aktarımı

Yakıt Hücresi	Anot reaksiyonu	Net iyon aktarımı	Katot reaksiyonu
AFC	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\leftarrow OH^-$	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H^+ \rightarrow$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H^+ \rightarrow$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
MCFC	$H_2 + C O_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$\leftarrow C O_3^{2-}$	$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow C O_3^{2-}$
SOFC	$CO + C O_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\leftarrow O^{2-}$	$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$
	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$		
	$CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$		
	$CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$		



Şekil 6. Farklı yakıt hücrelerindeki elektrokimyasal reaksiyonlar (30)

Çizelge 2'de, yakıt hücre sistemleri için tercih edilen elektrokatalizörler belirtilmiştir.

Çizelge 2. Temel yakıt hücre sistemleri için tercih edilen elektrokatalizörler

Yakıt Hücresi	Anot katalizörü	Katot katalizörü
AFC	Pt/Au, Pt, Ag	Pt/Au, Pt, Ag
PEMFC	Pt, Pt/Ru	Pt
PAFC	Pt	Pt/Cr/Co, Pt/Ni
MCFC	Ni, Ni/Cr	Li/NiO
SOFC	Ni/ZrO ₂	LaSrMnO ₃

5. YAKIT HÜCRELERİNİN SINIFLANDIRILMASI

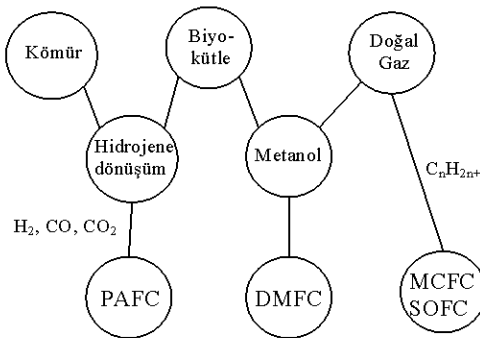
Yakıt hücreleri, en önemli bileşeni olan elektrolit ile tanımlanır. Elektrolit, elektrotlara uygulanacak katalizörü, işletim sıcaklığını ve aynı zamanda işletim gaz gereksinimini belirler. Çizelge 3'de hücre tiplerine göre elektrolit olarak kullanılan malzemeler sıralanmıştır. Yakıt hücresinde gerçekleşen temel reaksiyonlar farklı sıcaklıklarda çeşitli malzemeler tarafından kataliz edilebildikleri için, yakıt hücreleri, oda sıcaklığından 1000°C sıcaklığa kadar değişen işletim sıcaklıkları için tasarlanabilirler. Bu yüzden, yakıt hücresinin tipinin seçilmesi istenen uygulama tarafından belirlenir.

Yakıt hücreleri çalışma sıcaklığına göre düşük sıcaklık yakıt hücreleri (LTFC) ve yüksek sıcaklık yakıt hücreleri (HTFC) olarak iki ana başlık altında toplanırlar. Düşük sıcaklık yakıt hücreleri, asit elektrolit içeren hücrelerdir; yani, 180-210°C sıcaklık aralığında çalışan fosforik asit yakıt hücreleri (PAFC) ve 80-90°C sıcaklık aralığında çalışan Perfluorinat Polimer Sulfonik Asit (Proton exchange Membrane, PEM) yakıt hücreleridir (PEMFC). Yüksek sıcaklık yakıt hücreleri, 600-700°C sıcaklık aralığında çalışan eriyik karbon elektrotlar (MCFC) veya 800-1000°C sıcaklık aralığında çalışan katı-iyonik oksit elektrotları (SOFC) kullanırlar.

Çizelge 3. Temel yakıt hücre tipleri ve işletim sıcaklıkları

Yakıt Hücre Tipi	Kısaltma	Elektrolit	İşletim Sıcaklığı °C
Alkali	AFC	Potasyum hidroksit	50-90
Proton exchange membrane	PEMFC	Katı proton ileten polimer	50-125
Fosforik asit	PAFC	Ortofosforik asit	180-210
Eriyik karbonat	MCFC	Lithium/potasyum karbonat karışımı	630-650
Katı oksit	SOFC	Stabilised zirconia	900-1000
Doğrudan metanol	DMFC	Sülfürik asit veya katı polimer	50-120

Yakıt hücrelerinin diğer bir sınıflandırması yakıt çeşidine göre yapılabilir. Hidrojene alternatif yakıt kullanan sistemlere Doğrudan Yakıtlı Yakıt Hücreleri (DFFC) denmektedir. Alternatif yakıtlar ve kullandıkları sistemler Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Hidrojene alternatif yakıtlar ve kullandıkları sistemler

Yakıt hücreleri uygulama alanlarına göre seyyar veya yerleşik olarak sınıflandırılabilirler. Yakıt hücrelerinin seyyar uygulamalarda kullanılabilmesi için gerekli şartlardan biri yeterli güç yoğunluğu ve enerji dönüşüm esnekliğidir. Çizelge 4'de hidrojen-hava işletimi ve işletim sıcaklıkları için yakıt hücre tiplerinin güç yoğunlukları sunulmuştur.

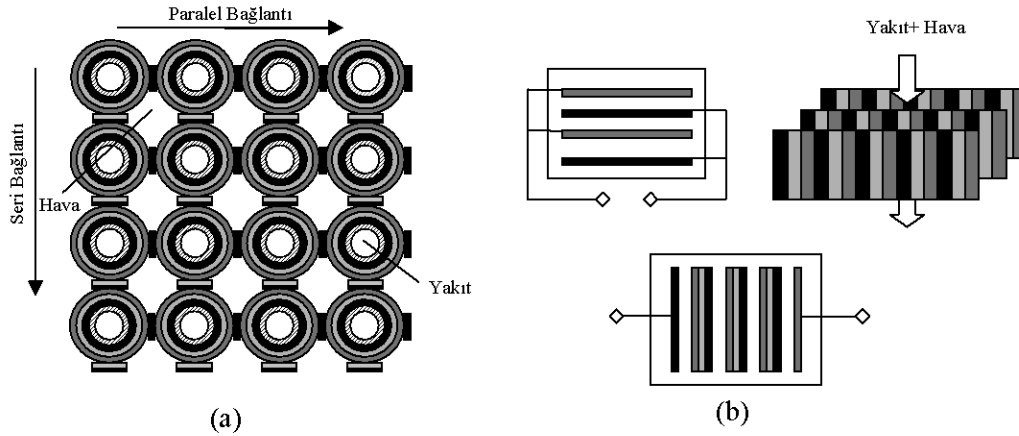
Çizelge 4. Yakıt hücre tiplerinin işletme sıcaklıkları ve güç yoğunlukları (12)

Yakıt hücre tipi	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
İşletim sıcaklığı °C	80	190	650	950
Güç yoğunluğu W/kg	400-800	90	40	60 (Silindirik) 100 (Levha)

Çizelge 4'de görüldüğü gibi seyyar uygulamalar için PEMFC en uygun yakıt hücresidir. Düşük sıcaklık işletimi, büyük enerji kayıpları olmaksızın işletimin keyfi olarak devreden çıkarılmasına izin vermektedir ve güç yoğunluğu diğer yakıt hücrelerinden oldukça yüksektir.

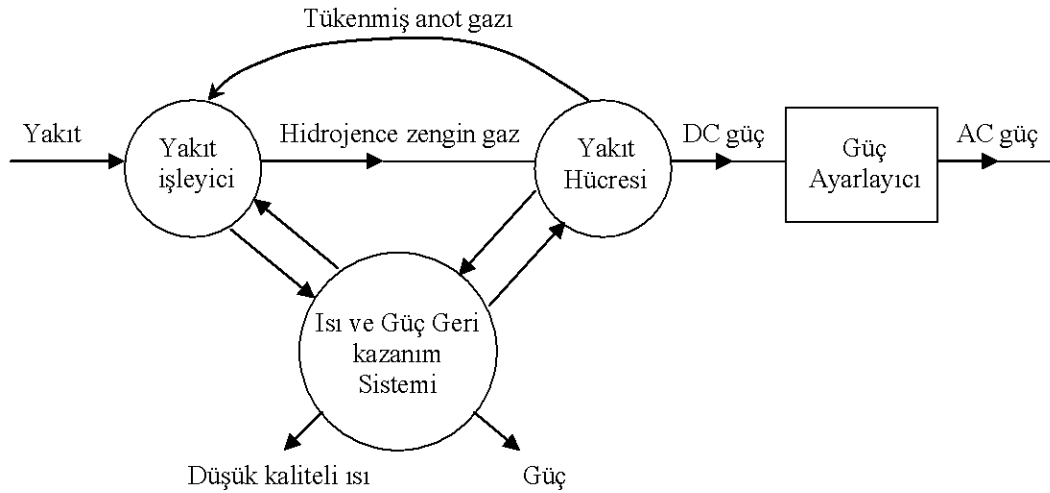
Yakıt hücre kümeleri: Yakıt hücre kümelerinin konfigürasyonu tüp veya levha şeklinde olabilir. Sistem maliyeti, bütünlüğü, çevre etkisi, üretilebilirliği ve pazarlanabilirliği ile ilgili şartlar gözönünde tutularak yakıt hücre kümelerinin konfigürasyonu belirlenmelidir. Hücrelerin birbirleri ile bağlantısı paralel veya seri şekilde yapılabilir.

Şekil 8(a)'da tüp şekilli yakıt hücre kümesi görülmektedir. Tüp şeklindeki yakıt hücreleri birbirlerine paralel ve seri olarak bağlanmışlardır. Bu tip tasarımın avantajı, yapım maliyeti uygun olan Al_2O_3 tüplerinin kullanılmasıdır. Levha şeklindeki yakıt hücrelerinden oluşan küme, Şekil 8(b)'de görülmektedir. Bu sistemin avantajı ise basit, ekonomik ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasıdır.



Şekil 8. Yakıt hücre küme çeşitleri (28): a) Silindirik, b)

Yakıt Hücresi Santrali: Şekil 9'da görüldüğü gibi yakıt hücresi santrali temel olarak dört kısımdan oluşur: Yakıt işleme, yakıt hücre kümelerinde güç üretimi, güç ayarlama ve ısı geri kazanımı ve/veya yakıt işleyici ve yakıt hücresinin atık gazları kullanılarak çalıştırılan entegre gaz ve buhar türbinlerinde güç üretimi. Yakıt işleyici, doğal gaz, propan, benzin, mazot, metanol ve benzeri hazır hidrokarbon yakıtları hidrojen zengin gaza dönüştürür. Bu işlem sisteme karmaşıklık getirir, fakat mevcut altyapısı ve dağıtım şebekesi bulunan yakıtların kullanılması avantaj sağlar. Yakıt olarak hidrojen kullanıldığında yakıt işleyici kullanılması gereksizdir. Güç üretim ünitesi yakıt hücre kümesini kapsar. Küme, istenen miktarda doğru akım güç üretmek için silindirik veya plaka şeklindeki elektrotların seri ve/veya paralel olarak bağlanmasıyla oluşturulur. Güç ayarlama ünitesi yakıt hücresinin ürettiği doğru akım gücü alternatif akıma dönüştürür, aynı zamanda voltaj kaçaklarını ve harmonik düzensizlikleri azaltır.



Şekil 9. Yakıt hücre santralının temel elemanları

6. YAKIT HÜCRELERİNİN BUGÜNKÜ DURUMU

Bugünün PEMFC sistemlerinde Nafyon membranlar tercih edilmesine rağmen, bu malzemenin hem maliyeti yüksektir hem de istenmeyen bazı özellikleri vardır. Hidrokarbon veya alkol yakıtlarından elde edilen hidrojen zengin gazlar yakıt olarak kullanıldığında, anot elektro-katalizörün karbon-monoksite olan hassasiyeti hala büyük bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Metanolün doğrudan elektrokimyasal oksidasyonu, yüksek sıcaklıklarda çalışması sebebiyle absorbe edilen zararlı bileşenlerin azaltılmasını sağladığı için, araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bunun yanı sıra, birçok teknolojik uygulamalar için metanolün Nafyon geçirgenliği çok yüksektir. Şu andaki, maksimum işletim sıcaklığının ve metanol geçişinin belli değerlerden yüksek tutulmaması, Nafyon içeren sistemler için ciddi sınırlamalar getirmektedir. Bu yüzden, araştırmacılar alternatif polimer elektrolit malzemeler aramaktadırlar. Bunlar arasında, sülfonat polietereketonlar (PEEK) ve ışınım aşılı baş-polimerler gelmektedir (13). İşletim sıcaklığını artırma yönündeki diğer bir yöntem ise kompozit polimer/seramik malzemeler geliştirmektir (14).

MCFC küme elemanlarında kullanılan malzemeler Çizelge 5'de listelenmiştir ve yaklaşık 25 yıldır değişmemiştir. 1980'li yılların başındaki en büyük gelişme, yerleşik elektrolit matrisinin üretiminde, çok daha ekonomik olan bant-döküm tekniklerinin kullanılması olmuştur ve şu anda 1 m^2 'den daha büyük hücre alanları başarılı bir şekilde üretilmekte ve test edilmektedir. MCFC sistemleri için yüksek performans ve dayanıklılığı sağlamada eriyik karbonatın dağılımının kontrolü (elektrolit yönetimi), kritik rol oynamaktadır. Bununla birlikte, korozyon reaksiyonları, voltaj tahrikli geçiş, sürünme ve eriyik tuzun buharlaşması gibi çeşitli işlemlerin hepsi, elektrolitin dağılımına etki etmekte ve küme performansını ve ömrünü azaltmaktadır.

Çizelge 5. MCFC küme elemanlarında kullanılan malzemeler ve ömür tahminleri (15)

Eleman	Malzeme	Dayanıklılık (h)
Anot	Ni-Cr	40000
Katot	NiO(Li)	40000
Matris	(-LiAlO ₂ +Al ₂ O ₃)	40000
Elektrolit	Li/Na/K: 60/20/20	25000-40000
Katalizör	BG Teknolojisi	6000-40000
Ayırıcı	310 S stainless çeliği	40000
Anot kaplaması	Ni tabaka	10000-15000
Islak-conta	Alüminize edilmiş metal	40000

Teknik ve ekonomik sınırlamalar, SOFC kümelerinin 1000°C sıcaklık civarında işletimini zorunlu kılmaktadır. Elektrik üretmek amacıyla kurulan gaz türbini/SOFC küme kombine sistemleri, üretilen elektrik enerjisinin maliyetini düşük tutmak için, halen SOFC kümelerinin 850°C sıcaklığın üzerinde çalıştırılmalarını gerektirmektedir. HT-SOFC ünitelerini üretmek için uygulanan işlemler, 1300°C'ye varan sıcaklıkları gerekli kılmakta ve bu yüksek sıcaklıklara maruz kalan elemanlar termodinamik ve mekanik olarak uyum içerisinde olmak zorundadırlar. HT-SOFC kümelerini üretmek için çeşitli işlem yöntemleri araştırılmaktadır. Contasız tüp şeklindeki SOFC tasarımı, ilk kez 1980 yılında, Siemens-Westinghouse tarafından gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda, yüksek güç yoğunlukları ve mukavemet artışı sağlamak amacıyla alternatif bir katot kesiti (16) araştırılmaktadır.

AFC sistemlerinin en büyük dezavantajı, KOH elektrolitinin, havanın veya hidrokarbon ve alkol yakıtlardan elde edilen saf-olmayan hidrojenin içerisinde bulunan CO₂ kirliticileri ile reaksiyona girmesidir. AFC sistemlerinin tasarımında iki temel konfigürasyon mevcuttur. Bunlardan ilki, yerleşik matris konfigürasyonudur. Diğer ise, su ve ısı yönetiminin kontrol mekanizmasını sağlayan elektrolitin sirküle edildiği AFC tasarım konfigürasyonudur.

Karbon-dioksit toleranslı olan düşük sıcaklıklarda çalışan diğer bir hücre ise PAFC sistemidir. PAFC üniteleri, tatminkar teknik şartlar ve yeterli güvenilirlik göstermesine rağmen, kombine ısı ve güç pazarında, maliyetinin yüksek olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadır. PAFC sistemlerinin ekonomisini etkileyen en önemli faktör, malzeme fiyatlarıdır. PAFC kümelerinde kullanılan malzemeler, 25 yılı aşkın bir süredir bir değişikliğe uğramamışlardır. Karbon korozyonu ve Pt çözülmesi, 0,8 V'dan yüksek hücre voltajlarında önemli olmaktadır. Bu yüzden, PAFC kümelerinin açık-devre potansiyeline yakın düşük akım yoğunluklarında çalışması önlenmelidir.

Appleby (17) tarafından gerçekleştirilen çalışma, 1989 yılından bu yana yakıt hücreleri üzerine yürütülen çalışmaları özetlemesi açısından önemlidir. Ayrıca, bu çalışmada, yakıt hücre üreticileri tanıtılmıştır. Daha çok inceleme türündeki makaleler ve 1991 yılından 1995 Mayıs'ına kadar olan sempozyum ve konferanslardaki sunumlar verilmiştir ve Ağustos 1995 yılına kadar olan mühendislik aktiviteleri genel olarak gözden geçirilmiştir. Yakıt hücrelerini modelleme çalışmaları son yıllarda önem kazanmıştır. Modelleme üzerine yapılan çalışmalar Çizelge 6 ve 7'de sunulmuştur. Yakıt hücreleri üzerine yapılan çalışmalar uygulama alanlarına göre yerleşik veya seyyar olarak sınıflandırılabilirler. Bu çalışmalardan bazıları Tablo 8'da sunulmuştur. Yakıt hücrelerindeki teknolojik gelişmeleri özetleyen 1995-2002 yılları arasında yapılmış çalışmalardan bazıları Çizelge 9'da sunulmuştur.

7. SONUÇ

Yakıt hücre reaksiyonu yüksek verime sahiptir. Yakıt hücresi, elektrik üretim kontrolünün bireysel tüketicinin eline geçmesini sağlayacaktır. Yakıt hücresi, geleneksel yakıt kaynaklarının yerini alacak (18-21), küresel ısınmaya (22-23), çevre (24-25) ve gürültü (26) kirliliğine çözüm getirecek alternatiflerden biridir. Yakın gelecekte, yerleşik ve seyyar uygulamalarda kullanılması tasarlanan mikro-yakıt hücresinin (27), üretimde ve satışlarda, çok hızlı bir ilerleme sağlayacağı umulmaktadır. Bunun gerçekleşmesi için, özellikle maliyet azaltılması yönünde çalışmalara ihtiyaç vardır.

Çizelge 6. Yakıt hücrelerinin modellenmesi üzerine 1995-2002 yılları arasında yapılan bazı çalışmalar.

Yazarlar	Yıl	Hücre Tipi	Amaç	Önemli Özellik	Kabuller	Çözüm Tekniği	Bilgisayar Program	Deneylerle Karşılaştırma
K. Scott, W. Taama, J. Cracksahn [30]	1997	DMFC	Hücre performansını hesaplamak	Gözenekli elektrotta Kütle aktarımı	a) Hücre sıcaklığı sabit ve uniform, b) Akış kanalı boyunca olan aktarım "plug akış" ile tanımlı, c) Her hücrede basınç uniform ve zar basınç düşümüne yol açmıyor, d) Elektrotlarda kütle aktarımı yok, e) Akış kanalı boyunca ve elektrotun kalınlığı yönünde voltaj düşüşü yok, f) Zar tamamen hücre edilmiş, g) Elektrot kinetiği Tafel denklemi ile tanımlı	Sonlu Farklar Metodu, Newman'ın BAND Algoritması	NL3BAN D.C [31, 32]	[30]
G. Maggio, V. Recupero, C. Mantegazza [33]	1996	SPEFC Küme'si	a) Sıcaklık ve akım yoğunluğu dağılımını hesaplamak, b) Performans kayıplarını azaltmak, c) İşletim şartlarını tanımlamak	Enerji, akım yoğunluğu, hassasiyet analizi	a) Küme'nin köşeleri adyabatik, b) Basınç düşümü ihmal, c) Soğutma tüpünün ısı iletkenliği ihmal, d) Yakıtın akış yönündeki sıcaklık gradyeni ihmal	Sonlu Farklar Metodu	3-B	De Nora Pemelec SpA (DNF), Milan, İtalya [34]
S. Freni, G. Maggio, E. Passalacqua [35]	1997	MCFC	Zar özelliklerinin hidrojen geçirgen akış ve difüzyon elektrot akışı üzerine olan etkilerini araştırmak	Kütle aktarımı, Gözenekli ortamda difüzyon	a) Bulk ve Knudsen gaz difüzyon mekanizması, b) Gözenekli ortamda difüzyon, gaz molekülleri ile bulk malzeme arasında kimyasal reaksiyon yok, c) Gözenekli ortamda alkali buhar aktarımının hesabında sadece difüzyon akışı d) Anot haznesinde alkali buharın konsantrasyonu sabit			
E. Fontes, C. Lagergren, D. Simmons [36]	1997	MCFC	Elektrot dolgu oranının değişimi ile kutuplaşma eğilimlerinin değişimini incelemek	Akım Kütle Elektrokimyasal reaksiyon	a) İnce-film modeli, b) Katı fazdaki potansiyel gradyeni ihmal, c) reaksiyonda superoxida mekanizması kullanılmış, d) Butler-Volmer kinetiği			
M. Wehr, vd. [37]	1998	PEFC Hem tek hücre hem de küme	Yakıt hücrelerinin yapısı ve malzeme ile ilgili değerlendirilmelerde bulunmak	Enerji Su Kütle Elektrokimyasal reaksiyonlar	a) PEFC'nin gaz dağıtıcı, difüzyon tabakası, katalitik reaksiyon tabakası ve proton iletken zar'dan oluştuğu kabul edilmiş, b) Sabit sıcaklık akış alanı	Modified Newton-Raphson Method, Petzold-Gear's backward differantiation formulas Method	1-B Sabit zamana bağlı	
G. Xia-Mei, K. Hidajat, C. Ching [38]	1999	Tüp-kabuk tipi SOFC	Yakıt hücrelerinin davranışını tanımlamak	Kütle, Reaksiyonlar	a) Continuously Stirred Tank Model (CSTM) ve Plug Flow Model (PFM) b) PFM için iyi karıştırılmış anot ve katot haznesi, c) kütle aktarım direnci ihmal, d) ideal gaz		Sabit sıcaklık, kararlı durum	[38]
J-H. Jo, S-C Yi [39]	1999	AFC tek hücre	Hücre performansını incelemek	Bileşen kütle, Süreklilik, Kütle, Momentan, Elektrik potansiyeli, Akım yoğunluğu, Anot ve katot katalizör tabakalarındaki potansiyel düşüşü	a) Hücre beş tabaka ve altı sınırdan oluşmaktadır. Anot gaz difüzyon tabakası, Anot katalizör tabakası, ayrıca tabaka, katot katalizör tabakası, katot gaz difüzyon tabakası, b) Model, 11 değişken, 25 yönetici denklem ve 38 sınır şartından oluşmuştur.	Birinci ve ikinci mertebe Sonlu Farklar Metodu BAND algoritması, Newman [40]	1-B Sabit sıcaklık	Orbiter Fuel Cell (FC-17C) NASA uzay mekâninde güç kaynağı olarak International Fuel Cell (IFC) tarafından geliştirilen hücre

Çizelge 7. Yakıt hücrelerinin modellenmesi üzerine 1995-2002 yılları arasında yapılan bazı çalışmalar.

Yazarlar	Yıl	Hücre Tipi	Amaç	Önemli Özellik	Kabuller	Çözüm Tekniği	Bilgisayar Programı	Deneylerle Karşılaştırma
J.J. Baschuk, X. Li [41]	2000	PEMFC tek hücre	a) Hücre performans ve işletimini incelemek, b) Yakıt hücrelerinin üç overpotansiyel bölgesini modellemek, c) Toplam hücre kutuplaşma eğilimlerini tahmin etmek	Elektro-kimyasal reaksiyonlar için Butler-Volmer denklemi, Ohmik kayıplar için Ohm Kanunu, kütle aktarımı için Fick Kanunu, hücre voltajı, kutuplaşma eğilimleri, hücre akımı,	Hücre dört kısımdan oluşmaktadır, zar elektrolit, katot katalizör tabakası, elektrot desteği, akış kanalı a) Katot elektrot destek bölgesinde ve/veya katot katalizör tabakasında su sızıntısı, b) Zar tamamen hücre edilmiş, c) Su su hem katot katalizör tabakasında hem de katot elektrotta mevcut, d) Anot reaksiyon over-potansiyeli ihmal edilmiş, e) Katalizör tabakasında Knudsen difüzyonu önemsiz, Mar ve Li [42, 43]	Aynklaştırmada "Quasi-linear Approximation" kullanılmış	1-B Sabit sıcaklık Kararlı durum	Kim vd [44] Voss vd [45] Ledjef-Hey ve Heinzel [46]
K. Sundmacher vd [47]	2001	DMFC Tek hücre	Yakıt hücrelerinin davranışını analiz etmek	Anotta konvektif kütle aktarımı, Anot katalizör tabakasında metanolün elektro-kimyasal oksidasyonu, Katot katalizör tabakasında oksijenin elektrokimyasal indirgenmesi, anot difüzyon tabakası boyunca karbon-doksit ve metanolün kütle aktarımı, elektro-osmosis ve basınç tahrikli aktarım, Katot katalizör tabakasında metanolün istemeyen elektrokimyasal oksidasyonu, Elektrot su dengesi, Elektrot kinetiği	a) Anot haznesi Sürekli karıştırılan Tank Reaktörü (CSTR) olarak ele alınmış, b) akım toplayıcılar ve elektrik bağlantılarındaki ohmik düşümler ihmal, c) Yakıt hücreleri sabit sıcaklık işletimi, d) Katot haznesinde oksijen dönüşümü ihmal, e) Oksijen ve Karbon-doksit PEM içine difüzyon olmayabilir, f) Su konsantrasyonu sabit, g) Katalizör tabakalarında kütle aktarım direnci ihmal, h) Anot difüzyon tabakasında, metanol ve Karbon-doksit kütle aktarım katsayıları ept, i) Anot haznesinde ve anot difüzyon tabakasındaki karışımlar saf su faz karışımı olarak ele alınmıştır.		ProMoT DIVA [48]	[47]
J.J. Kriegsmann, H.Y. Cheh [49]	2000	Silindirik AFC	Zn/MnO ₂ 'nin konsantrasyonlu elektrolit olarak modellenmesi	Kütle aktarımı reaksiyon	a) Alkalin hücre Anot, Elektrolit ve Katottan oluşmaktadır, b) Sınır şartları [50] ile aynı	Crank-Nicolson Method	BAND(J) Subroutine [51, 52] Modified Numerical Linearization Subroutine [53, 54]	
J. Palsson, A. Selimovic, L. Sjunnesson [55]	2000	Düzensel SOFC SOFC/GT sistemi	Sistem performans ve işletim davranışını incelemek	Kimyasal reaksiyonlar, İsa aktarımı, Kütle aktarımı	a) Eksenel koordinatlar, b) Kanallar ve küme hücreleri arasında besleme gazlarının uniform dağılımı, c) Hücre kayıplarına elektrik dirençten sebep olmakta, d) akım toplayıcılar eşli-potansiyel plakalar olarak ele alınmıştır, e) Uniform hücre voltajı, f) Gaz ve katı arasında ısıma ısı aktarımı yok, g) Bütün dış duvarlar adyabatik	Sonlu Hacim Formülasyonu	2-B Kararlı Durum, Aspen Plus™	

Çizelge 8. Uygulama alanına göre sınıflandırılan çalışmalardan bazıları

UYGULAMA ALANI	YAZARLAR	YIL	HÜCRE TİPİ	AMAÇ
YERLEŞİK	N.M. Sannes, R. Boersma [56]	2000	AFC, PEFC, PAFC, SOFC	Yerleşik uygulamalarda 1 ila 10 kW güç aralığındaki küçük-ölçekli yakıt hücreleri için Pazar ve teknik gereksinimler araştırılmıştır. Avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır. Evcil uygulamalardaki kullanımı ile ilgili PEM ve SOFC sistemlerindeki iki yeni gelişme karşılaştırılmıştır.
	G.W.H. Scherer, E. Newson, A. Wokaun [57]	1999	SOFC, MCFC	MTH-sistemi (Methylcyclohexane-Toluene-Hydrogen)'nin ekonomisini fosil yakıtlardan konvansiyonel elektrik üretimi ile karşılaştırmak
	D. Jansen ve M. Mozaffarian [58]	1997	MCFC	Özerk uygulamalarda, 500kW _e 'a kadar olan küçük sistemler için, merkezi güç üretim uygulamalarında 600 MW _e 'a kadar olan büyük sistemler için değerlendirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
	A.J. Appleby [17]	1996	PAFC MCFC SOFC	Sistem, Pazar, emisyon ve maliyet-indirgemesi açısından yakıt hücre üreticileri gözden geçirilmiştir. Bu araştırma, yerleşik uygulamalarda kullanılan PAFC, MCFC ve SOFC teknolojilerindeki ilerlemeleri kapsamaktadır. Bu makale, hepsini içermekle birlikte, genel anlamda, 1989 yılından bu yana yapılan literatürleri gözden geçirmiştir. Daha çok inceleme türündeki makaleler ve 1991 yılından 1995 Mayıs'ına kadar olan sempozyum ve konferanslardaki sunular incelenmiştir. Ağustos 1995 yılına kadar olan mühendislik aktiviteleri genel olarak gözden geçirilmiştir.
YERLEŞİK + SEYYAR	K.B. Prater [59]	1996	SPFC	Katı polimer yakıt hücre (SPFC) teknolojisindeki ilerlemeler sunulmuştur. Tamamen SPFC ile çalışan, gerçek boyuttaki bir transit otobüs tanıtılmıştır. Yerleşik ve seyyar uygulamalar için yakıt hücre kümelerinin gelişimindeki ilerlemeler anlatılmıştır.
	K. Ledjeff-Hey, V. Fomanski, T.Kalk, J. Roes [60]	1998	SPFC	Yerleşik ve seyyar uygulamalar için uygun olan ve SPFC için kullanılacak basit ve kompakt bir hidrojen üretim sistemini tasarlamak
SEYYAR	B. Lin [61]	2000	PEMFC	Kompakt metal hidrid hidrojen depolama ünitesine sahip PEMFC motosiklet tasarımı sunulmuştur.
	G. Sattler [62]	2000	Genel	Bu çalışmada, gemi güvertelerinde kullanılan yakıt hücrelerindeki, denizlilerin, deniz üssü gemilerin ve ticari gemilerin güvertesinde işletimi için çeşitli yakıt hücre sistemlerinin gereksinimlerini dikkate alan aktiviteler sunulmuştur.
	B.D. McNicol, D.A.J. Rand, K.R. Williams [63]	1999	DMFC	Karayolu ulaşımında DMFC'lerin kullanımı ile ilgili çalışmalar gözden geçirilmiştir. Teknolojinin tarihi tartışılmış ve ticari gelişiminin beraberinde getirdiği, özellikle elektrot reaksiyon mekanizmaları, etkin katalizörün gelişimi, ve olası kullanılabilir elektrotlar hakkındaki problemler değerlendirilmiştir. Başarılı ticarileşmeye karşı engeller gözden geçirilmiş ve gelecek çalışmalara öneriler verilmiştir.
	E. De Geeter, vd.[64]	1999	AFC	Hızlı yakıt ikmali yapılabilen ve sıfır emisiyona sahip mevcut elektrik araçları güverte yükleyicileri olarak kurulduklarında alkali yakıt hücrelerinin işletimi ve gelişimi sunulmuştur.
	S.G. Chalk, J.F. Miller, F.W. Wagner [65]	2000	PEMFC	Ulaşım sektöründe DOE Yakıt hücrelerinin geleceğe yönelik planları ve teknik başarıları gözden geçirilmiş, ve PNGV programı hakkında bir durum raporu sunulmuştur
	T. Klaiber [66]	1996	Genel	Metanol dönüştürücü ve yakıt hücresi kullanılan araçlarda tüketicilerin istekleri ve teknik gereksinimler tartışılmıştır. Kullanılan hacmin küçültülmesi, ağırlığın azaltılması ve aynı zamanda sistem dinamiği ve verim in geliştirilmesini içeren teknik gelişmelerin getirdiği risklerden bahsedilmiştir.
	T.B. Atwater, P.J. Cygan, F.C. Leung [67]	2000	PEMFC	Taşınabilir güç kaynağı için olası bir hibrid sistem örneği olarak, elektro-kimyasal kapasitörler ve bir yakıt hücresi incelenmiştir.

Çizelge 9. Yakıt hücrelerindeki teknolojik gelişmeleri tanıtan bazı makaleler

YAZARLAR	YIL	HÜCRE TİPİ	AMAÇ
S.C. Singhal [68]	2000	SOFC	1)Farklı hücre elemanları için kullanılan malzemeler ve üretim metodlarını gözden geçirmek, 2) Bu malzemeler kullanılarak üretilen hücrelerin performanslarını değerlendirmek, 3) Hücre maliyetini azaltmaya amacıyla araştırma yapılan malzemeler ve işlemleri değerlendirmek, 4) Güncel SOFC'leri işleten en son kurulan güç üretim sistemleri hakkında bilgi vermek
F.J. Gardner, M.J. Day, N.P. Brandon, M.N. Pashley, M. Cassidy [69]	2000	SOFC	1) Integrated Planar SOFC (IP-SOFC) sistemi hakkında bilgi vermek, 2) Rolls-Royce firmasında yürütülmekte olan araştırma projeleri hakkında bilgi vermek, 3) En son maliyet azaltma yönündeki IP-SOFC kümeleri üzerinde yapılan çalışmalar, multi-cell MEA performansındaki son gelişmeler anlatılmıştır.
K. Kordesch vd. [70]	2000	AFC	Elektrot teknolojisindeki yeni gelişmeler ve yakıt hücre kümeleri hakkında bilgi vermek
B. Zhu, G. Meng, B-E. Mellander [28]	1999	Orta Sıcaklık Yakıt Hücreleri	Malzeme ve sistemlerdeki en son gelişmelere dayanan orta sıcaklık ve yeni yakıt hücrelerini kapsayan sistemler incelenmiştir
D. Jansen ve M. Mozaffarian [58]	1997	MCFC	Bu makale, MCFC kombine ısı ve güç santral için yatırım maliyetlerinin tahmini ve elektrik ve ısı verim heaplarını, ve pazar araştırmasını içermektedir
M. Waidhas, W. Drenckhahn, W. Preidel, H. Landes [71]	1996	DMFC	Hidrojene alternatif yakıt kullanan sistemlerden kaynaklanan farklı opsiyonlar tanımlanmış ve genel durumları tartışılmıştır. Bu alanda, Siemens firmasındaki güncel durum ve teknik sorunlar gözden geçirilmiştir.
A.J. Appleby [17]	1996	PAFC MCFC SOFC	Sistem, Pazar, emisyon ve maliyet-indirilmesi açısından yakıt hücre üreticileri gözden geçirilmiştir. Bu araştırma, yerleşik uygulamalarda kullanılan PAFC, MCFC ve SOFC teknolojilerindeki ilerlemeleri kapsamaktadır. Bu makale, hepsini içermemekle birlikte, genel anlamda, 1989 yılından bu yana yapılan literatürleri gözden geçirmiştir. Daha çok inceleme türündeki makaleler ve 1991 yılından 1995 Mayıs'ına kadar olan sempozyum ve konferanslardaki sunular incelenmiştir. Ağustos 1995 yılına kadar olan mühendislik aktiviteleri genel olarak gözden geçirilmiştir.
K. Joon [29]	1998	Genel	Yakıt hücrelerinin gelişim durumları, sistem planları, inşası, karakteristikleri ve ilkelerinin incelenmesi sunulmuştur. Enerji kaynak altyapısındaki integrasyonun durumu ve ticarileşmesi tartışılmıştır.
G. Sattler [63]	2000	Genel	Bu çalışmada, gemi güvertelerinde kullanılan yakıt hücrelerindeki , denizluların, deniz üssü gemilerin ve ticari gemilerin güvertesinde işletimi için çeşitli yakıt hücre sistemlerinin gereksinimlerini dikkate alan aktiviteler sunulmuştur.
B.D. McNicol, D.A.J. Rand, K.R. Williams [64]	1999	DMFC	Karayolu ulaşımında DMFC'lerin kullanımı ile ilgili çalışmalar gözden geçirilmiştir. Teknolojinin tarihi tartışılmış ve ticari gelişiminin beraberinde getirdiği, özellikle elektrot reaksiyon mekanizmaları, etkin katalizörün gelişimi, ve olası kullanılabilir elektrotlar hakkındaki problemler değerlendirilmiştir. Başarılı ticarileşmeye karşı engeller gözden geçirilmiş ve gelecek çalışmalara öneriler verilmiştir.
W. Dönitz [12]	1998	PEMFC	Hidrojen/hava işletiminde PEMFC'lerin ilerlemesi , gelişiminin statüsü ve temel gereksinimler analiz edilmiştir.
E. Gülzow [72]	1996	AFC	AFC sistemlerinde karşılaşılan problemler ve maliyet analizleri sunulmuş, ayrıca, German Aerospace Research Establishment (DLR)'de AFC sistemleri üzerine gerçekleştirilen araştırmalardan bahsedilmiştir.
E. De Geeter, vd.[65]	1999	AFC	Hızlı yakıt ikmali yapılabilen ve sıfır emisyonu sahip mevcut elektrik araçları güverte yükleyicileri olarak kurulduklarında alkali yakıt hücrelerinin işletimi ve gelişimi sunulmuştur.
S.G. Chalk, J.F. Miller, F.W. Wagner [66]	2000	PEMFC	Ulaşım sektöründe DOE Yakıt hücrelerinin geleceğe yönelik planları ve teknik başarıları gözden geçirilmiş, ve PNGV programı hakkında bir durum raporu sunulmuştur
W. Smith [73]	2000	PEMFC	Enerji depolama ortamlarında hidrojen kullanımının uygulamaları ve çeşitli yakıt hücresi/elektrolizör tabanlı enerji depolama sistemleri incelenmiştir.
K. Kordesch, vd. [74]	2000	AFC	Alkali yakıt hücrelerinin çalışma prensibi açıklanmış, Kanada Hidrojen Enstitüsü [19] ve Graz Teknik Üniversitesi (Avusturya) [20]'nde geliştirilen yakıt hücre kümesi tanıtılmıştır.
B.C.H. Steele [75]	2001	Genel	Yakıt hücre teknolojisinin gelişiminde malzeme bilimi ve mühendisliğin kritik rolü araştırılmıştır. Yakıt hücresinin her tipi için malzeme seçimi incelenmiştir.
K.B. Prater [60]	1996	SPFC	Katı polimer yakıt hücrelerinin ticarileşmesi sürecindeki ilerlemeler sunulmuştur. Tamamen SPFC ile çalışan gerçek boyutlardaki bir transit otobüs tanıtılmıştır. Yerleşik ve ulaşım sektöründeki uygulamalarda, yakıt hücre küme'lerinin gelişimindeki ilerlemeler açıklanmıştır.
T. Klaiber [67]	1996	Genel	Metanol dönüştürücü ve yakıt hücresi kullanılan araçlarda tüketicilerin istekleri ve teknik gereksinimler tartışılmıştır. Kullanılan hacmin küçültülmesi, ağırlığın azaltılması ve aynı zamanda sistem dinamiği ve verimin geliştirilmesini içeren teknik gelişmelerin getirdiği rizikolardan bahsedilmiştir.
R. Jiang, D. Chu [76]	2001	PEMFC	Üç değişik PEMFC küme yapısının tasarımı (bipolar, pseudo-polar, mono-polar), çeşitli nem ve sıcaklıklarda, incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Grove, William R., "On Voltaic Series and the Combination of Gases by Platinum." *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 14 (86):127 (1839).
2. Grove, William R. "On a Gaseous Voltaic Battery." *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21 (140): 417 (1842).
3. Stone, C., Morrison, A.E., "From curiosity to 'power to change the world'," *Solid State Ionics*, 152-153:1-13 (2002).
4. Jacques, W.W., *Harper's Mag.*, 94:144 (1896).
5. Liebhafsky, H.A., Cairns, E.J., "Fuel Cells and Fuel Batteries", *Wiley*, New York, 34-42 (1968).
6. Bacon, F.T., *Int. J. Hydrogen Energy*, 10 (7/8):423 (1985).
7. Anon., *Business Week*, 68 (17 Ekim 1959).
8. Liebhafsky, H.A., Cairns, E.J., "Fuel Cells and Fuel Batteries", *Wiley*, New York, 34-42 (1968).
9. Grove, William R., "On Voltaic Series and the Combination of Gases by Platinum." *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 14 (86):127 (1839).
10. Grubb, W.T., General Electric, *US Patent 2*, 913, 511 (1959).
11. Dyer, C.K., *Nature*, 343: 547 (1990).
12. Dönitz, W., "Fuel cells for mobile applications, status, requirements and future application potential," *Int. J. Hydrogen Energy*, 23 (7): 611-615 (1998).
13. Buchi, F.N., Gupta, B., Haas, O. ve Schere, G.G., "Study of radiation-grafted FEP-G-polystyrene membranes as polymer electrolytes in fuel cells," *Electrochimica Acta*, 40: 345-353 (1995).
14. Antonucci, P.L., Arico, A.S., Creti, P., Ramunni, E. ve Antonucci, V., "Investigation of a direct methanol fuel cell based on a composite Nafion-silica electrolyte for high temperature operation," *Solid State Ionics*, 125: 431-437 (1999).
15. Steele, B.C.H., "Material science and engineering: The enabling technology for the commercialisation of fuel cell systems," *Journal of Materials Science*, 36: 1053-1068 (2001).
16. Singhal, S.C., "SOFC VI", Electrochem. Soc., *New Jersey*, USA99(19):39 (1999).
17. Appleby, A.J., "Fuel cell technology: Status and future prospects," *Energy*, 21(7/8): 521-653 (1996).
18. Louis, J.J.J., "Fuel Cell Power for Transportation 2001," *Society of Automotive Engineers*, Warrendale, PA (2001).
19. General Motors, Argonne national laboratory, BP amoco, ExxonMobil and Shell, "Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems-North American Analysis," US DOE Office of Transportation Technologies, *Draft Final Report*, Washington, DC, 1 (2001).
20. Anon., *Economist*, 358 (8208):13 (2001).
21. International energy agency, "World Energy Outlook 2000," *IEA Publications*, Paris, France (2000).
22. "Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change," Aralık (1997).
23. Intergovernmental Panel on Climate Change, in: J.T. Houghton (Ed.), Report of Working Group 1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2001: The Scientific Basis, Summary for Policymakers, *Cambridge Univ. Press*, New York, NY (2001).
24. American Public Power Association, "Notice of Market Opportunities for Fuel Cells," *American Public Power Association*, Washington, DC (1988).
25. Van der Veer, J., "Plenary speech," *16th World Petroleum Congress*, Calgary, 13 Haziran (2000).
26. Contadini, J.F., *Proc. IECEC 2000*, 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 1341 (2000).
27. F. Baentsch, "Liberalisation-challenges and opportunities for fuel cells," *J. Power Sources* 86: 84-89 (2000).
28. Zhu, B., Meng, G., Mellander, B.E., "Non-conventional fuel cell systems: new concepts and development," *Journal of Power Sources*, 79: 30-36 (1999).
29. Joon, K., "Fuel cells-a 21st century power system," *Journal of Power Sources*, 71: 12-18 (1998).
30. Scott, K., Taama, W., Cruickshank, J., "Performance and modelling of a direct methanol solid polymer electrolyte fuel cell," *Journal of Power Sources*, 65: 159-171 (1997).

31. "NL3BAND.C nonlinear tridiagonal band solver," copyright 1991 *Technical Software Distributors*.
32. White, R.E., *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 17: 367 (1978).
33. Maggio, G., Recupero, V., Mantegazza, C., "Modelling of temperature distribution in a solid polymer electrolyte fuel cell stack," *Journal of Power Sources*, 62: 167-174 (1996).
34. Informative Brochure, "Solid Polymer Fuel Cell (SPFC) at De Nora", De Nora SpA, Bistolfi 35, 20134-Milan. (2): 95 Apr. (1995).
35. Freni, S., Maggio, G., Passalacqua, E. "Modeling of porous membranes for molten carbonate fuel cells," *Materials Chemistry and Physics*, 48: 199-206 (1997).
36. Fontes, E., Lagergren, C., Simonsson, D., "Mathematical modelling of the MCFC cathode on the linear polarisation of the NiO cathode," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 432: 121-128 (1997).
37. Wöhr, M. vd., "Dynamic modelling and simulation of a polymer membrane fuel cell including mass transport limitation," *Int. J. Hydrogen Energy*, 23(3): 213-218 (1998).
38. Xui-Mei, G., Hidajat, K., Ching, C., "Simulation of a solid oxide fuel cell for oxidative coupling of methane," *Catalysis Today*, 50: 109-116 (1999).
39. Jang-Ho Jo, Sung-Chul Yi, "Acomputational simulation of an alkaline fuel cell," *Journal of Power Sources*, 84: 87-106 (1999).
40. Newman, J., *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 7: 514 (1968).
41. Baschuk, J.J., Li, X., "Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degrees of water flooding," *Journal of Power Sources*, 86: 181-196 (2000).
42. Marr, C.L., "Performance modelling of a proton exchange membrane fuel cell," Master Tezi, *Makina Müh. Böl.*, *University of Victoria*, Canada (1996).
43. Marr, C.L., Li, X., "Composition and performance modelling of catalyst layer in a proton exchange membrane fuel cell," *J. Power Sources*, 77: 17-27 (1999).
44. Kim, J., Lee, S., Srinivasan, S., "Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation," *J. Electrochem. Soc.*, 142(8): 2670-2674 (1995).
45. Voss, H.H. vd., "Anode water removal: a water management and diagnostic technique for solid polymer fuel cells," *Electrochem. Acta*, 40(3): 321-328 (1995).
46. Ledjeff-Hej, K., Heinzl, A., "Critical issues and future prospects for solid polymer fuel cells," *J. Power Sources*, 61: 125-127 (1996).
47. Sundmacher, K. vd., "Dynamics of the direct methanol fuel cell(DMFC): experiments and model-based analysis," *Chemical Engineering Science*, 56: 333-341 (2001).
48. Trankle, F. vd., "Pro-MoT/DIVA: A prototype of a process modeling and simulation environment," *IMACS symposium on mathematical modelling* (Editörler: I. Troch & F. Breitenacker), 2nd MATHMOD, ARGESIM Report No. 11, 341-346 (1997).
49. Kriegsmann, J.J., Cheh, H.Y., "A binary electrolyte model of a cylindrical alkaline cell," *Journal of Power Sources*, 85: 190-202 (2000).
50. Podlaha, E.J., Cheh, H.Y., "Modeling of cylindrical alkaline cells. VII. A wound cell model," *J. Electrochem. Soc.*, 141(7):1751 (1994).
51. Newman, J.S., "Electrochemical Systems 2nd ed.," *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, NJ (1991).
52. Van Zee, J., Kleine, G., White, R.E., Newman, J. "Electrochemical Cell Design," *Plenum*, New York, 377-389 (1984).
53. Podlaha, E.J., Doktora Tezi, *Columbia University*, Newyork (1992).
54. Bennion, D.N., *AIChE Symp. Ser.*, 79: 25 (1983).
55. Palsson, J., Selimovic, A., Sjunnesson, L., "Combined solid oxide fuel cell and gas turbine system for efficient power and heat generation," *Journal of Power Sources*, 86: 442-448 (2000).
56. Sammes, N.M., Boersma, R., "Small-scale fuel cells for residential applications," *Journal of Power Sources*, 86: 98-110 (2000).
57. Scherer, G.W.H., Newson, E., Wokaun, A., "Economic analysis of the seasonal storage of electricity with liquid organic hydrides," *International Journal of Hydrogen Energy*, 24: 1157-1169 (1999).
58. Jansen, D., Mozaffarian, M., "Advanced fuel cell energy conversion systems," *Energy Conv. Manage.*, 38(10-13):957-967 (1997).

59. Prater, K.B., "Solid polymer fuel cells for transport and stationary applications," *Journal of Power Sources*, 61: 105-109 (1996).
60. Ledjeff-Hej, K., Heinzl, A., "Critical issues and future prospects for solid polymer fuel cells," *J. Power Sources*, 61: 125-127 (1996).
61. Lin, B., "Conceptual design and modeling of a fuel cell scooter for urban Asia," *Journal of Power Sources*, 86: 202-213 (2000).
62. Sattler, G., "Fuel cells going on-board," *Journal of Power Sources*, 86: 61-67 (2000).
63. McNicol, B.D., Rand, D.A.J., Williams, K.R., "Direct methanol-air fuel cells for road transportation," *Journal of Power Sources*, 83: 15-31 (1999).
64. De Geeter, E., Mangan, M., Spaepen, S., Stinissen, W., Vennekens, G., "Alkaline fuel cells for road traction," *Journal of Power Sources*, 80: 207-212 (1999).
65. Chalk, S.G., Miller, J.F., Wagner, F.W., "Challenges for fuel cells in transport applications," *Journal of Power Sources*, 86: 40-51 (2000).
66. Klaiber, T., "Fuel cells for transport: can the promise be fulfilled? Technical requirements and demands from customers," *Journal of Power Sources*, 61: 61-69 (1996).
67. Atwater, T.B., Cygan, P.J., Leung, F.C., "Man portable power needs of the 21st century I. Applications for the dismounted soldier. II. Enhanced capabilities through the use of hybrid power sources," *Journal of Power Sources*, 91: 27-36 (2000).
68. Singhal, S.C., "Advances in solid oxide fuel cell technology," *Solid State Ionics*, 135: 305-313 (2000).
69. Gardner, F.J., Day, M.J., Brandon, N.P., Pashley, M.N., Cassidy, M., "SOFC technology development at Rolls-Royce," *Journal of Power Sources*, 86: 122-129 (2000).
70. Kordesch, K., Hacker, V., Gsellmann, J., Cifrain, M., Faleschini, B., Enzinger, P., Fankhause, R., Ortner, M., Muhr, M., Aronson, R.R., "Alkaline fuel cells applications," *Journal of Power Sources*, 86: 162-165 (2000).
71. Waidhas, M., Drenckhahn, W., Preidel, W., Landes, H., "Direct-fuelled fuel cells," *Journal of Power Sources*, 61: 91-97 (1996).
72. Gilzow, E., "Alkaline fuel cells: a critical view," *Journal of Power Sources*, 61: 99-104 (1996).
73. Smith, W., "The role of fuel cells in energy storage," *Journal of Power Sources*, 86: 74-83 (2000).
74. Kordesch, K., Hacker, V., Gsellmann, J., Cifrain, M., Faleschini, G., Enzinger, P., Fankhauser, R., Ortner, M., Muhr, M., Aronson, R.R., "Alkaline fuel cells applications," *Journal of Power Sources*, 86: 162-165 (2000).
75. Steele, B.C.H., "Material science and engineering: The enabling technology for the commercialisation of fuel cell systems," *Journal of Materials Science*, 36: 1053-1068 (2001).
76. Jiang, R., Chu, D., "Stack design and performance of polymer electrolyte membrane fuel cells," *Journal of Power Sources*, 93: 25-31 (2001).

Geliş Tarihi:23.10.2002

Kabul tarihi:15.04.2003