

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİDROJEN YAKMA SİSTEMİ DİZAYNI
YAKIT HÜCRESİ DİZAYN VE HESAPLARI**

Makine Mühendisi Alen Murat KUYUMCU

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet KOYUN

İSTANBUL,2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iii
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. YAKIT PİLLERİ	1
1.1 GİRİŞ	1
1.2 YAKIT PİLİ NEDİR?.....	1
1.3 YAKIT PİLİ TARİHİ	1
1.4 YAKIT PİLLERİNİN GENEL YAPISI VE TEMEL PRENSİBİ	2
1.5 YAKIT PİLİ ÇEŞİTLERİ.....	4
1.5.1 ERİMİŞ KARBONAT YAKIT PİLİ (MCFC).....	4
1.5.2 KATI OKSİT YAKIT PİLİ (SOFC).....	6
1.5.3 ALKALİ YAKIT PİLİ (AFC)	9
1.5.4 DOĞRUDAN METANOL KULLANILAN YAKIT PİLİ	11
1.5.5 FOSFORİK ASİT YAKIT PİLİ	13
1.5.6 PROTON DEĞİŞİM MEMBRANLI YAKIT PİLİ	15
1.6 YAKIT PİLLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	18
2. HİBRİD SİSTEMLER.....	20
2.1 YAKIT PİLİ - GAZ TÜRBİNİ SİSTEMLERİ	21
2.2 SOFC – TPV SİSTEMLERİ	24
2.3 PEMFC – RÜZGAR TÜRBİNİ SİSTEMLERİ	25
2.4 YAKIT PİLİ – PV SİSTEMLERİ	27
2.5 YAKIT PİLİ – PİL SİSTEMLERİ	30
2.6 YAKIT PİLİ – YAKIT PİLİ SİSTEMLERİ	31
2.6.1 DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE REAKSİYONLARI	32
2.6.2 KARBON MONOKSİT UZAKLAŞTIRMA.....	34
3. MATEMATİK MODEL.....	36
3.1 ANOT İÇERİSİNDEKİ KANALLARDA OLUŞAN ENERJİ DENKLEMİ	38
3.2 ANOT GAZ GEÇİŞ KATMANI İÇERİSİNDE BASINÇ DENKLEMİ.....	40
3.3 KATOT GAZ GEÇİŞ KATMANI İÇERİSİNDE BASINÇ DENKLEMİ	42
3.4 ANOT GAZ GEÇİŞ KATMANI İÇERİSİNDE ENERJİ DENKLEMİ	42
3.5 ANOT REAKSİYON KATMANI İÇİNDE ENERJİ DENKLEMİ	44
3.6 POLİMER ELEKTRON GEÇİŞ ZARI İÇİNDE ENERJİ DENKLEMİ.....	47

3.7	KATOT REAKSİYON KATMANI İÇİNDE ENERJİ DENKLEMİ.....	49
3.8	KATOT GAZ GEÇİŞ KATMANI İÇERİSİNDE ENERJİ DENKLEMİ.....	51
3.9	KATOT İÇERİSİNDEKİ KANALLARDA OLUŞAN ENERJİ DENKLEMİ....	54
4.	DENEY DÜZENEĞİ VE DENEYLER	56
4.1	DENEY TESİSATI	56
4.2	DENEYLER	60
4.2.1	1. DENEY.....	61
4.2.2	2. DENEY	62
4.2.3	3. DENEY	63
4.2.4	4. DENEY.....	64
4.2.5	5. DENEY	64
4.2.6	6. DENEY	64
5.	SONUÇLAR.....	65
	KAYNAKLAR.....	66
	EKLER	68
Ek 1	YAKIT PİLİ ÜÇ BOYUTLU ÇİZİMLERİ.....	69
Ek2	TEKNİK RESİMLER.....	75
Ek3	PARÇA RESİMLERİ.....	79
Ek3	DENKLEMLERİN VE JACOBIEN MATRİSİNİ OLUŞTURAN YAZILIM.....	91
Ek4	DENKLEMLERDEN VE JACOBIEN MATRİSİNDEN SONUÇLARI.....	
	BULAN YAZILIM.....	93
Ek5	DENKLEMLERİN YAZILI OLDUĞU YAZILIM.....	94
Ek6	JACOBIEN MATRİSİN YAZILI OLDUĞU YAZILIM	96
	ÖZGEÇMİŞ.....	99

SİMGE LİSTESİ

\tilde{A}	: Boyutsuz alan
A	: Alan (m^2)
\tilde{A}_s	: Boyutsuz yakıt hücresi kesit alanı
A_s	: Yakıt hücresi kesit alanı (m^2)
A_{wet}	: Islak alan (m^2)
B	: Boyutsuz sabit
$c_{p,i}$: Sabit basınçta ısı kapasitesi (kJ/kgK)
D_{h_1}	: Gaz kanalı hidrolik çapı (m)
D_2	: Knudsen difüzyon katsayısı
f_1	: Sürtünme faktörü
F	: Faraday Sabiti, 96.485 (c/mol)
ΔG	: Gibbs serbest enerjisi değişimi kJ/kmol gaz
$\tilde{\Delta G}$: Boyutsuz gibbs serbest enerjisi değişimi
H	: Entalpi (kJ/kmol)
ΔH	: Entalpi değişimi (kJ/kmol)
$\tilde{\Delta H}$: Boyutsuz entalpi değişimi
h	: Isı transfer katsayısı (W/m^2K)
\tilde{h}	: Boyutsuz ısı transfer katsayısı
I	: Akım (A)
j_2	: Kütle akışı (kg/m^2s)
k_1	: Isıl iletkenlik W/mK
\tilde{k}	: Boyutsuz ısı iletkenlik
K	: Geçirgenlik m^2
L_1	: Kontrol hacmi uzunluğu (m)
L_c	: Gaz kanalı genişliği (m)
L_t	: Kanal ayırıcı genişliği (m)

L_x, L_y, L_z : Yakıt hücresi boyutları (m)

\dot{m} : Kütleli debi(kg/s)

m : Kütle (kg)

M : Molekül ağırlığı (kg/kmol)

n : Eşdeğer elektron sayısı (1/mol)

\tilde{N} : Boyutsuz duvar ısı transfer katsayısı

$P_{2,out}$: Basınç N/m²

\tilde{p}_i : Boyutsuz

\tilde{p}_s : Kesit alanı katsayısı (m)

\tilde{Q} : Boyutsuz ısı transferi

Q : Isı transferi (W)

r : gözenek çapı

\tilde{R} : üniversal gaz sabiti, 8,314 (kJ/kmolK)

R : İdeal gaz sabiti (kJ/kmolK)

$Re_{D_{h,1}}$: Hidrolik çapa göre hesaplanan Reynolds sayısı

T_i : Sıcaklık (K)

u : Hız (m/s)

\tilde{u} : Boyutsuz hız

U : Isı transfer katsayısı (W/m²K)

V_T : Toplam Hacim (m³)

β : Elektrik Direnci (Ω)

- δ :Gaz Kanal Oranı
- ξ : Boyutsuz Katman Kalınlıkları
- ϕ_1 : Porozite
- ψ : Boyutsuz Kütlesel Debisi
- θ : Boyutsuz Sıcaklık
- σ : Elektriksel İletkenlik (1/ Ω m)
- ρ : Yoğunluk (kg/m³)
- μ : Viskozite (Pa.s)
- ζ : Fazlalık Katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

PAFC	Phosporic Acid Fuel Cell
FC	Fuel Cell
PEM	Proton Exchange Membrane
GDL	Gas Diffusion Layer
MEA	Membrane Electrode Assembly
AFC	Alkali Fuel Cell
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
TPV	Thermo Photo Voltaic
SPV	Solar Photo Voltaic
PV	Photo Voltaic
DC	Direct Current
AC	Alternative Current
CV	Control Volume

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Elektroliz ve yakıt pilinin karşılaştırmalı prensibi	2
Şekil 1.2 yakıt hücresinin şematik çalışma prensibi	4
Şekil 1.3 Erimiş karbonat yakıt pili şematik çalışma prensibi	7
Şekil 1.4 Katı oksit yakıt pili şematik çalışma prensibi	7
Şekil 1.5 Alkali yakıt pili şematik çalışma prensibi	9
Şekil 1.6 Alkali yakıt pillerinde basınç etkisi.....	11
Şekil 1.7 Alkali yakıt pillerinde sıcaklık etkisi	11
Şekil 1.8 Doğrudan metanol kullanılan yakıt pillerin şematik çalışma prensibi	12
Şekil 1.9 Fosforik asit yakıt pilinin şematik çalışma prensibi.....	13
Şekil 1.10 Proton değişim membranlı yakıt pili yığını.....	15
Şekil 1.11 Proton değişim membranlı yakıt pilinin şematik çalışma prensibi	16
Şekil 1.12 Seri bağlanmış yakıt hücreleri	17
Şekil 2.1 Sistemlerin güç üretim kapasitesine göre verimlerinin değişimi	20
Şekil 2.2 Endüstride kullanılan bir FC-gaz türbini sistemi	22
Şekil 2.3 Şekil 2.2 deki sistemin elektrik şeması	22
Şekil 2.4 Başka bir SOFC- gaz türbini sistemi.....	24
Şekil 2.5 TPV sisteminin çalışma prensibi	25
Şekil 2.6 SOFC-TPV hibrid sistemi	26
Şekil 2.7 FC-Rüzgar türbini hibrid sistemi.....	26
Şekil 2.8 FC-PV hibrid sistemi.....	28
Şekil 2.9 Şekil 2.8 deki FC-PV hibrid sisteminin çalışma avantajları	28
Şekil 2.10 Bir diğer FC-PV sistemi	29
Şekil 2.11 FC-Pil hibrid sistemi	30
Şekil 2.12 FC-Pil paralel bağlama.....	30
Şekil 2.13 FC-Pil seri bağlama	31
Şekil 2.14 SOFC-PEMFC hibrid sistemi.....	32
Şekil 3.1 Yakıt Matematik modeli.....	37
Şekil 4.1 Yakıt Pili Tesisatı	56

Şekil 4.2 150 bar basınçlı hidrojen tüpü	57
Şekil 4.3 Basınç ayar vanası	57
Şekil 4.4 Hidrojen debimetre ve debi ayar vanası	58
Şekil 4.5 Nemlendirici	58
Şekil 4.6 Nem alıcı ve basınç ayar vanası	59
Şekil 4.7 Hava debimetre ve debi ayar vanası	59
Şekil 4.8 Sisteme bağlı ampermetre ve voltmetre	60
Şekil 4.9 1. Deneydeki Değerlerden Yararlanarak Yakıt Hücresi İçindeki Sıcaklıkları	61
Şekil 4.10 2. Deneydeki Değerlerden Yararlanarak Yakıt Hücresi İçindeki Sıcaklıkları	62
Şekil 4.11 3. Deneydeki Değerlerden Yararlanarak Yakıt Hücresi İçindeki Sıcaklıkları	63

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Yakıt pili çeşitleri	5
Tablo 1.2 Yakıt pillerinin karşılaştırılması.....	19
Tablo 2.1 Şekil 2.2 deki sistemin ölçüm değerleri	23
Tablo 4.1 Hesaplarda kullanılan sabit değerler	60
Tablo 4.2 1.deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri ...	61
Tablo 4.3 2.deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri ...	62
Tablo 4.4 3.deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri ...	63
Tablo 4.5 4.deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri ...	64
Tablo 4.6 5.deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri ...	64
Tablo 4.7 6.deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri ...	65

ÖNSÖZ

Günümüzde dünya nüfusundaki artış ve buna bağlı olarak enerji ihtiyacındaki yükseliş, alternatif yakıtlara daha fazla önem verilmesine ve buna bağlı olarak daha fazla zaman ve para harcanmasına neden olmaktadır. Varolan fosil yakıt kaynaklarının ortalama 100 yıllık bir ömrü kaldığı düşünüldüğünde, verilen önemin artmasının normal olduğu görülmektedir. Söz konusu enerji ihtiyacı ancak 21. yüzyılın yakıtı olan hidrojen ile karşılanabilir. Bu nedenden dolayı hidrojenin enerjisini kullanarak elektrik üreten yakıt pilleri büyük bir öneme sahiptir. Bunun yanı sıra giderek ağırlaşan çevre sorunu, küresel ısınma gibi etkenler dünyamızı her geçen gün yaşanmaz bir yere çevirirken bu dünya üstünde yaşam alanı bulan her insan oğlunun üstüne tabiat anaya karşı büyük bir sorumluluk düşmektedir. Yeni, temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olan hidrojen ve bu enerjinin açığa çıkarılmasında büyük öneme sahip olan yakıt pilleri hakkında bu tezi hazırlayarak ben üzerime düşen bu sorumluluğun bir kısmı umarım yerine getirmiş olurum.

Hayatımın her anında bana destek olan hem çok iyi bir anne hem de çok iyi bir dost olarak gördüğüm annem Eftihiya Kuyumcu'ya; bu günlere gelmemde ruhen desteğini eksik etmeyen rahmetli babam Haritun Kuyumcu'ya; çalışmalarım esnasında her türlü kahrımı çeken bir tanecik kardeşim Mirey Anastasia Kuyumcu'ya; çalışmamda bilgisini ve tecrübesini benimle paylaşan tez danışmanım Yıldız Teknik Üniversitesi öğretim elemanlarından Doç. Dr. Ahmet Koyun'a ve teknoloji danışmanlığı yaptığı benden maddi, manevi desteğini esirgemeyen Alarge Alıç Ağacı Mak. Elek. Ar.-Ge. Ltd. Şti.'ne ve sevgili çalışma arkadaşlarıma; hayatımda önemli yeri olan bütün zorluklara rağmen çalışmaktan vazgeçmeyen bilim aşığı Yıldız Teknik Üniversitesi Güneş Enerjili Sistemler Kulüp'ü üyesi arkadaşlarıma; manevi desteğini her zaman hissettiğim Öğr. Gör. Dr. Anıl Nomak Akdoğan'a, moralimi yüksek tutmama yardımcı olan Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Isı Proses dalı öğretim elemanlarına; projemde özel yardımları dokunan sevgili çalışma arkadaşlarım Cumali Dede ve Onur Yenilmez'e ; vatanın ve milletin bütünlüğünü korumak için canlarını veren aziz şehitlerimize teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Bu yüksek lisans tezi dünya’da enerji sorunun çözümünde önemli rol oynayan alternatif enerji kaynaklarından hidrojen enerjisini tanıtmayı ve yaygınlaştırmayı amaçlar.

Bu tezde hidrojenin kimyasal yöntemlerle oksitlenmesi sonucunda elde edilen elektrik enerjisine dönüşmesi prensibiyle çalışan yakıt hücreleri anlatılmış ve bu doğrultuda yakıt hücresi içinde enerji ve momentum denklemlerinden yararlanarak oluşan sıcaklık değişimi ve basınç kaybı hesaplanmıştır. Burada oluşan denklemler MATLAB de farklı debi ve basınçlar için hesaplanmış, dizayn ve imal edilen yakıt pili ile deneyler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yakıt pilinin testleri için bir test düzeneği kurulmuş ve bu düzende testler yapılmıştır.

Yapılan hesaplar kanal içindeki termodinamik ve ısı dengelere göre yapılmıştır. Her katman içerisinde enerji, momentum, ve kütle korunumu denklemleri yazılarak sistem içindeki sıcaklıklara ulaşılmış ve bu sayede sistemin verimi hesaplanmıştır.

Özel bir dizayn yapılarak yakıt pili imal edilmiş bu imalat sırasında üst sıkma kısımları döküm yöntemiyle imal edilmiş yakıt pilinin iki yanında kapatma görevi gören parçalar (endplate) sac malzeme alınıp frezede işlenerek hazırlanmıştır. Alt sıkma parçaları ise lama alınarak frezede işlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yakıt hücresi, yakıt pili, hidrojen, hibrid sistemler, enerji denklemleri, kütle ve ısı transferi

ABSTRACT

This paper aims to introduce fuel cells which are an alternative energy resources which are the solution for the energy problem.

This paper explains the working of the fuel cell which is based on the oxidation of the hydrogen to produce electric, by using the energy and momentum equations the temperature distribution and pressure drops in backing layers were calculated. MATLAB was used in order to calculate the equations and the results with the change of flowrate and the inlet pressures. The specially designed fuel cell was produced and experiments have done to compare the calculated efficiency and the real efficiency. A test system was installed and tests were made.

Calculations were made according to the thermodynamic equations. Energy, momentum and mass transfer equations were written in every layer and then temperature distribution and the efficiencies were found.

The produced fuel cell was specially designed. The upper clamps made by casting and the endplates and lower clamps were treated in milling cutter.

Keywords: Fuel cell, hydrogen, hybrid systems, energy equations, mass and heat transfer

1. YAKIT PİLLERİ

1.1. Giriş

Günümüzde dünya nüfusundaki artış ve buna bağlı olarak enerji ihtiyacındaki yükseliş, alternatif yakıtlara daha fazla önem verilmesine ve buna bağlı olarak daha fazla zaman ve para harcanmasına neden olmaktadır. Varolan fosil yakıt kaynaklarının ortalama 100 yıllık bir ömrü kaldığı düşünüldüğünde, verilen önemin artmasının normal olduğu görülmektedir. İnsanoğlunun enerjiyi değerlendirme seçeneklerinin en önemlilerinden biri “Elektrik Enerjisi” şeklindedir. Günümüzde güneş, hidrolik, rüzgar, nükleer, dalga, jeotermik, hidrojen ve biyokütle gibi yeni-temiz-yenilenebilir enerji kaynaklarına, elektrik üretimi için, artan bir ilgi bulunmaktadır. Bu kaynaklar yeni enerji teknolojisi kapsamında, çeşitli enerji dönüşüm yöntem ve/veya sistemleri ile değerlendirilmektedir. Bu kapsamda yakıt pilleri sahip olduğu pek çok olumlu özellik ile ön plana çıkmaktadır.

1.2 Yakıt Pili Nedir?

Yakıt pili sisteme dışarıdan sağlanan yakıt ve elektro kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olan oksitleyicinin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik ve ısı formunda kullanılabilir enerjiye çeviren güç üretim elemanıdır.(Büyüktür, 2005)

1.3 Yakıt Pili Tarihi

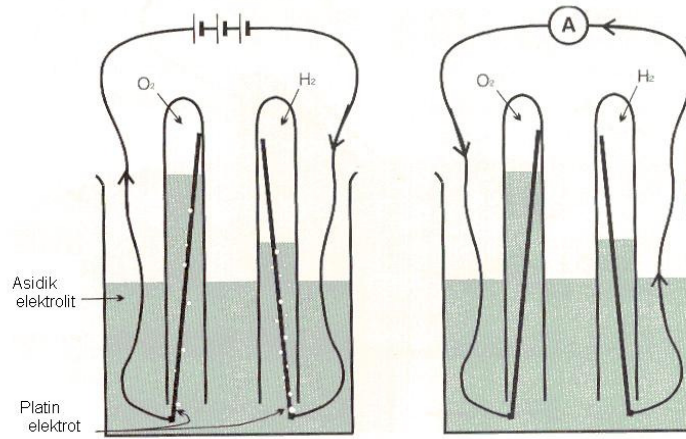
Yakıt pillerinin teorik altyapısı 1838 yılında Alman bilim adamı Christian Friedrich Schönbein tarafından bulunmuştur ve 1839 yılında “Philosophical Magazine” de yayınlanmıştır. Daha sonra 1843 yılında Sir William Robert Grove ilk yakıt pilini geliştirmiştir. Burada yakıt pil günümüzde PAFC (fosforik asit yakıt pili) olarak adlandırılan sisteme benzemektedir. Daha sonra 1959 yılında Francis Thomas Bacon 5 kW lık sabit bir yakıt pili üretti. Aynı sene içinde Harry Ihrig yönetiminde bir grup ABD’ de 15 kW lık yakıt pili içeren bir traktör üretti. Bu traktörde kullanılan sistemde potasyum hidroksit (KOH) ilk olarak elektrolit ve basınçlı hidrojen ve oksijen tepken olarak kullanılmıştır. Aynı sene içinde gene Bacon kaynak makinalarında kullanılmak üzere taşınabilir bir yakıt pili üretti. 1960 yılında Pratt ve Whitney, Bacon’un sistemine patent olarak uzay araçlarında elektrik ve içme suyu üretimi için kullanılır. (Büyüktür, 2005)

1960 lı yıllarda Thomas Grubb ve Leonard Niedrach isimli General Elektrik çalışanları

tarafında ilk PEM (proton değişim zarlı) yakıt pili ABD ordusunda ve sinyal merkezlerinde kullanılmak üzere üretildi. Bu sistemde hidrojen su ile lityum hidratin karışımı ile oluşur. Yakıt karışımı tek kullanımlık teneke kutularda saklanır. 1963 yılında ilk yakıt pili ile bir fan çalıştırıldı, fakat platin katalizörler oldukça pahalıydı. Proton değişim zarlı yakıt pili daha sonra Gemini projesi için NASA'nın hizmetine sunuldu. Daha önceki Mercury projesinde yakıt pili yerine pil kullanılmıştır. Gemini'nin asıl amacı daha fazla güç gerektiren Apollo için hazırlık oluşturmaktır. İlk model olan PB2 de problem zar üzerine oluşan oksijen geçişi idi. PB3 modelinde bu problemin üstesinden gelindi fakat fiyat hala çok yüksekti. Apollo için alkali yakıt pilleri tercih edildi. General Elektrik, proton değişim zarlı yakıt pilleri geliştirilince 1970 lerin ortasında Gemini projeleri için kullanılmakla beraber su altında elektrolizle yaşam sağlama amacı ile ABD oksijen dönüşüm ünitesine kullanıldı. İngiliz Donanması 1980 li yıllarda deniz altılarda kullanıldı. Sistem geliştikçe amaç maliyeti düşürmek olmaya başlamıştır. (Larminie ve Dicks, 2000)

1.4 Yakıt Pillerinin Genel Yapısı ve Temel Prensipleri

Hidrojen pillerinin çalışması temel olarak elektrolizin ters çalışması olarak algılanabilir.



Şekil 1.1 Elektroliz ve yakıt pilinin karşılaştırmalı prensibi

Şekil 1.1 de solda elektroliz işlemi gözükmemektedir. Bu şekilde bir ampermetre bağlandığında bir süre sonra ampermetrenin saptığı görülür.

Çalışma Prensibi:

Bu tepkimenin yarı tepkimeleri;



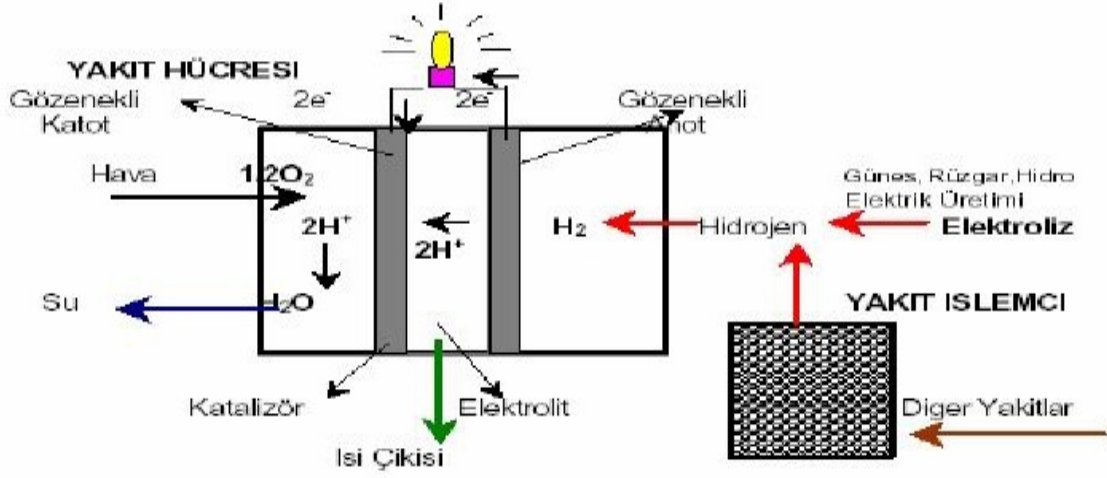
şeklindedir.

Burada ilk problem H_2 gazının iyonlaştırılmasında yaşanıyor. Bunun için uzun araştırmalar sonucu en uygun malzemenin platin olduğu görülmüştür. Hidrojen pilinin temel prensibi H_2 ' in iyonlaştırılmasından sonra açığa çıkan elektronların kablo yardımıyla bir motor üzerinden geçirilerek enerjileri kullanıldıktan sonra Proton Exchange Membrane (PEM) ' den geçen H^+ iyonu , O_2 ve e^- larla birleşerek su oluşturur. İkinci problem elektronların kabloya ulaşmasında yaşanır. Bunu gidermek için iyi bir iletken olan karbon (C) kullanılır. Karbonun tanecikli yapısı sayesinde H^+ iyonunun PEM 'e ulaşması engellenmemiş olur.

Şekil 1.2 deki olayların gerçekleşebilmesi için karbon ve platin tozundan oluşturulmuş bir katalizör (catalyst) kullanılır. Bu yüzeyin önünde yine H_2 geçişini ve elektrik akımı oluşumunu kolaylaştırmak için geçirgen bir karbon tabaka kullanılır. Bu tabaka GDL (Gas Diffusion Layer) adını alır.

2 GDL , 2 catalyst ve 1 PEM ' in birleşmesiyle oluşan gruba MEA (Membrane Electrode Assembly) adı verilir. Bu parçalar ayrı olarak alındığı sıcak presle birleştirilmesi gerekmektedir.

1 adet yakıt pili ile yaklaşık 0,7 V gerilim elde edilebilmektedir. Bunu arttırabilmek için pillerin seri bağlanması gerekmektedir. Kablolarla yapılan bağlantı direnci arttırdığından bir pilin anodu ile diğerinin katodunun birleştiği iki kutuplu plakalar (bipolar plate) mevcuttur.



Şekil 1.2 yakıt hücresinin şematik çalışma prensibi

1.5 Yakıt Pili Çeşitleri

Yeni enerji teknolojisi kapsamında, çeşitli enerji dönüşüm yöntem ve/veya sistemleri içinde yakıt pilleri sahip olduğu pek çok olumlu özellik ile ön plana çıkmaktadır. Yakıt pilleri, yakıt ve oksitleyicinin bileşimine, yakıtın dolaylı veya direk yoldan verilmesine, kullanılan elektrot ve elektrolit cinsine, operasyon sıcaklığına bağlı olarak, yakıt pilleri 6 grupta toplanabilir. (Büyüktür, 2005)

1.5.1 Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC)

Erimiş karbonat yakıt hücreleri (MCFC), proton değiştiren membranlı yakıt hücresi (PEM) ve fosforik asit yakıt hücresi (PAFC)'lerin sınırlı olan çalışma sıcaklıklarına alternatif olarak geliştirilmiş sistemlerdendir. Bu hücreler 600-650°C arasında çalışmakta olup yüksek verimliliklerinden dolayı diğer sistemler arasında çok önemli bir yer teşkil etmektedir. (Büyüktür, 2005)

Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri Çalışma Prensibi

Bu tür yakıt hücreleri elektrolit olarak karbonat tuzlarını kullanırlar. Bunlar genellikle lityum ve potasyum ikili karışımları yada lityum ve potasyum karbonatlarıdır. Karbonat tuzları 650°C gibi yüksek derecedeki bir sıcaklıkta sıvı hale geçerler ve CO_3^{2-} karbonatıyla iyonik iletim sağlanmış olur.

Tablo 1.1 Yakıt pili çeşitleri

Yakıt Pili Çeşidi	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı, °C
Alkali Yakıt Pili (AFC)	KOH	50- 90
Proton Değiştiren Membranlı Yakıt Pili (PEM)	Polimer	0- 125
Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC)	Sülfürik Asit veya Polimer	50- 120
Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)	Orto Fosforik Asit	190- 210
Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC)	Li/ K Karbonat karışımı	630- 650
Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)	Stabilize Zirkonyum	900- 1000

Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri Çalışma Prensibi

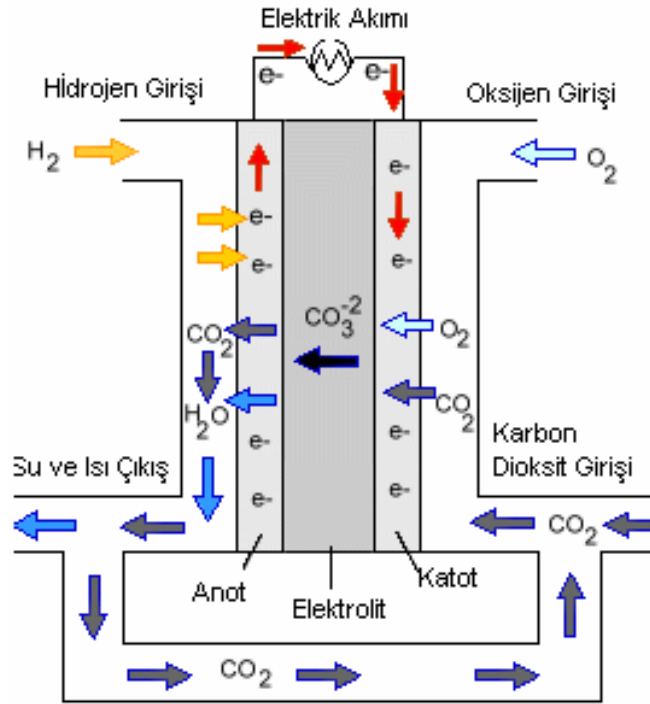
Bu tür yakıt hücreleri elektrolit olarak karbonat tuzlarını kullanırlar. Bunlar genellikle lityum ve potasyum ikili karışımları yada lityum ve potasyum karbonatlarıdır. Karbonat tuzları 650°C gibi yüksek derecedeki bir sıcaklıkta sıvı hale geçerler ve CO_3^{-2} karbonatıyla iyonik iletim sağlanmış olur.

Erimiş karbonat yakıt hücresinde anotta;

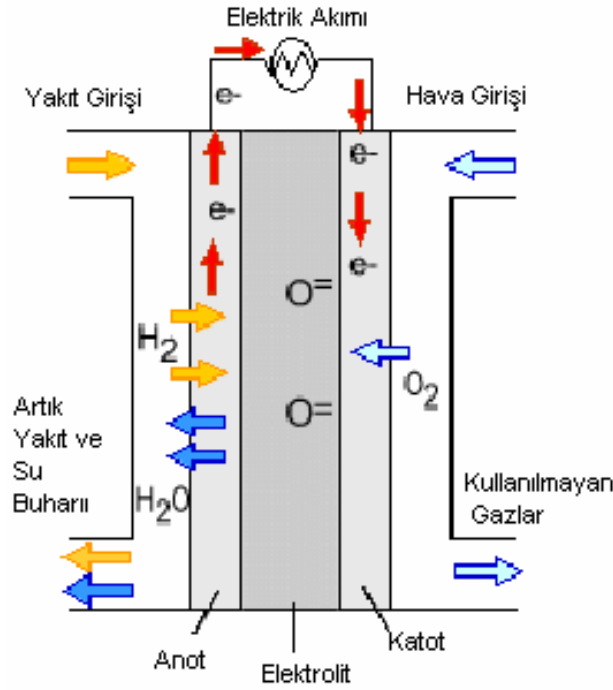


Katotta;





Şekil 1.3 Erimiş karbonat yakıt pili şematik çalışma prensibi [3]



Şekil 1.4 Katı oksit yakıt pili şematik çalışma prensibi [3]

Katı Oksit Yakıt Pillerinin Çalışma Prensipleri

Bu yakıt pilinde elektrolit olarak genellikle zirkonyum oksit (ZrO_2) ile kararlı kılınmış itriyum oksit (Y_2O_3) gibi bir katı metal oksit kullanılmaktadır. Bu tür metal oksitler seramik olarak ifade edildiğinden katı oksitli yakıt pilleri seramik yakıt pilleri olarak da bilinir. Anot, elektrik aktivasyonunu sağlayan nikel karıştırılmış zirkonyum seramiğinden, katot ise $LaCo_{1-x}Mn_xO_3$ ($x = 0.2-0.3$) veya $LaSrMnO_3$ gibi seramik malzemelerden üretilir. Elektrotlar seramik yüzeye ya mürekkep şeklinde uygulanıp, yüksek sıcaklıklarda fırınlanarak, ya da plazma (çok yüksek sıcaklıklı maddenin dördüncü hali) spreyi şeklinde püskürtülerek uygulanır. Oksijen atomu iyonize olduğundan anot tarafında herhangi bir hidrokarbon yakıtı kullanılabilir. Katotta dış devreden gelen elektronla oksijen iyonlaştırılır. (Larminie ve Dicks, 2000)



Oksijen iyonu seramik elektrolitten anot tarafına iletilir. Anotta yakıt oksijen iyonu ile birleşir, yanma gazları ve elektron açığa çıkar.



Elektron dış devreden katot tarafına aktarılır. Şekil 1.4'de SOFC'nin çalışma prensibi gösterilmiştir.

SOFC yakıt pilleri 700-1000 °C arasındaki yüksek sıcaklıklarda çalışır. Bunun temel nedeni göreceli olarak daha büyük olan oksijen iyonunun katı seramikten yapılmış bir elektrolitten geçirme zorunluluğudur. Geçişini kolaylaştırmak için elektrolit levha mümkün olduğu kadar (50-70 mikron) ince tasarlanarak imal edilir.

Çalışma basınçları düşük (atmosferik) veya yüksek olabilir. Bu tasarım şartlarında yakıt pili 0.78 V gerilimde 600 mili amper/cm² civarında elektrik enerjisi üretebilir. (Larminie ve Dicks, 2000).

Yüksek basınçta çalışan SOFC sistemlerin gaz türbinleri ile entegrasyonu sağlanarak toplam verim %70'lere kadar artırılabilir. Bu sistemlerin çalışma sıcaklıkları yüksek

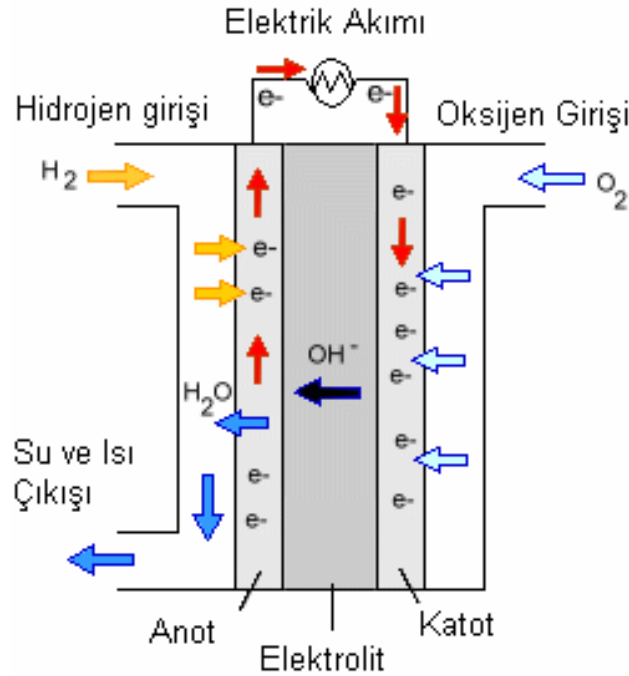
olduğundan kojenerasyon uygulamalarında kullanımları da daha kolaydır.

1.5.3 Alkali Yakıt Pili (AFC)

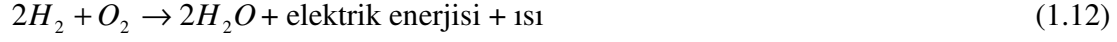
1960 yıllarında üreilmeye başlayan alkalın yakıt hücreleri (AFC) ilk modern yakıt hücrelerinden bir tanesidir. Bu tarihte Apollo uzay mekiğinde elektrik enerjisi üretmek için kullanılmıştır. Diğer yakıt hücrelerine kıyasla daha geniş ve esnek kullanım alanına sahiptirler ve O_2 ve H_2 iyi bir performans gösterirler. (Büyüktür, 2005)

Alkali Yakıt Pili Çalışma Prensipleri

AFC' in uzay uygulamalarında kullanılmasını 1930'lu yıllarda F.T Bacon tarafından yapılan çalışmaları temel alır. H_2 ve O_2 kullanarak 5 kW enerji üreten AFC' nin performans testleri 1952 yılında tamamlanmıştır. Bacon tarafından geliştirilen AFC 200-240 °C sıcaklıklarda %45 KOH (potasyum hidroksit) ile çalışıyordu. Bununla birlikte elektroliti kaynamadan korumak için 40-55 atm basınç sağlanıyordu. Bu yüksek sıcaklık ve basınca rağmen yakıt hücresinin performansı oldukça iyi bir mertebededeydi (800 mA/cm² de 0.78 volt).



Şekil 1.5 Alkali yakıt pili şematik çalışma prensibi [3]



Bir çok yakıt hücresi dizaynında, oluşan ısıyı ve suyu uzaklaştırmak için elektrolit sirkülasyonu yaptırılır (mobil elektrolit). Yüksek Alkalın hidroksit taşıma kapasitesine sahip olması nedeni ile KOH tercih edilir.

Yüksek sıcaklıklarda (260 °C) çalışan bir AFC' in elektrolit sıvısı kütle olarak %85 KOH içerirken, düşük sıcaklıklarda (<120 °C) çalışan AFC elektroliti (%35-55) KOH içerir. Elektrolit genellikle asbesto imal edilmiş matris içerisinde tutulurlar. Elektro katalizör olarak çok çeşitli malzeme kullanılabilir. (Ni, Ag, metal oksit, asal elementler).

AFC 'in performansı 1960 dan buyana bir çok değişim geçirmiştir. İlk AFC' ler istenen gücü elde etmek için görece olarak yüksek sıcaklık ve basınçta çalışıyorlardı. Yeni teknolojilere bağlı olarak geliştirilen AFC' lerde çevre koşullarındaki hava oksidant olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu sayede AFC daha ucuza mal edilmektedir.

AFC içerisinde daha hızlı bir reaksiyonun meydana gelmesi için sistem 100 °C sıcaklıktan daha fazla sıcaklıkta ve yüksek basınçta çalıştırılır. Bu durumda voltaj;

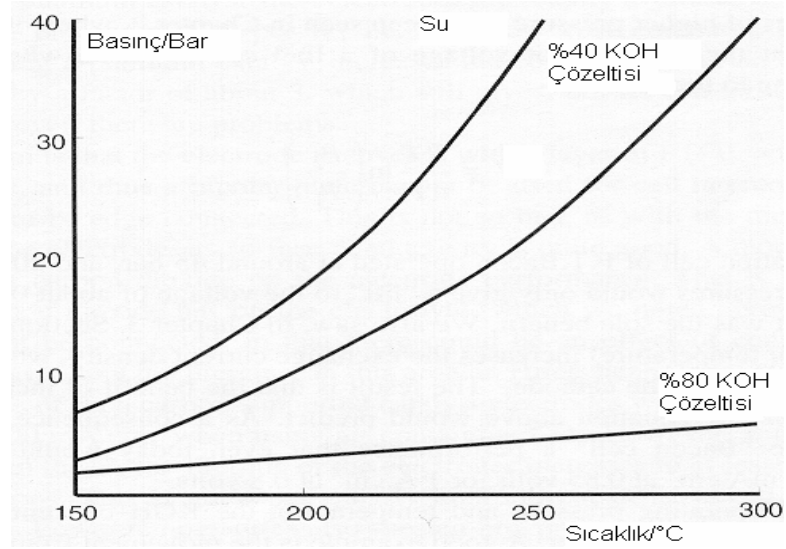
$$V_p \text{ (mV)} = 0,15T \log \frac{P_2}{P_1} \quad (1.13)$$

ifade edilebilir. Burada P_2 ve P_1 farklı basınçlardır.

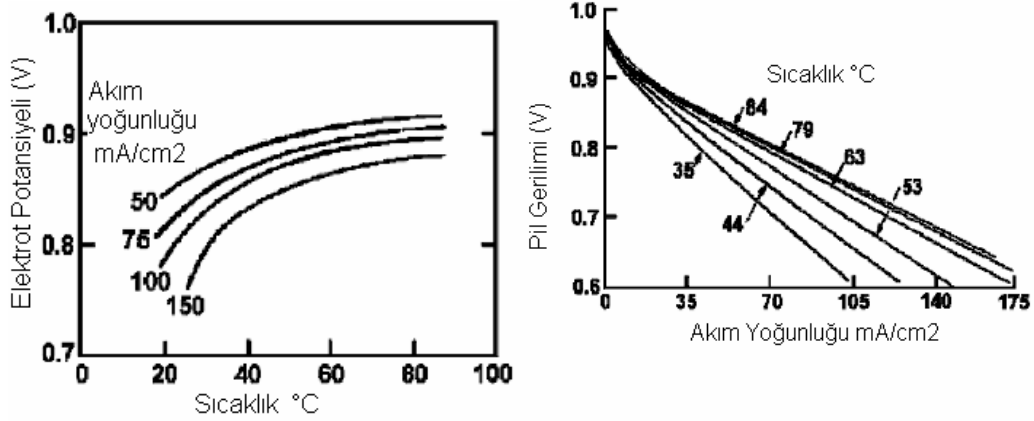
AFC' de sıcaklığın yükselmesi AFC içerisinde aktivasyonu, kütle transferini iyileştirir ve dirençten doğacak kayıpları azaltır. Bu durumda AFC' in performansı yükselir. Bu durum;

$$V_t \text{ (mV)} = 4.0 (T_2 - T_1) \quad T < 63 \text{ °C için veya}$$

$$V_t \text{ (mV)} = 0.7 (T_2 - T_1) \quad T > 63 \text{ °C şeklinde formüle edilebilir. (Larminie ve Dicks,2003)}$$



Şekil 1.6 Alkali yakıt pillerinde basınç etkisi



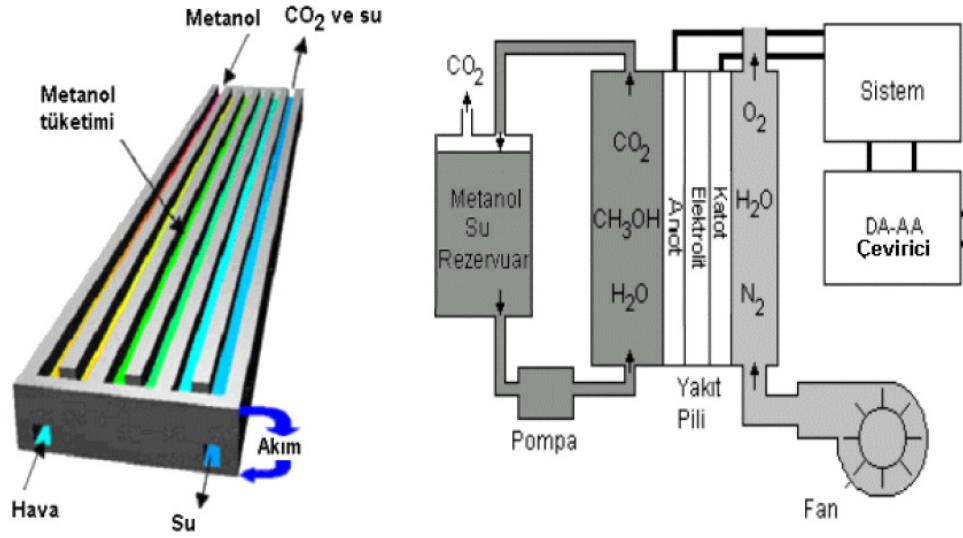
Şekil 1.7 Alkali yakıt pillerinde sıcaklık etkisi

1.5.4 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC)

Polimer membran elektrolit kullanılması nedeniyle PEM yakıt pilleri ile benzerlik göstermektedirler. DMFC'ni PEM yakıt pillerinden ayıran en önemli özellik yakıt dönüştürücü gerekmeksizin metanol / etanolün doğrudan yakıt olarak kullanılabilmesidir. Metanol anotta meydana gelen reaksiyon sonucu hidrojen açığa çıkarır ve yakıt pilinde bu hidrojen kullanılır.

DMFC yakıt pili sistemleri yakıt dönüştürme alt sistemi içermediğinden diğer yakıt

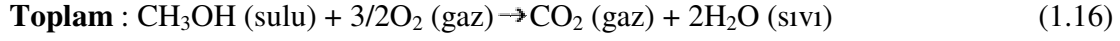
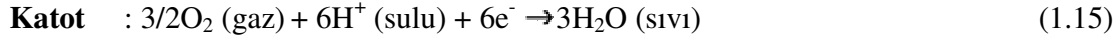
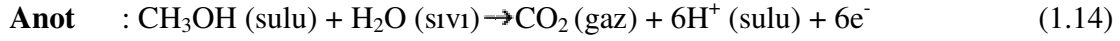
pillerine göre daha az karmaşık, daha hafif ve daha ucuzdur. Genellikle 120-190°C arası bir sıcaklıkta çalıştırılan bu yakıt pillerinin elektrik verimi %25-35 civarındadır. DMFC'leri özellikle askeri ve sivil amaçlı kullanılan küçük elektronik cihazların (cep telefonları ve diz üstü bilgisayarlar gibi) güç ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla tasarlanmaktadır.(Larminie ve Dicks, 2000)



Şekil 1.8 Doğrudan metanol kullanılan yakıt pillerin şematik çalışma prensibi

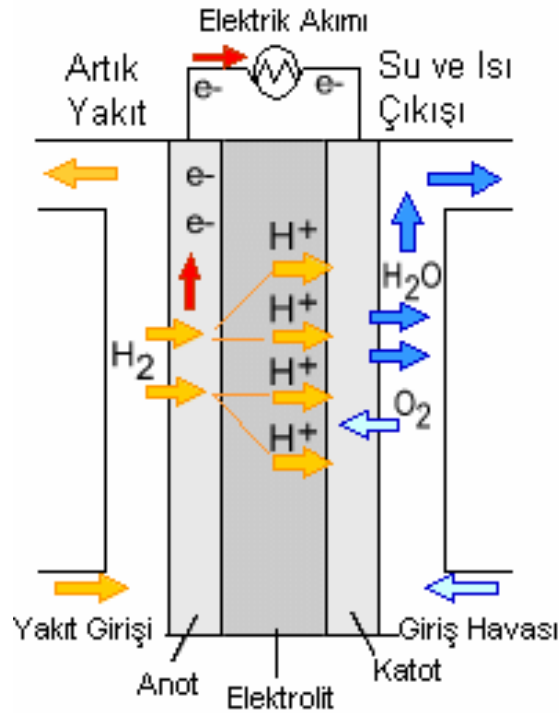
Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Piliin Çalışma Prensibi

Şekil 1.8'de DMFC'nin çalışma prensibi gösterilmiştir. Yakıt pilinde teorik olarak gerçekleşmesi beklenen reaksiyonlar sırasıyla şu şekildedir; katot üzerinde oluşan su ile sisteme doğrudan beslenen metanol-su karışımı anot üzerinde elektro kimyasal bir reaksiyon meydana getirmekte ve ürün olarak metanolün parçalanması sonucunda protonlar, elektronlar ve karbon dioksit meydana gelmektedir. Oluşan protonlar diğer ürünlerden ayrılarak seçiciliğe sahip polimer elektrolit zardan geçerek katoda göç etmekte ve katot üzerinde, beslenen havadan sağlanan oksijen ile reaksiyona girerek su oluşumunu sağlamaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda meydana gelen termodinamik potansiyeller, iletken tel ile oluşturulan dış devrede gerilimin oluşmasına ve elektrik üretilmesine neden olmaktadır. Gerçekleşen reaksiyonlar;



Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili sırasıyla; anot, katot, sıvı elektrolit, ve seçici geçirgenliğe sahip bir zar içermektedir. Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili çalışmalarında en öncelikli sırayı, kullanılan zarın seçiciliği, elektrolit yapısı ve katalizör seçimi almaktadır.(Larminie ve Dicks, 2000)

1.5.5. Fosforik Asit Yakıt Pilleri



Şekil 1.9 Fosforik asit yakıt pilinin şematik çalışma prensibi [3]

Fosforik asit yakıt pilleri halihazırda ticari olarak satılmaktadır. Hastaneler, oteller, ofis binaları, okullar, güç tesisleri, havaalanı terminalleri, atık geri kazanım ve arıtma tesisleri gibi birçok farklı alanda 200'den fazla fosforik asit yakıt pili tesisi kurulu bulunmaktadır. Fosforik asit yakıt pilleri %40'lara varan elektriksel verim değerlerine sahiptir. Toplam verim değeri ise kojenerasyon uygulamalarında % 85'lere ulaşmaktadır. Çalışma

sıcaklıkları 300 ile 400°C arasındadır. Düşük sıcaklıklarda fosforik asit zayıf iyon iletkenliği sağlar. Anottaki platinin elektro-katalitik yapısının CO zehirlenme riski de önemli bir problemdir. Yakıt piline beslenen yakıtta %1,5 oranına kadar CO konsantrasyonuna müsaade edilebilmektedir. Bu yakıt pilinde elektrolit olarak ise sıvı fosforik asit matrisi kullanılır.

Fosforik asit yakıt pillerinin % 85'e varan yüksek verimliliğin yanısıra, saf olmayan hidrojeni yakıt olarak kullanabilmesi de önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ancak, eğer yakıt olarak benzin ya da benzeri bir hidrokarbon kullanılacaksa yakıttaki kükürt mutlaka uzaklaştırılmalıdır.

Diğer yakıt pillerine göre düşük akım ve güç üretimi söz konusudur. Büyük hacim ve ağırlık da diğer bir dezavantajdır. Buna rağmen bu teknoloji yeterince gelişmiştir. Çıkış güçleri genellikle 200 W ile 1 MW arasında değişmektedir.(Larminie ve Dicks, 2000)

Şekil 1.9'da FAFC'nin çalışma prensibi gösterilmiştir.

Fosforik Asit Yakıt Pilinin Çalışma Prensibi

PAFC lerin çalışma şekli PEM yakıt pillerine benzer. PAFC;



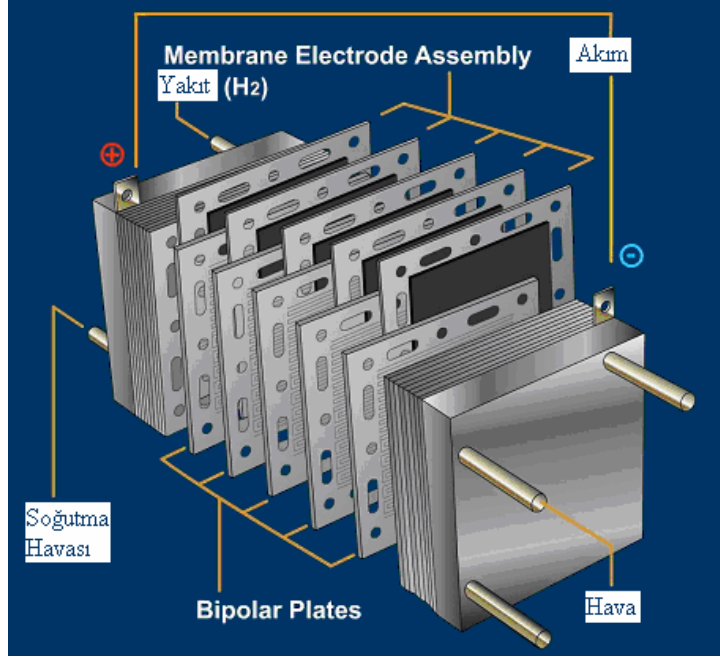
reaksiyonların olduğu anot ve katotla proton ileten elektrolitten meydana gelir. Reaksiyonlar yüksek oranda yayılmış elektro katalizör partiküllerin desteklediği karbon üzerinde meydana gelir. Elektrolit inorganik, 100 % konsantre fosforik asittir.

Fosforik asit tek yaygın inorganik asit olup, yeterli termal stabilite, kimyasal ve elektro kimyasal stabilite ve az uçuculuk - 150 C üstünde – özelliklere sahip olduğundan elektrolit olarak seçilmiştir.: En önemli özelliği ise CO₂ ye karşı dayanımı yüksektir. Daha sonra ONSI yakıt pili santralleri için elektrolit olarak fosforik asidi seçmiştir.

PAFC ler gaz difüzyon elektrotları kullanırlar. 1960'larda PTFE zincirli platin kullanılırdı. Elektrotlardaki platin yükü 9 mg / cm² idi. Platin destekli karbon platin in yerini aldığından, karbona PTFE zinciri takılarak elektrot yapısı oluşturuldu. Karbon un

fonksiyonları; Platini yayarak, katalizör maddeden iyi şekilde yararlanmayı sağlamaktadır. Elektrotlarda mikro gözenekler oluşturarak maksimum gaz difüzyonu sağlamaktadır. Katalizörün elektriksel iletkenliğini arttırmaktadır. (Büyüktür, 2005)

1.5.6. Proton Değişim Membranlı Yakıt Pilleri (PEM)

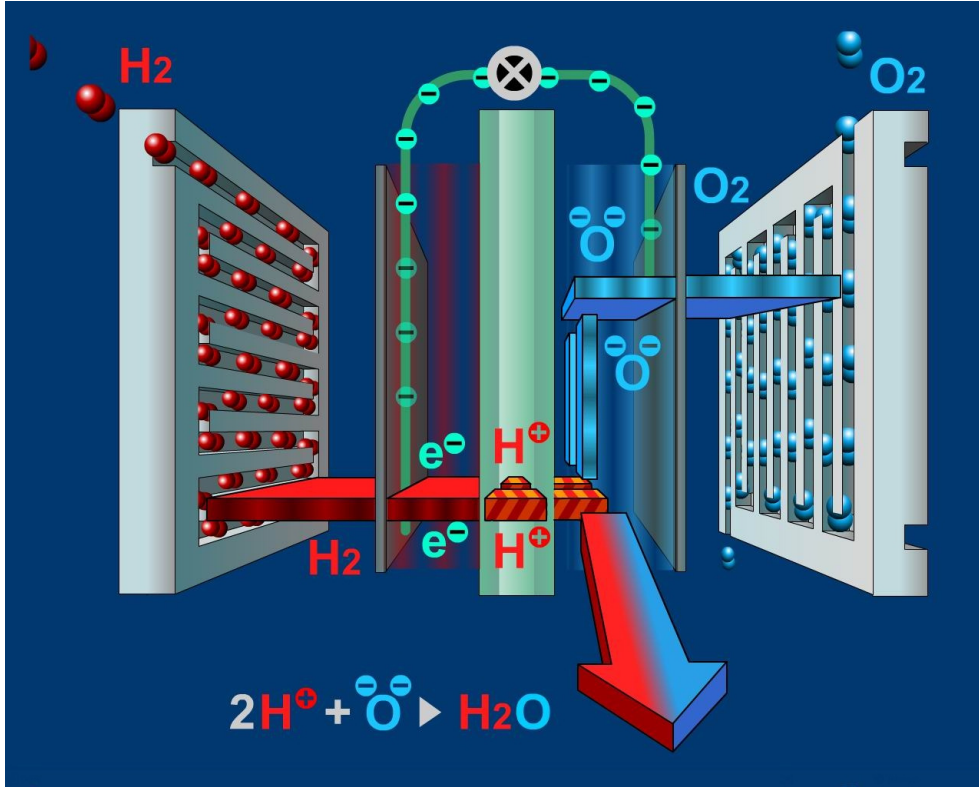


Şekil 1.10 Proton değişim membranlı yakıt pili yığını

PEM tipi yakıt pilleri göreceli olarak daha düşük sıcaklıklarda ve yüksek güç yoğunluğu ile çalıştırılır. Çıkış güçlerinin gerekli güç miktarına göre ayarlanabilir olması, özellikle hızlı devreye alma işlemi gerektiren araç uygulamaları ve küçük uygulamalarda önemli avantaj sağlamaktadır. Özellikle, bu yakıt pilleri hafif araç uygulamaları, binalar ve küçük uygulamalarda yeniden şarj edilebilen pillere alternatif olarak düşünülmektedir. Çıkış güçleri genellikle 50 W ile 250 kW arasında değişmektedir.

PEM tipi yakıt pilinin çalışma prensibi Şekil 1.11 'de gösterilmektedir. Bu yakıt pilinde pilin elektrolit malzemesi perflourosülfonik asit gibi hidrojen iyonunu (proton) geçirebilen polimerik yapıdadır. Korozyon ile ısı, hava, su ve güç şartlandırma yönetimi problemlerinin indirgenmesi açısından, katı elektrolit kullanımı bir avantajdır. (Larminie ve Dicks, 2000)

Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili'nin Çalışma Prensibi



Şekil 1.11 Proton değişim membranlı yakıt pilinin şematik çalışma prensibi

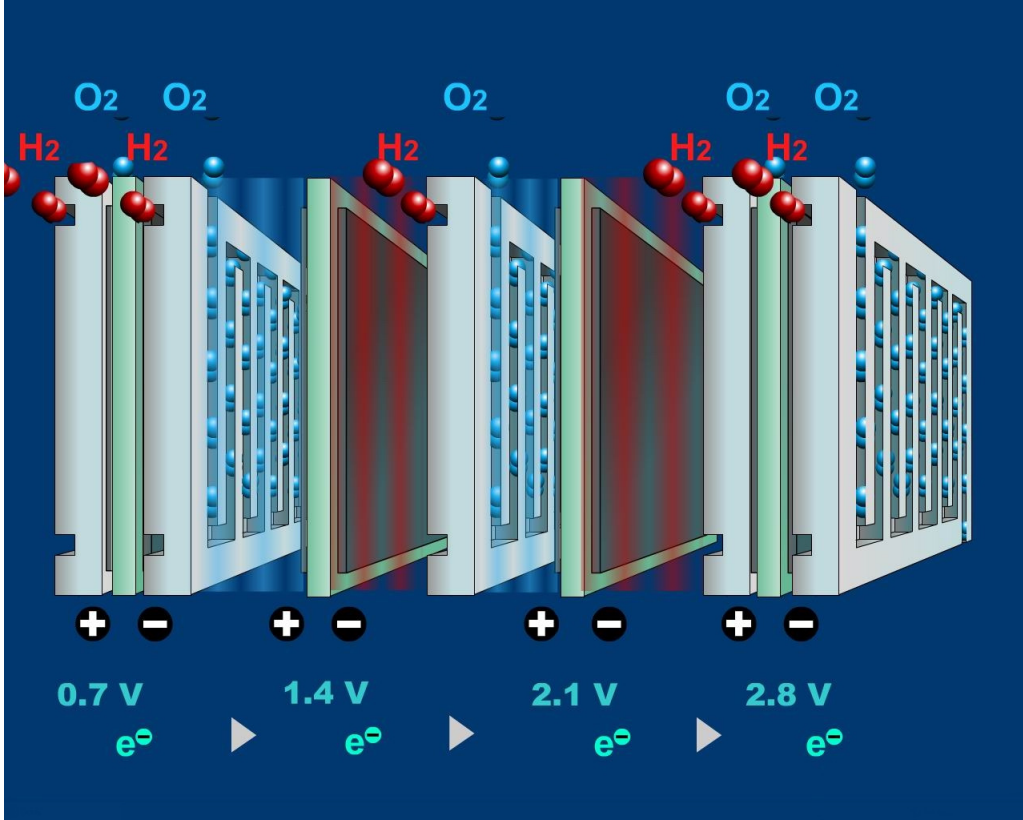
Anot ve katot olarak, gözenekli karbona emdirilmiş platin gibi yüksek elektro kimyasal reaksiyon aktivitesi sağlayan katalizörler kullanılmaktadır. Bu katalizör üzerinde anotta hidrojen gazı hidrojen iyonuna dönüşür.



Elektronlar dış devreden elektrik olarak akarken, proton (H^+) iyonları polimer elektrolit üzerinden katoda ulaşır. Katot tarafında havanın içindeki oksijen polimer elektrolitten geçerek gelen proton ve dış devreyi tamamlayan elektronla birleşerek su oluşturur.



PEM yakıt pilinin çalışma sıcaklığı 80 ile 120 °C arasında değişmektedir. Bu yakıt pilinde, 0.7 Volt gerilimde 600 mili amper/cm² elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Kullanılır gerilim ve akım değerlerine ulaşabilmek için piller seri ve



Şekil 1.12 Seri bağlanmış yakıt hücreleri

paralel olarak bağlanarak yakıt pili modülü oluşturulur. Reaksiyonlardan da görüldüğü gibi bu tip yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen kullanılmaktadır.

Ancak hidrokarbon yakıtlar, yakıt dönüştürücü adımı verdiğimiz sistemlerde hidrojene dönüştürülerek kullanılabilir.

PEM yakıt pilleri yakıtla beraber gelen safsızlıklara özellikle karbon monoksit ve kükürt bileşiklerine karşı son derece hassastır. Bu nedenle, yakıt piline beslenecek yakıttaki CO ve kükürt bileşenlerinin uzaklaştırılması zorunludur.

Karbon monoksit, alumina gibi seçici katalitik yüzeylerde oksijen (veya hava) kullanılarak uzaklaştırılabildiği gibi hidrojenin seçici membranlar kullanılarak karışımdan süzme yoluyla da uzaklaştırılabilir.

Kükürt gidermek içinse çinko ve molibden oksit gibi katalizörler içeren kükürt ayrıştırıcılar kullanılır.(Larminie ve Dicks, 2000)

1.6 Yakıt Pillerinin Karşılaştırılması

Yakıt pili teknolojisi yüksek verimi ve modüler yapısıyla elektrik enerjisi üretiminde yeni bir dönem başlatacaktır. Yakıt pillerinin kömür dahil her türlü yakıttan yakıt dönüştürme prosesleri kullanılarak yararlanabilme (hidrojence zengin gaz karışımı üretimi prosesleri) avantajı, birinci derece hidrokarbon yakıtlarının yakıt pilleriyle kullanılabilme olasılıklarını, içten yanmalı motorlara göre cazip kılmaktadır.

Yüksek kapasitede elektrik enerjisi üretimi için de yakıt pili santralleri konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Halihazırda 10 MW kapasiteli yakıt pili santralleri çalışmaktadır, ancak elektrik enerjisi üretim alanında yakıt pillerinin ağırlığını hissettirmesi belli bir zaman alacaktır.(Larminie ve Dicks, 2000) Yakıt pillerinin temel özellikleri, avantajları, dezavantajları ve maliyetleri **Tablo 1.2** de özetlenmiştir.

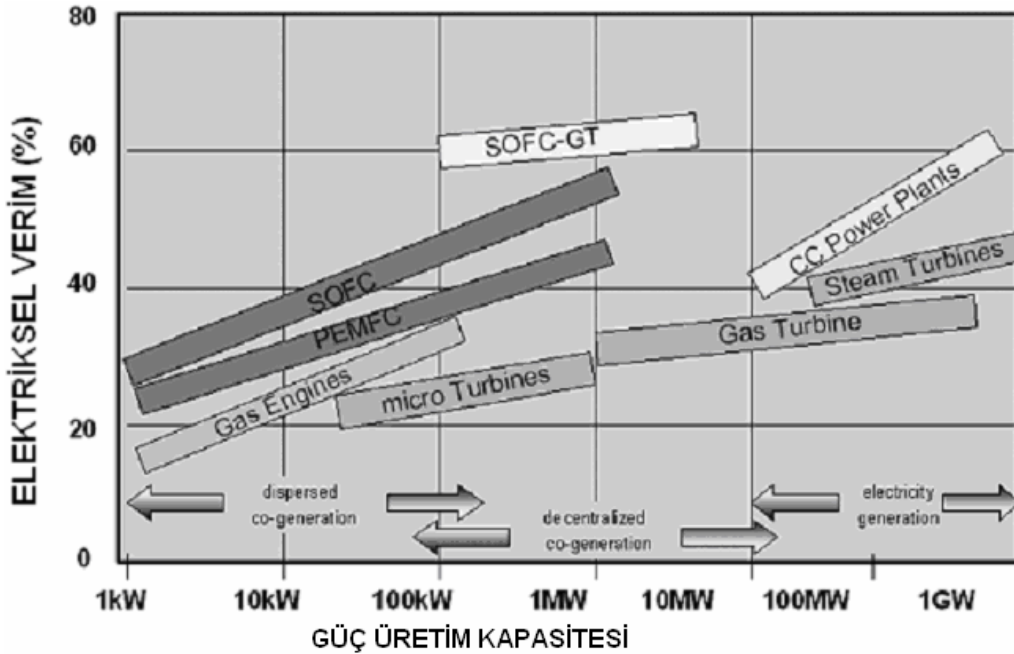
Tablo 1.2 Yakıt pillerinin karşılaştırılması

	PolimerElektrolit Membranlı Yakıt Pili (PEMYP)	Doğrudan Yakıt Pili (DMYP)	Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)	Ergimiş Yakıt Pili (EKYP)	Karbonat	Katı Oksitli Yakıt Pili (KOYP)	Alkali Yakıt Pili (AYP)
Elektrolit	Perfluorin katı polimer İyon Değişim Membran	Perfluorin katı polimer İyon Değişim Membran	Konsantr H ₃ PO ₄ çözeltisi (95-98%)	Alkali karışımı, Ergimiş tuz (Li ₂ CO ₃ /Na ₂ CO ₃)	Yttria Zirconia ZrO ₂	Stabilize Seramik,	Konsantr çözeltisi (35-40 wt%) KOH
Çalışma Sıcaklığı, °C	80 - 90	80 - 90	200 - 220	600 - 650	800 - 1,000		80 - 90
İyon	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻		OH ⁻
Elektrolit Durumu	Katı	Katı	İmmobilize Sıvı	İmmobilize Sıvı	Katı		Sıvı
PH Donanımı	Karbon yada Metal Bazlı	Karbon yada Metal Bazlı	Grafit Bazlı	Paslanmaz Çelik	Seramik		Karbon Metal Bazlı
Katalizör	Platin	Platin	Platin	Nikel	Perovskitler		Pt-Pd
Kojenerasyon Isı Verimi, %	Düşük kalite	Düşük kalite	Düşük kalite	Yüksek	Yüksek		-
Yakıt Pili Elektrik Verimi, %	40-45	25-35	40-45	50-60	50-60		55-60
Yakıt Pili Toplam Sistem Verimi, %							
Yakıt Kaynağı	Hidrojen yada yakıt dönüştürücü	Metanol	Hidrojen yada yakıt dönüştürücü	Seçilmiş bir yakıt yada yakıt dönüştürücü	Bütün yakıtlar, direkt besleme		Hidrojen yada NH ₃ parçalayıcı
Uygulama	Küçük üniteler, ulaşım araçları	Taşınabilir cihazlar	Güç üretim tesisleri 50-200 kW.	Güç Üretim Tesisleri Mega W lar düzeyinde	Küçük ve büyük güç üretim tesisleri		Küçük üniteler, ulaşım araçları
Avantajlar	Düşük sıcaklık, hemen ulaşımında çalıştırma imkanı, yüksek verim kompleks ısı dönüştürücü gerektirmemesi	Yakıt dönüştürücü gerekmez, daha az karmaşık, daha hafif ve düşük maliyeti düşünlüğünde daha ucuzdur	Düşük sıcaklıkta çalıştırma ve ulaşımında hemen çalıştırma imkanı	CO'e duyarlı değil en çok geliştirilen tür, gaz türbinlerle birlikte kullanımla üretilen enerji ile yakıt iyileştirme	Isı enerjisi kaynağı, yüksek verim, hacim ve düşük ağırlık CO'e duyarlı değil		Yüksek verim, anot ve katotta platine gerek yok,
Dezavantajlar	Isı enerji kaynağı olarak kullanılmaz, CO'e duyarlı ve dinamik su kontrolü gerekli	Membrandan yakıt geçiş ve düşük performans	CO'e duyarlı ve H ₂ S ppm seviyesinde olmalı	Güç Üretim Tesisleri Mega W lar düzeyinde	Uzun sürede üretim, uzun sürede devreye alma ve çok ince seramik elektrolit üretimi		Sadece yakıt olarak saf hidrojen ve oksijen kullanımı
Maliyetler	4000-10.000\$/kW	8000\$/kW	2875\$/kW	10000-15000\$/kW	15000\$/kW civarında		500-1000\$/kW

2 Hibrid Sistemler

Hibrid bir güç sistemi; iki veya daha fazla güç üretim sisteminin karakteristik özelliklerine göre sistem verimini arttırmak için bir arada kullanılması sonucu oluşan güç üretim sistemidir. Yakıt pilleri; yakıt oksitleyici yardımıyla kimyasal bir tepkime sonucu düşük emisyon ve yüksek verimlerle elektrik üreten cihazlardır. Yakıt pillerinin diğer kaynaklarla birleşmesi durumunda verim veya çalışma süresinde artış görülür. Hibrid sistemlerde verim %60 civarına yaklaşır ki bu da içten yanmalı motorların 2 katıdır. Ayrıca oluşan NO_x , SO_x , CO_x miktarları da çok düşüktür.

Hibrid sistemler genel olarak ikiye ayrılabilir. İlk tip yüksek sıcaklıkta çalışan bir yakıt pili diğer bir yüksek sıcaklıkta çalışan güç üretim sistemi ile beraber çalışır. Buna en iyi örnek SOFC veya MCFC ile birlikte bir gaz türbininin çalışmasıdır. İkinci yöntemde ise rüzgar veya güneş enerjili sistemler ile yakıt pilleri beraber çalışır. Burada amaç verimi arttırmak değil gücün kullanım süresini arttırmaktır.(Rajashekara ve Fellow , 2005)



Şekil 2.1 sistemlerin güç üretim kapasitesine göre verimlerinin değişimi

Burada bahsedilecek olan hibrid sistemleri;

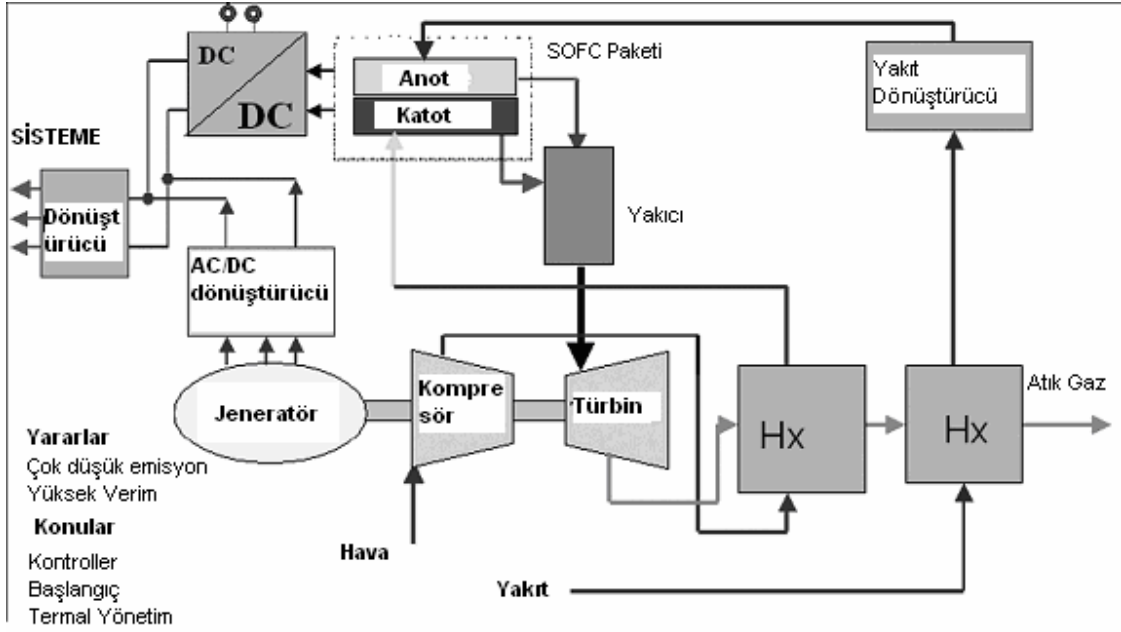
1. Yüksek sıcaklıkta SOFC-Gaz Türbini sistemleri
2. SOFC-TPV sistemleri
3. PEMFC-SPV sistemleri
4. PEMFC-Rüzgar Türbini sistemleri

2.1 FC-GAZ TÜRİNİ SİSTEMLERİ

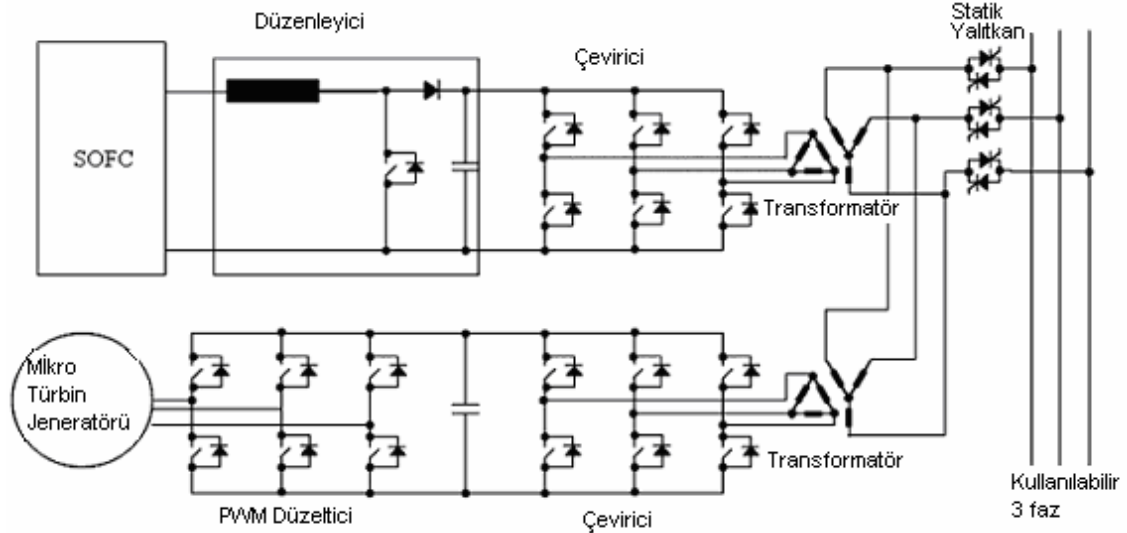
Bu sistemlerin gelişmesi sonucunda;

- Fosil yakıt kullanılan diğer sistemlere göre yüksek verim oluşur.
- Temizlemeye gerek kalmaz çünkü emisyon değerleri düşüktür.
- Kurulum yeri seçimi problem olmaz çünkü çevreye zarar vermez.
- Yakıt esnekliği mevcuttur.

SOFC yakıt pilleri otomobiller için 5kW den başlayarak, güç üretim tesislerinde MW mertebelerine ulaşır. Mikro türbinler 30 kW ile 30 MW arasında, gaz türbinleri ise 100 ile 1000 MW arasında güç üretebilen tesislerdir. Bu sistemde 400.000 cm² yüzey alanına sahip ve güç yoğunluğu 1,1 W/cm² olan bir SOFC kullanılmış, verimi arttırmak için basınç oranı 3 olarak seçilmiştir. (Larminie ve Dicks, 2003)



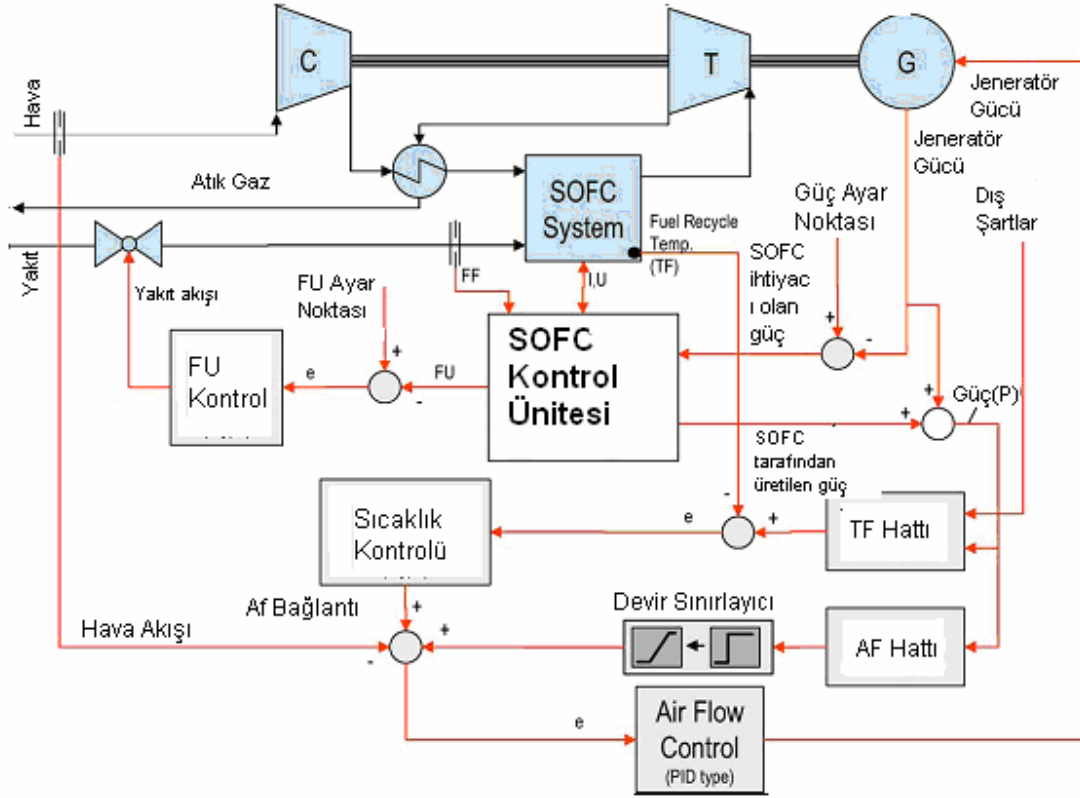
Şekil 2.2 endüstride kullanılan bir FC-gaz türbini sistemi (Rajashekara ve Fellow , 2005)



Şekil 2.3 şekil 2.2 deki sistemin elektrik şeması

Tablo 2.1 Şekil 2.2 deki sistemin ölçüm değerleri

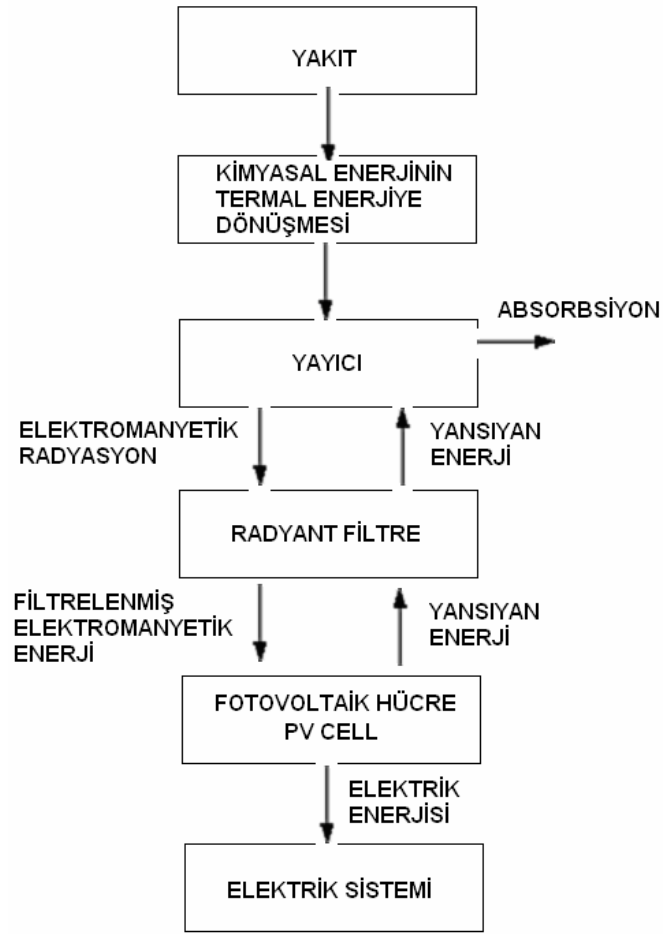
Stack ve Reformer	Değer	Kompresör ve Türbin	Değer
Stack Gücü kW	441	Kompresör giriş sıcaklığı C	15
Stack Alanı cm ²	400000	Kompresör çıkış sıcaklığı C	168
Stack güç yoğunluğu Cm ²	1,1	Kompresör giriş basıncı kPa	101,23
Stack gerilimi	0,74	Kompresör çıkış basıncı kPa	323
Stack sıcaklığı C	800	Kompresör basınç oranı	3,19
Stack Basıncı atm	3	Kompresörden debi geçişi g/s	609
Stack elektrik verimi %	50	Kompresör gücü	93,65
Hava kullanım oranı %	35	Türbin giriş sıcaklığı C	1000
Yakıt kullanım oranı %	85	Türbin çıkış sıcaklığı C	783
Reformer Sıcaklığı C	677	Türbin giriş basıncı kPa	288,9
Yakıt debisi g/s	14,56	Türbin çıkış basıncı kPa	105,31
		Türbin genleşme oranı	2,74
		Türbinden geçen kütleli debi g/s	623
Stack + jeneratör gücü kW	500	Türbin gücü kW	161,96
Sistem toplam verimi	68,6	Jeneratör gücü kW	58



Şekil 2.4 Başka bir SOFC- gaz türbini sistemi (Stiller vd.,2005)

2.2 SOFC-TPV SİSTEMLERİ

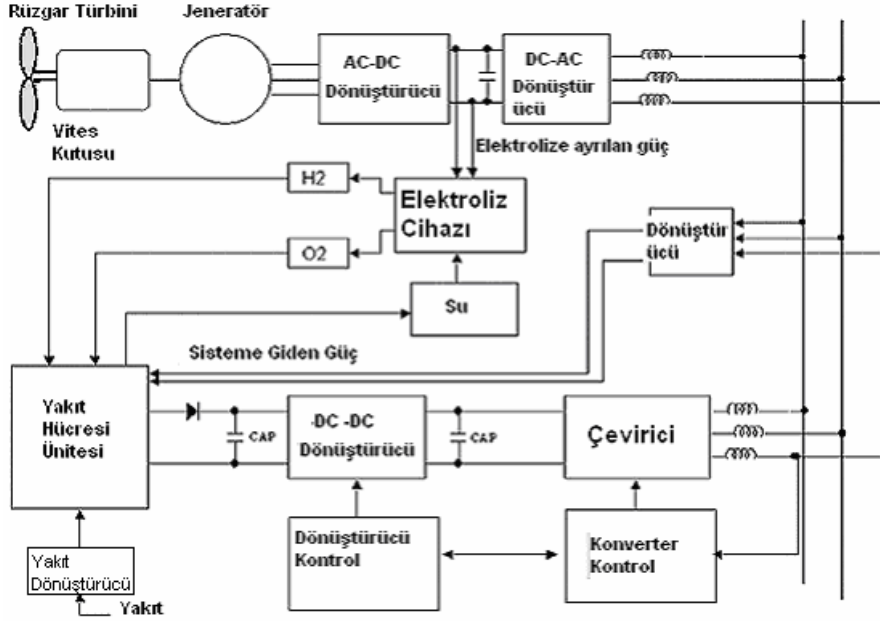
Malzeme ve üretim teknolojilerinin gelişmesi ile termoelektrik ve TPV (termo photovoltaic) malzemelerin hayatımızdaki yeri artacaktır. Bu iki ünite sıcaklık ve atık ısı enerjisini elektrik enerjisine çevirir. Şekil 2.5 bize TPV ünitesinin çalışma prensibini gösterir. Bir TPV sisteminde ısıtılan yarıiletken elektromanyetik radyasyon oluşturur. Seçici bir filtre bu foton taneciklerinden düşük enerjili olanları geri kazanım amacıyla geri yollar. TPV sistemleri SPV (solar photovoltaic) sistemlerine benzer fakat TPV sistemlerinde kaynak daha yakın ama sıcaklık daha düşüktür. (1500-1800 K arası; güneşte bu değer 5800 K civarındadır.) Bu sıcaklık 1200-1500 °C arasında olduğunda verimli olarak çalışır. Verim %45 olan bir SOFC sisteminde; atık enerjinin %65'inin %15 verimle dönüştüğü düşünülürse toplam verim %50 civarına çıkar.



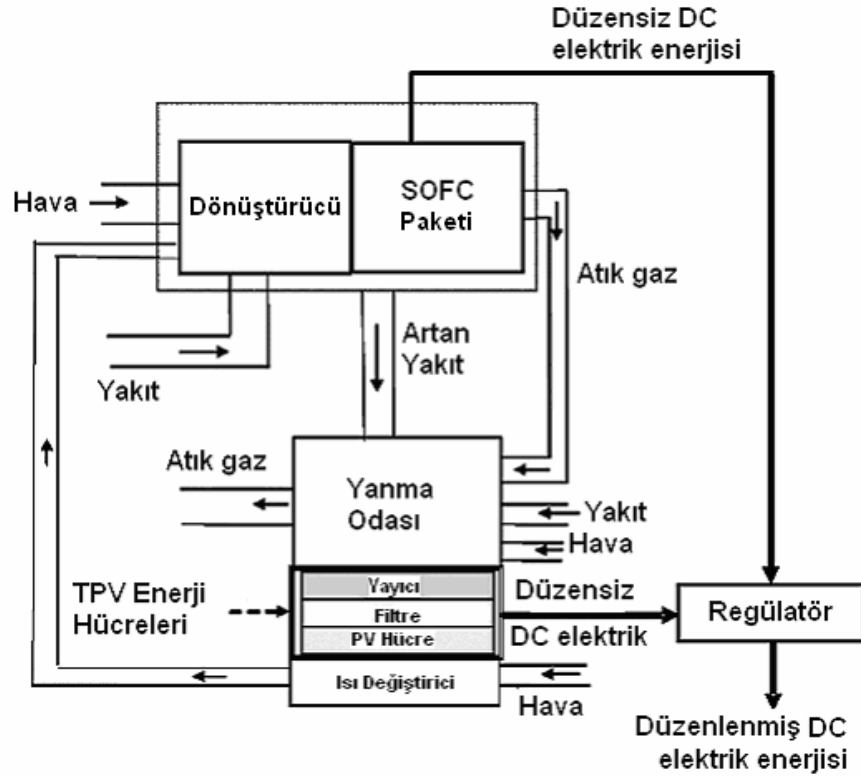
Şekil 2.5 TPV sisteminin çalışma prensibi

2.3 PEMFC-RÜZGAR TÜRBİNİ SİSTEMLERİ

Rüzgar enerjisi sürekli bir elektrik üretim kaynağıdır. Fakat burada problem rüzgarın süreksiz oluşudur, üretilen güç rüzgar hızı ile alakalı olduğundan hız azaldığında çok düşük değerlere düşebilir. Rüzgar gibi sürekli ama düzensiz bir güç kaynağını yakıt pili ile hibrid çalıştırılması sayesinde bazı problemler ortadan kalkar. Rüzgar enerjisi ile üretilen elektrik, elektroliz cihazlarında hidrojen üretiminde kullanılır ve bu hidrojen sabit bir basınçta saklanır. Bu hidrojen daha sonra yakıt pillerinde yakıt olarak kullanılabilir. Bu sistemler için kullanım yöntemleri çeşitlilik gösterir; (Rajashekara ve Fellow2005).



Şekil 2.6 SOFC-TPV hibrid sistemi (Rajashekara ve Fellow , 2005)



Şekil 2.7 FC-Rüzgar türbini hibrid sistemi

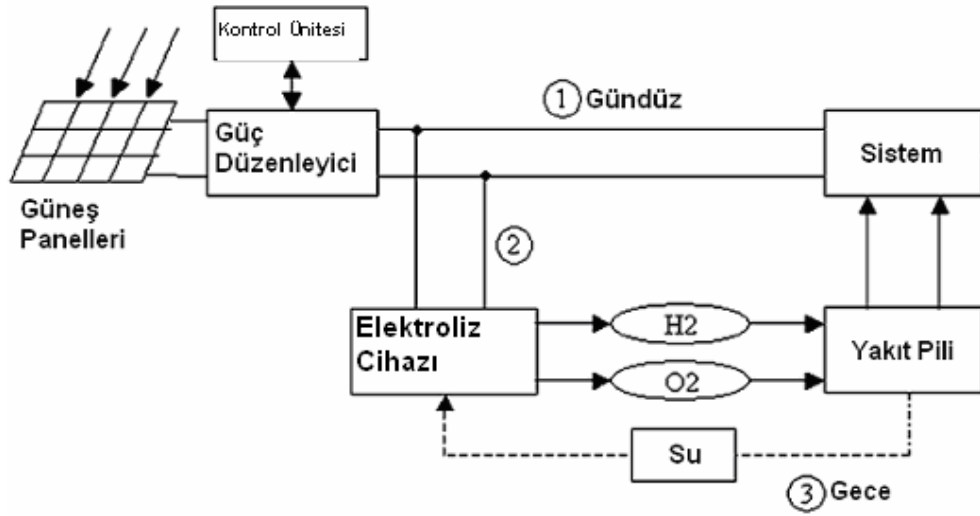
- ✓ Rüzgar enerjisi tesisin enerji ihtiyacına ek olarak, yakıt piline yardım etmek amacıyla kullanılabilir. Burada baskın olan yakıt pili sistemidir.
- ✓ Bir diğer sistemde ise hidrojen , rüzgar enerjisi sisteminin pik değere geldiği yerde üretilir ve rüzgardan elde edilen enerji düştüğünde bu hidrojen, yakıt pili sayesinde elektriğe dönüşür ve enerji ihtiyacını tamamlar.

2.4 FC-PV SİSTEMLERİ

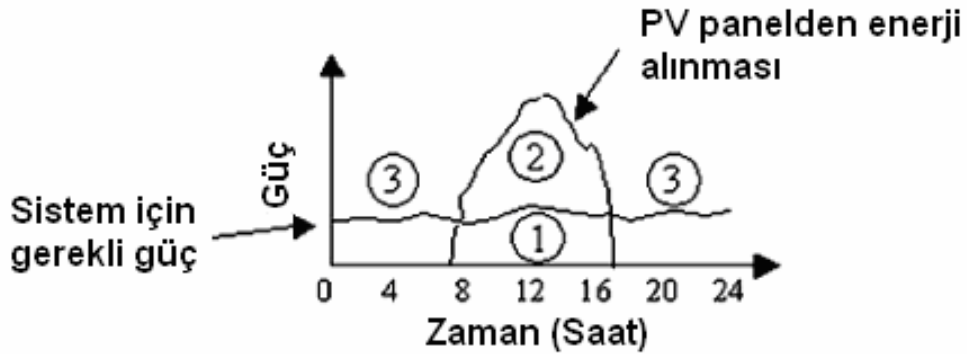
Rüzgar sistemlerinde olduğu gibi PV sistemlerinde de hidrojen üretilir, depolanır ve hidrojen elde edilir. Akşam güneş battığında bu hidrojen kullanılarak elde edilen elektrik kullanılır.

Şekilde görülen bir diğer sistemde ise temel güç PV modüllerden oluşur. Burada 12 adet 12 V ve 65 W modül mevcuttur. 24 V luk sistemde modüller 6 şar seri olarak 2 paralel sistemde birleşmiştir. Modüller güneşi en iyi göreceklere yere yerleştirilmiş ve sistem çalıştırılmıştır. Güneş enerjisi sisteminin gücü yetmediğinde hidrojen pili otomatik olarak devreye girer. Yakıt pili ise 32 hücreden oluşan 140 cm² alana sahiptir. Bu sistemde hidrojen yakıt piline 3 psi basınçla gider. Pil gerilimi 25,2 V a düştüğünde yakıt pili ek sistemleri çalışır ve 25,8 V a yükseldiğinde ek sistemler durur. Bir diğer kontrol elemanı kalkış esnasında gerilimi 28 V mertebesine getirir, gerilim düştüğünde (24 V) ise hidrojen pili devreden çıkar. Bir kısım diğer sensörler de pil sıcaklığını algılayıp yakıt pilinin çalışmasını durdurur. Pil santrifüj bir pompa yardımıyla sağlanan atmosfer havası ile çalışır. Yakıt pilinin soğutması hava ile sağlanır. Sistemdeki fanlar yakıt pili 40 °C a çıktığında devreye girer ve 38 °C a düştüğünde devreden çıkar. Hidrojen basıçlı olarak endüstriyel tüplerde saklanır. (Rajashekara ve Fellow , 2005)

Bu sistemde temel güç PV modüllerinden elde edilir. Bu sistemde 12 adet 12 V 65 W olan modüller kullanılmıştır. 24 voltluk sistemde modüller ile çalışır. Modüller 6lı seri 2 paralel sistem olarak bağlanmıştır. 32 hücreden (140 cm²) oluşan ve 3 psi (0,2 atm) basınçta çalışan hidrojen pili sistemi dengelemekle görevlidir. Pil gerilimi 25,4 V 'a düştüğünde yakıt pili ek sistemleri çalışır. Ve 25,8 V a yükseldiğinde bu ek üniteler kapanır. Burada kontrol elemanı yardımıyla kalkış esnasında gerilimi 28 V mertebesine taşır.

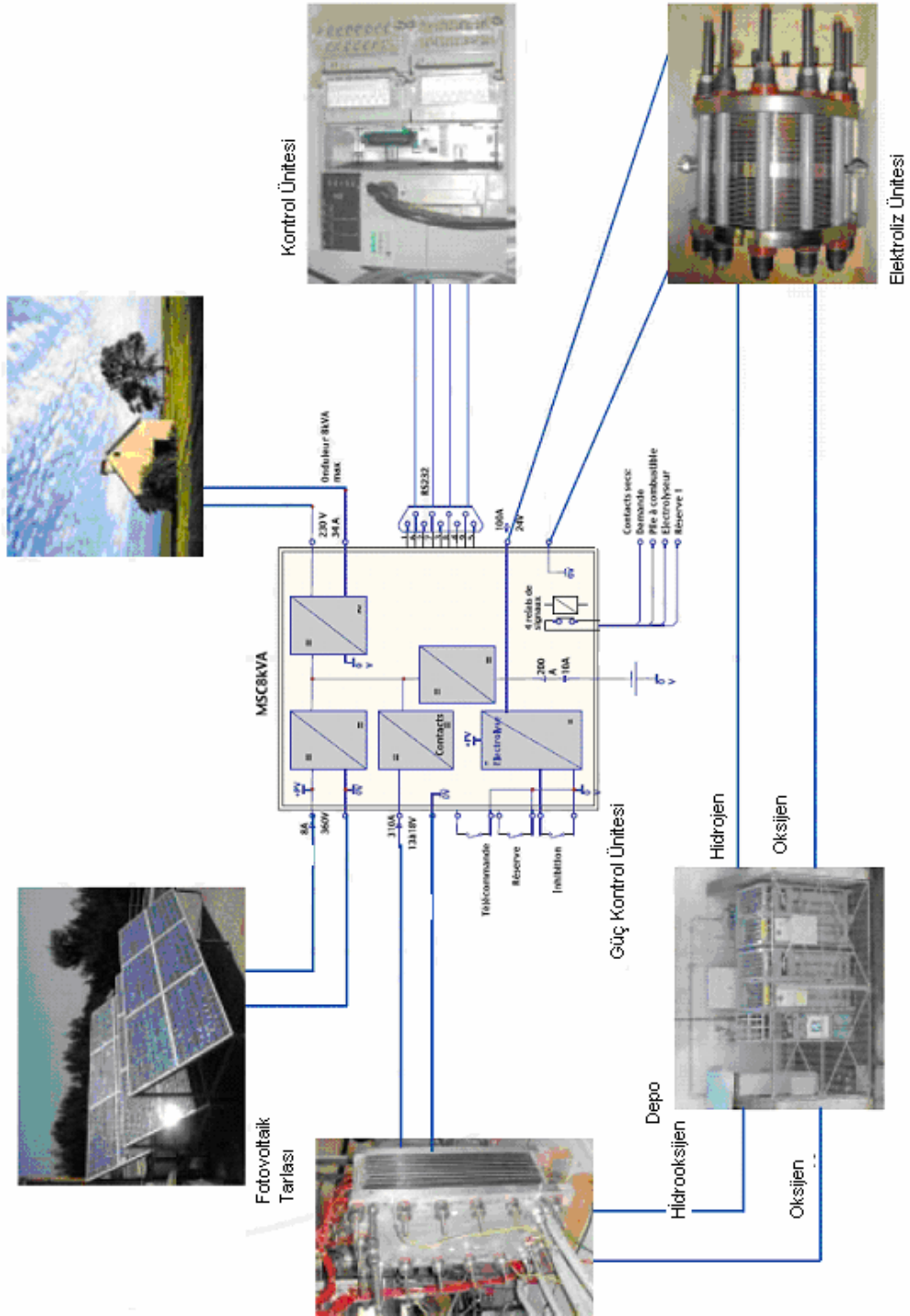


Şekil 2.8 FC-PV hibrid sistemi (Rajashekara ve Fellow , 2005)



Şekil 2.9 Şekil 2.8 deki FC-PV hibrid sisteminin çalışma avantajları

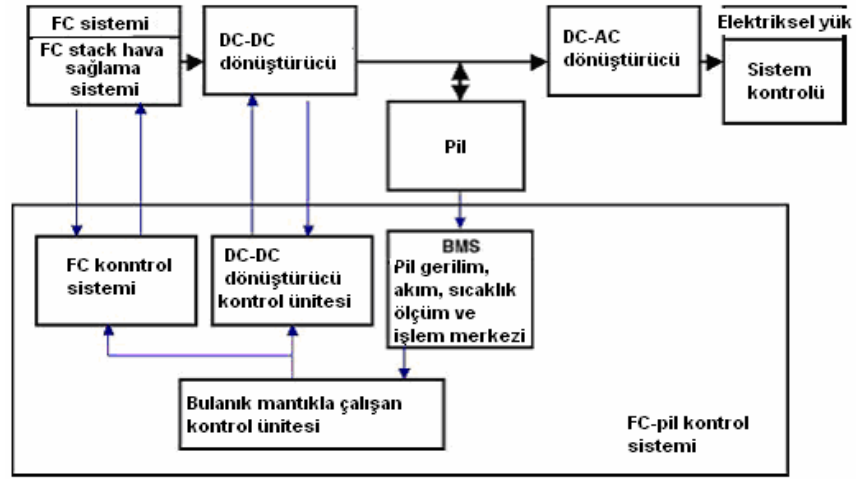
İhtiyaç duyulan gerilim 24 V a düştüğünde hidrojen pil devreden çıkar. Bir kısım diğer sensörler pil sıcaklığını ölçer ve sıcaklık arttığında pillerin çalışması durdurulur. Yakıt pili santrifüj bir pompa ile sağlanan atmosfer havası ile çalışır. Bu hava aynı zamanda soğutma için de kullanılır. Ek olarak pillerin soğutması için fanlar bulunur ve bunlar pil sıcaklığı 40 °C ye çıktığında devreye girer ve 38 °C a düştüğünde devreden çıkar. Hidrojen ise basınçlı tüplerde saklanır. (Chamberlin vd., 2004)



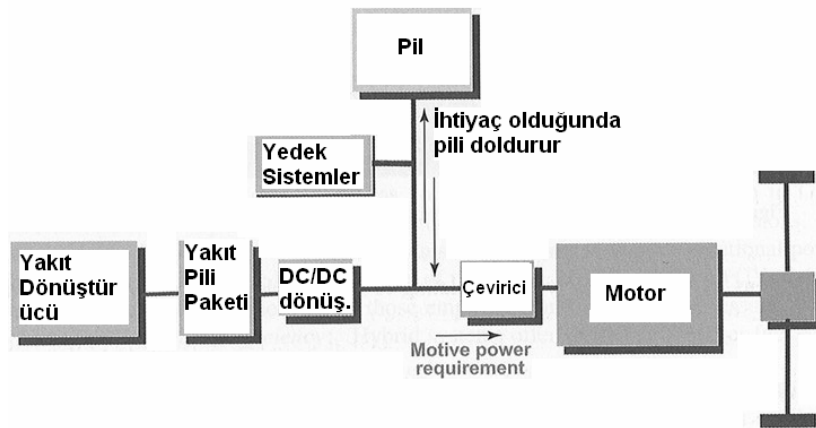
Şekil 2.10 Bir diğer FC-PV sistemi (European Commision Community Research 2001)

2.5 FC-PİL HİBRİD SİSTEMLERİ

Burada genel amaç yakıt pilinin kapasitesinin küçültülmesidir. Pik değerlere ulaşmak için pil kullanılır. Böylelikle yatırım maliyetleri düşürülmüş olur. Üstelik uygun bir bulanık mantıkla çalışan kontrol sistemi seçilirse verim daha da artar. Şekil 2.11’de bulanık mantık yardımıyla çalışan bir kontrol sistemi bulunduran yakıt pili-pil hibrid sistemi görülmektedir. Bu sistem yakıt pili, pil, DC-DC dönüştürücü, DC-AC dönüştürücü, pil yönetim sistemi ve bir kontrol ünitesinden oluşur. Bulanık mantık sayesinde optimum performans elde edilir.

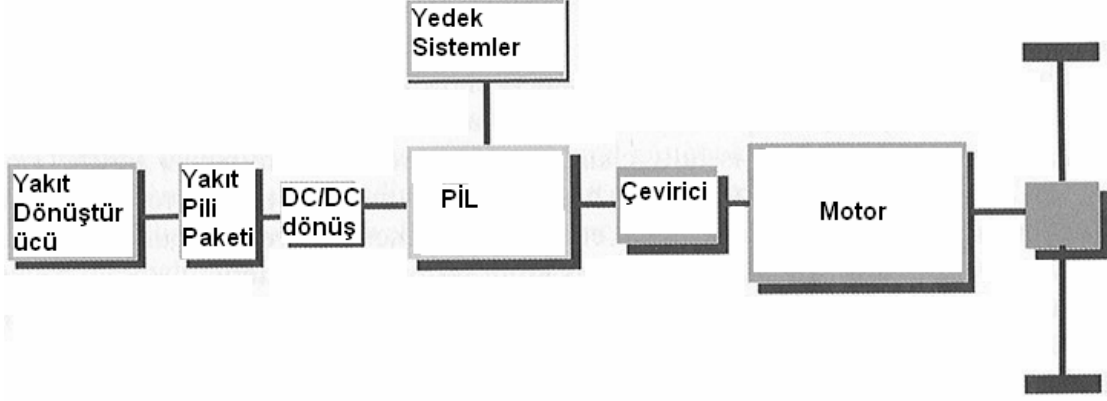


Şekil 2.11 FC-Pil hibrid sistemi



Şekil 2.12 FC-Pil paralel bağlama (Larminie ve Dicks, 2003)

Şekil 2.12 de PEMFC ile pilin paralel bağlanma yöntemi görülmektedir. Bu durumda motorun ihtiyacı olan enerji büyük kısmı yakıt pili yardımıyla sağlanır. Gerekli yerlerde piller şarj edilir.



Şekil 2.13 FC-Pil seri bağlama (Larminie ve Dicks, 2003)

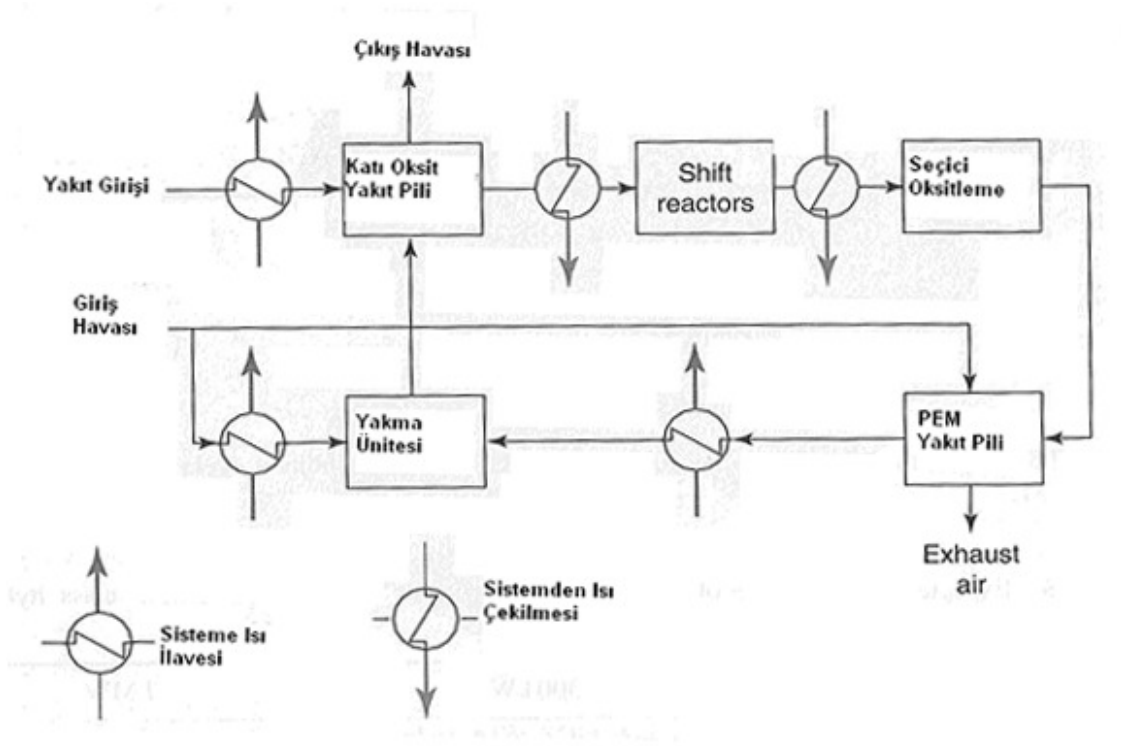
Şekil 2.13 de seri bağlantı şekli görülmektedir. Bu durumda güç piller yardımıyla sağlanır. Bu durumda güç pillerden sağlanır yakıt pilinin görevi pilleri şarj etmektir.

2.6 FC-FC HİBRİD SİSTEMLERİ

SOFC-PEMFC sistemi Şekil 2.14 deki gibi kurulabilir. İki sistem beraber çalıştığında verim oldukça yüksek olur. Ayrıca yakıt olarak saf hidrojen yerine direkt olarak metanol de kullanılabilceği için avantaj da artar. Böylelikle yakıt içinde CO ve CO₂ bulunması çok önemli olmaz.

Reformer (dönüştürücü) CO ve H₂ üretir. Shift ünitesi ise H₂O yardımıyla CO dan H₂ üretimi sağlar. Reform işlemi endotermik bir reaksiyondur ve büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duyar. Bir mol hidrojen yakması ile elde edilen enerji 241,8 kJ/mol 'dur.

Bu sistemin verimini düşürücü etki yapmasına neden olur. O shift reaksiyonu yerine yüksek sıcaklıkta çalışan bir SOFC ile beraber çalışan PEMFC, SOFC ' nin dönüştürme özelliğinden yararlanarak dönüştürücü kaybı engellenmiş olur. SOFC den çıkan gazlar shift reaktöründe $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ tepkimesi gerçekleşir burada CO alınmış olur ve H₂ yönünden zengin olan gazlar PEMFC ye verilir bu sayede sistemin verimi artmış olur.

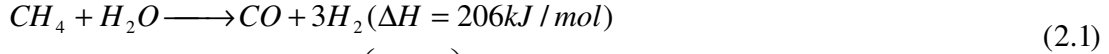


Şekil 2.14 SOFC-PEMFC hibrid sistemi (Larminie ve Dicks, 2003)

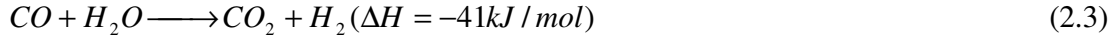
Bu reaktöre girdikten sonra bile sistemde yeterli H_2 saflığı sağlanamaz. PEMFC 'de sisteme giren H_2 %99,95-%99,99 saflığında olmalıdır ve kesinlikle CO içermemelidir. Bunun sebebi CO in anot ve katot içerisinde katalizör olarak kullanılan platinin yüzeyini kapatması ve katalizörün kullanılmaz hale gelmesine neden olmasıdır. Shift reaktöründen sonra seçici oksitleyici tankından geçer ve buradan istenen saflık değerinde çıkar.

2.6.1 Dönüştürücü (Reformer) ve Reaksiyonları :

Buharla dönüştürme büyük miktarda hidrojen üretimi olan tesislerde kullanılmak için oldukça uygun bir sistemdir. Bu teknolojinin bulunması çok eskiye dayanmaz. 1980 yılında Von Hook tarafından ortaya çıkarılan yöntem Rostrup-Nielsen (1984 ve 1993) tarafından geliştirilmiş 1989 yılında da Twigg tarafından sistem olarak hayata geçirilmiştir. Metanda ve diğer hidrokarbonlarda tepkime bu şekilde gerçekleşir.



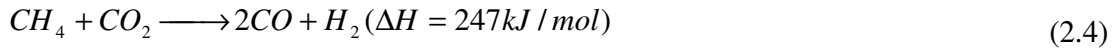
2.1 ve 2.2 numaralı denklemler dönüşüm fonksiyonlarıdır.



2.3 numaralı denklem shift (değişim) reaksiyonu

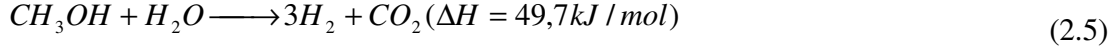
Dönüşüm reaksiyonları daha doğrusu kimyasal tabiri ile oksijenoliz işlemi ve shift reaksiyonu nikel katalizör üzerinde gerçekleşir. Bu işlemler genelde 500 °C civarında gerçekleşir. Dönüşüm reaksiyonu gerçekleşen yüzeyde shift reaksiyonu da gerçekleşir. Sıcaklığa bağlı olarak gaz konsantrasyonları Şekil 2.15 de görülür. Aslında shift reaksiyonunun shift reaksiyonunun dönüşüm reaksiyonu ile gerçekleşmesi oldukça önemlidir çünkü üretimin doğru yerde durdurulması kaliteli hidrojen üretimini sağlar. Bu reaksiyonlar ile tabi ki CO miktarı istenilen seviyeye inmez.

Dönüşüm reaksiyonları tabi ki her zaman endotermik olmaz. Örneğin nafta gibi petrol tabanlı hidrokarbonlarda tepkimenin en fazla endotermik olduğu yer karbon ve hidrojenin oksijen bırakmaya başlamadan önceki konsantrasyonudur. Bu nokta aşıldıktan sonra tepkime eksotermik olmaya başlar. Bu doğalgaz için böyle olmamaktadır. Oradaki tepkime değişmeyecek şekilde endotermiktir. İstenilen miktarda dönüşüm sağlamak için yüksek sıcaklık ve bu sebeple yüksek ısı gerekir. Eğer ürün olarak H₂ elde etmek isteniyorsa bütün hidrokarbonlar (nafta ve bütün hidrokarbonlar dahil) endotermik davranır. Bir diğer diğer dönüşüm ise kuru dönüşüm veya CO₂ dönüşüm işlemidir. Bu işlem sırasında su buharı kullanılmasına gerek yoktur.



Bu işlem genellikle iç dönüşüme sahip (MCFC tipi) yakıt pillerinde gerçekleşir. Bu durumda anot çıkışında anot çıkışında oluşan CO₂ ve H₂O yakıt beslenme kısmına geri döner Bazı durumlarda ise hibrid olarak adlandırılabilir buhar ve CO₂ kullanılan sistemlerdir. Hibrid sistemin buharlı veya CO₂ ye göre avantajı mevcuttur. Sistemde katalizör olarak nikel kullanılır fakat karbon oluşumu ve nikel sinterlenmesi oluşabilir

ayrıca daha iyi bir katalizör tercih edilmelidir. Tabi ki sadece hidrokarbonlar dönüşüm için uygun değildir. Alkollerde de oksijenoliz veya buharla dönüşümü sağlanır. Örneğin metanolde;



Metanol daha az endotermik olduğundan araçlarda kullanım açısından oldukça avantajlıdır. Düşük sıcaklıkta gerçekleşebilmesi daha önemli bir avantajdır. Katalizör de daha basittir. Gümüş takviyeli çinko oksit kullanımı gayet uygundur. Metanol dönüşüm formülü sonucunda hiç CO çıkmadığı kabul edilir. Bu nedenle PEMFC 'de kullanılmak için uygundur. Ama tepkime içinde görünmemesi hiç olmadığı anlamına gelmez.



tepkimesi tersinir olduğundan ortamda bir miktar CO kalacaktır. Bu miktar sadece PEMFC için önemlidir. Diğer pil çeşitleri çalışacaktır. Kalan C onun giderilmesi işlemi 2.6.2 de görülecektir.

2.6.2.Karbon monoksit uzaklaştırma:

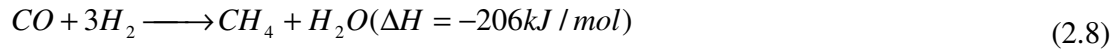
Doğalgaz dönüşümü için atmosferik basınçta, çıkış sıcaklığı 800 °C olarak çalışan buharlı dönüştürücü reaktöründen çıkan gaz %75 oranında H₂, %15 CO, ve %10 CO₂ ihtiva eder. PEMFC ve PAFC bu içerikte CO bulunması halinde 'zehirlenir' ve çalışmaz hale gelir. Metanol dönüşümünü gerçekleştiren bir reaktörde ise 200 °C de basınç ve nem oranlarına göre %0,1 değerine kadar düşürülebilir. Bu oran PAFC için yeterli olmakla beraber PEMFC için yeterli değildir. Daha önceki konularda shift reaksiyonunu görmüştük;



Bu reaksiyon dönüşüm reaksiyonu ile birlikte gerçekleşir. Bu sistemin mekanizması sıcaklık yükseldikçe CO üretimini arttıracak şekilde hareket eder. İlk çare olarak buharlı dönüştürücüden çıkan gazlar soğutulur. Ve katalizör ihtiva eden bir reaktörden geçer. Bu sayede shift reaksiyonu gerçekleşir ve CO,CO₂ ' ye dönüşür. Oluşan çıkışa göre birden fazla shift reaksiyonu gerekebilir. Bu işlemlerden sonra bile PEMFC için yeterli değere ulaşmak mümkün olmaz. İlk shift reaktörü çalışırken sıcaklığın yüksek (400-500°C)

olasından kaynaklı olarak demir –krom katalizör oldukça faydalıdır. İkinci reaktör ise bakır katalizörlü ve düşük sıcaklıklılıdır (200-250 °C). Bu durumda CO %0,25-0,5 arasına düşer. Bu değer hala PEMFC için yeterli değildir. Bu değer 2500-5000 ppm civarına gelir ki bu değer PEMFC için hala 100 kat daha zehirlidir. Shift reaksiyonundan sonra PEMFC’de kullanılmak için uygun hale gelmesi için 3 basamak mevcuttur.

- *Seçici oksitlenme reaktörü:* Yakıt akışı içerisinde %2 oranında hava ilave edilir ve değerli metal bir katalizör üzerinden geçer. Bu katalizör seçici olarak CO ’i tutar ve H₂ nin oksijenle tepkimeye girmesi girmesini engellemiş olur. Burada H₂, CO, O₂ den oluşan bir karışım özel bir katalizörle aynı ortamda bulunur. Ölçümler hassas ve uygun şekilde yapılmazsa patlayıcı oalabilecek bir karışım oluşur. Bu araçlar gibi debi değişken sistemlerde büyük bir problemdir.
- *CO’in metanlaştırılması:* Bu işlem patlayıcı karışım oluşturma adına daha az risklidir. Burada oluşan işlem buharla dönüştürme reaksiyonunun tersidir.



Buradaki zarar ise H₂ nin boşa harcanmasıdır. Bu nedenle verim düşer. Ama tabi ki miktarlar çok azdır yani dönüştürmek istediğimiz CO zaten karışımda %0,25 miktarda bulunmaktadır. Metan yakıt hücrelerini zehirlemez; sulandırıcı etki yapar. Bu reaksiyon sayesinde CO seviyesi 10 ppm altına iner.

- *Paladyum/platin zarlar(membrane):* Bu zarlarda hidrojen saflaştırmak için kullanılır. Bu uzun yıllardır kullanılan fakat oldukça pahalı olan bir sistemdir.

Bu yöntemlerden başka biyolojik sistemler yardımıyla da ayrıştırma yapılır. Faka bu sistem henüz gelişme aşamasındadır.

Yakıt Pili Kullanımının Yaygınlaşmasına Engel Olan Etkenler:

Maliyet ve dayanıklılık şu an için yakıt pillerinin yaygınlaşması önündeki en büyük engeldir. Bu engeller kullanılan yakıt pili cinsine göre değişecektir. Boyut, ağırlık, ısı ve su yönetimi de yakıt pilleri için önemli bir problemdir. Taşıtlarda kullanılan yakıt pilleri daha çok maliyet ve dayanıklılık problemleri oluşturur. Sabit kurulu sistemlerde güç ve ısı enerjisi kojenerasyonu işlemlerinde sıcaklık artarsa PEM kullanımı da kolaylaşır. En önemli problemler şu şekilde sıralanabilir:

- *Dayanıklılık ve Güvenilirlik:* Bir yakıt pili sisteminin dayanıklılığı tam olarak bilinmeyebilir. Örneğin taşıt sistemlerinde 5000 saat çalışma süresi (ki bu da 150.00 mile karşılık gelir) beklenir. Sabit sistemlerde süre 40.000 saat ve sıcaklık aralığı ‘-35’-‘40’ °C arası olmalıdır.
- *Sistem Boyutları:* Mevcut sistemlerin boyutlarının ve ağırlıklarının otomotiv sektörü için kullanılması için ağırlıklarının ve boyutlarının büyük ölçüde azalması gerekir. Sadece yakıt pilinin değil aynı zamanda ek sistemlerin de hafiflemesi gerekir.
- *Hava, Su Sıcaklık Kontrolleri:* Yakıt pilleri için hava kontrolü oldukça zordur. Günümüzün kompresör teknolojileri otomotiv için kullanılacak yakıt pili sistemlerine uygun değildir. Sıcaklık ve su kontrolü de önemlidir. Çünkü sıcaklık farkı düşüktür ve bu da büyük eşanjör hacimlerine sebep olur.
- *Gelişmiş Isı Geri Kazanım Sistemleri:* PEM yakıt pilleri düşük sıcaklıkta çalışmaları için ısı geri kazanım sistemleri için uygun değildir. Farklı yöntemler yardımıyla çalışma sıcaklıkları yükseltilebilirse iyi bir ısı geri kazanımı ile verim %80 civarına çıkabilir.[4]

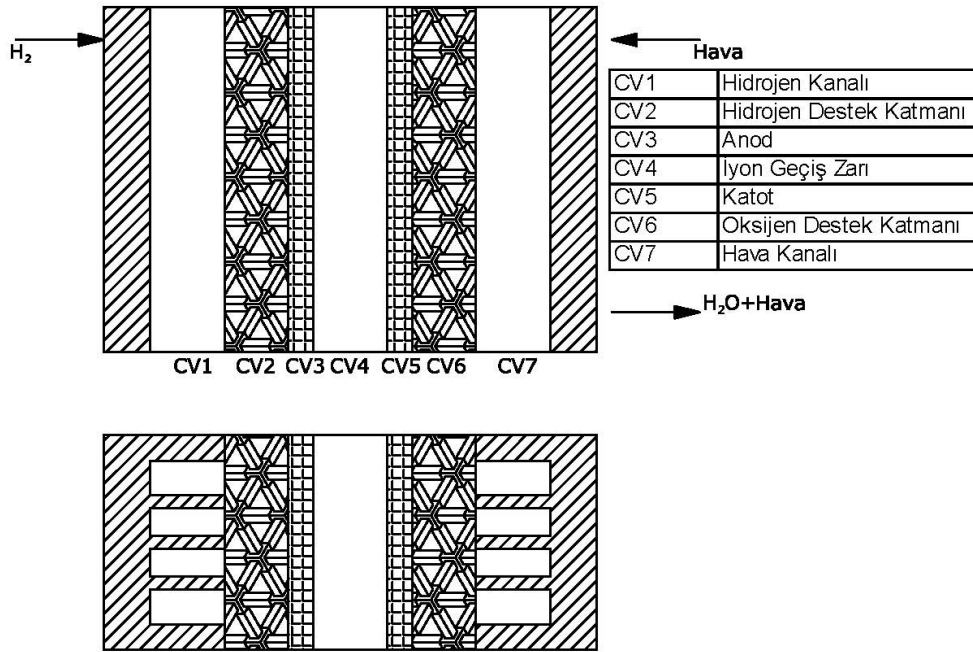
3. Matematik Model:

Hidrojen proton değişim zarlı yakıt hücresinde hesaplarda kullanılan değerlerin açıkça anlaşılması için gerekli şekiller (Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3) aşağıdaki gibidir. Yakıt hücresine saf hidrojen veya dönüştürülmüş hidrojen sokulabilir. Buradaki hesaplar sisteme saf hidrojen’in belli bir fazlalık katsayısı ile birlikte girmesi şeklinde olacaktır. Giren oksidan ise saf oksijendir. Yakıt hücresi yığını içindeki her bir hücre tek parçaymış gibi düşünülüp sistemden giriş çıkışlar şekildeki gibidir. Bu hücrelerin her biri 7 adet bölüme ayrılmıştır. Bunun dışında hücrenin iki tarafında çift kutuplu levha olduğu yakıt ve oksijen kaçağı olmadığı kabul edilmiştir, ki zaten iyi çalışan bir yakıt hücresinde kaçakların engellenmiş olması gerekir. Kontrol hacimleri yakıt hücresini oluşturan 7 bölümden oluşur ve bunlar CV1 yakıt kanalı, CV2 anot gaz geçiş katmanı, CV3 anod reaksiyon katmanı, CV4 Polimer elektrolit zarı, CV5 katot reaksiyon katmanı, CV6 katot gaz geçiş katmanı, CV7 oksidan kanalı şeklinde tanımlanmıştır.

Matematik model içinde korunum eşitlikleri her bir kontrol hacmi için hesaplanarak oluşan denklemler çözülerek gerekli hesaplamalar yapılacaktır. Yapılan hesaplamaların

bağımsız olabilmesi için değerlerin tamamı boyutsuz hale getirilmiş ve hesaba katılırken boyutsuz halleri kullanılmıştır. Değerler tanımlanırken dış ortam şartları temel alınır ve $\tilde{p}_i = p_i / p_\infty$ ve $\tilde{\theta}_i = T_i / T_\infty$ şeklinde bulunur. Burada p_∞ açık hava basıncı, T_∞ ise ortam sıcaklığıdır. Boyutsuz kütleli debi ise $\psi_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{ref}}$ şeklinde tanımlanır. \dot{m}_{ref} referans kütleli debiyi ifade eder. Buna ek olarak diğer boyutsuz değişkenler;

$$\tilde{N}_i = \frac{U_{wi} \times V_T^{2/3}}{\dot{m}_{ref} \times c_{p,i}} \quad \text{ve} \quad \tilde{A}_i = \frac{A_i}{V_T^{2/3}}, \quad (3.1) \text{ ve } (3.2)$$



Şekil 3.1 Yakıt Pili matematik modeli

Burada i akışın yakıt hücresi içindeki yerini, \tilde{N}_i boyutsuz ısı transfer katsayısı \tilde{A}_i boyutsuz alanı ifade eder. $c_{p,i}$ ise belirli bir basınçtaki özgül ısıyı ifade eder.

Yakıt hücresinin toplam hacmi $V_T = L_x L_y L_z$ olarak ifade edilir. Bu değerlerden L_y ve L_z alınacak olan yakıt hücresi Uzunlukların boyutsuz hale gelebilmesi için $V_T^{1/3}$ ile

oranlanması gerekir.

$$\xi_j = \frac{L_j}{V_T^{1/3}} \quad (3.3)$$

Burada j yakıt hücrelerinin her bir uzunluğunu ifade eder. (Vargas vd., 2004)

3.1 Anot içerisindeki kanallarda oluşan enerji denklemi:

$$\tilde{N}_1 = \frac{U_{w1} \times V_T^{2/3}}{\dot{m}_{ref} \times c_{p,f}} \quad (3.4)$$

$$U_{w1} = 50 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_{ref} = 10^{-4} \text{ kg/s} \quad (3.6)$$

$$c_{p,f} = 14,95 \text{ kJ/kgK} \quad (3.7)$$

$$\tilde{A}_{w1} = \frac{\tilde{p}_s L_1 + L_y L_z}{V_T^{2/3}} \quad (3.8)$$

$$\tilde{A}_{w1} : \text{Duvar alanı (boyutsuz)} \quad (3.9)$$

$$\tilde{p}_s = 2(L_y + L_z) \quad (3.10)$$

$$\tilde{Q}_{w1} = \tilde{N}_1 \tilde{A}_{w1} (1 - \theta_f) \quad (3.11)$$

\tilde{Q}_{w1} : Duvarda oluşan ısı transferi

$$m_{H_2} = \frac{I}{nF} M_{H_2} \quad m_{H_2} = \frac{I}{96485,34} \quad m_{H_2} : \text{Hidrojen kütleli debisi} \quad (3.12) \text{ ve } (3.13)$$

$$\tilde{Q}_{1ohm} = \frac{I^2 \beta_1}{m_{ref} \times c_{p,f} \times T_\infty} \quad \tilde{Q}_{1ohm} : \text{Boyutsuz elektriksel direnç kayıpları} \quad (3.14)$$

$$\beta_1 = \frac{\xi_1}{\tilde{A}_s \times V_T^{1/3} \times \sigma_1 \times (1 - \phi_1)} \quad \beta_1 : \text{elektriksel direnç } (\Omega) \quad (3.15)$$

$$\phi_1 = \frac{L_c}{L_t + L_c} \quad (3.16)$$

$$\tilde{A}_s = \frac{L_y L_z}{V_T^{2/3}} \quad A_s : \text{Yakıt hücresi birim kesit alanı } (m^2) \quad (3.17)$$

$$\sigma_1 = 1,388 \times 10^6 \quad \text{Çift kutuplu (bipolar) plaka iletim katsayısı } (1/\Omega m) \quad (3.18)$$

$$\tilde{Q}_{1-2} = \tilde{h}_1 \times \tilde{A}_s (1 - \phi_2)(\theta_2 - \theta_1) \quad \text{CV1 ile CV2 arası transfer olan enerji akışı} \quad (3.19)$$

$$\tilde{h}_1 = \frac{h_1 V_T^{2/3}}{m_{ref} \times c_{p,f}} \quad h_1 : \text{Isı transfer sabiti } \left(\frac{W}{m^2 K} \right) \quad (3.20)$$

Isı transfer katsayısını hesaplanması sırasında;

$$Re_{D_{h,1}} = \frac{u_1 D_{h,1} \rho_1}{\mu_1} \quad \text{Reynolds Sayısı} \quad (3.21)$$

$$\text{Burada } u_1 = \frac{m_f}{L_1 L_c} ; \text{kanal içi hız} \quad (3.22)$$

$$D_{h,1} = \frac{2L_c L_1}{L_c + L_1} \quad \mu_1 = 10^{-5} \text{ Pas dir. } \rho_1 = 0,1516 \frac{kg}{m^3} \quad (3.23)$$

Konveksiyonla oluşan ısı transferinin temel prensibi olarak reynolds boyutsuz sayısı ile ilgili olacaktır.

$Re_{D_{h,1}} < 2300$ için,

$$f_1 \text{Re}_{D_{h,1}} = 24(1 - 1,3553\delta_1 + 1,9467\delta_1^2 - 1,7012\delta_1^3 + 0,9564\delta_1^4 - 0,2537\delta_1^5) \quad (3.24)$$

$$\frac{h_1 D_{h,1}}{k_1} = 7,541(1 - 2,61\delta_1 + 4,97\delta_1^2 - 5,119\delta_1^3 + 2,702\delta_1^4 - 0,548\delta_1^5) \quad (3.25)$$

şeklinde alınır.

Burada δ_1 ; $L_1 \geq L_c$ olması halinde $\delta_1 = \frac{L_c}{L_1}$, $L_1 < L_c$ olması halinde $\delta_1 = \frac{L_1}{L_c}$ olarak

hesaplanır.

2300 < $\text{Re}_{D_{h,1}}$ < 20000 olması halinde

$$f_1 = 0,079(\text{Re}_{D_{h,1}})^{-1/4} \quad (3.26)$$

$$\frac{h_1 D_{h,1}}{k_1} = \frac{\left(\frac{f_1}{2}\right)(\text{Re}_{D_{h,1}} - 1000)\mu \times c_p}{k \left[1 + 12,7\left(\frac{f_1}{2}\right)^{1/2} \left(\frac{\mu \times c_p}{k}\right) - 1\right]} \text{ olarak bulunur.} \quad (3.27)$$

Buradaki k ise termal iletim katsayısıdır.

$$\psi_f (\theta_f - \theta_1) = \frac{m_f}{10^{-4}} (1 - T_1) \frac{1}{298,15} \text{ Kütle transferi ile oluşan ısı transferi} \quad (3.28)$$

$$m_f = \zeta_f m_{H_2} + m_{H_2O} \quad (3.29)$$

$$\tilde{Q}_{w1} + \psi_f (\theta_f - \theta_1) + \tilde{Q}_{1-2} + \tilde{Q}_{1ohm} = 0 \quad (3.30)$$

3.30 denklemi anot içerisindeki kanallarda oluşan enerji denklemdir.

3.2 Anot gaz geçiş katmanı içerisinde basınç denklemi:

Bu eşitliklerin oluşturulması için Basınçlar ve basınç kayıpları kullanılmıştır.

$$P_{2,out} = P_f - \frac{j_2 R_2 T_\infty L_2 \theta_2}{D_2 P_\infty} \quad (3.31)$$

Burada;

$P_{2,out}$: Hidrojenin anot gaz geçiş katmanı çıkışındaki (anod reaksiyon katmanı girişindeki) basınç

$P_{2,in} = P_f$: Yakıtın sisteme giriş basıncını (Bu kabulün yapılması için gazların kanal içindeki kayıpları göz ardı edilir) ifade eder.

$$j_2: \text{Kütlesel Akı } \frac{kg}{m^2 s} \quad j_2 = \frac{D_2(\rho_{out_2} - \rho_{in_2})}{L_2} \text{ olarak tanımlanır} \quad (3.32)$$

Bu denklemde;

D_2 : Knudsen difüzyon katsayısıdır ki o da

$$D = B \times r \left[\frac{8 \tilde{R} T}{\pi M} \right]^{1/2} \phi^q \text{ şeklinde ifade edilir.} \quad (3.33)$$

Burada ρ yoğunluk, \tilde{R} universal gaz sabiti, ϕ difüzyon sabiti, q ise tortuosity değeridir. B ise düzeltme katsayısıdır.

Bu değerlerden yola çıkıldığında

$$D_2 = 0,156 r_2 \left[\frac{8 \times 8,314 \times T_2}{\pi \times 1} \right]^{1/2} 0,4^{1,5} = 0,182 r_2 \sqrt{T_2} \text{ halini alır.} \quad (3.34)$$

Yukarıdaki formüller ve H_2 ve O_2 için ideal gaz modelleri kullanıldığında

$$j_2 = \frac{\dot{m}_{H_2}}{A_{3wet}} \text{ ifadesi elde edilir. } A_{3wet} \text{ ise anod reaksiyon katmanı içindeki ıslak alanlardır}$$

ve $A_{3wet} = 4\phi_2 L_2 K_2^{-1/2} A_s$ 'dir.

Burada K_2 geçirgenliği ifade eder. (Vargas vd., 2004)

3.3 Katot gaz geçiş katmanı içerisinde basınç denklemi:

Bu eşitliklerin oluşturulması için Basınçlar ve basınç kayıpları kullanılmıştır.

$$P_{6,out} = P_{6,in} - \frac{j_6 R_6 T_\infty L_6 \theta_6}{D_6 p_\infty} \quad (3.35)$$

Burada;

$P_{6,out}$: Hidrojenin anot gaz geçiş katmanı çıkışındaki (anot reaksiyon katmanı girişindeki) basınç

$P_{6,in} = P_{ox}$: Yakıtın sisteme giriş basıncı (Bu kabulün yapılması için gazların kanal içindeki kayıpları göz ardı edilir)

$$j_6 = \frac{D_6 (\rho_{out_6} - \rho_{in_6})}{L_6} \quad (3.36)$$

j_6 : Kütleli Akı $\frac{kg}{m^2 s}$

Bölüm 3.2 deki açıklandığı gibi;

$j_6 = \frac{\dot{m}_{o_2}}{A_{5wet}}$ ifadesi elde edilir. A_{5wet} ise katot reaksiyon katmanı içindeki ıslak alanlardır

ve $A_{5wet} = 4\phi_6 L_6 K_6^{-1/2} A_s$ 'dir.

Burada K_6 geçirgenliği ifade eder. (Vargas vd., 2004)

3.4. Anot gaz geçiş katmanı içinde enerji dengesi:

$$\tilde{N}_2 = \frac{U_{w2} \times V_T^{2/3}}{\dot{m}_{ref} \times c_{p,f}} \text{ ifadesinden hesaplanır.} \quad (3.37)$$

$U_{w2} = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$\dot{m}_{ref} = 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$$c_{p,f} = 14,95 \text{ kJ/kgK}$$

$$\tilde{A}_{w2} = \frac{\tilde{p}_s L_2}{V_T^{2/3}} \quad (3.38)$$

$$\tilde{p}_s = 2(L_y + L_z) \quad (3.39)$$

$$\tilde{Q}_{w2} = \tilde{N}_2 \tilde{A}_{w2} (1 - \theta_2) \quad (3.40)$$

ifadesi elde edilmiş olur.

$$\tilde{Q}_{2ohm} = \frac{I^2 \beta_2}{\dot{m}_{ref} \times c_{p,f} \times T_\infty} \text{ olduğundan ve} \quad (3.41)$$

$$\beta_2 = \frac{\xi_2}{A_s \times V_T^{1/3} \times \sigma_2 \times (1 - \phi_2)} \text{ yani} \quad (3.42)$$

$$\beta_2 = \frac{L_2}{V_T^{1/3}} \times \frac{V_T^{2/3}}{L_y L_z V_T^{1/3} \sigma_2 (1 - \phi_2)} \text{ şeklinde ifade edilir.} \quad (3.43)$$

$$\tilde{A}_s = \frac{L_y L_z}{V_T^{2/3}} \quad (3.44)$$

$$\sigma_2 = 4000 \text{ 1/}\Omega\text{m karbon kısmı iletim katsayısı}$$

ifadelerinden yararlanarak bulunur.

$$\tilde{Q}_{2-3} = \frac{2\tilde{k}_f (1 - \phi_2) \tilde{A}_s (\theta_2 - \theta_3)}{\left(\frac{L_2 + L_3}{V_T^{1/3}} \right)} \quad (3.45)$$

\tilde{k}_f : boyutsuz termal iletkenlik (0,2)

ϕ_2 : porozite

olmak üzere;

$$\tilde{Q}_2 = -\tilde{Q}_{1-2} + \tilde{Q}_{2-3} + \tilde{Q}_{2ohm} + \tilde{Q}_{w2} \text{ şeklindedir ve} \quad (3.46)$$

$$\theta_1 - \theta_2 + \frac{\tilde{Q}_2}{\psi_{H_2}} = 0 \text{ denkleminde yerine koyulur.} \quad (3.47)$$

3.47 numaralı denklem anot gaz geçiş katmanı içerisinde (Vargas vd., 2004)

3.5 Anot reaksiyon katmanı içinde enerji denklemi:

$$\tilde{N}_3 = \frac{U_{w3} \times V_T^{2/3}}{m_{ref} \times c_{p,f}} \text{ şeklindedir.} \quad (3.48)$$

$$\tilde{A}_{w3} = \frac{\tilde{p}_s L_3}{V_T^{2/3}} \text{ şeklinde ifade edilir.} \quad (3.49)$$

$$\tilde{p}_s = 2(L_y + L_z) \quad (3.50)$$

$$\tilde{Q}_{w3} = \tilde{N}_3 \tilde{A}_{w3} (1 - \theta_3) \text{ Çeperlerden dışarı olan ısı kaybı} \quad (3.51)$$

$$\tilde{Q}_{3-4} = -\frac{(1 - \phi_3)(\theta_3 - \theta_4) \tilde{A}_s \times 2 \tilde{k}_{s,a} \tilde{k}_p}{\xi_4 \tilde{k}_{s,a} + \xi_3 \tilde{k}_p} \quad (3.52)$$

$\tilde{k}_{s,a}$: Anot katı kısımların boyutsuz termal iletkenliği

\tilde{k}_p : polimer elektrolit zar

ξ_4 : boyutsuz polimer elektrolit zar kalınlığı

ξ_5 : boyutsuz anot reaksiyon katmanı kalınlığı

Direnç kayıpları ise

$$\tilde{Q}_{3ohm} = \frac{m_{H_2}^2 \times 9,31 \times 10^9 \times \beta_3}{14,95 \times 10^{-4} \times 298,15} \text{ şeklinde ifade edilir,} \quad (3.53)$$

$$\beta_3 = \frac{\xi_3}{A_s V_T^{1/3} \sigma_3 \phi_3} \quad (3.54)$$

$$\beta_3 = \frac{L_3 V_T^{2/3}}{L_y L_z V_T^{1/3} V_T^{1/3} \phi_3 \sigma_3} \quad (3.55)$$

$$\sigma_3 = \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_3} \right) \right] (0,5139 \lambda_3 - 0,326) \quad (3.56)$$

Tahmini olarak $\Omega=40$ $\Phi=0,2$ $T \approx 80$ oC için $\lambda=14$ olarak alınarak \tilde{Q}_{3ohm} bulunur.

$$\tilde{Q}_3 = -Q_{2-3} + \tilde{Q}_{w3} + \tilde{Q}_{3-4} + \tilde{Q}_{3ohm} \quad (3.57)$$

$$(H_{H_2})_3 = (c_p(T_2))_{H_2} T_2 \quad (3.58)$$

$$(H_{H_2})_3 = (29,11 - 0,1916 \times 10^{-2} T_2 - 0,4003 \times 10^{-5} T_2^2 - 0,8704 \times 10^{-9} T_2^3) T_2 \quad (3.59)$$

$$(H_{H^+})_3 = 8,314 \times [222,33 \times 10^{-9} \times T_3^3 - 731,22 \times 10^{-6} T_3^2 + 820,29 \times 10^{-3} \times T_3 - 348,95 - 71,224] \times \left(\frac{1}{298,15} - \frac{1}{T_3} \right)^{-1} \quad (3.60)$$

$$\Delta H_3 = (H_{H_2}) - (H_{H^+})_3 \quad (3.61)$$

$$\Delta \tilde{H}_3 = \frac{m_{H_2} \Delta H_3}{M_{H_2} m_{ref} c_{p,f} T_\infty} \quad (3.62)$$

$$\Delta \tilde{H}_3 = \frac{n_{H_2} \Delta H_3}{\dot{m}_{ref} \times c_{p,f} T_\infty} \text{ şeklinde ifade edilir.} \quad (3.63)$$

$$\Delta G_3 = \Delta G_3^0 + \tilde{R} T_3 \ln(\gamma_3) \quad (3.64)$$

$$\gamma_3 = \frac{(H^+)^2}{P_{2out}} = \left[\frac{\rho_{H_2}}{\lambda M_{H_2}} \right] \frac{1}{P_{2out}} \quad (3.65)$$

$$\rho_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{\phi_3} \quad (3.66)$$

$$\Delta H^0 = 218,00 \text{ kJ / kmol}$$

$$\Delta G^0 = 203,29 \text{ kJ / kmol}$$

$$\Delta G_3 = \Delta G_3^0 + \left[\tilde{R} T_3 \ln \left\{ \left(\frac{m_{H_2}}{\lambda M_{H_2} \phi_3} \right)^2 \left(\frac{1}{P_{2out}} \right) \right\} \right] \quad (3.67)$$

$$\Delta \tilde{G}_3 = \frac{m_{H_2} \Delta G_3}{M_{H_2} m_{ref} c_{p,f} T_\infty} \quad (3.68)$$

$$\tilde{Q}_3 + \Delta \tilde{G}_3 - \Delta \tilde{H}_3 = 0 \quad (3.69)$$

Anot Reaksiyon katmanı içerisinde enerji denklemi 3.69 numaralı denklemde görülmektedir. (Vargas vd., 2004)

3.6 Polimer elektron geçiş zarı içinde enerji denklemi :

$$\tilde{N}_4 = \frac{U_{w4} \times V_T^{2/3}}{\dot{m}_{ref} \times c_{p,f}} \quad (3.70)$$

$$U_{w4} = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\tilde{A}_{w4} = \frac{\tilde{p}_s L_4}{V_T^{2/3}} \quad (3.71)$$

$$\tilde{p}_s = 2(L_y + L_z) \quad (3.72)$$

$$\tilde{Q}_{w4} = \tilde{N}_4 \tilde{A}_{w4} (1 - \theta_4) \quad \text{Çeperlerden dışarı olan ısı kaybı} \quad (3.73)$$

$$\tilde{Q}_{4-5} = - \frac{(1 - \phi_5)(\theta_5 - \theta_4) \tilde{A}_s \times 2 \tilde{k}_{s,c} \tilde{k}_p}{\xi_4 \tilde{k}_{s,c} + \xi_5 \tilde{k}_p} \quad (3.74)$$

$\tilde{k}_{s,c}$: Katot katı kısımların boyutsuz termal iletkenliği

\tilde{k}_p : polimer elektrolit zar

ξ_4 : boyutsuz polimer elektrolit zar kalınlığı

ξ_5 : boyutsuz katot reaksiyon katmanı kalınlığı

ϕ_5 : Porozite 0,2

$$\tilde{Q}_{4ohm} = \frac{I^2 \beta_4}{m_{ref} \times c_{p,f} \times T_\infty} \text{ olduğundan ve} \quad (3.75)$$

$$\beta_4 = \frac{\xi_4}{A_s \times V_T^{1/3} \times \sigma_4 \times \phi_4} \quad (3.76)$$

$$\beta_4 = \frac{L_4}{V_T^{1/3}} \times \frac{V_T^{2/3}}{L_y L_z V_T^{1/3} \sigma_4 \phi_4} \quad (3.77)$$

$$\sigma_4 = \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_4} \right) \right] (0,5139 \lambda_4 - 0,326) \quad (3.78)$$

eşitliklerinden yararlanılarak denklemdeki değerler sağlanmış olur.

$$\tilde{Q}_4 = -\tilde{Q}_{3-4} + \tilde{Q}_{w4} + \tilde{Q}_{4-5} + \tilde{Q}_{4ohm} \quad (3.79)$$

Entalpi değişimi denklemleri yazılırsa

$$H(T_3)_{H^+} - H(T_4)_{H^+} = \Delta H_{H^+(\theta_3-\theta_4)} = [\ln K(T_3) - \ln K(T_4)] R \left(\frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_3} \right)^{-1} \quad (3.80)$$

$$H(T_3)_{H^+} - H(T_4)_{H^+} = \ln K(T_3) - \ln K(T_4) = 222,33 \times 10^{-9} (T_3^3 - T_4^3) - 731,22 \times 10^{-6} (T_3^2 - T_4^2) + 820,29 \times 10^{-3} (T_3 - T_4) - 348,95 \quad (3.81)$$

şeklinde olur.

$$\Delta \tilde{H}_{H^+(\theta_3-\theta_4)} = \frac{\Delta H_{H^+(\theta_3-\theta_4)} \times m_{H_2}}{M_{H^+} m_{ref} c_{p,f} T_\infty} \quad (3.82)$$

$$\tilde{Q}_4 + \Delta \tilde{H}_{H^+(\theta_3-\theta_4)} = 0 \quad (3.83)$$

3.83 numaralı denklem polimer elektron geçiş zarı içindeki enerji denklemini ifade eder. (Vargas vd., 2004)

3.7 Katot reaksiyon katmanı içinde enerji denklemi:

$$\tilde{N}_5 = \frac{U_{w_5} V_T^{2/3}}{m_{ref} c_{p,f}} \quad (3.84)$$

$$U_{w_5} = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\tilde{A}_{w_5} = \tilde{p}_s L_5 \quad (3.85)$$

$$\tilde{p}_s = 2(L_y + L_z) \quad (3.86)$$

$$\tilde{Q}_{w_5} = \tilde{N}_5 \tilde{A}_{w_5} (1 - \theta_5) \quad \text{Çeperlerden dışarı olan ısı kaybı} \quad (3.87)$$

$$\tilde{Q}_{5-6} = -\frac{2k_{s,c} (1 - \phi_6) \tilde{A}_s (\theta_5 - \theta_6)}{\xi_5 + \xi_6} \quad (3.88)$$

$\tilde{k}_{s,c}$: Katot katı kısımların boyutsuz termal iletkenliği

ξ_5 : boyutsuz katot reaksiyon katmanı kalınlığı

ξ_6 : katot gaz geçiş katmanı kalınlığı

ϕ_6 : Porozite 0,033

Direnç kayıpları ise

$$\tilde{Q}_{sohm} = \frac{I^2 \beta_5}{m_{ref} \times c_{p,f} \times T_\infty} \quad \text{şeklinde ifade edilir,} \quad (3.89)$$

$$\beta_5 = \frac{\xi_5}{\tilde{A}_s V_T^{1/3} \sigma_5 \phi_5} \quad \text{şeklinde} \quad (3.90)$$

$$\sigma_5 = \exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_5}\right)\right](0,5139\lambda_5 - 0,326) \quad (3.91)$$

yerine yazılır.

$$\tilde{Q}_5 = -\tilde{Q}_{4-5} + \tilde{Q}_{w5} + \tilde{Q}_{5-6} + \tilde{Q}_{5ohm} \text{ olarak ifade edilir.} \quad (3.92)$$

$$\Delta H_5 = H_{ürün} - H_{giren} \quad (3.93)$$

$$\Delta \tilde{H}_5 = \frac{m_{O_2} \Delta H_5}{M_{O_2} m_{ref} c_{p,f} T_\infty} \quad (3.94)$$

Sıvı H₂O olması hali; T<100 oC;

$$(H_{H_2O})_{5,s} = [-135,2 \times 10^{-9} \times T_5^3 + 145,89 \times 10^{-6} T_5^2 + 51,57 \times 10^{-3} \times T_5 + 10,171] \times T_5 \quad (3.95)$$

Gaz H₂O olması hali; T>100 oC;

$$(H_{H_2O})_{5,g} = [-3,595 \times 10^{-9} \times T_5^3 + 1,055 \times 10^{-5} T_5^2 + 0,1923 \times 10^{-2} \times T_5 + 32,24] \times T_5 \quad (3.96)$$

Hidrojen iyonu için;

$$(H_{H^+})_4 = 8,314 \times [222,33 \times 10^{-9} \times T_4^3 - 731,22 \times 10^{-6} T_4^2 + 820,29 \times 10^{-3} \times T_4 - 348,95 - 71,224] \times \left(\frac{1}{298,15} - \frac{1}{T_4}\right)^{-1} \quad (3.97)$$

Oksijen gazı için ise;

$$(H_{O_2})_6 = 8,314 \times [254,29 \times 10^{-9} \times T_6^3 - 836,35 \times 10^{-6} T_6^2 + 937,9 \times 10^{-3} \times T_6 - 398,41 - 81,208] \times \left(\frac{1}{298,15} - \frac{1}{T_6}\right)^{-1} \quad (3.98)$$

Sıvı hal için $T_5 < 80$ olduğunda

$$\Delta G_5 = 163,64 \times 10^{-3} T_5 - 285,96 \quad (3.99)$$

ve $T_5 > 80$ olduğunda ise gaz kabul edersek,

$$\Delta G_5 = 25 \times 10^{-3} T_5^2 + 26,85 T_5 - 238,69 \quad (3.100)$$

$$\Delta \tilde{G}_5 = \frac{m_{O_2} \Delta G_5}{M_{O_2} m_{ref} c_{p,f} T_\infty} \text{ olarak denklemdeki yerini alır.} \quad (3.101)$$

$$\tilde{Q}_5 - \Delta \tilde{H}_5 + \Delta \tilde{G}_5 = 0 \quad (3.102)$$

Denklem 3.102 katot reaksiyon katmanı içinde enerji denklemini ifade eder. (Vargas vd., 2004)

3.8 Katot gaz geçiş katmanı içerisinde enerji denklemi:

$$\tilde{N}_6 = \frac{U_{w_6} V_T^{2/3}}{m_{ref} c_{p,f}} \quad (3.103)$$

$$U_{w_6} = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\tilde{A}_{w_6} = \tilde{p}_s L_6 \quad (3.104)$$

$$\tilde{p}_s = 2(L_y + L_z) \quad (3.105)$$

$$\tilde{Q}_{w_6} = \tilde{N}_6 \tilde{A}_{w_6} (1 - \theta_6) \text{ Çeperlerden dışarı olan ısı kaybı} \quad (3.106)$$

$$\tilde{Q}_{6-7} = \tilde{h}_7 (1 - \phi_6) \tilde{A}_s (\theta_7 - \theta_6) \quad (3.107)$$

ϕ_6 : Porozite 0,033

$$\tilde{h}_7 = \frac{h_7 V_T^{2/3}}{m_{ref} \times c_{p,f}} \quad (3.108)$$

$$h_7 : \text{Isı transfer sabiti} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$$

Isı transfer katsayısını hesaplanması sırasında

$$Re_{D_{h,7}} = \frac{u_7 D_{h,7} \rho_7}{\mu_7} \quad \text{Reynolds Sayısı} \quad (3.109)$$

$$\text{Burada } u_7 = \frac{m_{ox}}{L_7 L_c} ; \text{ kanal içi hız} \quad (3.110)$$

$$D_{h,7} = \frac{2L_c L_7}{L_c + L_7} \quad (3.111)$$

$$\mu_7 = 2,4 \times 10^{-5} \text{ Pas} \quad \text{ve} \quad \rho_7 = 3,3228 \text{ kg} / m^3 \text{ dir.}$$

Konveksiyonla oluşan ısı transferinin temel prensibi olarak Reynolds boyutsuz sayısı ile ilgili olacaktır.

$$Re_{D_{h,7}} < 2300 \quad \text{için,}$$

$$f_7 Re_{D_{h,7}} = 24 \left(1 - 1,3553 \delta_7 + 1,9467 \delta_7^2 - 1,7012 \delta_7^3 + 0,9564 \delta_7^4 - 0,2537 \delta_7^5 \right) \quad (3.112)$$

$$\frac{h_7 D_{h,7}}{k_7} = 7,541 \left(1 - 2,61 \delta_7 + 4,97 \delta_7^2 - 5,119 \delta_7^3 + 2,702 \delta_7^4 - 0,548 \delta_7^5 \right) \quad (3.113)$$

şeklinde alınır.

$$\text{Burada } \delta_7; L_7 \geq L_c \text{ olması halinde } \delta_7 = \frac{L_c}{L_7}, L_7 < L_c \text{ olması halinde } \delta_7 = \frac{L_7}{L_c} \text{ olarak hesaplanır.}$$

$2300 < \text{Re}_{D_{h,7}} < 20000$ olması halinde

$$f_7 = 0,079(\text{Re}_{D_{h,7}})^{-1/4} \quad (3.114)$$

$$\frac{h_7 D_{h,7}}{k_7} = \frac{\left(\frac{f_7}{2}\right)(\text{Re}_{D_{h,7}} - 1000)\mu \times c_p}{k \left[1 + 12,7\left(\frac{f_7}{2}\right)^{1/2} \left(\frac{\mu \times c_p}{k}\right) - 1\right]} \quad (3.115)$$

olarak bulunur. Buradaki k ise termal iletim katsayısıdır.

Direnç kayıpları ise

$$\tilde{Q}_{6ohm} = \frac{I^2 \beta_6}{\dot{m}_{ref} \times c_{p,f} \times T_\infty} \quad (3.116)$$

şeklinde ifade edilir, ve

$$\beta_6 = \frac{\xi_6}{A_s V_T^{1/3} \sigma_6 \phi_6} \quad \text{şeklinde} \quad (3.117)$$

$\sigma_6 = 4000 \text{ 1}/\Omega\text{m}$ yerine yazılır.

$$\psi_{ox} (\theta_{ox} - \theta_7) = \frac{m_{ox}}{10^{-4}} (1 - T_7) \frac{1}{298,15} \quad (3.118)$$

$$m_{ox} = \zeta_{ox} m_{O_2} + m_{H_2O} \quad (3.119)$$

$$\tilde{Q}_6 = -\tilde{Q}_{5-6} + \tilde{Q}_{w6} + \tilde{Q}_{6-7} + \tilde{Q}_{6ohm} \quad (3.120)$$

olacak ifade edilir.

$$\Delta H_6 = H_{ürün} - H_{giren} \quad (3.121)$$

$$\Delta \tilde{H}_6 = H(\tilde{T}_5)_{H_2O} - H(\tilde{T}_6)_{H_2O} \quad (3.122)$$

Sıvı hal için $T_5 < 80$ olduğunda

$$(H_{H_2O})_{5,s} = [-135,2 \times 10^{-9} \times T_5^3 + 145,89 \times 10^{-6} T_5^2 + 51,57 \times 10^{-3} \times T_5 + 10,171] \times T_5 \quad (3.123)$$

ve $T_5 > 80$ olduğunda ise gaz kabul edersek,

$$H(\tilde{T}_5)_{H_2O} = [-3,595 \times 10^{-9} \times T_5^3 + 1,055 \times 10^{-5} T_5^2 + 0,1923 \times 10^{-2} \times T_5 + 32,24] \times T_5 \quad (3.124)$$

Sıvı hal için $T_6 < 80$ olduğunda

$$H(\tilde{T}_6)_{H_2O} = [-135,2 \times 10^{-9} \times T_6^3 + 145,89 \times 10^{-6} T_6^2 + 51,57 \times 10^{-3} \times T_6 + 10,171] \times T_6 \quad (3.125)$$

ve $T_6 > 80$ olduğunda ise gaz kabul edersek,

$$H(\tilde{T}_6)_{H_2O} = [-3,595 \times 10^{-9} \times T_6^3 + 1,055 \times 10^{-5} T_6^2 + 0,1923 \times 10^{-2} \times T_6 + 32,24] \times T_6 \quad (3.126)$$

$$\tilde{Q}_6 + \psi_{O_2} \frac{c_{p,ox}}{c_{p,f}} (\theta_7 - \theta_6) + \Delta \tilde{H}_6 = 0 \quad (3.127)$$

Denklem 3.127 katot geçiş katmanını içerisindeki enerji denklemini ifade eder.

3.9 Katot içerisindeki kanallarda oluşan enerji denklemi:

$$\tilde{N}_7 = \frac{U_{w_6} V_T^{2/3}}{m_{ref} c_{p,f}} \quad (3.128)$$

$$U_{w7} = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\tilde{A}_{w7} = \frac{\tilde{p}_s L_7 + L_y L_z}{V_T^{2/3}} \quad (3.129)$$

$$\tilde{p}_s = 2(L_y + L_z) \quad (3.130)$$

$$\tilde{Q}_{w7} = \tilde{N}_7 \tilde{A}_{w7} (1 - \theta_7) \quad \text{Çeperlerden dışarı olan ısı kaybı} \quad (3.131)$$

Direnç kayıpları ise

$$\tilde{Q}_{7ohm} = \frac{I^2 \beta_7}{m_{ref} \times c_{p,f} \times T_\infty} \quad (3.132)$$

şeklinde ifade edilir, ve

$$\beta_7 = \frac{\xi_7}{\tilde{A}_s V_T^{1/3} \sigma_7 (1 - \phi_7)} \quad \text{şeklinde} \quad (3.133)$$

$$\sigma_7 = 3,7 \times 10^5 \text{ 1/}\Omega\text{m}$$

$$\phi_7 = \frac{L_c}{L_t + L_c} \text{ yerine yazılır.} \quad (3.134)$$

$$\tilde{Q}_7 = \tilde{Q}_{w7} - \tilde{Q}_{6-7} + \tilde{Q}_{7ohm} \quad (3.135)$$

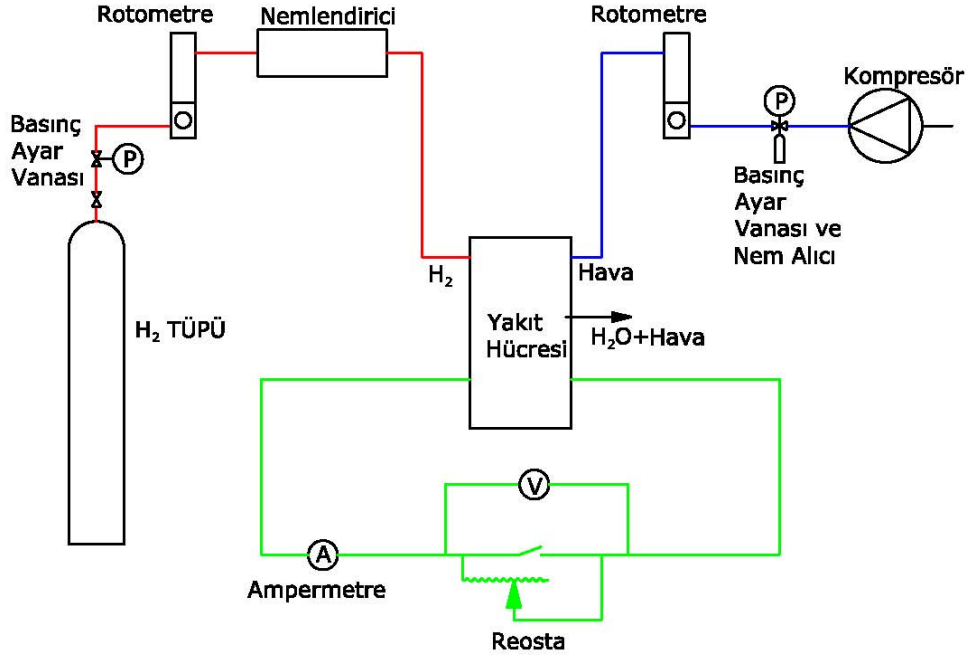
$$\tilde{Q}_7 + \psi_{ox} \frac{c_{p,ox}}{c_{p,f}} (\theta_{ox} - \theta_7) + \Delta \tilde{H}_7 = 0 \quad (3.136)$$

Denklem 3.136 da katot içerisindeki hava kanallarında oluşan enerji dengesinin ifade eder. (Vargas vd., 2004)

4. Deneyler ve Deney Tesisatı:

4.1 Deney Tesisatı:

Şekilde görülen tesisat kurulmuş ve imal edilen yakıt pilinin test edilmesi için kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Yakıt Pili tesisatı

Sistem Tanımı: Şekil 4.2 de görüldüğü gibi sıvı hidrojen %99.9999 saflıkta olarak 150 bar basınçlı tüpten alınır. Şekil 4.3 te görülen basınç ayar vanasından geçirilerek basıncı düşürülür, Şekil 4.4 teki debimetreden geçirilerek hidrojen debisi ölçüldükten sonra gaz nemlendirilerek (Şekil 4.5) yakıt pili içerisine gönderilir. Tesisatın diğer kısmında ise kompresörden gelen hava Şekil 4.6 teki nem alıcı ve basınç ayar vanasından geçtikten sonra Şekil 4.7 da yer alan debimetreden geçerek gerekli debi ayarlanır.

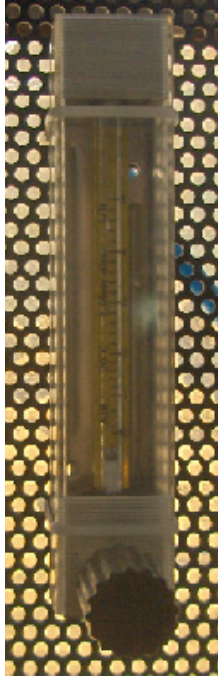
Elektrik kısmında ise bir reosta üzerinden akım geçirilerek devreye seri olarak bir bağlı ampermetreden (Şekil 4.8) akım okunur ve reostaya paralel olarak bağlanmış bir voltmetre (Şekil 4.8) yardımıyla sistemin gerilimi de ölçülmüş olur.



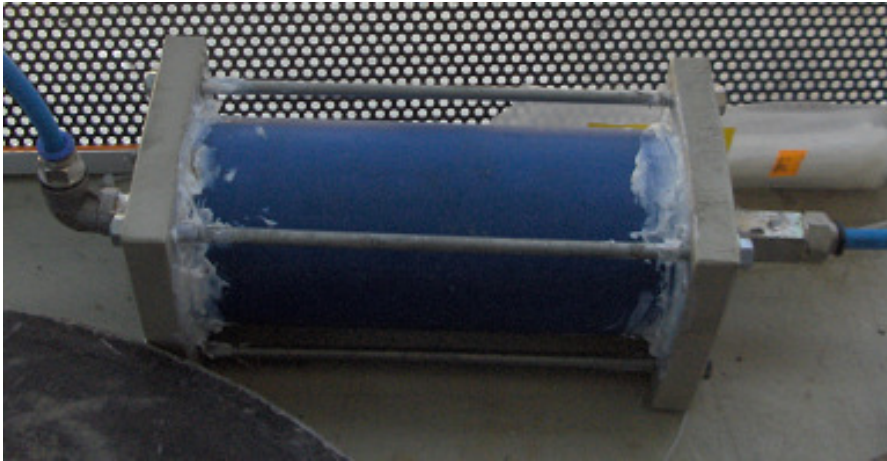
Şekil 4.2 150 bar basınçlı hidrojen tüpü



Şekil 4.3 Basınç ayar vanası



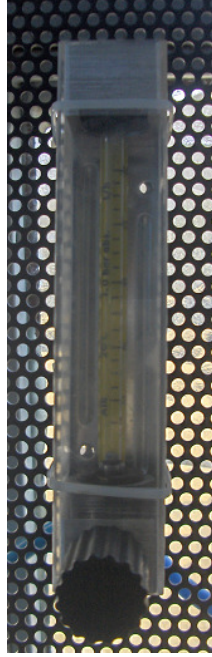
Şekil 4.4 Hidrojen debimetre ve debi ayar vanası



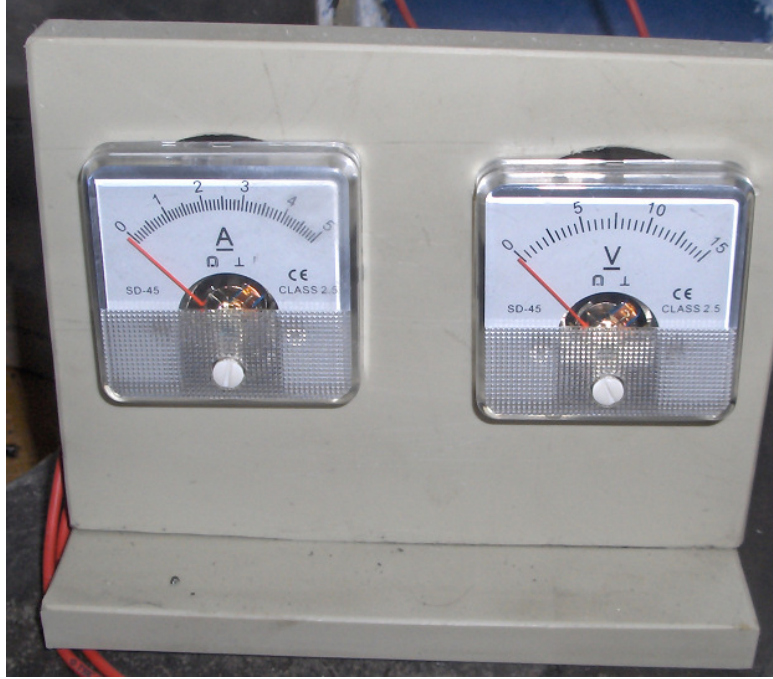
Şekil 4.5 Nemlendirici



Şekil 4.6 Nem alıcı ve basınç ayar vanası



Şekil 4.7 Hava debimetre ve debi ayar vanası



Şekil 4.8 Sisteme bağlı ampermetre ve voltmetre

Hesaplar doğrultusunda yazılan MATLAB programına göre çıkan sonuçlar ve deneylerden alınan sonuçlar sonucunda oluşan verim aşağıdaki tablolarda verildiği gibidir.

4.2 Deneyler:

Yapılan matematik modelde alınan sabit sayılar Tablo 4.1 de gösterilmiştir.

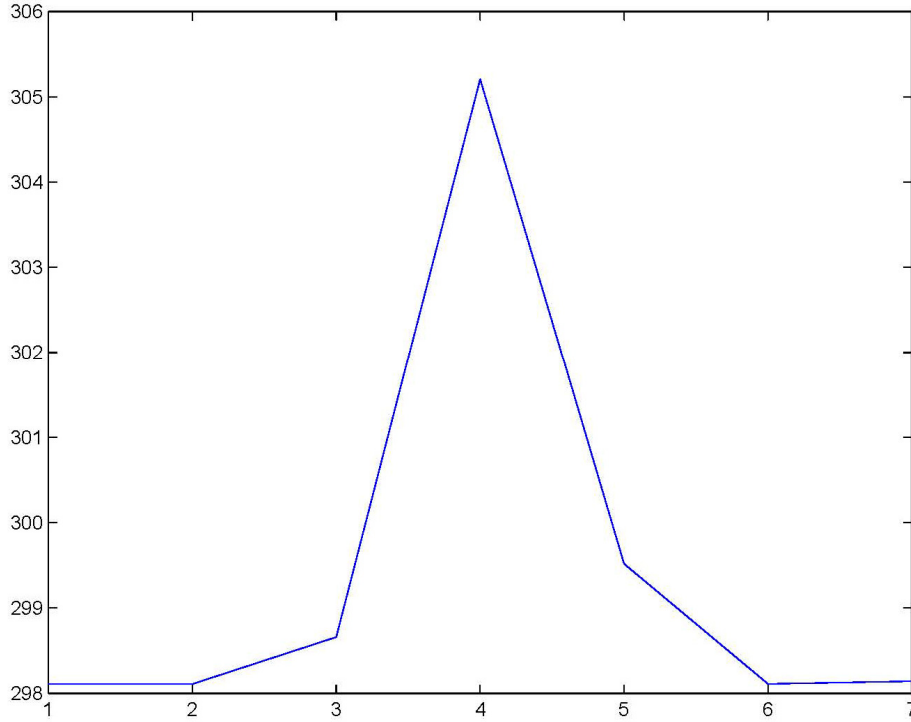
Tablo 4.1 Hesaplarda kullanılan sabit değerler

Değişken	Birim	Değer		Değişken	Birim	Değer
L_y	m	0,15		$\sigma_1 = \sigma_7$	$1/\Omega m$	5,8479E+06
L_z	m	0,25		$\sigma_2 = \sigma_6$	$1/\Omega m$	64516,13
L_c	m	0,03		c_{pf}	kJ/kgK	14,95
L_t	m	0,007		C_{pox}	kJ/kgK	0,91875
$L_1 = L_7$	m	0,005		F	coulomb	96500
$L_2 = L_6$	m	0,003		ρ_f	kg/m ³	0,1516
$L_3 = L_5$	m	2,80E-04		μ_1	Pa.s	2,40E-05
L_4	m	5,08E-05		μ_7	Pa.s	1,00E-05
L_b	m	6,00E-03		$k_1 = k_f$	W/mK	0,2
m_{ref}	kg/s	1,00E-04		k_p	W/mK	0,21
U_{wi}	W/m ² K	50		k_{ox}	W/mK	0,033
q	Birimsiz	1,5		r	Birimsiz	4,00E-05

4.2.1 1. Deney:

Tablo 4.2 1. deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri

Deney 1 Ölçülen ve hesaplanan değerler		Hesaplanan Sıcaklıklar ve Basınç	
Hava Basıncı (MPa)	0,1	T1 (K)	298,1099
Hava Debisi (lt/h)	16	T2 (K)	298,1099
Hava Debisi (kg/s)	1,62E-04	T3 (K)	298,6587
Hidrojen Basıncı (MPa)	0,2	T4 (K)	298,6587
Hidrojen Debisi (kg/s)	0,017837	T5 (K)	305,2062
Ölçülen Akım (A)	1,15	T6 (K)	298,5161
Gerçek Verim	7,4068	T7 (K)	298,111
Hesaplanan Verim	9,9135	P1 (MPa)	298,142
		P2 (MPa)	0,2

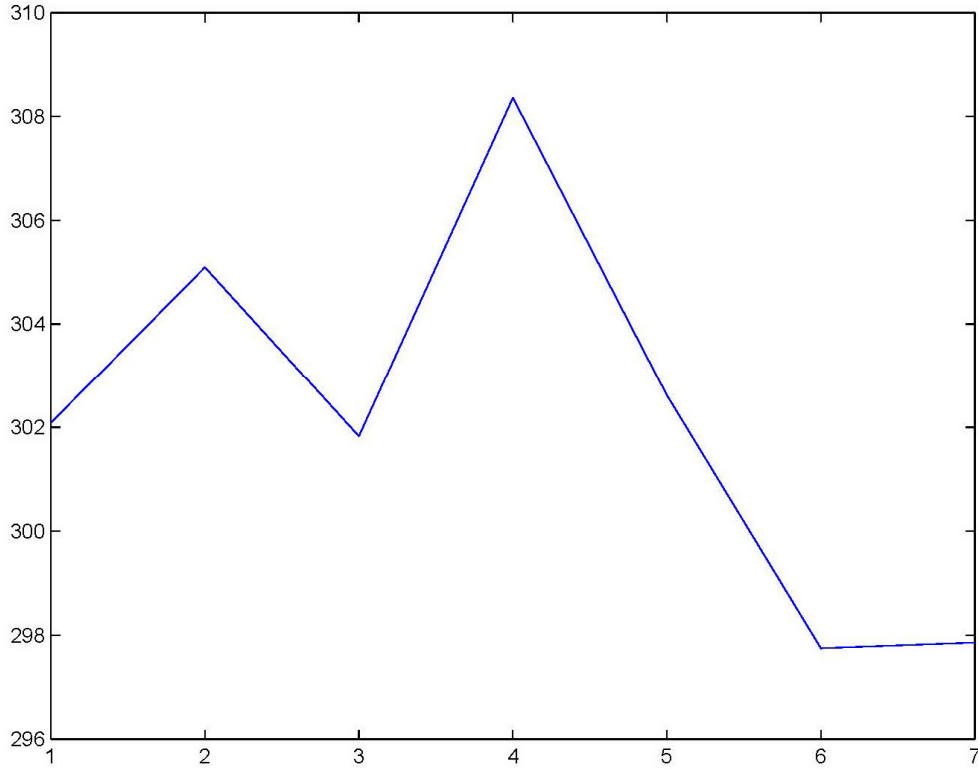


Şekil 4.9 1. deneydeki değerlerden yararlanarak yakıt hücresi içindeki sıcaklıkları gösteren grafik

4.2.2 2. Deney:

Tablo 4.3 2. deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri

Deney 2 Ölçülen ve hesaplanan değerler		Hesaplanan Sıcaklıklar ve Basınç	
Hava Basıncı (MPa)	0,8	T1 (K)	302,0860
Hava Debisi (lt/h)	25	T2 (K)	305,0950
Hava Debisi (kg/s)	3,30E-03	T3 (K)	301,8249
Hidrojen Basıncı (MPa)	0,5	T4 (K)	308,3630
Hidrojen Debisi (kg/s)	1,394E-05	T5 (K)	302,6160
Ölçülen Akım (A)	1,35	T6 (K)	297,7470
Gerçek Verim	7,6081	T7 (K)	297,8571
Hesaplanan Verim	10,1235	P1 (MPa)	0,5000
		P2 (MPa)	0,7997

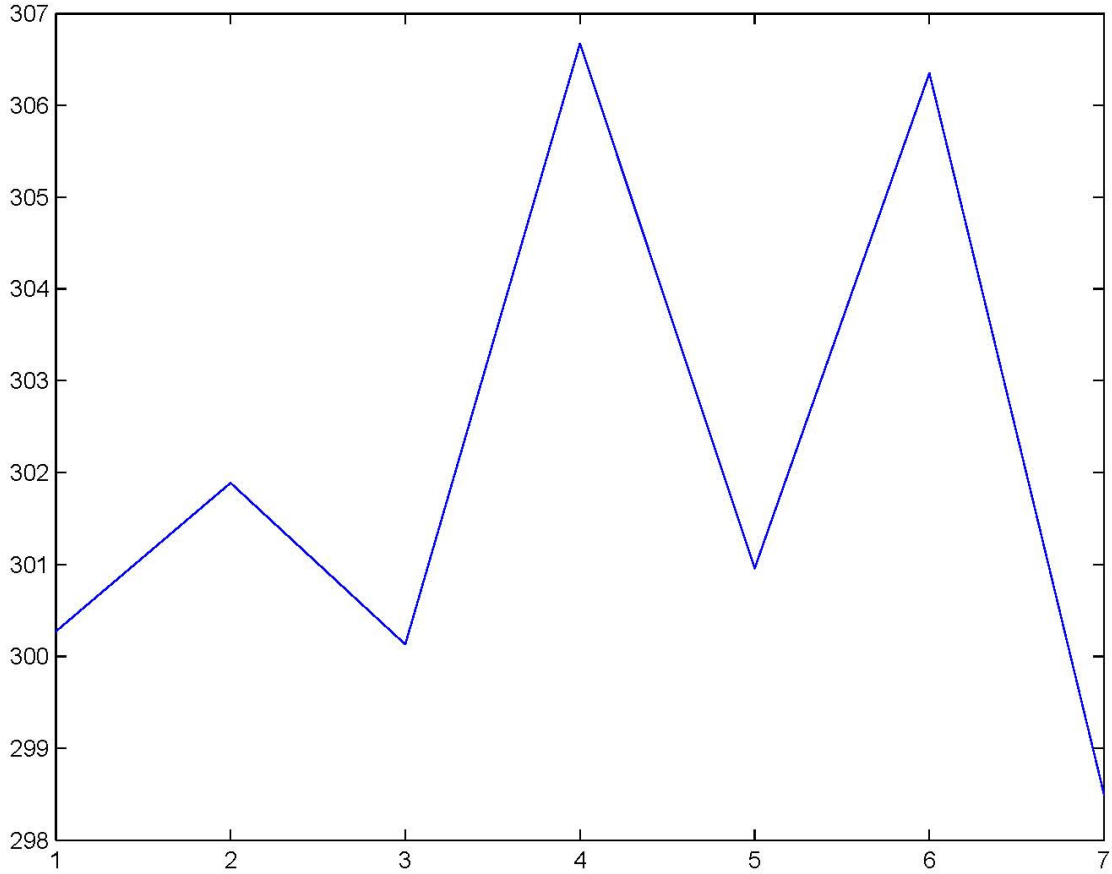


Şekil 4.10 2. deneydeki değerlerden yararlanarak yakıt hücresi içindeki sıcaklıkları gösteren grafik

4.2.3 3. Deney:

Tablo 4.4 2. deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri

Deney 3 Ölçülen ve hesaplanan değerler		Hesaplanan Sıcaklıklar ve Basınç	
Hava Basıncı (MPa)	0,3	T1 (K)	300,2701
Hava Debisi (lt/h)	50	T2 (K)	301,8855
Hava Debisi (kg/s)	1,80E-03	T3 (K)	300,1297
Hidrojen Basıncı (MPa)	0,3	T4 (K)	306,6728
Hidrojen Debisi (kg/s)	1,394E-05	T5 (K)	300,9567
Ölçülen Akım (A)	1,57	T6 (K)	306,3511
Gerçek Verim	7,7986	T7 (K)	298,4957
Hesaplanan Verim	10,2519	P1 (MPa)	0,3
		P2 (MPa)	0,2998



Şekil 4.11 3. deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri

4.2.4 4. Deney:

1. deneyin aynı değerleriyle hava ısıtılarak 60 C° verildiğinde

Tablo 4.5 4. deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri

Deney 4	
Ölçülen ve hesaplanan değerler	
Hava Basıncı (MPa)	0,1
Hava Debisi (lt/h)	16
Hava Debisi (kg/s)	1,6242E-04
Hidrojen Basıncı (MPa)	0,2
Hidrojen Debisi (kg/s)	0,017837
Ölçülen Akım (A)	1,4

4.2.5 5. Deney:

2. deneyin aynı değerleriyle hava ısıtılarak 60 C° verildiğinde Tablo 4.6 daki sonuçlar oluşur.

Tablo 4.6 5. deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri

Deney 5	
Ölçülen ve hesaplanan değerler	
Hava Basıncı (MPa)	0,8
Hava Debisi (lt/h)	25
Hava Debisi (kg/s)	3,30E-03
Hidrojen Basıncı (MPa)	0,5
Hidrojen Debisi (kg/s)	1,3935E-05
Ölçülen Akım (A)	1,75

4.2.6 6. Deney:

3. deneyin aynı değerleriyle hava ısıtılarak 60 C° verildiğinde Tablo 4.7 daki sonuçlar oluşur.

Tablo 4.7 6. deney için alınan değerler ve bu doğrultuda çıkan sıcaklık ve basınç değerleri

Deney 6	
Ölçülen ve hesaplanan değerler	
Hava Basıncı (MPa)	0,3
Hava Debisi (lt/h)	50
Hava Debisi (kg/s)	1,80E-03
Hidrojen Basıncı (MPa)	0,3
Hidrojen Debisi (kg/s)	1,3935E-05
Ölçülen Akım (A)	1,9

5. Sonuçlar:

Sistem çalıştırılmış yapılan deneyler ve hesaplamaların benzer sonuçlar verdiği fakat bunları yakıt hücresinin standart çalışma şartlarını sağlamamıştır. Bunun sebepleri arasında yakıt hücresinin istenen sıcaklığa çıkamaması gösterilebilir. Normal şartlarda PEM nin çalışma sıcaklığından; aynı zamanda hidrojen ve oksijenin entalpileri ve oluşum entalpilerinin oluşan sıcaklıklarda yeterli enerji üretimini sağlayamaması gösterilebilir. Bu sebeple yakıt hücresi bir ısıtıcı üzerine koyularak hidrojen giriş kısmı ısıtılmış ve bu sayede verim arttırılmıştır.

Sistemde sıcaklıklar dışında oluşan bir problem de malzemedeki oksitlenmedir. Burada tercih edilen malzemeler oksitlenmeye karşı korumalı olmadığından (kapatma parçaları saçtan işlendiğinden, sıkma parçaları dökümle imal edildiğinden) sistemde oluşan oksitlenme Ek 3 te görülmektedir. Bu oksitlenme yakıt hücresinin uzun süreli kullanımında elektron geçiş zarına zarar verebilir bu nedenle özellikle kapama kısımları için plastik veya alüminyum kaplamalı plastik kullanılması hem sıcaklığın artmasına hem de sistem içinde pastan kaynaklanan zararların oluşmasını engellemeye yarayacaktır.

Gaz geçiş katmanı olarak kullanılan karbon elyafı malzeme de elektrik iletimi için ideal malzeme değildir. Bu malzeme karbondan elyaf haline getirilirken kullanılan ek malzemeler sebebiyle karbon tozunda olduğu gibi yüksek bir elektrik iletimi sağlamasına engel olmaktadır.

Sonuç olarak malzemelerden kaynaklı problemler olmakla beraber yurtdışında kullanım yaygınlaşmaya başlayan yakıt hücrelerinin Türkiye’de üretilmeye başlayabilmesi ve gerektiği zaman iyi bir bilgi kaynağı olabilecek bir tez çalışması olmuştur.

KAYNAKLAR

Christoph Stiller a., Bjørn Thorud a, Olav Bolland a, Rambabu Kandepub, Lars Imsland b
 a Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Kolbjorn Hejes vei 1B, NO-7491 Trondheim, Norway

b Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, Control strategy for a solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system 2005, NO-7491 Trondheim, Norway

C.E. Chamberlin, P.A. Lehman, J.I. Zoellick, R.A. Engel, and D.S. Rommel Fuelcell photovoltaic integrated power system for a remote telecommunications station Schatz Energy Research Center Humboldt State University

J.V.C. Vargas a,*, J.C. Ordonez b, A. Bejan c

a Departamento de Engenharia Mecanica, Universidade Federal do Paran_a, C.P. 19011, Curitiba, Paran_a 81531-990, Brazil

b Department of Mechanical Engineering and Center for Advanced Power Systems, Florida State University, Tallahassee, FL 32310-6046, USA

c Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Duke University, Durham, NC 27708-0300, USA 2004

Constructal flow structure for a PEM fuel cell

Kaushik Rajashekara, Fellow, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 41, NO. 3, May/June 2005 Hybrid Fuel-Cell Strategies for Clean Power Generation, IEEE

Kwi-Seong Jeong, Won-Yong Lee , Chang-Soo Kim, Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics, Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Republic of Korea

Larminie J., Dicks A.,2000,” FuelCell System Explained “- John Willey & Sons Ltd.

Larminie J., Dicks A, 2003,“FuelCell Explianed Second Edition”-John Willey & Sons Ltd.

M. Tariq Iqbal, Faculty of Engineering, MUN, St. John’s, NF, Dynamics of a wind fuel cell hybrid energy system Canada A1B3X5

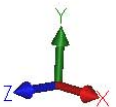
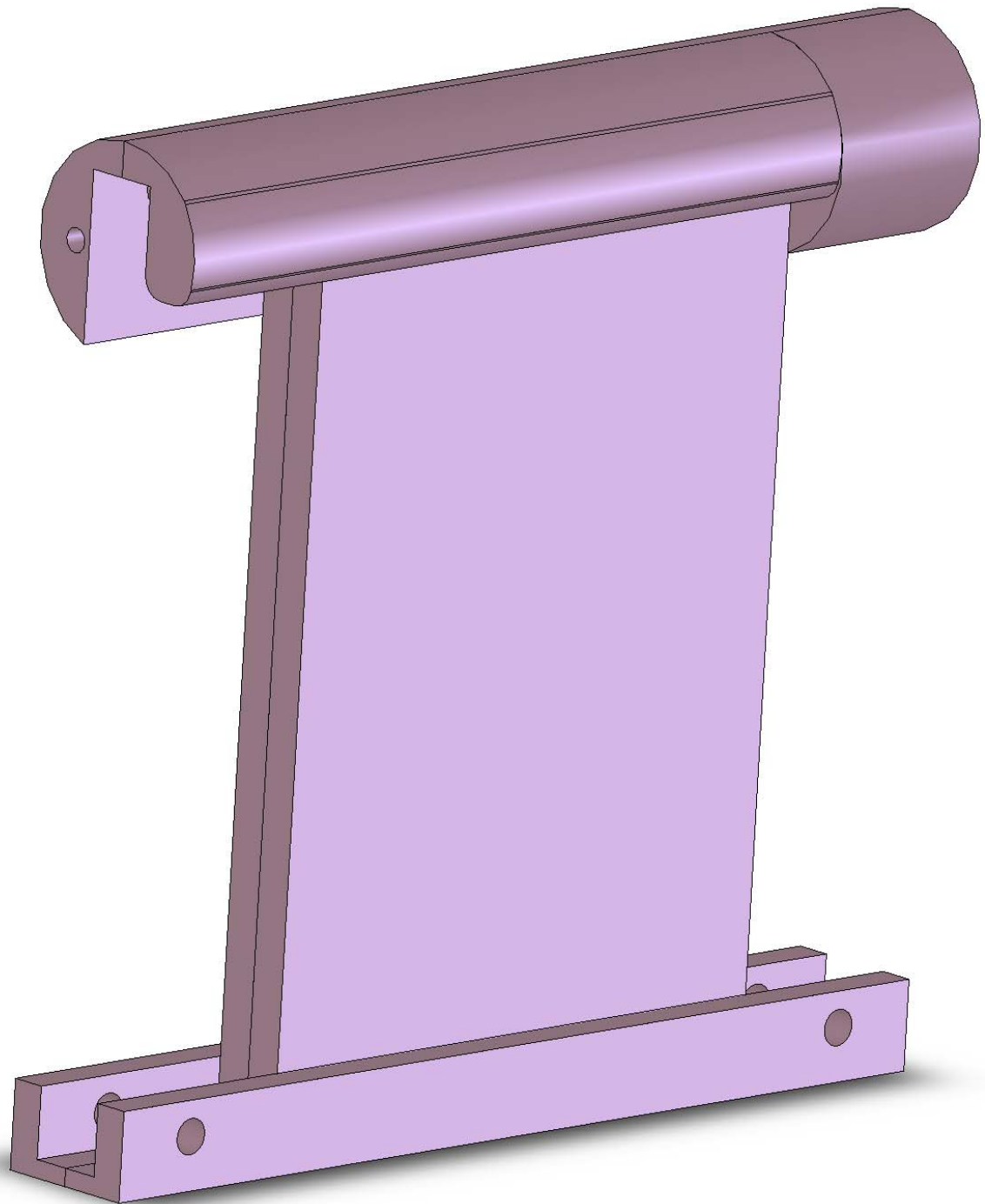
“Proses Tekniğinde Özel Konular (Yakıt Pilleri)” Doktora ve Yüksek Lisans Dersi Prof. Dr. Ahmet Rasim Büyüktür Ders Notları ve Öğrenci Sunumları, 2005

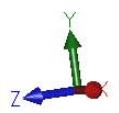
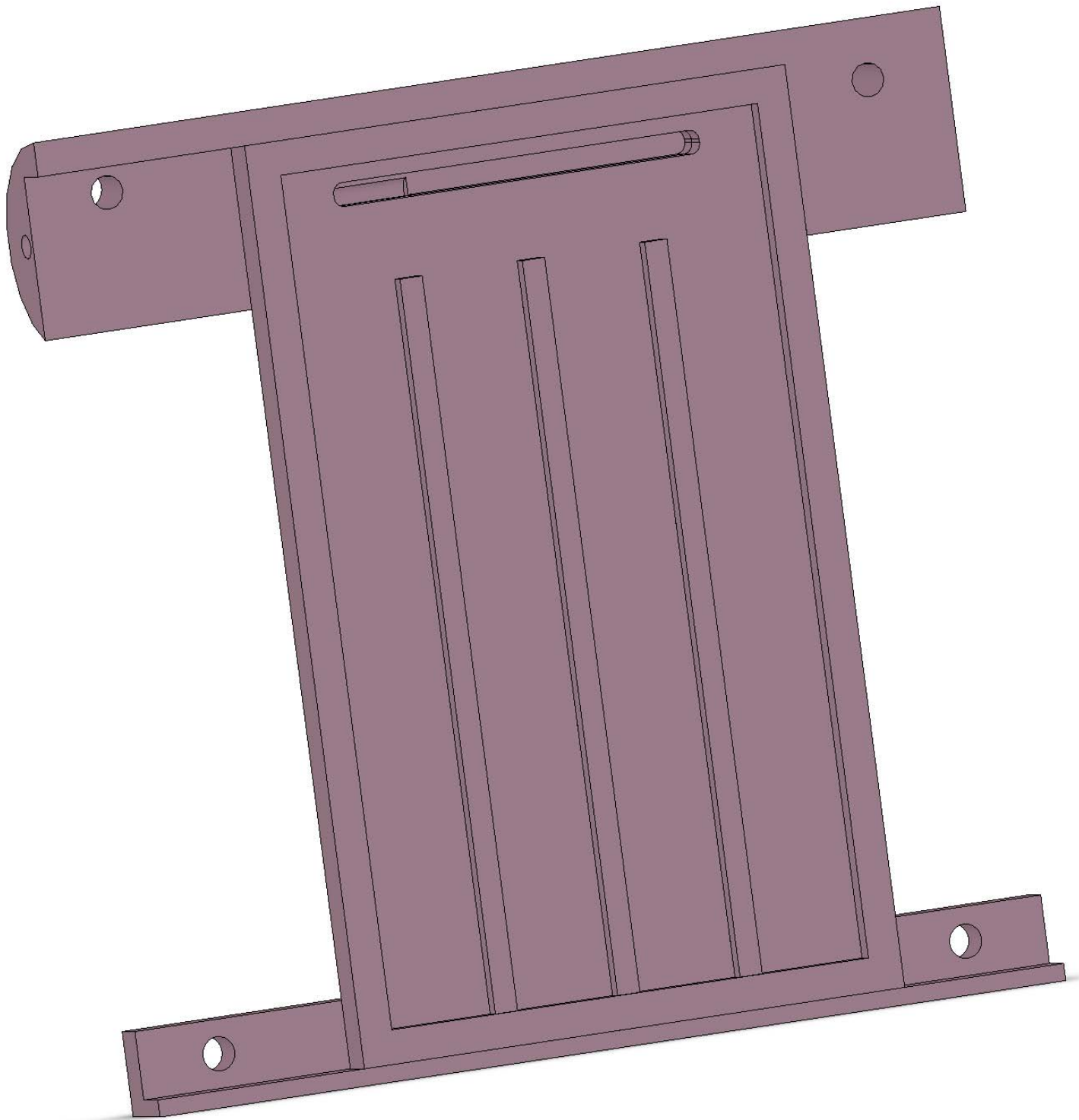
Photovoltaic fuel cell hybrid system for electricity and heat generation for remote sites European Commision Community Research 2001

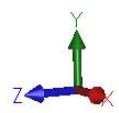
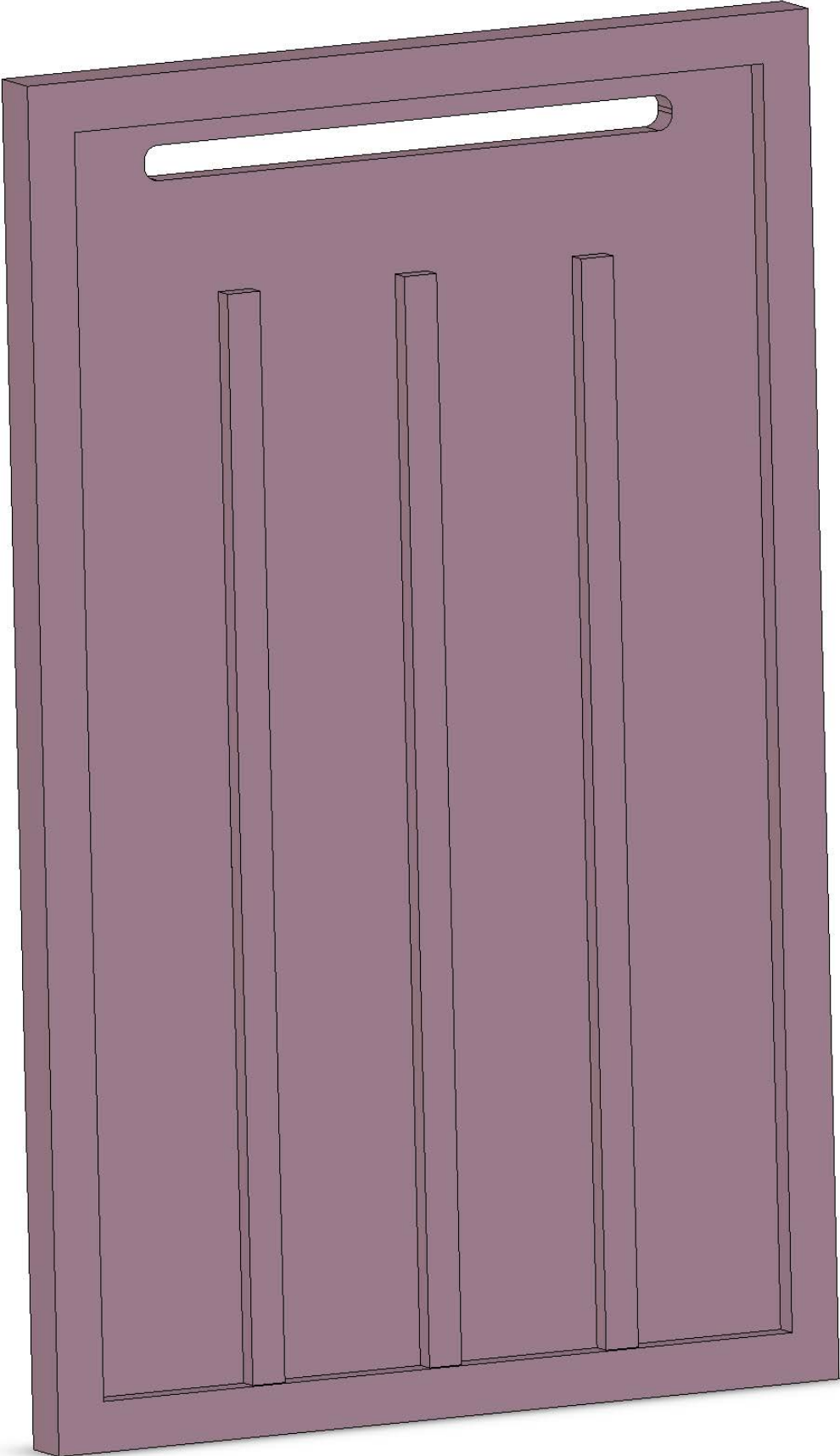
İNTERNET KAYNAKLARI

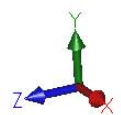
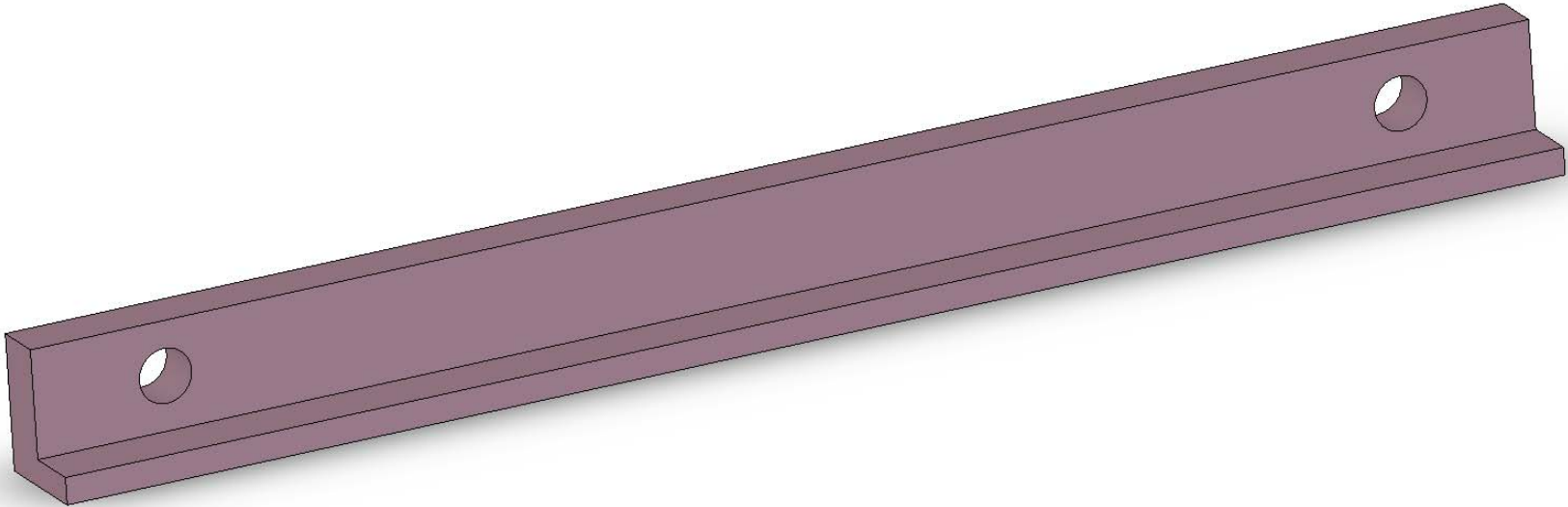
- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell
- [2] <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/pem/pemmain.htm#hist>
- [3] http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_systems.html
- [4] http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_challenges.html
- [5] www.matweb.com

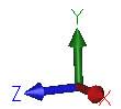
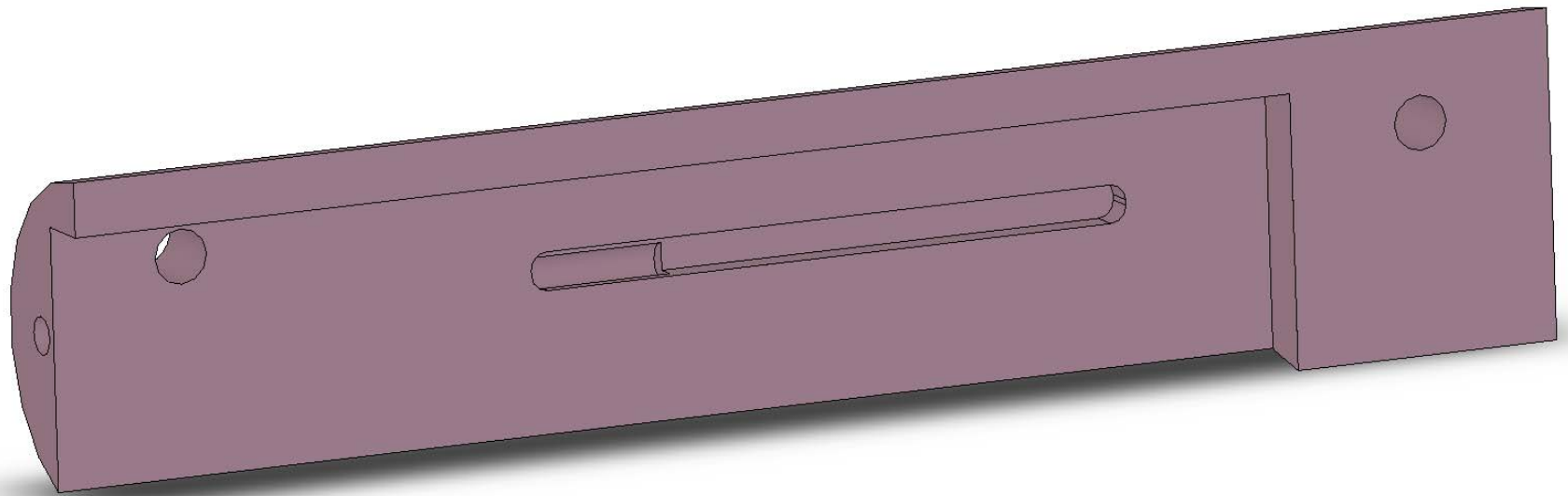
EKLER

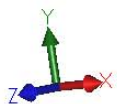
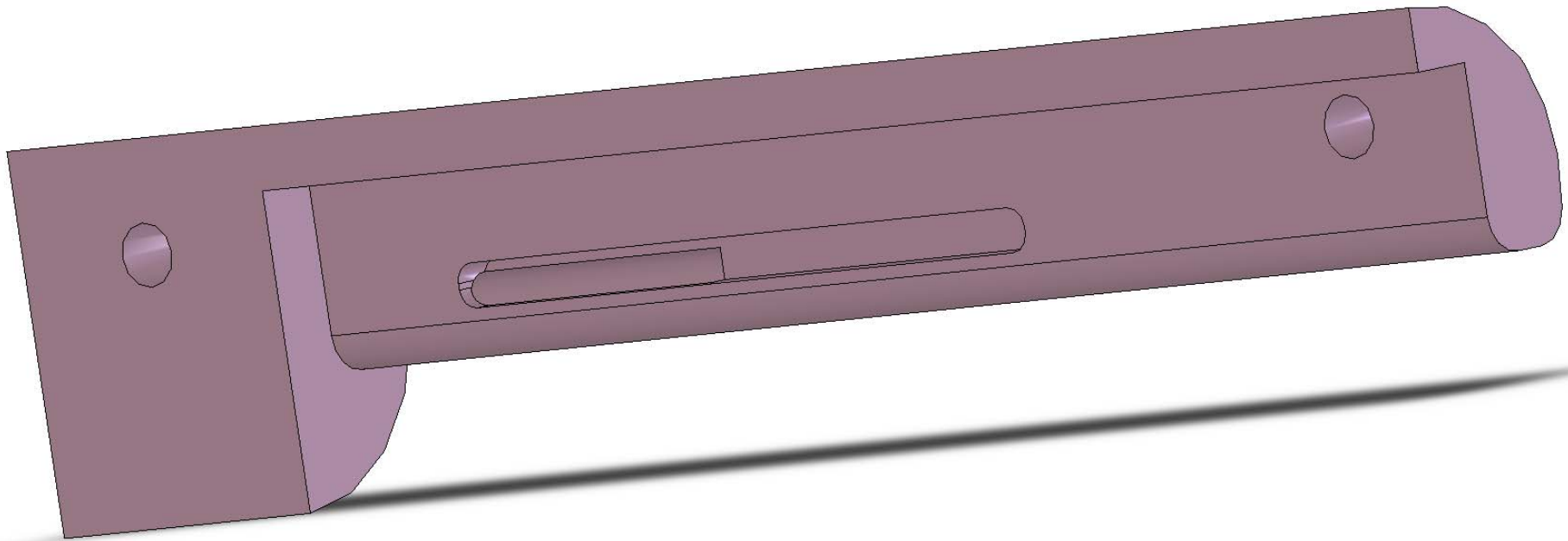


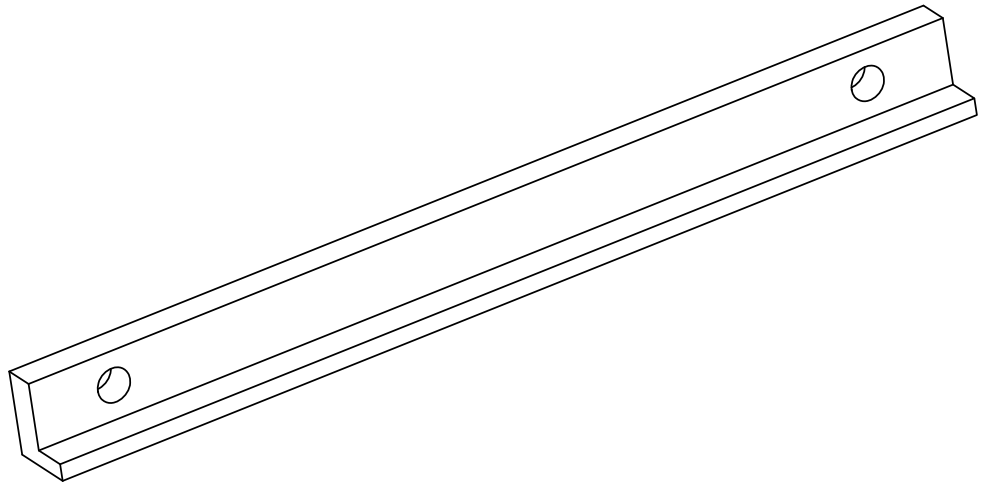
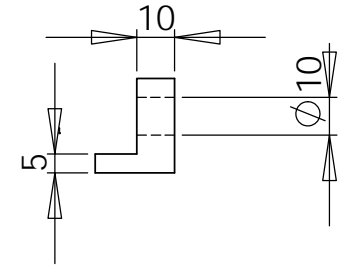
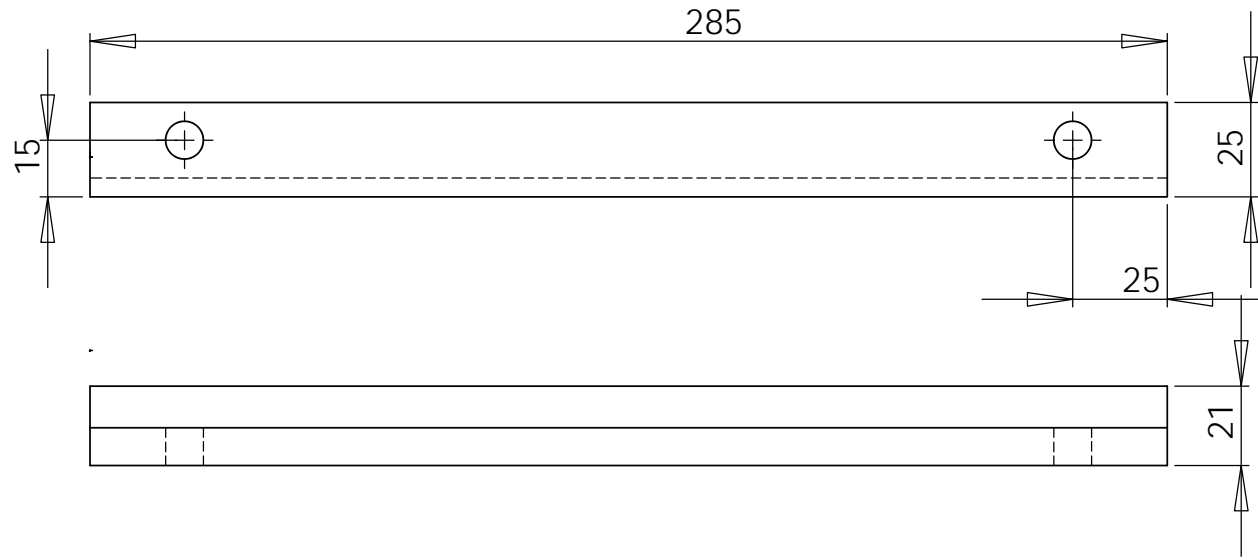




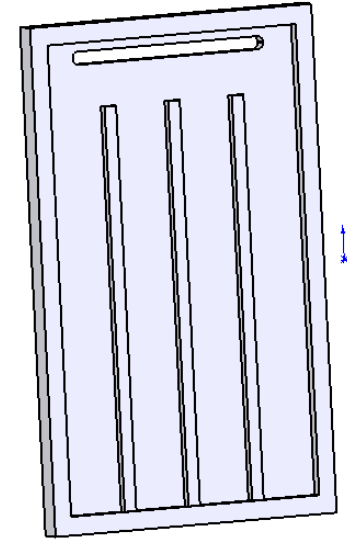
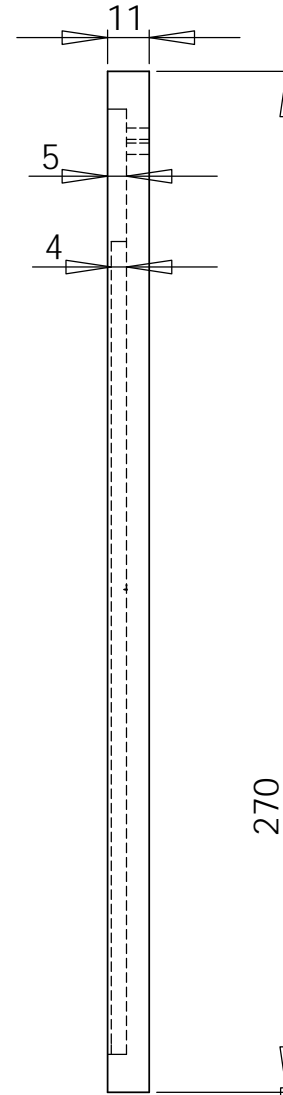
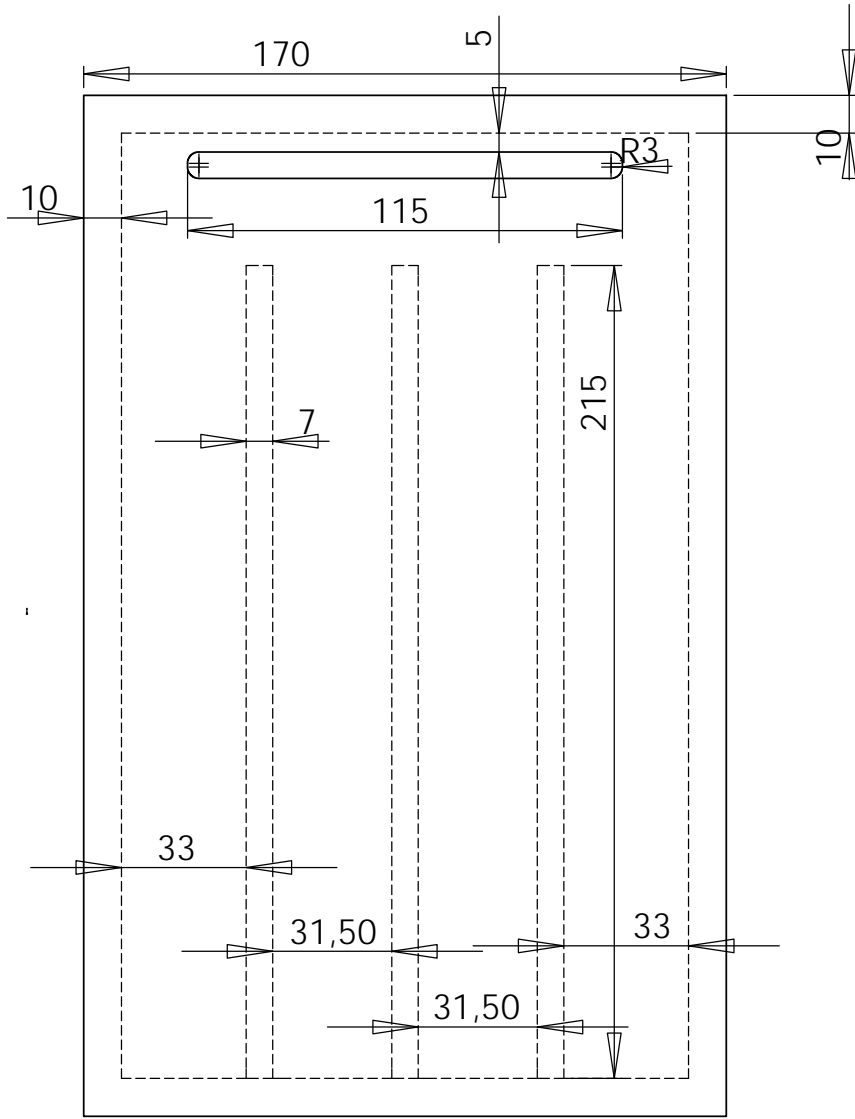






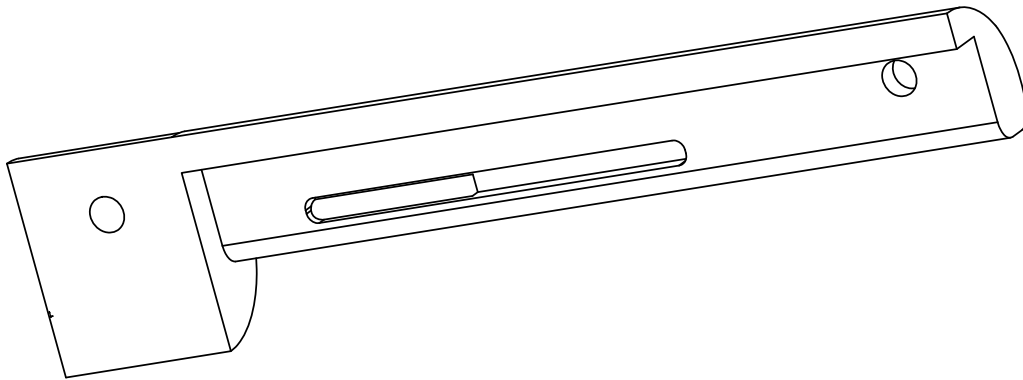
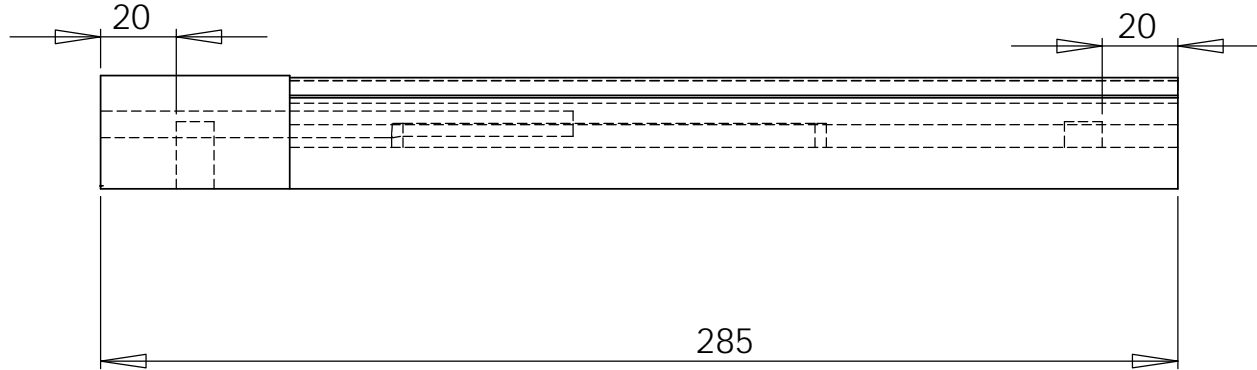
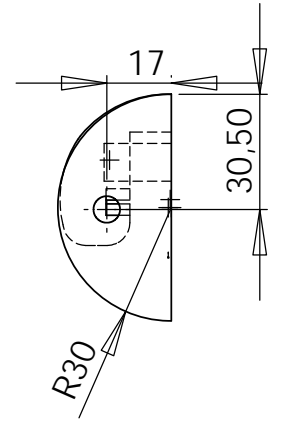
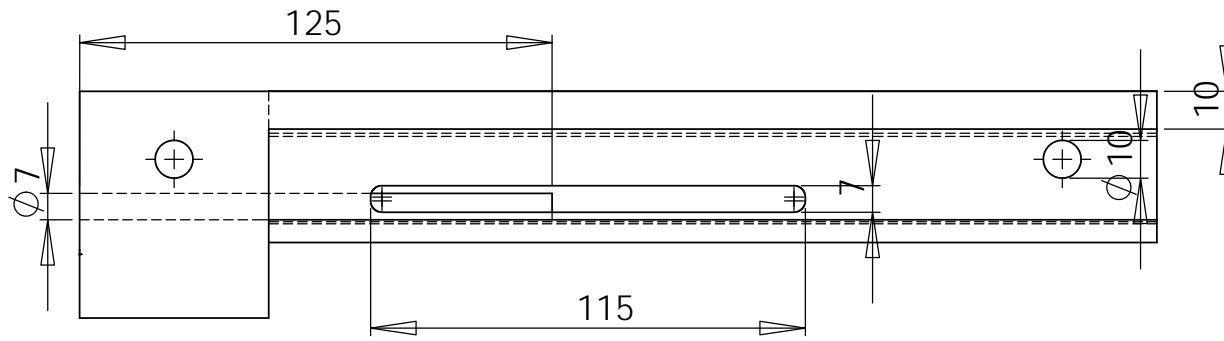
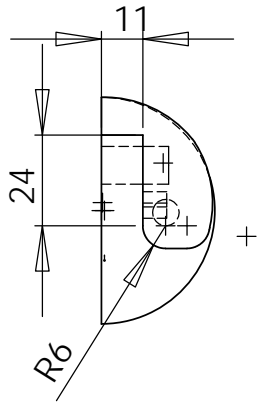


Alen Murat Kuyumcu		
Parça Adı:	Sıkma parçası	Ölçek
Parça No:	001	

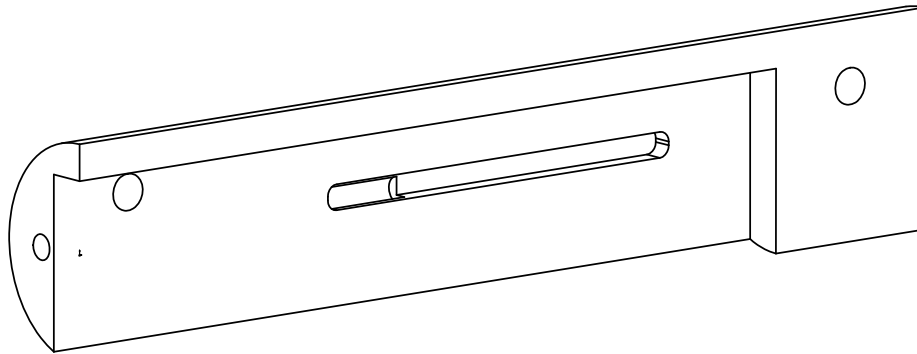
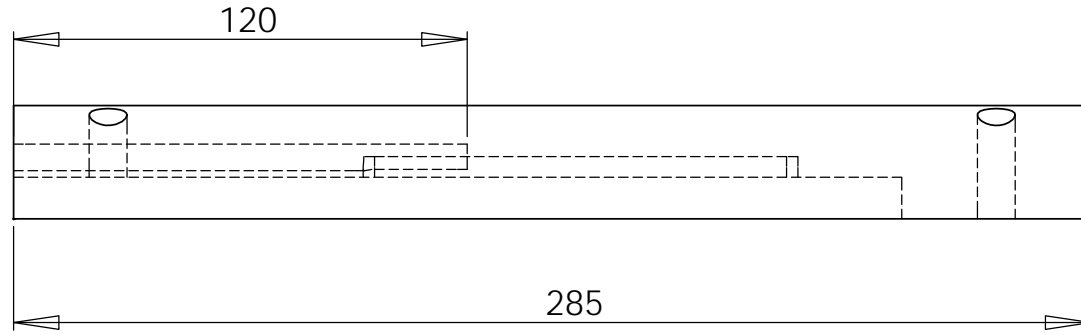
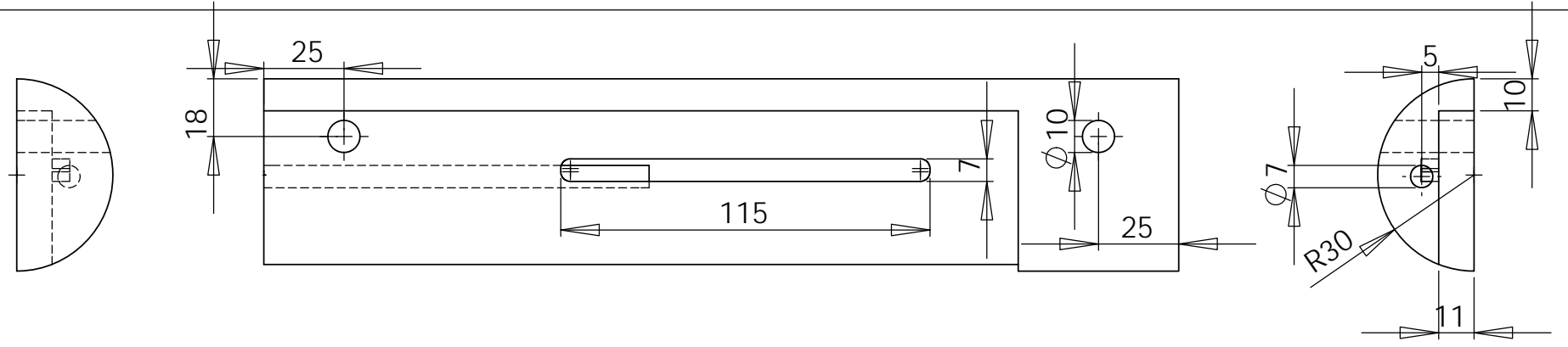


Alen Murat Kuyumcu

Parça Adı:	Endplate Destek plakası	Ölçek
Parça No:	002	



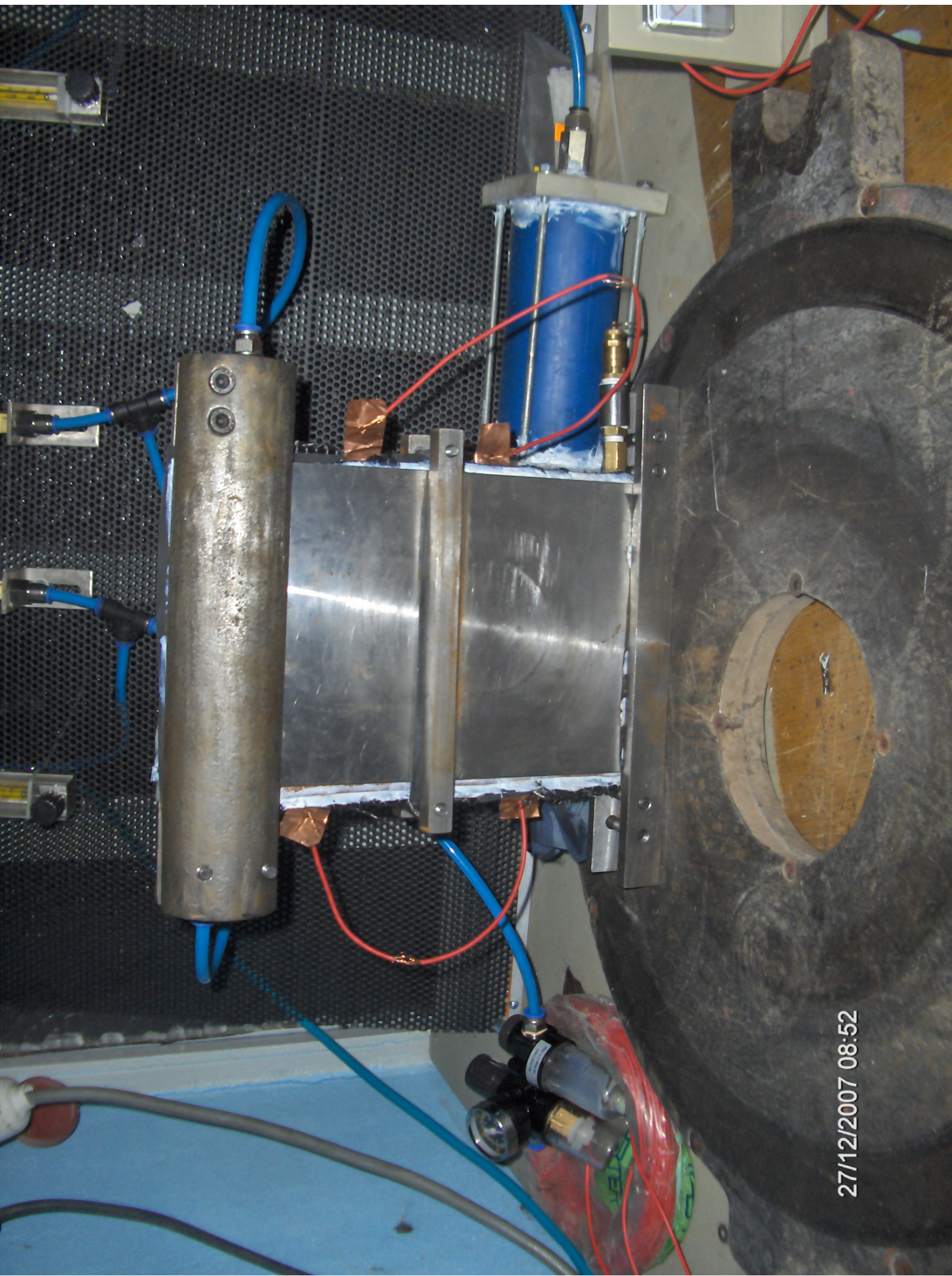
Alen Murat Kuyumcu		
Parça Adı:	Üst Sarma Parçası	Ölçek
Parça No:	003	



Alen Murat Kuyumcu		
Parça Adı:	Üst Sarma Parçası	Ölçek
Parça No:	004	



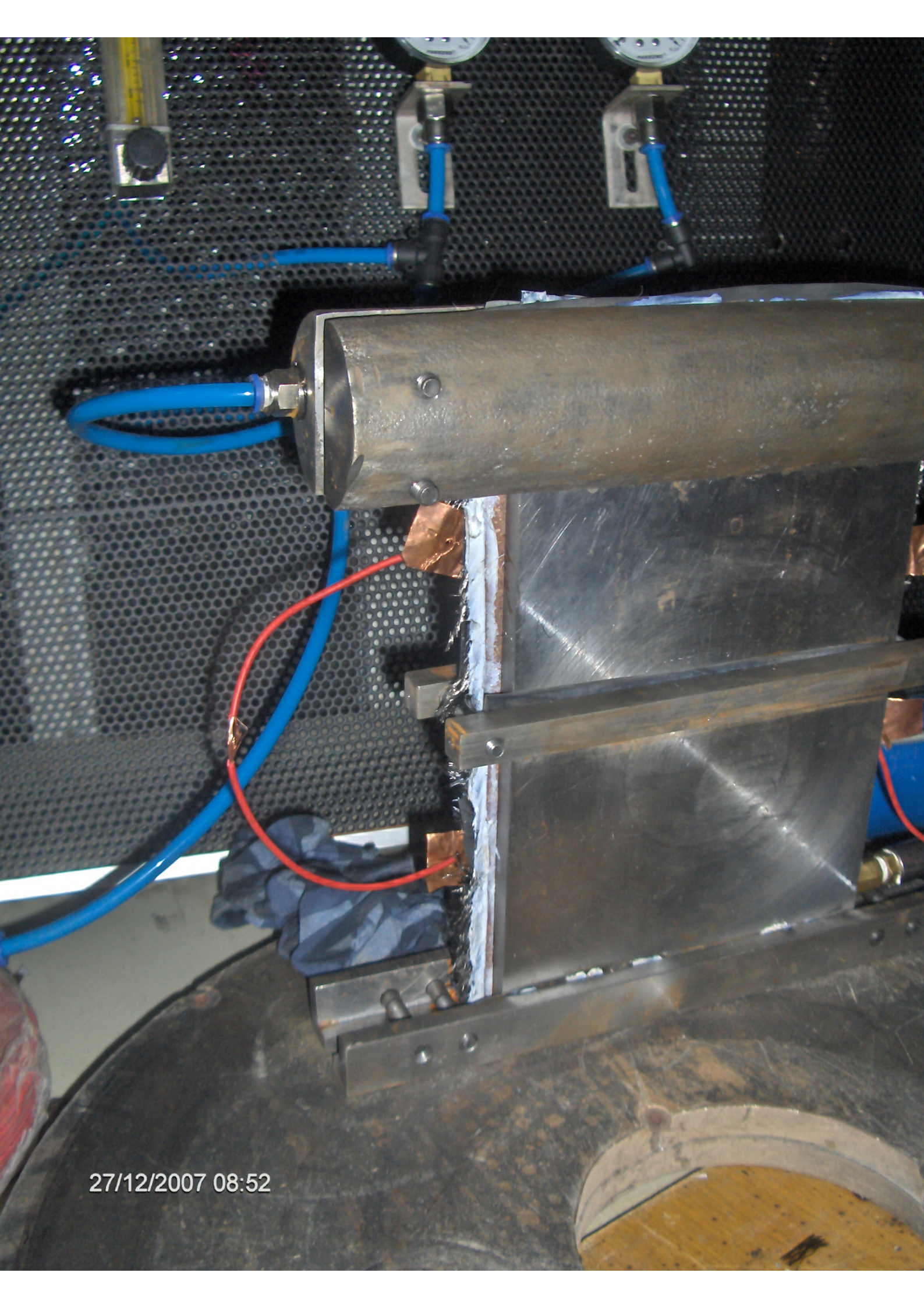
27/12/2007 08:50



27/12/2007 08:52



27/12/2007 08:52



27/12/2007 08:52

17/01/2008 06:07



17/01/2008 06:08



17/01/2008 06:09





17/01/2008 06:10

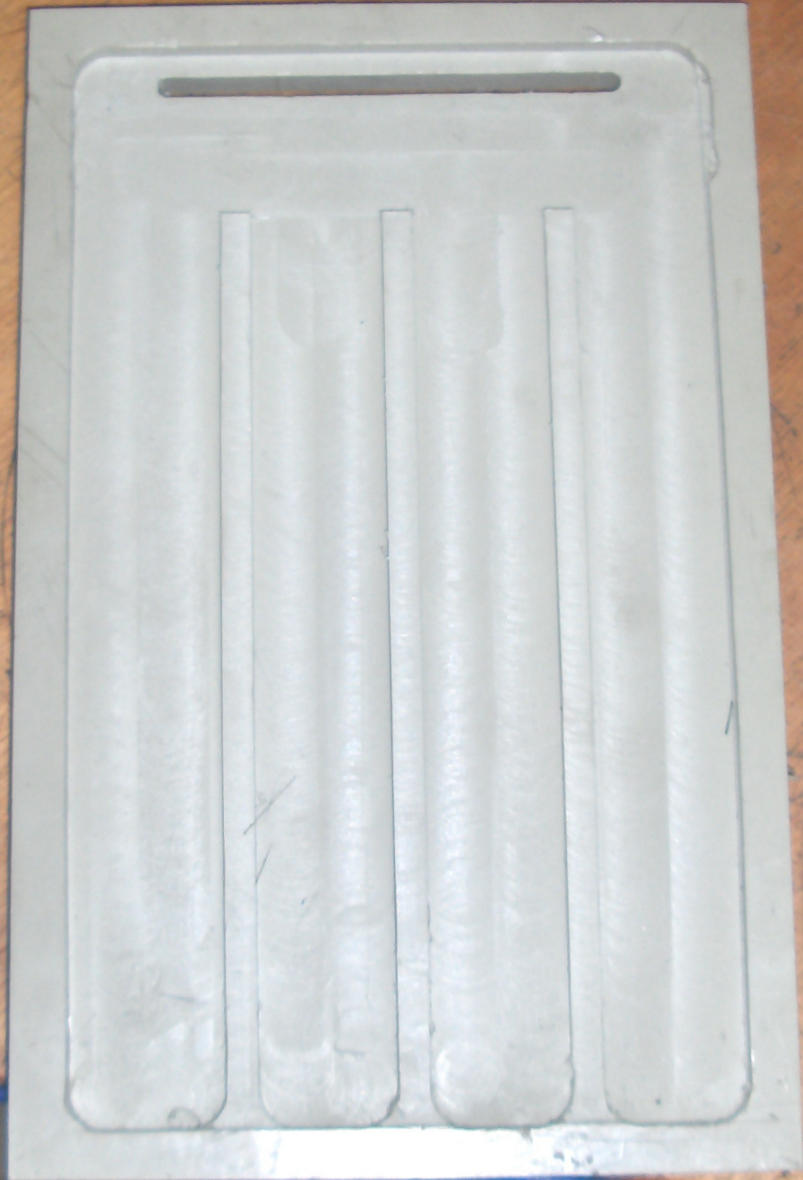


17/01/2008 06:10



17/01/2008 06:11

17/01/2008 06:36



17/01/2008 06:36



```
clear
clc

syms X1 X2 X3 X4 X5 X6 X7 X8 X9
X(1)=X1;
X(2)=X2;
X(3)=X3;
X(4)=X4;
X(5)=X5;
X(6)=X6;
X(7)=X7;
X(8)=X8;
X(9)=X9;

mf=input('mh2 degeri (lt/h)');
mox=input(' hava degeri (lt/h)');
P1=input('hidrojen basinci giriniz (MPa)');
P7=input('hava basinci giriniz (Mpa)');
L2=input('Ara Katman Kalinligini Giriniz (m)');
mh2=(mf*2*P1/(3600*22.4))*((8.99/100)/1.2)*(1+P1)
mox2=mox/4.3;
mo2=(mox2*32*P7/(3600*22.4))*(1+P7)

if mh2<=(2.655/1000)
    h1=120.155
elseif (2.655/1000)<mh2
    h1=(181.3427*(30320*mh2-155))/((mh2^0.25)-15.8247*(mh2^0.125))
end
if mo2<=(2.907/10000)
    h7=2.832
elseif (2.907/10000)<mo2
    h7=((5.467/100000)*(276900*mo2-35))/((mo2^0.25)-0.48957*(mo2^0.125))
end

N5=(((-135.2/1000000000)*(X(5)^3))+((145.89/1000000)*(X(5)^2))
+((-51.57/1000)*X(5))+10.171)*X(5);

G5=(0.07*mo2*((163.85/100000)*X(5)-285.96));

N6=(((-135.2/1000000000)*(X(6)^3))+((145.89/1000000)*(X(6)^2))
+((-51.57/1000)*X(6))+10.171)*X(6);

N7=(((-135.2/1000000000)*(X(7)^3))+((145.89/1000000)*(X(7)^2))
+((-51.57/1000)*X(7))+10.171)*X(7);

q1=(1387.9598-4.655*X(1))+((mh2/10000)*(298.15-X(1))/298.15)
+((50.4785/1000)*h1*(X(2)-X(1)))

q2=X(8)-P1+(0.21347*mh2*((22.6108/1000)+2*L2)^(2/3))*X(2)^(0.5))
```



```
q3=X(9)-P7+((53.4264/1000)*mo2*((22.6108/1000)+2*L2)^(2/3))*(X(6)^(0.5))
```

```
q4=((-50.4785/1000)*h1*(X(2)-X(1)))+((20.1914/1000)*(X(2)
-X(3))/(L2+(2.8/10000)))+(14.39*1000000)*(mh2^2)*L2
+(89.7395*L2*(298.15-X(2)))+(X(1)-X(2))/298.15)
```

```
q5=-((20.1914/1000)*(X(2)-X(3))/(L2+(2.8/10000))
+((25.127/1000)*(298.15-X(3)))+(40.9918*(X(3)-X(4)))+
((1.72887*1000000)*(mh2^2)*exp(1268/X(3)))-((1.1217*mh2)*((8.314*((222.33
/1000000000)*(X(3)^3)-(731.22/1000000)*(X(3)^2)+(820.19/1000)*X(3)-277.726)
/((1/298.15)-(1/X(3))))-(X(2)*(29.11-((0.1916/100)*X(2))-((0.4003/100000)
*(X(2)^2))-((0.8704/1000000000)*(X(2)^3)))))))+(1.1217*mh2*(203.29
+(8.314*X(3)*log(mh2/(5.6*X(8))))))
```

```
q6=((4.55877/1000)*(298.15-X(4)))+(15.4249*(X(4)-X(5)))+(62675.798*(mh2^2)
*exp(1268/X(4)))-(40.9918*(X(3)-X(4)))+(8.314*((222.33/1000000000)*(X(3)^3
-X(4)^3)-(731.22/1000000)*(X(3)^2-X(4)^2)+(820.19/1000)*(X(3)-X(4))
-277.726)/((1/298.15)-(X(3)-X(4))))
```

```
q7=-((15.4249*(X(4)-X(5)))+(4.55877/1000)*(298.15-X(5)))+(1.72887*1000000)
*(mh2^2)*exp(1265/X(5)))+(70.109/1000)*(N5-(8.314*((222.33/1000000000)
*(X(4)^3)-(731.22/1000000)*(X(4)^2)+(820.19/1000)*X(4)-420.174)
/((1/298.15)-(1/X(4)))+(254.29/1000000000)*(X(6)^3)-(836.35/1000000)
*(X(6)^2)+(937.9/1000)*X(6)-348.95)/((1/298.15)-(1/X(6)))))+G5))
```

```
q8=-((1.488/1000000)*(X(5)-X(6)))/((2.8/10000)+L2)*((22.6108/1000)+(2*L2)
^(1/3)))+(89.7395*L2*(298.15-X(6)))+(50.4785/1000)*h7*(X(7)-X(6))
+(14390000*(mh2^2)*L2)+(70.109/1000)*(-N5+N6)+(2.06*mo2*(X(7)-X(6)))
```

```
q9=(4.65624*(298.15-X(7)))+(26.08781/1000)*(mh2^2)-((50.4785/1000)*h7
*(X(7)-X(6)))+2.06*mo2*(298.15-X(7)))+(70.109/1000)*(N6-N7))
```

```
J=[diff(q1,X(1)), diff(q1,X(2)), diff(q1,X(3)), diff(q1,X(4))
, diff(q1,X(5)), diff(q1,X(6)), diff(q1,X(7)), diff(q1,X(8))
, diff(q1,X(9))];
```

```
diff(q2,X(1)), diff(q2,X(2)), diff(q2,X(3)), diff(q2,X(4)), diff(q2,X(5))
, diff(q2,X(6)), diff(q2,X(7)), diff(q2,X(8)), diff(q2,X(9));
```

```
diff(q3,X(1)), diff(q3,X(2)), diff(q3,X(3)), diff(q3,X(4)), diff(q3,X(5))
, diff(q3,X(6)), diff(q3,X(7)), diff(q3,X(8)), diff(q3,X(9));
```

```
diff(q4,X(1)), diff(q4,X(2)), diff(q4,X(3)), diff(q4,X(4)), diff(q4,X(5))
, diff(q4,X(6)), diff(q4,X(7)), diff(q4,X(8)), diff(q4,X(9));
```

```
diff(q5,X(1)), diff(q5,X(2)), diff(q5,X(3)), diff(q5,X(4)), diff(q5,X(5))
, diff(q5,X(6)), diff(q5,X(7)), diff(q5,X(8)), diff(q5,X(9));
```

```
diff(q6,X(1)), diff(q6,X(2)), diff(q6,X(3)), diff(q6,X(4)), diff(q6,X(5))
, diff(q6,X(6)), diff(q6,X(7)), diff(q6,X(8)), diff(q6,X(9));
```

```
diff(q7,X(1)), diff(q7,X(2)), diff(q7,X(3)), diff(q7,X(4)), diff(q7,X(5))
, diff(q7,X(6)), diff(q7,X(7)), diff(q7,X(8)), diff(q7,X(9));
```

```
diff(q8,X(1)), diff(q8,X(2)), diff(q8,X(3)), diff(q8,X(4)), diff(q8,X(5))
, diff(q8,X(6)), diff(q8,X(7)), diff(q8,X(8)), diff(q8,X(9));
```

```
diff(q9,X(1)), diff(q9,X(2)), diff(q9,X(3)), diff(q9,X(4)), diff(q9,X(5))
, diff(q9,X(6)), diff(q9,X(7)), diff(q9,X(8)), diff(q9,X(9))]
```

```
% NEWTON-RAPHSON METODU ILE LINEER OLMAYAN
% DENKLEM SISTEMLERININ COZUMU
% tol ; tolerans degeridir.
% max1; musade edilecek maksimum iterasyon sayisidir.
% k ; gerceklesen iterasyon sayisidir.
% X ; aranan kok degerini gosteren vektordur.
% hata; iterasyonun yakinsamasindaki hata miktaridir.
clc
clear
disp('NonLineer Denklem Sistemlerinin Cozumune Yonelik Program')
disp('Bu programin eklentisi durumunda olan fonkaal isimli dosyada
cozulecek denklem sistemi')
disp('fonkbb1 isimli dosyada da Jacobi Matrisi bulunmaktadir')
disp('Random olarak 9 bilinmeyenli 9 denklemden olusan bir
sistem cozulmektedir')
disp('Bu durum sozkonusu oldugunda Jacobi Matrisi de degistirilmelidir')

tol=0.00001; max1=20;
x0(1)=300; x0(2)=300; x0(3)=300; x0(4)=300; x0(5)=300; x0(6)=300;
x0(7)=300; x0(8)=0.12; x0(9)=0.1;
X=x0; % baslangic kosullari X vektorunun icine atiliyor
% asagidaki satirda verilen fonksiyonlarin
% ilk kosullardaki degerleri hesaplaniyor
Y=feval('fonkaal',X);
for k=1:max1
%asagidaki satirda X degerleri icin Jacobien matris hesaplaniyor
J=feval('fonkbb1',X);
% asagidaki satir (9.35) ve (9.36) esitliklerini hesaplamaktadir
Q=X-(J\Y)';
% asagidaki satir deltaX genligini hesaplamaktadir
hata=norm(Q-X);
hatatek=hata/(norm(Q)+eps);
if (hata<tol)|(hatatek<tol)
'gerceklesen iterasyon sayisi'
k
'aranan kok degerleri'
X
break
else
X=Q;
Z=feval('fonkaal',Q);
Y=Z;
end
end
if k==max1
'max1 degerindeki iterasyon sayisi asildigi icin iterasyon durdu'
end
disp('5-6-7 degerlerinden 353 K ise kontrol ediniz')

n=[X(1),X(2),X(3),X(4),X(5),X(6),X(7)];
plot(n)
```

```
function F= fonk10(X)
F(1)=1907597973487878263/1374389534720000
+6525719217367964846143/102443559944192000*X(1)
-8755587579777889/137438953472*X(2);
F(2)=X(8)-1/5+5457204489644449/75557863725914323419136*X(2)^(1/2);
F(3)=X(9)-1/10+3886456640806451/2361183241434822606848*X(6)^(1/2);

F(4)=10360293929269915731981367391/162633665484430180876288*X(2)
-52209565989436482667/819548479553536*X(1)
-18186796303217728125/27273799343355723776*X(3)
+3790525323603753992040601/4722366482869645213696;

F(5)=-18186796303217728125/27273799343355723776*X(2)
+9084028923760690612647/218190394746845790208*X(3)
+176900363060843490043333/23611832414348226068480
-2884541487581967/70368744177664*X(4)
+6494120538496567/1180591620717411303424*exp(1268/X(3))
-2362139661194225/1180591620717411303424
*(17458131950988196381/9444732965739290427392000*X(3)^3
-28036113716979660993/4611686018427387904000*X(3)^2+340952983/50000000*X(3)
-10155150808460617023/4398046511104000)/(20/5963-1/X(3))
+2362139661194225/1180591620717411303424*X(2)
*(2911/100-8835990411306875/4611686018427387904*X(2)
-4725908257731797/1180591620717411303424*X(2)^2
-8417992267140585/9671406556917033397649408*X(2)^3
+392776582863375733/23611832414348226068480*X(3)
*log(21058568790177635/66113130760175032991744/X(8)));

F(6)=7835238839634935857/5764607523034234880
+16259692686246385933/288230376151711744*X(4)
-8683446736528395/562949953421312*X(5)
+3766845970452025/18889465931478580854784*exp(1268/X(4))
-2884541487581967/70368744177664*X(3)
+(17458131950988196381/9444732965739290427392000*X(3)^3
-17458131950988196381/9444732965739290427392000*X(4)^3
-28036113716979660993/4611686018427387904000*X(3)^2
+28036113716979660993/4611686018427387904000*X(4)^2
+340952983/50000000*X(3)-340952983/50000000*X(4)
-10155150808460617023/4398046511104000)/(20/5963-X(3)+X(4));

F(7)=-8683446736528395/562949953421312*X(4)
+3024845334477688343945292086972036452648308740830211186987
/196159429230833773869868419475239575503198607639501078528*X(5)
+289020813760063851292147029053692708583
/212676479325586539664609129644855132160+6494120538496567
/1180591620717411303424*exp(1265/X(5))+5051885860405089/72057594037927936
*(-79807993560497/590295810358705651712*X(5)^3+1345597746456743
/9223372036854775808*X(5)^2-5157/100000*X(5)+10171/1000)*X(5)
-21000689521703954973/36028797018963968000*
(4199694960545633/18889465931478580854784*X(4)^3
-6744314100788949/9223372036854775808*X(4)^2+82019/100000*X(4)
-461986198689153/1099511627776)/(20/5963-1/X(4)+(600425286464461
```

```
/2361183241434822606848*X(6)^3-1928491800755873/2305843009213693952*X(6)^2  
+9379/10000*X(6)-6979/20)/(20/5963-1/X(6));
```

```
F(8)=-243988934948265/216239658504551168*X(5)  
-93811734736785162080478786981652745/7790854763710559572196132204314624  
*X(6)+3790525323603753992040601/4722366482869645213696+86240435752177906635  
/9223372036854775808*X(7)-5051885860405089/72057594037927936  
*(-79807993560497/590295810358705651712*X(5)^3+1345597746456743  
/9223372036854775808*X(5)^2-5157/100000*X(5)+10171/1000)*X(5)  
+5051885860405089/72057594037927936*(-79807993560497  
/590295810358705651712*X(6)^3+1345597746456743/9223372036854775808*X(6)^2  
-5157/100000*X(6)+10171/1000)*X(6);
```

```
F(9)=3470961646301814158606927987573222411  
/309485009821345068724781056000000-82623658345493413459/1759218604441600000  
*X(7)+5263510114672999/562949953421312*X(6)+5051885860405089  
/72057594037927936*(-79807993560497/590295810358705651712*X(6)^3  
+1345597746456743/9223372036854775808*X(6)^2-5157/100000*X(6)+10171/1000)  
*X(6)-5051885860405089/72057594037927936*(-79807993560497/  
590295810358705651712*X(7)^3+1345597746456743/9223372036854775808*X(7)^2  
-5157/100000*X(7)+10171/1000)*X(7);
```

```
function J= fonk11(X)
J=[6525719217367964846143/102443559944192000,
    -8755587579777889/137438953472, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
0, 5457204489644449/151115727451828646838272/X(2)^(1/2),
0, 0, 0, 0, 0, 1, 0;
0, 0, 0, 0, 0, 3886456640806451/4722366482869645213696/X(6)^(1/2), 0, 0, 1;
-52209565989436482667/819548479553536,
10360293929269915731981367391/162633665484430180876288,
-18186796303217728125/27273799343355723776, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
0, -2383571554065946922941837/3574831427532321426767872
-20871843396479842517105452796875/5444517870735015415413993718908291383296
*X(2)-11163255330753577125858775272325
/1393796574908163946345982392040522594123776*X(2)^2
-19884473401839067439327065121625
/11417981541647679048466287755595961091061972992*X(2)^3+2362139661194225
/1180591620717411303424*X(2)*(-8835990411306875/4611686018427387904
-4725908257731797/590295810358705651712*X(2)
-25253976801421755/9671406556917033397649408*X(2)^2),
9084028923760690612647/218190394746845790208-2058636210703411739
/295147905179352825856/X(3)^2*exp(1268/X(3))-2362139661194225
/1180591620717411303424*(52374395852964589143/9444732965739290427392000
*X(3)^2-28036113716979660993/2305843009213693952000*X(3)+340952983
/50000000)/(20/5963-1/X(3))+2362139661194225/1180591620717411303424
*(17458131950988196381/9444732965739290427392000*X(3)^3
-28036113716979660993/4611686018427387904000*X(3)^2+340952983/50000000*X(3)
-10155150808460617023/4398046511104000)/(20/5963-1/X(3))^2/X(3)^2
+392776582863375733/23611832414348226068480
*log(21058568790177635/66113130760175032991744/X(8)),
-2884541487581967/70368744177664, 0, 0, 0,
-392776582863375733/23611832414348226068480*X(3)/X(8), 0;
0, 0, -2884541487581967/70368744177664+(52374395852964589143
/9444732965739290427392000*X(3)^2-28036113716979660993
/2305843009213693952000*X(3)+340952983/50000000)/(20/5963-X(3)
+X(4))+17458131950988196381/9444732965739290427392000*X(3)^3
-17458131950988196381/9444732965739290427392000*X(4)^3-28036113716979660993
/4611686018427387904000*X(3)^2+28036113716979660993/4611686018427387904000
*X(4)^2+340952983/50000000*X(3)-340952983/50000000*X(4)
-10155150808460617023/4398046511104000)/(20/5963-X(3)+X(4))^2,
16259692686246385933/288230376151711744-1194090172633291925
/4722366482869645213696/X(4)^2*exp(1268/X(4))+(-52374395852964589143
/9444732965739290427392000*X(4)^2+28036113716979660993
/2305843009213693952000*X(4)-340952983/50000000)/(20/5963-X(3)+X(4))
-(17458131950988196381/9444732965739290427392000*X(3)^3
-17458131950988196381/9444732965739290427392000*X(4)^3-28036113716979660993
/4611686018427387904000*X(3)^2+28036113716979660993/4611686018427387904000
*X(4)^2+340952983/50000000*X(3)-340952983/50000000*X(4)
-10155150808460617023/4398046511104000)/(20/5963-X(3)+X(4))^2,
-8683446736528395/562949953421312, 0, 0, 0;
0, 0, 0, -8683446736528395/562949953421312-21000689521703954973
/36028797018963968000*(12599084881636899/18889465931478580854784*X(4)^2
-6744314100788949/4611686018427387904*X(4)+82019/100000)/(20/5963-1/X(4)
+(600425286464461/2361183241434822606848*X(6))^3
```

```
-1928491800755873/2305843009213693952*x(6)^2+9379/10000*x(6)-6979/20)
/(20/5963-1/x(6)))+21000689521703954973/36028797018963968000
*(4199694960545633/18889465931478580854784*x(4)^3-6744314100788949
/9223372036854775808*x(4)^2+82019/100000*x(4)-461986198689153
/1099511627776)/(20/5963-1/x(4)+(600425286464461/2361183241434822606848
*x(6)^3-1928491800755873/2305843009213693952*x(6)^2+9379/10000*x(6)
-6979/20)/(20/5963-1/x(6)))^2/x(4)^2,
395590304162578511229800439164515004751519371513525549642239
/24519928653854221733733552434404946937899825954937634816000
-8215062481198157255/1180591620717411303424/x(5)^2*exp(1265/x(5))
+5051885860405089/72057594037927936*(-239423980681491/590295810358705651712
*x(5)^2+1345597746456743/4611686018427387904*x(5)-5157/100000)*x(5)
-403180874215575189175848169233/42535295865117307932921825928971026432
*x(5)^3+6797806229117771908868395565127
/664613997892457936451903530140172288*x(5)^2-26052575382109043973
/7205759403792793600000*x(5),
21000689521703954973/36028797018963968000*(4199694960545633
/18889465931478580854784*x(4)^3-6744314100788949/9223372036854775808*x(4)^2
+82019/100000*x(4)-461986198689153/1099511627776)/(20/5963-1/x(4)
+(600425286464461/2361183241434822606848*x(6)^3-1928491800755873
/2305843009213693952*x(6)^2+9379/10000*x(6)-6979/20)/(20/5963-1/x(6)))^2
*((1801275859393383/2361183241434822606848*x(6)^2-1928491800755873
/1152921504606846976*x(6)+9379/10000)/(20/5963-1/x(6))-(600425286464461
/2361183241434822606848*x(6)^3-1928491800755873/2305843009213693952*x(6)^2
+9379/10000*x(6)-6979/20)/(20/5963-1/x(6))^2/x(6)^2),
0, 0, 0;
0, 0, 0, 0,
-43470958901293093139795740457635257/60866052841488746657782282846208000
-5051885860405089/72057594037927936*(-239423980681491/590295810358705651712
*x(5)^2+1345597746456743/4611686018427387904*x(5)-5157/100000)*x(5)
+403180874215575189175848169233/42535295865117307932921825928971026432
*x(5)^3-6797806229117771908868395565127
/664613997892457936451903530140172288*x(5)^2+26052575382109043973
/7205759403792793600000*x(5),
-11032030328153971300265856272773869013
/973856845463819946524516525539328000+5051885860405089/72057594037927936
*(-239423980681491/590295810358705651712*x(6)^2+1345597746456743
/4611686018427387904*x(6)-5157/100000)*x(6)-403180874215575189175848169233
/42535295865117307932921825928971026432*x(6)^3
+6797806229117771908868395565127/664613997892457936451903530140172288
*x(6)^2-26052575382109043973/7205759403792793600000*x(6),
86240435752177906635/9223372036854775808, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0,
725112025764324032219/72057594037927936000+5051885860405089
/72057594037927936*(-239423980681491/590295810358705651712*x(6)^2
+1345597746456743/4611686018427387904*x(6)-5157/100000)*x(6)
-403180874215575189175848169233/42535295865117307932921825928971026432
*x(6)^3+6797806229117771908868395565127
/664613997892457936451903530140172288*x(6)^2-26052575382109043973
/7205759403792793600000*x(6),
-85891194422939759387491/1801439850948198400000-5051885860405089
/72057594037927936*(-239423980681491/590295810358705651712*x(7)^2
```

```
+1345597746456743/4611686018427387904*x(7)-5157/100000)*x(7)
+403180874215575189175848169233/42535295865117307932921825928971026432
*x(7)^3-6797806229117771908868395565127
/664613997892457936451903530140172288*x(7)^2+26052575382109043973
/7205759403792793600000*x(7), 0, 0] ;
```

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi: 16.08.1982

Doğum Yeri: İstanbul

Ortaokul ve Lise: 1992-2000 Vefa Anadolu Lisesi

Lisans: 2000-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi
Makine Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurumlar

Klima Teknikeri 2000-2005 Also Klima
Proje Mühendisi 2005-2006 Also Klima
İletişim Yöneticisi 2006-Devam Ediyor Alarge Alıç Ağacı Ltd. Şti.