



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATI OKSİT YAKIT PİLİ İÇİN STAK GELİŞTİRİLMESİ

MURAT CANAVAR

Temmuz 2013



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATI OKSİT YAKIT PİLİ İÇİN STAK GELİŞTİRİLMESİ

MURAT CANAVAR

Yüksek Lisans Tezi

Danışman  
Doç. Dr. Yüksel KAPLAN

Temmuz 2013

Murat CANAVAR tarafından Doç. Dr. Yüksel KAPLAN danışmanlığında hazırlanan “Katı Oksit Yakıt Pili İçin Stak Geliştirilmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mahmut D. MAT, Melikşah Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Tankut YALÇINÖZ, Melikşah Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Yüksel KAPLAN, Niğde Üniversitesi

**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../....../2013 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun ....../....../2013 tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

....../....../2013

**Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA**

**MÜDÜR**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Murat CANAVAR

## ÖZET

### KATI OKSİT YAKIT PİLİ İÇİN STAK GELİŞTİRİLMESİ

CANAVAR, Murat

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman

:Doç. Dr. Yüksel KAPLAN

Temmuz 2013, 46 sayfa

Bu tezde, interkonektör geometrisinin ve elek yapısının Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) tekli stak performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel olarak gaz debileri, çalışma sıcaklıkları, test süreleri ve sıkıştırma basınçları sabit tutularak aynı şartlar altında yapılmıştır. Öncelikle kanallı interkonektörler üzerinde en iyi akım toplayıcı elek tespit edilmiştir. Daha sonra kanalsız interkonektörler üzerinde aynı eleklerin reaksiyon gazlarını dağıtma özellikleri araştırılmıştır ve en iyi akış dağıtıcı eleğin akım toplama özelliği iyileştirilmiştir. Çalışmaların neticesinde çoklu stak konfigürasyonu belirlenmiş ve stak imal edilmiştir.

*Anahtar sözcükler:* İnterkonektör geometrisi, elek yapısı, Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) tekli veya çoklu stağı, akım toplama, gaz dağıtma.

## **SUMMARY**

### **DEVELOPMENT OF A STACK FOR SOLID OXIDE FUEL CELL**

CANAVAR, Murat

Nigde University

Graduate School of Naturel and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor

: Assoc. Prof. Yuksel KAPLAN

July 2013, 46 pages

In this study, the effects of interconnector geometry and mesh structure on single solid oxide fuel cell (SOFC) single stack performance have been investigated. Experiments were performed having air and fuel mass flow rates, working temperatures, test durations, and stack compression pressures fixed for operating conditions. Primarily, optimum current collecting mesh type was determined on channeled collectors. Then, the reactant gas distribution properties of the same mesh types on unchanneled collectors were investigated. Furthermore, the current collecting property of the optimum gas distributor mesh has been improved. Eventually, multiple stack configuration was optimized and produced.

*Keywords:* Interconnector geometry, mesh structure, Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) single or multiple stack, current collecting, gas distribution.

## ÖN SÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Doç. Dr. Yüksel KAPLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tez çalışmam esnasında tecrübelerine başvurduğum Prof. Dr. Mahmut Dursun MAT, Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk SELAMET ve Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve ayrıca çalışmalarımı yapabilmem için gerekli şartları sağlayan Doç. Dr. İlyas UYGUR nezdinde tüm Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi öğretim üyelerine müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim. Bu tezin hazırlanması esnasında yaptıkları katkılardan dolayı mesai arkadaşlarım Selahattin ÇELİK, Tuğrul Yavuz ERTUĞRUL ve Abdullah MAT'a, ayrıca laboratuvar alt yapısının kurulmasına katkılarından dolayı Vestel Savunma A.Ş. Genel Müdür Yardımcısı İbrahim PAMUK, laboratuvar çalışmalarındaki desteklerinden dolayı Çiğdem TİMURKUTLUK ve Bora TİMURKUTLUK'a teşekkür etmek isterim.

Bu tezi, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi destek veren babam Cevdet CANAVAR, annem Fatma CANAVAR, abim Kamuran CANAVAR ve ablam Emine GÜRKOL'a ithaf ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
ÖN SÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xii
BÖLÜM I GİRİŞ .....	1
1.1 Genel Bilgiler .....	1
1.2 Yakıt Pilleri .....	2
1.2.1 Temel çalışma prensipleri .....	2
1.2.2 Verimleri .....	4
1.2.3 Elektrokimyasal Empedans Ölçümleri .....	5
1.2.4 Yakıt Pili Çeşitleri .....	7
1.2.5 Reaksiyon gazlarının dağıtımı .....	9
1.3 Stak Mühendisliği .....	10
1.4 Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) .....	10
1.4.1 Katot .....	10
1.4.2 Anot .....	11
1.4.3 Elektrolit .....	12
1.4.4 İnterkonektörler .....	13
1.4.5 Akış yönleri .....	14
1.5 Literatür Özeti .....	14
1.6 Amaç .....	19
1.7 Tezin Başlıkları .....	20
BÖLÜM II MATERYAL VE METOT .....	21
2.1 Deneysel Çalışma .....	22
2.2 Deneysel parametreler .....	29
2.3 Yapılan Değişiklikler ve Gerekçeleri .....	31
2.4 Araştırmanın Ölçme Değerlendirme Yöntemleri .....	31

BÖLÜM III BULGULAR ve TARTIŞMA .....	33
3.1 Kanallı Tasarımda Elek Performansları.....	33
3.2 Kanalsız Tasarımda Elek Performansları .....	36
3.3 Kanallı ve Kanalsız Tasarımda Elek Karşılaştırmaları.....	38
3.4 Çoklu Stak Performansı .....	39
BÖLÜM IV SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	41
4.1 Sonuçlar .....	41
4.2 Öneriler .....	42
KAYNAKLAR .....	43
ÖZGEÇMİŞ .....	46

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Eşdeğer devre modelinde sık kullanılan devre elemanları .....	6
Çizelge 1.2. Yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları.....	8
Çizelge 2.1. KOYP tekli stak eşleşmeleri.....	32

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Katı oksit yakıt pili membran elektrot grubu.....	3
Şekil 1.2. Randles Hücresinin devre elemanları .....	6
Şekil 1.3. Yakıt pillerinde dış (a) ve iç (b) dağıtım görünümü.....	9
Şekil 1.4. Çoklu stak görünümü.....	10
Şekil 1.5. paralel akış (a), karşıt akış (b), çapraz akış (c) .....	14
Şekil 2.1. Empedans ölçümlerinde kullanılan eşdeğer devre modeli .....	22
Şekil 2.2. Deney düzeneği .....	23
Şekil 2.3. Tekli stak için sıcaklık zaman grafiği.....	29
Şekil 2.4. Çoklu stak için sıcaklık zaman grafiği .....	30
Şekil 3.1. Deney 1-2-3-4-5 Akım-Voltaj ve Akım-Güç eğrileri.....	34
Şekil 3.2. Deney 1-2-3-4-5 empedans eğrileri .....	35
Şekil 3.3. Deney 6-7-8-9 Akım-Voltaj ve Akım-Güç eğrileri.....	36
Şekil 3.4. Deney 6-7-8-9 empedans eğrileri .....	37
Şekil 3.6. Çoklu stak Akım-Voltaj ve Akım-Güç eğrileri .....	40

## **FOTOĞRAFLAR DİZİNİ**

Fotoğraf 2.1. Deneylerde kullanılan cihazların görünümü .....	21
Fotoğraf 2.2. Deneylerde kullanılan interkonektörler kanalsız (a) ve düz kanallı (b)....	25
Fotoğraf 2.3. Deneylerde kullanılan elekler GNE (a), İÖNE (b) ve KÖNE (c) .....	26
Fotoğraf 2.4. MEG görünümü anot (a) ve katot (b).....	26
Fotoğraf 2.5. Çoklu stak görünümü .....	28
Fotoğraf 3.1. Kaynak bölgelerinin oluşturduğu deformasyonların görünümü .....	38

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\Delta H$	Entalpi değişimi
$\Delta G$	Gibbs serbest enerjisi değişimi
$\Delta S$	İzotermal entropi değişimi
$\Delta U_0$	Hücre voltajı
$\varepsilon_{r,cell}$	Yakıt pili verimi
$F$	Faraday sabiti
$n$	Reaksiyondaki elektron sayısı
Ni	Nikel
$T$	Sıcaklık

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
AC	Alternatif Akım
ADV	Açık Devre Voltajı
AÖD	Alan Özel Dirençleri
AYP	Alkali Yakıt Pili
CeO <sub>2</sub>	Seryum Oksit
CrFe	Krom Demir
CrO <sub>3</sub>	Krom Oksit
DC	Doğru Akım
DMYP	Direk Metanol Yakıt Pili
EKYP	Erimiş Karbonat Yakıt Pili
FAYP	Fosforik Asit Yakıt Pili
GNE	Gözenekli Nikel Elek
I-P	Akım-Güç
I-V	Akım-Voltaj
İM	İnterkonektör Malzemeleri
KE	Krofer Elek
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
LaCrO <sub>3</sub>	Lantanyum Krom Oksit

LSM	LaSrMnO <sub>3</sub> , Stronsiyum Ekli Lantanyum Manganat
MEG	Membran Elektrot Grup
Mİ	Metalik İnterkonektör
NiO	Nikel Oksit
ÖNE	Örgü Nikel Elek
PEYP	Polimer Elektrotlu Yakıt Pili
SiO <sub>2</sub>	Silisyum Oksit
SWPC	Siemens Westinghouse Güç Şirketi
V-P	Voltaj-Güç
YSZ	Yitra Ekli Zirkonyum
ZrO <sub>2</sub>	Zirkonyum Oksit

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

### 1.1 Genel Bilgiler

Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) yakıtın kimyasal enerjisini direk olarak elektrik ve ısı enerjisine çeviren sistemlerdir. KOYP'un yüksek enerji dönüşüm verimi, hareketli parçalarının olmaması, sessiz çalışmaları, modüler yapıları, PEM yakıt pillerinde olduğu gibi platinyum ve benzeri pahalı katalizörler kullanılmaması sebebi ile son yıllarda büyük ilgi çekmektedir. KOYP'un en önemli avantajlarından biri de saf hidrojene ihtiyaç duymaması ve çalışma sıcaklığının yüksek olması nedeni ile doğal gaz, LPG, metanol, etanol, dizel, benzin vb. birçok yakıtı doğrudan kullanabilmesidir. Fosil kökenli bu yakıtların ayrıştırılması ile ortaya çıkan karbon monoksit düşük sıcaklık yakıt pillerinde, örneğin PEM yakıt pillerinde zehirleyici etkiye neden olmaktadır ve yakıt pilini kısa zamanda çalışamaz hale getirebilmektedir. KOYP'un en temel alt elemanını hücre oluşturmaktadır. Hücre, membran elektrot gurubu ve anot tarafına yakıtın, katot tarafına havanın iyi bir şekilde dağılmasını, aynı zamanda üretilen elektriğin alınmasını sağlayan elektrik iletken malzemeden yapılan interkonektor tabakalarından oluşmaktadır. İnterkonektörün üzerinde yakıt veya havanın anot veya katot yüzeyine etkin bir şekilde dağılması için akış kanalları açılması veya örgü nikel elek kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle katı oksit yakıt pilinde interkonektörler ya elektrik iletken özel seramiklerden ya da metallere yapılmaktadır. Metaller kolay işlenebilmeleri ve yüksek mukavemetleri nedeniyle tercih edilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda (800 °C ve üzeri) çok özel ve bu nedenle pahalı alaşımlar (Crofer, Inconel, Haynes vb.) kullanılmaktadır. Fakat çalışma sıcaklığının 550-650 °C aralığına çekilebilmesi durumunda ucuz paslanmaz çelikler kullanılabilir.

Bir KOYP hücresi en fazla 1 Volt civarında voltaj üretmektedir. Fakat hücre ürettiği en yüksek voltajda (açık devre voltajı) akım üretmemektedir. Hücreden çekilen akım arttıkça voltaj düşmekte ve 0,5-0,6 Volt aralığında hücreden en fazla güç üretilmektedir. Ayrıca bir hücrenin ürettiği güç sınırlı olmaktadır. Yakıt pilinde, istenilen güç değerine ulaşmak için hücreler seri bağlanarak birçok hücre bir araya getirilerek stak oluşturulmaktadır. KOYP'un yüksek sıcaklıklarda çalışması nedeniyle

stak oluşturma durumunda birçok sorunla karşılaşılmaktadır ve en önemli olarak da sızdırmazlık problemi ortaya çıkmaktadır. Özellikle organik temelli sızdırmazlık malzemelerinin 300°C üzerinde kullanılması özel sızdırmazlık ve özel hücre dizaynı gerektirmektedir. Ayrıca Stak dizaynında basınç düşümü, yakıtın ve havanın etkin dağılımlı, sıcaklık gradyenti ve buna bağlı olarak gerilmeler önemli dizayn parametreleri olarak ön plana çıkmaktadır.

## 1.2 Yakıt Pilleri

### 1.2.1 Temel alışma prensipleri

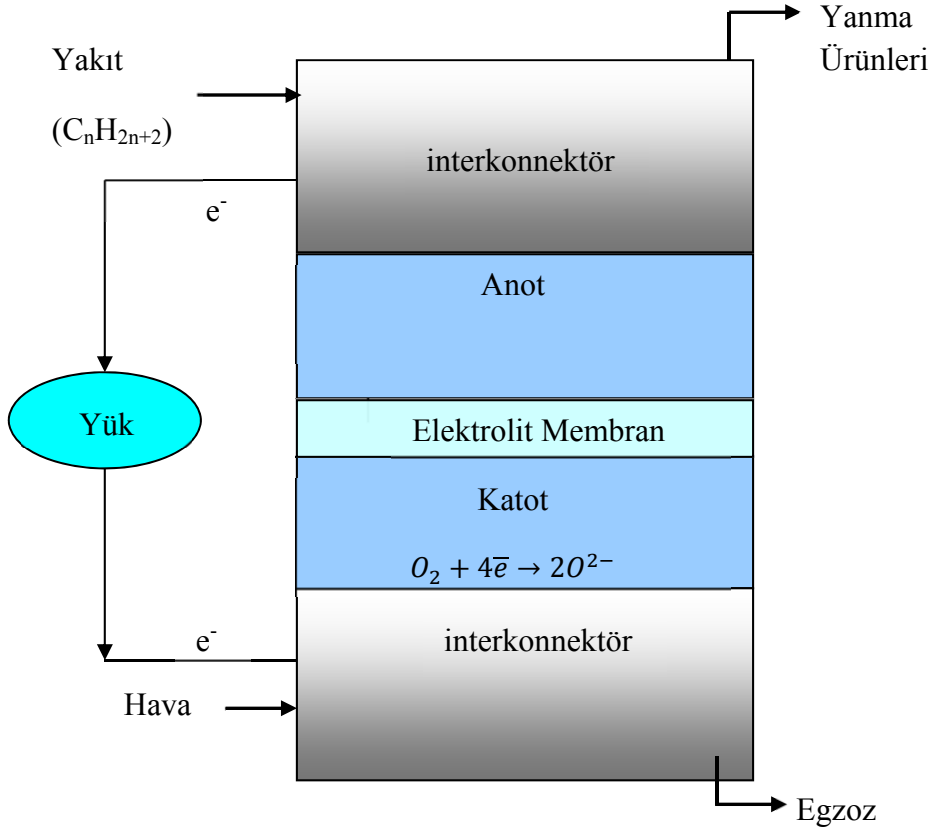
Yakıt Pilleri temel olarak membran (elektrolit) ve elektrotlardan oluşan, elektrokimyasal olarak enerji dönüşümü yapan sistemlerdir.

Yakıt pilleri, yakıtın ve oksijenin elektrokimyasal olarak sırasıyla ykseltendiği ve indirgendendiği, reaksiyonların sonucunda oluşan elektronların hareketiyle elektrik akımının elde edildiği galvanik hücrelerdir. Kimyasal tepkimenin Gibbs serbest enerji değişimi hücre voltajına bağlıdır (Atkins, 1994).

$$\Delta G = -nF\Delta U_0 \quad (1.1)$$

Burada n reaksiyondaki elektron sayısıdır, F Faraday sabitidir,  $\Delta U_0$  hücre voltajıdır. Yakıt pillerindeki anot reaksiyonu, hidrojenin ya da metanolün direk yükseltgenmesidir. Yakıt pillerindeki katot reaksiyonu, genellikle havadan sağlanan oksijenin indirgenmesidir.

şekil 1.1'de katı oksit yakıt pilinin temel elemanları ve çalışma prensibi verilmiştir. Bir KOYP hücresi elektrolit membranla ayrılmış iki elektrottan oluşmaktadır. şekilden de görüldüğü gibi katı oksit yakıt pillerinde karbon monoksidin oksitlenmesi sırasında iki elektron açığa çıkmakta dolayısıyla sistem verimi artmaktadır. Böylece hem düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde zehirleyici etki yapan CO gazı yakıt olarak kullanılmış hem de bu gazın çevreye atılması nlenmiş olmaktadır.



Şekil 1.1. Katı oksit yakıt pili membran elektrot grubu

Katot bölgesinde havadan veya direk olarak sağlanan oksijen, oksijen iyonuna indirgenmektedir.



Elektrolit, iyonların iki elektrot arasında geçişine izin vermektedir.

Anot bölgesinde ise hidrojen ve karbon monoksit, katottan gelen  $O^{2-}$  iyonu ile oksitlenmektedir.



### 1.2.2 Verimleri

Yakıt pillerini, içten yanmalı motorlarla kıyaslamak için sistem verimlerinin değerlendirilmesi gerekir. Bir içten yanmalı motor kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye çevirir, dönen jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisi elde edilir. Yakıt pili sistemleri Carnot verimi ile sınırlı olmayıp, üretilen ısıdan da faydalanılmasıyla enerji dönüşüm verimleri %50-85 değerlerine kadar çıkabilmektedir.

Yakıt pilleri oksijen ve hidrojenin reaksiyona girmesiyle kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal sistemlerdir. Yakıt pili elemanları hareketsiz, titreşimsiz ve sessiz çalıştıkları için içten yanmalı motorlara göre uzun ömürlüdür ve verimleri yüksektir.

#### Yakıt kullanım verimi

Reaksiyona giren yakıtların kullanımının ölçüsüdür. Faraday verimi galvanik reaksiyonlarda reaksiyona giren yakıtların oransal ifadesidir ve yakıt kullanım verimi olarak bilinmektedir. Yakıt kullanım verimi, teorik yakıt miktarının kullanılan yakıt miktarına oranı olarak tanımlanır (Mench, 2007).

$$\varepsilon_{\mu_f} = \frac{\text{Teorik olarak gerekli yakıt miktarı}}{\text{Reel olarak kullanılan yakıt miktarı}} \quad (1.5)$$

#### Termodinamik verim

Yakıt pillerinde tersinir voltaj, elektriksel işi tarif ederken kullanılır. Elektriksel iş yüklü parçacığın belli bir mesafe hareket ettirilmesidir.

$$E^o = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (1.6)$$

Burada  $n$  eşdeğer elektron sayısıdır,  $F$  Faraday sabitidir.  $nF$  kimyasal reaksiyona bağlıdır ve değişmez. Dolayısıyla tersinir voltaj Gibbs serbest enerjisine bağlı olarak değişir.

Termal voltaj, ısı transferinin olmadığı tersinir ve adyabatik sistemlerde ulaşılabilecek en yüksek voltajdır.

$$E^{oo} = \frac{-\Delta H}{nF} \quad (1.7)$$

Burada  $\Delta H$  entropi değişimini ifade etmektedir.

Teorik voltajın termal voltaja oranı maksimum termal verimi ifade eder.

$$\eta_{t,max} = \frac{\text{maksimum elektriksel iş}}{\text{maksimum kullanılabilir iş}} = \frac{E^o}{E^{oo}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (1.8)$$

Yakıt pili verimleri, Gibbs serbest enerjisi ( $\Delta G$ ) ve elektrokimyasal reaksiyonun entalpi değişimine ( $\Delta H$ ) bağlı olarak hesaplanır. Teorik olarak serbest enerjinin tamamen elektrik enerjisine dönüştüğü kabulü yapılır. Burada  $\Delta S$  reaksiyonun izotermal entropi değişimi,  $T\Delta S$  ise dış ortamlarla olan tersinir enerji değişimidir.  $\Delta S$  reaksiyona giren ve çıkan ürünlere bağlıdır (Carrette vd., 2001).

### 1.2.3 Elektrokimyasal Empedans Ölçümleri

Yakıt pillerinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar kompleks bir yapıya sahiptir; elektrokimyasal çift tabaka kapasitif etki gösterir, difüzyon gibi elektrot üzerinde meydana gelen işlemler zamana ve/veya frekansa bağlı olarak gerçekleşir. Bu sebeple elektrokimyasal reaksiyonlarda direnç yerine empedans terimi kullanılır.  $Z(\omega)$  olarak gösterilen empedans, uygulanan bir AC sinyale karşı sistemin verdiği cevaptır, voltaj ve akıma bağlıdır:

$$Z(\omega) = \frac{V(t)}{I(t)} \quad (1.9)$$

Kartezyen koordinatlarda empedans, reel ve sanal kısımlarının toplamı olarak ifade edilir:

$$Z(\omega) = Z_{re} + iZ_{im} \quad (1.10)$$

### Eşdeğer devre modeli

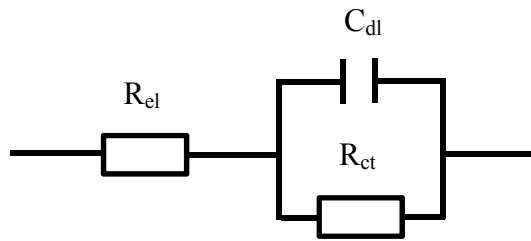
Elektrokimyasal empedans ölçümleri genellikle eşdeğer elektrik devre modeli ile çizdirilir. Bir eşdeğer devre başlıca; direnç, kapasitör, indüktör, Warburg difüzyon elemanı ve sabit faz elemanından oluşmaktadır. Modelde her bir devre elemanı bileşeni, hücrede meydana gelen olayları temsil etmektedir. Sık kullanılan devre elemanları Çizelge 1.1 ile gösterilmiştir (Yuan vd., 2010).

**Çizelge 1.1.** Eşdeğer devre modelinde sık kullanılan devre elemanları

Devre elemanı	Adı
R	Direnç
C	Kapasitör
L	İndüktör
W	Sınırsız Warburg
BW	Sınırlandırılmış Warburg
CPE	Sabit faz elemanı
BCPE	Sınırlandırılmış faz elemanı

### Randles Hücresi

Elektrokimyasal ara yüz için en basit olan ve en çok kullanılan model Randles Hücresidir. Şekil 1.2 bu modelde bulunan elemanları göstermektedir.



**Şekil 1.2.** Randles Hücresinin devre elemanları

Devrede kullanılan  $R_{el}$  elektrolit direncini,  $C_{dl}$  çift tabakanın kapasitif etkisini,  $R_{ct}$  elektrotun yük transfer direncini göstermektedir. Bu basit devre KOYP gibi kompleks elektrokimyasal reaksiyonların olduğu sistemlerde ihtiyacı karşılayamadığından, devre elemanları değiştirilerek kullanılır. Yüzey pürüzlülüğü ve gözenekli yapıdan dolayı çift tabaka tam bir kapasitör gibi davranmaz. Bu yüzden  $C_{dl}$  yerine sabit faz elemanı (CPE)

devrede kullanılır.  $Z_{re}$  değerlerine karşılık  $Z_{im}$  değerlerinin çizdirildiği Nyquist diyagramında,  $C_{dl}$  elemanı tam bir yarım daire olarak çizdirilirken, CPE elemanı basık bir yarım daire olarak çizdirilir.

Yakıt pillerinde; ohmik polarizasyon, aktivasyon polarizasyonu ve konsantrasyon polarizasyonu kayıpları meydana gelmektedir. Ohmik polarizasyon; elektrolitin iyonik direncine, elektrotun elektronik direncine, kontak direncine, akım toplayıcılara ve interkonektörlere bağlıdır. Aktivasyon polarizasyonu; elektro-katalist malzeme, mikroyapı, reaktant aktivitesi ve akım yoğunluğuna bağlıdır. Kütle transferi kayıpları ise; reaktantların hızına ve aktivitesine, akım yoğunluğuna, elektrot yapısına bağlıdır (DOE, 2004). Elektrottan yük transferi gazların difüzyonundan etkilenir (Yuan vd., 2010). Elektrokimyasal empedans ölçümleri, ohmik direnç ve polarizasyon direncinde meydana gelen toplam kayıpların; kimyasal, elektrokimyasal ve transfer işlemlerinden dolayı olduğunu gösterir (Singhal ve Kendall, 2003). Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pili hücrelerinin toplam polarizasyonunda ohmik kayıplar hücre performansının etkileyen temel kriterdir (DOE, 2004).

$$\eta_{ohm} = iR \quad (1.11)$$

Burada  $i$  akım,  $R$  hücrenin toplam direncidir:

$$R = R_{elektronik} + R_{iyonik} + R_{kontak} \quad (1.12)$$

#### 1.2.4 Yakıt Pili Çeşitleri

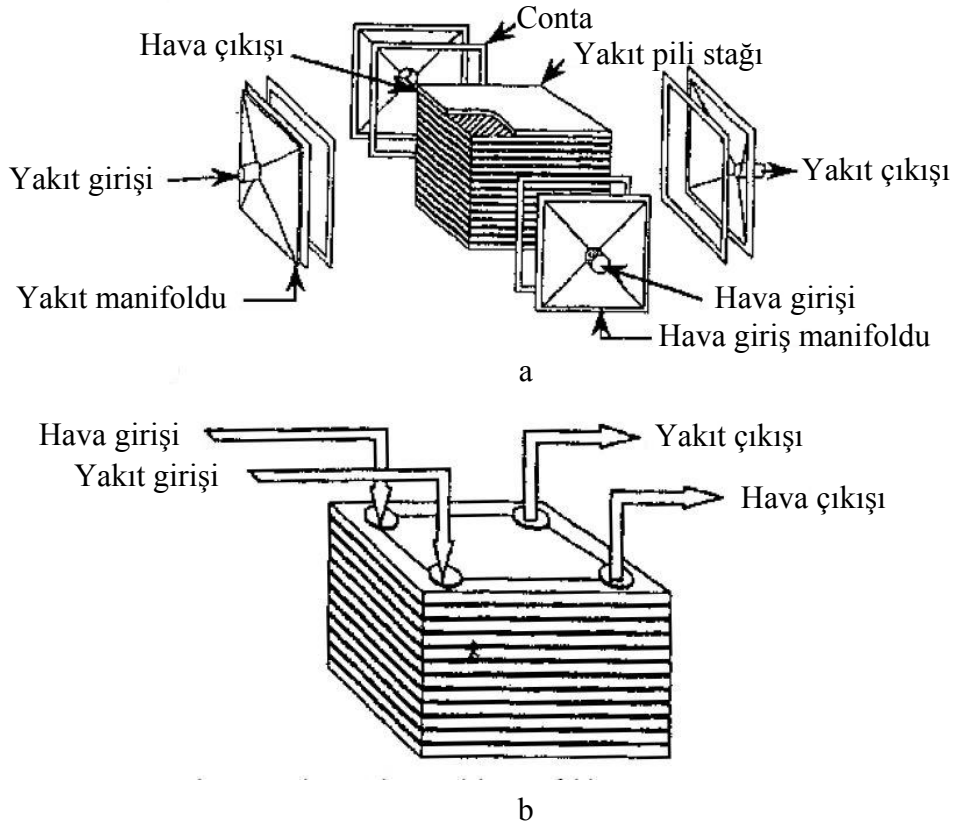
Yakıt pilleri genellikle elektrolit işlevine göre sınıflandırılırlar. Diğer bir sınıflandırma, her bir yakıt pilinin çalışma sıcaklığına göre yapılabilir ve Çizelge 1.2 ile gösterilmiştir. Bu bakımdan düşük sıcaklık, orta sıcaklık ve yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri olarak üç grupta sınıflandırma yapılabilir. Alkali Yakıt Pili (AYP), Polimer Elektrotlu Yakıt Pili (PEYP), DMYP, düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleridir. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP) ve Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) yüksek sıcaklıkta çalışan grubu oluşturur. Bu çeşit hücrelerin çalışma sıcaklıkları 600 °C değerinin üzerindedir. Orta sıcaklık yakıt pillerine ise Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP) örnek verebiliriz.

**Çizelge 1.2.** Yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları

	<b>AYP</b>	<b>PEYP</b>	<b>DMYP</b>	<b>FAYP</b>	<b>EKYP</b>	<b>KOYP</b>
Çalışma sıcaklığı (°C)	<100	60-120	60-120	160-220	600-800	800-1000 Mümkün olan en düşük (500-600)
Anot reaksiyonu	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$
Katot reaksiyonu	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
Uygulamaları	Ulaşım Uzay Askeri Enerji depolama sistemleri			Isı ve gücün beraber olduğu merkezi olmayan güç santralleri	Isı ve gücün beraber olduğu merkezi olmayan güç santralleri ve ulaşım (trenler, gemiler,...)	
Ulaştığı güç	Küçük tesisler 5 - 150 kW	Küçük tesisler 5 - 250 kW (modüler)	Küçük tesisler 5 kW	Küçük-orta ölçekli tesisler 50 kW - 11 MW	Küçük tesisler 100 kW - 2 MW	Küçük tesisler 100 - 250 kW
Elektrolitte yük geçişi	$OH^-$	$H^+$	$H^+$	$H^+$	$CO_3^{2-}$	$O^{2-}$

### 1.2.5 Reaksiyon gazlarının dağıtımı

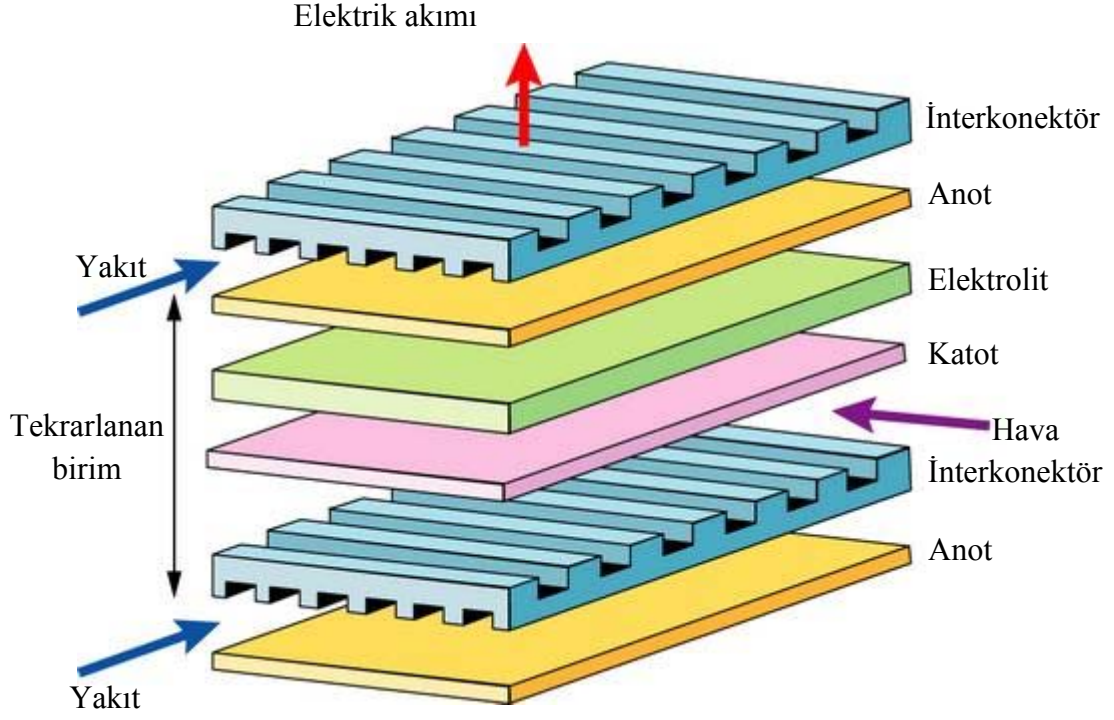
Çok hücreli stakların yakıt ve oksijen beslemeleri manifoldlar yardımıyla yapılmaktadır. Gazların dağıtımı için farklı yollar tercih edilebilir. Reaksiyona giren gazların dağıtımı ve ürünlerin toplanması için dış manifoldlama yapıldığında, akışkanlar her bir stak tabakasına paralel olarak giriş bölgelerinden beslenirler. Dağıtımın dışarıdan yapılması çoğunlukla FAYP için tercih edilmektedir. Fakat iç dağıtım yapıldığında, yakıt ve oksijen stakın içinden beslenmekte ve akış interkonnektörlere dik yönde hareket etmektedir. Her iki tasarım da Şekil 1.3 ile verilmiştir. İki kutuplu plakalar ve membranlar arasında reaksiyon gazlarının ve ürünlerin stak içerisinden geçeceği akış bölgeleri vardır. Stak içinde sızdırmazlığın contalar ile sağlandığından emin olmak önemlidir. İç ve dış dağıtımın beraber kullanıldığı sistemlerde tercih edilebilir (Baker ve Maru, 1997).



Şekil 1.3. Yakıt pillerinde dış (a) ve iç (b) dağıtım görünümü

### 1.3 Stak Mühendisliği

Tekli hücreler pek çok uygulama için yeterli voltajı sağlayamazlar. Dolayısıyla MEG'ler voltajları seri bağlı olacak şekilde bir araya getirilirler. Çoklu stak şematik olarak Şekil 1.4 ile verilmiştir. Çoklu stakta kullanılacak hücre sayısı istenen güce göre belirlenir.



Şekil 1.4. Çoklu stak görünümü

### 1.4 Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)

KOYP hücreleri gaz ve katı olmak üzere iki fazlıdır, bu yüzden su yönetimi, katalizör tabakayı su basması veya yavaş oksijen indirgenme kinetiği problemleri oluşmaz. Fakat yüksek çalışma sıcaklığından dolayı gerekli kararlılığa ve termal özelliklere sahip uygun malzemeler bulmak zordur.

#### 1.4.1 Katot

Katot malzemesinden istenen özellikler; 0.1 S/cm üzerinde bir elektronik ve iyonik iletkenlik ayrıca oksijenin iyonizasyonunda yüksek katalitik aktivite göstermesidir. Bunun yanı sıra malzemenin membran malzemesi ile uygun çalışabilmesi gerekir.

KOYP gelişme sürecinin başlarında, yüksek sıcaklıklarda oksijen indirgenmesi için yüksek aktiviteye sahip ve çalışma koşullarında kararlı  $\text{LaSrMnO}_3$  (LSM) elektrot bulunmuştur. LSM katotlar zamanla geliştirilmiş ve yitra ekli zirkonyum (YSZ) katotlar hücre performansını artırmışlardır (Shibuya and Nagamoto, 1997). Tek fazlı LSM katotlar düşük oksit-difüzyon katsayısına sahiptir ve bu yüzden daha düşük oksijen indirgenme potansiyelini veren çift fazlı katotlara göre tercih edilmeleri daha uygundur.

Metal oksitler  $\text{MxOy}$  ( $\text{M}=\text{Ni, Co, Fe, Ce, Bi, Ti, Mn, Pb}$ ) genellikle katot malzemesi olarak iyi performans göstermektedirler. Aynı zamanda bu malzemeler ucuz ve işlenmesi kolaydır. Bunların içinde  $\text{CO}_2\text{O}_3$  perovskite oksitlerden bile daha iyi performans göstermektedirler. Ayrıca  $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$  karışımında çok iyi elektronik ve iyon iletimi göstermektedir.

Katot malzemesi olarak en çok kullanılan malzemeler perovskit oksitlerdir. Bunlar içinde en çok kullanılan  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{MnO}_3$  ve  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{CO}_y\text{Fe}_{1-y}\text{O}_3$  dür. Her iki malzeme yüksek sıcaklıkta kararlı çalışma ile dikkat çekmektedirler. Perovskit tip materyaller daha iyi KOYP katot malzemeleri olması için araştırılmaktadır. Lantanit temelli perovskitler oksijen indirgenmesinde daha yüksek iletkenlik ve daha yüksek katalitik aktivite göstermişlerdir. LSM elektrotlardaki YSZ parçacık tabakaların ince bir gözenekli yapı olarak uygulanması performansı artırırken, polarizasyon direncini düşürmüştür. Özellikle düşük sıcaklıklarda (600-700 °C) etkin bir katot olması önemlidir.

#### 1.4.2 Anot

KOYP için kullanılacak anot malzemesinden istenen en önemli özellikler; proton ve elektronik iletkenliğinin 0.1 S/cm den büyük olması, çok iyi katalitik reaksiyon ve iyi gaz geçirgenliğidir. Aynı zamanda membran malzemesi ile uygunluk göstermesi gerekmektedir. Bu amaçla Pt ve Pd gibi soy metaller çok uygun olmasına rağmen pahalı olmaları nedeniyle tercih edilememektedir. Fe, Ni, ve Co'da bu malzemelere alternatiftir. Fakat demir kullanımı durumunda katalitik reaksiyon hızı önemli ölçüde düşmektedir, diğer taraftan kobalt ise Pt kadar olmasa bile KOYP seri üretimi için pahalıdır. Nikel ve nikel alaşımlarının (özellikle  $\text{NiO(Ni) Al}_2\text{O}_3$ ) anot malzemesi olarak Pt'den daha iyi performans gösterdiği gözlenmiştir. Saf nikel kullanımı durumunda yüksek sıcaklıkta gözenekli yapı kaybolmakta ve performans düşmektedir. Bu amaçla

Ni-Cr ve Ni-Al alaşımları denenmiş en iyi performans Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımı ile elde edilmiştir (Zhu vd., 2003). Yapılan alışmalar tabaka yapılı nikel oksitlerin (örneğin M<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub> (M=Li, Na, K vb.)) ok dūřuk sıcaklıklarda (yaklaşık 200 C) bile yüksek iyonik iletkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur.

KOYP anotları Ni temellidir, genellikle sadece Ni metal malzemededen daha kararlı davranan Ni sermet malzemeler kullanılır. NiO anotlar YSZ elektrolit içinde kolaylıkla çözünebilir, fakat elektrolitin kübik fazlı olması durumunda anotun kararlılığı artar. YSZ tozlarıyla birlikte karıştırılarak aralarında reçineyle bağlar oluşturulan NiO tozları, YSZ elektrolitin üzerine yerleşerek sinterlenir. Daha sonra bu tabaka üzerine katot püskürtülerek düzlemsel anot destekli KOYP hcreti oluşturulabilir (Buchkremer vd., 1997). Ayrıca YSZ-Ni anotlar vakumlu plazma püskürtme yöntemi ile oluşturulabilir (Lang, 1997).

### 1.4.3 Elektrolit

KOYP sisteminde membran malzemesi olarak en çok kullanılan malzeme yitrium ile stabilize edilmiř zirkonyumdur (YSZ ile beraber 8-10 mol Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Bu malzeme 1000 C de çok yüksek iyonik iletim göstermektedir (800 C de 0.02 S/m, 1000 C de 0.1 S/m). Yüksek sıcaklıkta dūřuk elektron iletim özelliđine kararlı bir yapıya sahip olması bu malzemeyi cazip hale getirmektedir. Fakat 1000 C altındaki sıcaklıklarda iyonik iletkenliđinin önemli ölçülerde dūřmesi nedeniyle daha dūřuk çalıřma sıcaklıklarına inmek mümkün deđildir.

Daha dūřuk çalışma sıcaklıkları için yoğun araştırmalar mevcuttur. alışmalar seryum alaşımları ve lantanyum alaşımları üzerine yoğunlaşmıştır. Seryum, zirkonyum hemen hemen aynı kristal yapıya sahip olmakla birlikte lantanyum gallate perovskite kafes yapısına sahiptir. Yapılan alışmalar Ce<sub>0.8</sub>Gd<sub>0.2</sub>O<sub>2</sub>'nin 900 C de, YSZ'nin 1000 C'de sahip olduğu 0.1 S/cm iyon iletkenliğine ulaştığını göstermiştir. ZrO<sub>2</sub> destekli elektrolitlerin yeterli iletkenlik verdiği ve çalışma sırasında kararlı yapıya sahip olduğu bilinmektedir. İstenen sıcaklıklarda çalışabilen elektrolit malzemelerle uyumlu katot ve anot yapılarının da göz önüne alınması gerekmektedir. Doshi ve arkadaşları CeO<sub>2</sub> temelli elektrolitler yitra ekli elektrolitlerden daha iletken olduğunu tespit etmişlerdir (Doshi vd., 1997; Steele, 1996; Doshi vd., 1999; Doshi vd., 1999; Huijsmans., 1998).

#### 1.4.4 İnterkonektörler

İnterkonektörler, stak içinde hem akım toplama hem de gaz ve yakıt dağıtımını amaçlı kullanılmaktadır. Bu amaçla interkonektörün iyi bir elektrik iletkenliğe sahip malzemedan imal edilmesi gerekmektedir. Ayrıca interkonektör üzerinde gaz kanalları bulunmalıdır. İnterkonektörün ve sızdırmazlık elemanlarının seçiminde en önemli kriter ısıl genişleme katsayılarının membran elektrot gurubuna yakın olmasıdır. İnterkonektörün görevini yerine getirebilmesi için aşağıdaki kriterlere kesinlikle uyması gerekmektedir.

- %100 elektronik iletkenlik
- Hücre çalışma sıcaklığında hem oksitleyici hem de indirgeyici koşullardan etkilenmemesi
- Yakıt ve oksitleyicinin karışmasını önlemek için oksijen ve hidrojen geçirgenliğinin düşük olması
- Isıl genişleme katsayısının hava elektrotu ve elektrolit malzemesine yakın olması

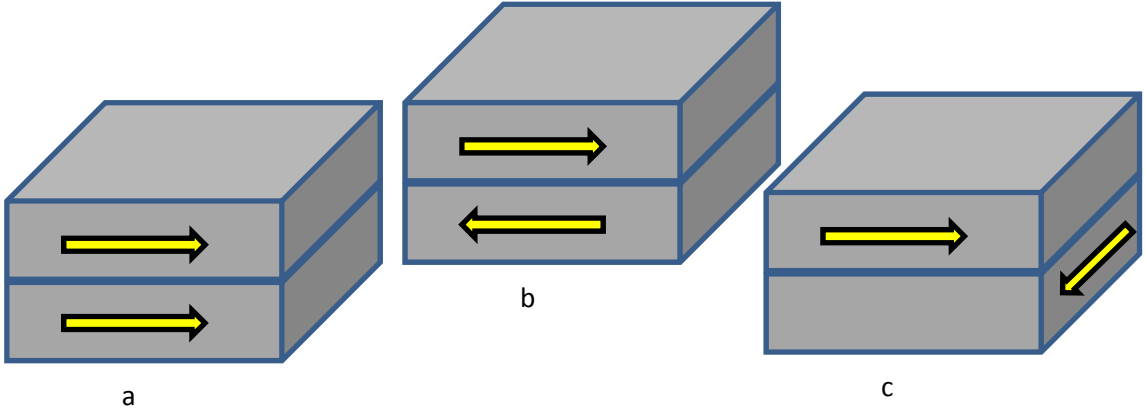
Bu şartları sağlamak için interkonektör olarak Lantanyum kromit, Crofer, Hyness gibi yüksek sıcaklığa ve mukavemete dayanıklı aynı zamanda yüksek elektronik iletkenliğe sahip malzemeler kullanılmaktadır. Isıya dayanıklı alaşımlar, interkonnektör malzemesi olarak üretim kolaylığı ve mekanik dayanımları nedeniyle,  $\text{LaCrO}_3$  tabanlı seramiklere göre daha yüksek performans göstermektedirler. Ayrıca bu alaşımlar anot tarafındaki kimyasal ortamdan etkilenerek hacimsel değişime uğramazlar.

$\text{ZrO}_2$  benzeri genişleme katsayısına sahip,  $\text{LaCrO}_3$  temelli seramiklerden üretilen iki kutuplu plakaların yüzeyine  $\text{CrO}_3$  tabaka kaplandığında yeterli elektriksel iletkenliği sağladığı gözlenmiştir (Buchkremer, 1995).

Yüksek korozyon direncine, istenen termal iletkenliğe, yüksek mekanik dayanıma ve düşük genişleme katsayısına sahip yeni bir seramik-metal alaşım Plansee (Reutte, Austria) tarafından bulunmuştur. Seramik-metal alaşımlar yitrium oksit seramikle karıştırılmış  $\text{CrFe}$  paslanmaz çelik metal, elemanlarından oluşmaktadır.

### 1.4.5 Akış yönleri

Yakıt pilleri, temel olarak ikişer adet elektrot, iki kutuplu plaka, akım toplayıcı ve bir adet elektrolitten oluşan sandviç benzeri bir yapıya sahiptir. Akım toplayıcılar sadece elektriği toplamakla kalmaz aynı zamanda reaksiyona giren gazlar için hücre boyunca hareket edebileceği akış alanı oluştururlar. Reaksiyona giren ve çıkan gazlar için çeşitli akış konfigürasyonları tercih edilebilir. Şekil 1.5 en çok kullanılan üç akış tipini göstermektedir.



Şekil 1.5. paralel akış (a), karşıt akış (b), çapraz akış (c)

Paralel akış, anot ve katot akışkanlarının aynı eksen ve aynı yönde hareket ettiği (a) ile gösterilen konfigürasyondur. Bir akış boyunca eksenler aynı fakat yönler zıt ise karşıt akış olarak adlandırılır ve (b) ile gösterilmiştir. Anot ve katot gaz akışlarının birbirine dik olarak gerçekleştiği durum ise çapraz akış olarak bilinir ve (c) ile gösterilmiştir.

### 1.5 Literatür Özeti

KOYP stak tasarımı tüp ve düzlemsel şekilli iki ana kavram üzerine gelişmektedir. Tüp şeklinde tasarım uzun süreli çalışmalarda kararlılığı açısından avantaja sahipken düzlemsel tasarım da daha yüksek akım yoğunluğu sağlanmaktadır.

Tüp şeklinde KOYP konusundaki yeniliklerin lider kuruluşu, Siemens Westinghouse Power Corporation (SWPC) olarak kabul edilebilir. Tasarımları gözenekli katot tüpün ekstrüzyon ve sinterleme ile üretimine dayanır ve 22 mm dış çap, 2 mm et kalınlığı ve 1.8 m tube uzunluğuna sahiptir (Kabs, 2002; Stöver and Bram, 2002). Bu tip hücrelerin

sahip olduğu yüksek ohmik direnç,  $200 \text{ mWcm}^{-2}$  güç yoğunluğuna ulaşabilmek için  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$  arasında çalışma sıcaklığı gerektirmektedir. Bu problemin üstesinden gelebilmek için SWPC modifiye edilmiş yeni tasarımlar üzerinde çalışmakta ve ohmik direnci azaltmak için hücre içerisinde kaburgaların olduğu düzleştirilmiş tüpler kullanılmaktadır ve benzer bir dizayna sahip fakat anot destekli hücreler Kyocera tarafından (Kyocera, <http://global.kyocera.com/news/2003/1205.html>, 2003) geliştirilmektedir. Mitsubishi Heavy Industries farklı tüp tasarım üzerine çalışmalar yapmaktadır. Bu tasarımda tekli hücreler gözenekli yapı destekli tüpün merkezine yerleştirilmiş ve seramik interkonektör halkaları sayesinde elektriksel olarak seri bağlanmış, yakıt tüpün içinden hava ise dışından verilmiştir (Fujii, 2002; Fujii and Ninomiya 2002).

Düzlemsel yaklaşım temelde elektrot destekli ve elektrolit destekli olarak ikiye ayrılabilir. İlk yapılan çalışmalarda genellikle  $100\text{-}200 \text{ }\mu\text{m}$  kalınlığa ve yaklaşık  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  yüzey alanına sahip YSZ elektrottan oluşan destek birimleri kullanılmıştır. Bu dizaynların, elektrot kalınlığının yüksek ohmik direncine bağlı tipik çalışma sıcaklığı  $800\text{-}1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$  aralığındadır. Yüksek çalışma sıcaklıklarında lantanyum-cromat malzeme esaslı seramik interkonektörler kullanılır. Çünkü farklı termal genleşme davranışları olan yükseltgeyici ve indirgeyici ortamlarda genleşme bakımından sınırlıdır ve nispeten düşük elektrik ve sıcaklık iletkenlikleri vardır (Blum vd., 2005). Bu tip malzemenin diğer avantajı ise korozyon ve buna bağlı bozulmanın ihmal edilebilir olmasıdır. Metalik interkonektör plakalar çalışma sıcaklığının düşmesine izin verirken büyüklüklerinde artma meydana gelir.

Sulzer Hexis, yakıtın elektrot destekli dairesel hücrenin merkezinden verildiği ( $120 \text{ mm}$  çap), akışın dışa doğru olduğu düzlemsel model geliştirmiştir. Hava dışarıdan verilmekte ve merkeze doğru ilerlerken ısıtılmaktadır. Bu anlayışla üretilen stakları  $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta çalıştırılmıştır. Yakın zamanlarda firma üretim maliyetlerini düşürmek için tekli plakaya yönelmiştir.

Forschungszentrum Jülich tarafından tüm dünyada “yeni jenerasyon” olarak bilinen KOYP geliştirilmiştir. Bu tasarım,  $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta elektrolit destekli hücrelerden alınan güç yoğunluğunun,  $700\text{-}800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  çalışma sıcaklığı aralığında alınabilmesini sağlamıştır. Aynı zamanda bu tasarım, anot destekli hücrelere uygun termal genleşme

katsayıları sayesinde ferritik krom alaşımların da interkonektörler için kullanılmasını sağlamıştır. Stak tasarımları paralel akış veya karşı akış olarak yapılmıştır.

KOYP performansı, tekli-hücre seviyesinde son yıllarda artarak devam eden çalışmalarla, sürekli geliştirilmiştir (Tietz vd., 2006). Bunun yanı sıra stak seviyesinde %50 oranında kullanılmayan güç yoğunluğu vardır (Blum vd., 2005). Bu duruma neden olan sebepler hakkında yapılan araştırmalar metalik interkonektör (Mİ) etkisinin payını işaret etmektedir (Gazzarri ve Kesler, 2008). Mİ geometrisinden kaynaklanan kayıplar hücre performansını düşürmektedir. Akış geometrisinden kaynaklanan ideal olmayan kontak alanının sebep olduğu kontak direnci veya diğer ifadesiyle sınırlı kontak alanı ve gaz dağıtım kanallarıyla sınırlı gaz dağılımı, söz konusu ilave ohmik ve polarizasyon kayıplarına neden olmaktadır.

Mİ geometrisinin KOYP performansı üzerindeki etkisi, tekrarlanan birimlerin farklı modelleri ile araştırılmıştır. Tanner ve Virkar (2003), Mİ geometrisi, elektrostatik potansiyel, elektriksel iletkenlik ve yük transfer direncini açıklamak için farklı elementler kullanmışlar ve tekrarlanan birimlerin ohmik alan özel dirençlerini (AÖD) sayısal olarak açıklamışlardır. Gazzarri ve Kessler (2008), tekrarlanan birimlerin empedans spektrumunu kullanarak zamana bağlı bir model geliştirmişlerdir. Böylece AC ve DC kütle ve yük transfer bağıntıları geliştirmiş ve bunları gaz difüzyonu ve elektrotların konsantrasyon polarizasyonu ile birlikte değerlendirmişlerdir.

Kornely vd. (2011), ilave kayıpların, elektrot ve akış alanı aralarındaki kontak direncinden, elektrotlardaki düzlemsel iletimden, kaburga ile katot arasındaki gaz transferinden meydana geldiğini düşünmüşlerdir. Yaptıkları simülasyon ve deneysel çalışmaların sonucunda, anot akış alanı geometrisinin hücre performansına etkisinin ihmal edilebilir olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca daha geniş kaburga kontak yüzeyine sahip anot akış alanında, ohmik direnç azalırken gaz difüzyon direnci artmaktadır. Yine de ohmik direncin zaten çok küçük olmasından dolayı hücre performansını artırıcı yönde önemli bir katkısı yoktur. Bu durum niçin anot akış alanı konusunda daha fazla deneysel çalışma ve modellemenin yapılmadığını izah eder. Yaptıkları çalışmalar katot akım yoğunluğu dağılımının kontak geometrisine bağlı olduğunu göstermiştir. Çalışmaların neticesinde, 4 mm kanal ve 1 mm kaburga genişliğine sahip tasarım 1 performansının ( $P_{(tasarım\ 1(0.7\ V))}=1.03\ Wcm^{-2}$ ) ve 2.6 mm kanal ayrıca 2.4 mm kaburga

genişliğine sahip tasarım 2 performansının ( $P_{(tasarım\ 2(0.7\ v))}=0.76\ Wcm^{-2}$ ) ideal tasarım performansına ( $P_{(ideal(0.7\ v))}=1.3\ Wcm^{-2}$ ) kıyasla, sırasıyla %21 ve %41 azaldığını göstermiştir. Dar kaburga genişliğini ohmik alan-özel direncini artırmıştır, gaz difüzyon direnci kanal tasarımından önemli ölçüde etkilenmiştir. Gaz difüzyon direnci artan kaburga genişliği ile artmıştır.

Gaz kanalları altındaki elektrik iletimine ve kaburga kontakları altındaki gaz difüzyonuna bağlı olarak, tasarım 1 ve tasarım 2 için ohmik AÖD ve katot difüzyon dirençleri artmıştır.

Yaptıkları deneyler ve FEM model, dar kaburga genişliğine sahip metal interkonektörlerdeki (tasarım 1) ohmik kayıpların %84 oranına kadar arttığını göstermiştir. Geniş kaburgaya sahip interkonektörlerde (tasarım 2) bu oran %24 seviyesine kadar düşmüştür.

Deneysel sonuçlar, dar kaburga kontak genişliğine sahip metalik interkonektörlerin (tasarım 1) akış alanlarındaki gaz difüzyon direncinin %48 oranına kadar, geniş kaburgaya sahip interkonektörde (tasarım 2) ise bu oranın %750 civarı bir değere kadar arttığını göstermiştir.

Tüm yaptıkları çalışmalar sonucunda Kornely vd. (2011), en iyi akış alanı tasarımını, dar gaz kanalı ve dar kontak kaburga genişliğinin kombinasyonu olarak tanımlamışlardır.

KOYP hücrelerindeki anot ve katot bölgelerinin sahip oldukları akış yönlerinin; gaz, sıcaklık ve akım dağılımlarına ve ayrıca yakıt kullanım verimine etkileri üzerinde çalışmaların yapıldığı bir diğer önemli konudur. Recknagle vd. (2003), yaptıkları çalışmalarda paralel akışın en düzgün sıcaklık dağılımına ve en küçük sıcaklık gradyanına sahip olduğunu göstermişlerdir.

Yakıt kullanım verimi ve hücrenin ortalama çalışma sıcaklığı, yakıt havanın hem dağılım hızına hem de sahip olduğu sıcaklığa bağlıdır. Yakıt dağılımı, ekzotermik kimyasal reaksiyonlar bakımından çok kritik öneme sahiptir. Yakıt konsantrasyonunun yüksek olduğu bölgeler elektrokimyasal olarak aktif hale gelir, lokal sıcaklıkları artırır

ve böylece söz konusu bölgelerin reaksiyon hızları daha da artar. Kullanılmış yakıtın bulunduğu hücre alanları aktivitesini kaybederek, daha soğuk bölgeler oluşturur ve buralardaki reaksiyon hızları azalır. Yakıt miktarının artması reaksiyon hızı düzgünlüğünü artırır ama yakıt kullanım verimini azaltır. Yakıt miktarının azalması ise yakıt kullanım verimini artırır fakat sıcaklık dağılımını daha kötü hale getirerek soğuk noktaların oluşmasına neden olur. Yakıt ve hava akışının yönetimi, hücre çalışma stabilitesi için kritik öneme sahiptir.

Recknagle vd. (2003), çapraz-akışı baz alarak 0.7 V hücre voltajında yaptıkları çalışmalarda, yaklaşık 750 °C ortalama hücre sıcaklığında 60-70% yakıt kullanım verimini hedeflemişlerdir. Hava katot tarafında 0.25 gm/s debi ve 625 °C sıcaklık ile dağıtılmıştır. Netice olarak stabil çalışma halinde hücre ortalama sıcaklığı 769 °C, maksimum ve minimum sıcaklıklar 643 ve 912 °C olmuştur. Yakıt kullanım verimi 61.7% olarak elde edilmiştir. Sıcaklık yakıtın giriş ve havanın çıkış bölgelerine yakın yerlerde en yüksek değerlerine ulaşmıştır.

Çapraz-akış için uygulanan şartlar korunarak, diğer iki akış konfigürasyonu içinde sonuçlar elde edilmiştir. Paralel akış, diğer akış eşleşmelerine göre daha düzgün sıcaklık dağılımını ve havanın giriş-çıkış bölgeleri arasında daha küçük sıcaklık farklarını sağlamıştır.

Paralel akış en düzgün akım yoğunluğunu sağlayan eşleşme olmuştur. Çapraz akış ve karşıt akış için yakıt girişi ve hava çıkışına yakın bölgeler en yüksek akım yoğunluğunun sağlandığı alanlar olmuştur. Fakat bu durum paralel akışın en yüksek akım yoğunluğunu sağladığını göstermez.

Paralel akış ve karşıt-akış durumları gaz girişinden çıkışına kadar minimum “çizgi” boyunca yakıt konsantrasyonunu sağlamıştır. Çapraz akış konsepti ise diğer iki durumdan daha düşük fakat minimum “nokta” şeklinde yakıt konsantrasyonunu sağlamıştır. Yakıt kullanım veriminin maksimum, lokal yakıt tükenmeleri riskinin daha az olması için minimum “çizgi” daha iyi bir sonuç verecektir. Yakıt tükenmelerinin ve sonrasında soğuk noktaların oluşmasının önlenmesi, daha küçük termal gradyanların ve daha az termal gerilmelerin olması hücre bileşenlerinin yapısal bütünlüğünün sağlanmasına yardımcı olacaktır.

Recknagle vd. (2003), sonuç olarak paralel akış tasarımının, diğer akış tipleriyle benzer yakıt kullanım verimine ve ortalama hücre sıcaklığına, en düzgün sıcaklık dağılım profiline ve en küçük sıcaklık gradyantına sahip olduğunu göstermiştir. Bu durum stak bileşenlerinin yapısal bütünlüğü bakımından önemli bir avantajdır.

Ayrıca aktif alan üzerinde reaksiyon gazlarının dağıtımı ve egzoz gazlarının toplanması için araştırmalar yapılmıştır. Yakabe vd. (2001), giriş ve çıkışın tek hat üzerinden yapıldığı basit bir dağıtım tasarımı geliştirmiştir. Huang vd. (2008), ise yaptıkları nümerik ve deneysel çalışmalar ile bu tasarımın giriş kısımlarında resirkülasyon bölgeleri oluştuğunu ispatlamışlardır. Bölgesel düzgün olmayan hız dağılımları, daha büyük düzgün olmayan sıcaklık dağılımı oluşturacak ve istenmeyen konsantrasyon kayıplarının miktarı artacaktır. Haart vd. (2001), yaptıkları iki beslemeye sahip tasarımın tek beslemeli tasarıma göre daha avantajlı olduğunu göstermişlerdir fakat yine de bu tasarımda resirkülasyon problemlerinin var olduğu Huang vd. (2008), tarafından deneysel ve nümerik olarak ispatlanmıştır. Ayrıca aynı araştırma ekibi iki tasarımı daha incelemiştir. Üçüncü inceledikleri tasarım iki farklı giriş ile beslendiği gibi aynı zamanda fiziksel olarak aktif alan bitimine kadar ayrılmışlardır. Dördüncü tasarım önceki tasarıma benzemekle beraber, bu hücrede aktif alan girişinden önce on adet manifoldla reaksiyon gazlarının dağıtımı yapılmıştır. Yaptıkları deneyler nümerik çalışmalardan elde edilen bulguları desteklemiştir. Dördüncü tasarımın kullanıldığı besleme bölgesi civarında dağıtımın küçük dağıtıcı kanallarla yapıldığı interkonektörler tüm modeller içinde en düzgün akış dağılımını sağlamıştır. Böylece yerel sıcak noktaların oluşumunun büyük oranda önüne geçilmiş ve tek bir hücreden ikinci tasarıma kıyasla, en az 11% maksimum güç yoğunluğu artışı sağlanmıştır. Ayrıca anot tarafında kontak tabakası olarak nikel elek kullanıldığında hem komşu kaburgalar arasındaki sıcaklık dalgalanmaları azaltılmış hem de maksimum güç yoğunluğu artırılmıştır Huang vd. (2008).

## **1.6 Amaç**

Katı oksit yakıt pilleri, sahip oldukları yüksek elektriksel verim, sessiz ve titreşimsiz çalışmaları dolayısı ile geleceğin elektrik ve ısı enerjisi üreten sistemleri olarak dikkat çekmektedirler. Eysel uygulamalara, büyük ve küçük ölçekli merkezi güç üretimine uygun olan KOYP sistemlerinin yaygınlaşabilmesinin önündeki en temel engeller;

Üretim zorluğu ve buna bağlı olarak maliyetlerin yüksek olması olarak sayılabilir. Bu alışma kapsamında KOYP sistemlerinin üretimini kolaylaştırmak ve maliyetlerin azaltılmasına yardımcı olmak için, kanallı/kanalsız geometriye sahip interkonektör plakaları ile farklı yapısal özelliklere ve geometriye sahip eleklerin testleri yapılmıştır.

### **1.7 Tezin Başlıkları**

şimdiye kadar yakıt pilleri hakkında genel bilgiler verilmiş ve KOYP için daha detaylı açıklamalar yapılarak literatürde yapılmış olan çalışmalar özetlenmiştir. Tezin devam eden bölümlerinde, üzerinde araştırmaların yapıldığı materyaller tanıtılacak, deney düzeneği ve deneylerin yapıldığı eşleşmeler açıklanacaktır. nc bölümde elde edilen bulgular üzerine tartışmalar yapılacak ve dördüncü bölümde ulaşılan sonuçlar özetlenecek, sonraki çalışmalar için öneriler oluşturulacaktır.

## BÖLÜM II

### MATERYAL VE METOT

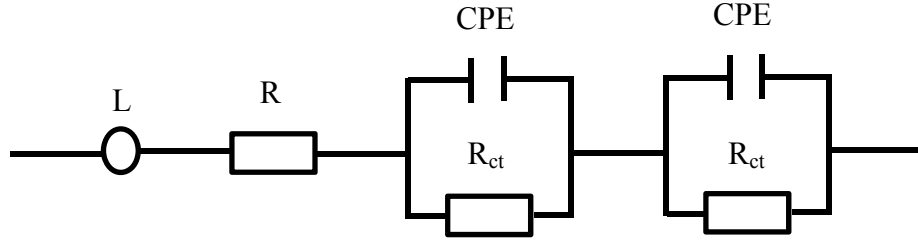
Bu tez kapsamında deneyler, Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Hidrojen Teknolojileri Araştırma Laboratuvarında üretilen elektrolit destekli membranlar kullanılarak yine aynı bölümün Isı transferi ve Yakıt Pilleri Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Staktaki destek yapıyı oluşturan, gazların dağıtımı ile egzoz görevlerini üstlenen interkonektörler, düzlemsel yapıdadır ve Crofer malzemeden oluşmaktadır. Fotoğraf 2.1 Isı Transferi ve Yakıt Pilleri Laboratuvarında kullanılan cihazları göstermektedir.



**Fotoğraf 2.1.** Deneylerde kullanılan cihazların görünümü

Yapılan deneylerle KOYP hücresinin performans ve empedans değerleri incelenmiştir. Performansa etki eden reaksiyon gazı debileri, hücreye uygulanan basınçlar, çalışma sıcaklık ve her bir parametrenin uygulandığı zaman aralıkları aynı değerlerde olacak

şekilde tekli stak testleri yapılmıştır. Böylece aynı şartlar altındaki KOYP tekli stağında kanallı veya kanalsız geometri ve akım toplayıcı eşleşmelerinin performans üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Deney sonuçları yorumlanırken empedans ölçüm değerleri dikkate alınmıştır. Empedans ölçümlerinde kullanılan eşdeğer devre modeli Şekil 2.1 ile gösterilmiştir.

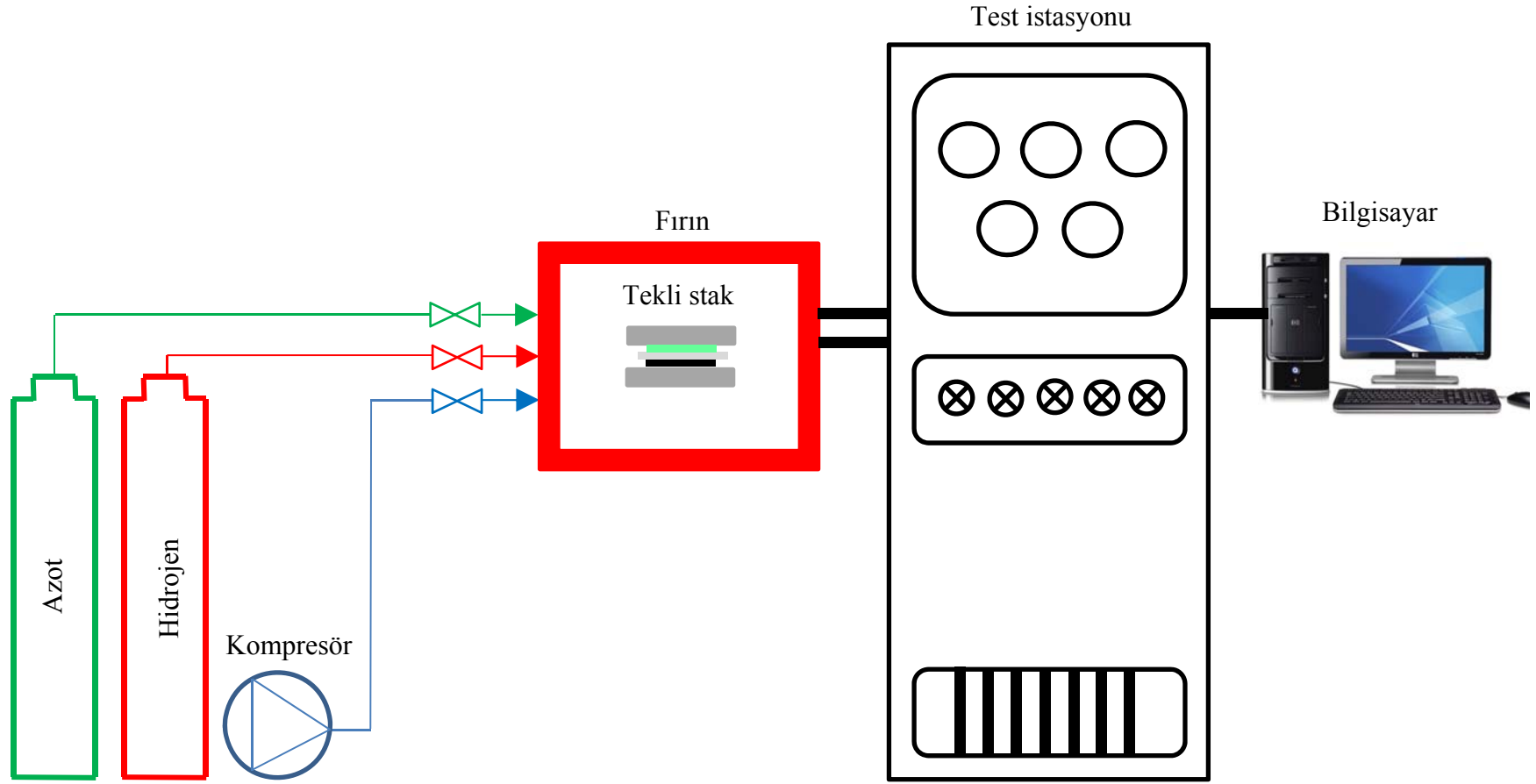


**Şekil 2.1.** Empedans ölçümlerinde kullanılan eşdeğer devre modeli

Deney sonuçları paralelinde çoklu stak için optimum eşleşmeler belirlenmiş, 10 hücreden oluşan stak imal edilerek, çoklu stak testi yapılmış; akım, voltaj ve güç değerleri elde edilmiştir.

## 2.1 Deneysel Çalışma

Deneysel olarak yapılan çalışmalarda; kanallı veya kanalsız geometriye sahip metalik interkonektörlerin, gözenekli nikel elek, 0,4 mm kalınlığa sahip ince örgülü nikel elek, 1,25 mm kalınlığa sahip kalın örgülü nikel elek ile testleri yapılmıştır. Fakat cam seramik malzeme, interkonektör ile elektrolit arasında sinterlenerek bir sızdırmazlık sağladığı için kontrolsüz bir genleşme durumunda ızgara akış alanı ile MEG arasındaki kontağın azalmasına neden olabilmektedir. Deney düzeneği Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Deney düzeneği

Stak performans testleri için kullanılan deney düzeneği; tekli/çoklu stak, yakıt pili test istasyonu, elektronik kontrollü fırın, empedans ölçüm cihazı, gaz tankları, hava kompresörü ve bilgisayardan oluşmaktadır.

Gaz dağıtım hatları hem direk fırına hem de test istasyonuna bağlanmıştır, böylece tekli/çoklu hücre için gerekli gazlar, kompresör ve tüplerden test istasyonu üzerinden sağlanmıştır. Test istasyonu hem sayısal işlemci ünite hem de test yapılacak birimle bağlantılı şekilde çalışmaktadır. Fırınlara diğer birimlerden bağımsız olarak kendi ara yüzüyle kontrol edilmektedir. Test düzeneği fırınlara entegre olan pünomatik preslerle sıkıştırılarak bir arada tutulmuş, kaçaklar sıkıştırma basıncıyla azaltılmış ve böylece hücre-elek-interkonektör kontağı sağlanmıştır.

### Test İstasyonu

Çalışmalarda kullanılan test istasyonu (ARBIN Instruments FCTS) stak performans ölçümlerinin yapıldığı birimdir. Reaksiyon gazları olan hidrojen ve havanın, ayrıca azot gazının istenilen değerlerde hücreye gönderilmesini sağlamaktadır. Kullanıcının belirleyebileceği sabit voltaj altında hücreyi çalıştırıp bu süreçteki bilgileri kaydeder, değişken voltaj değerlerine karşılık hücreden akım çeker veya değişen akım değerlerine karşılık voltaj bilgilerini elde ederek performans sonuçlarını oluşturur.

### Fırın

KOYP sistemlerinin çalışma sıcaklıkları yaklaşık olarak 800°C civarındadır. Bu çalışma sıcaklığına, sıcaklık kontrollü fırın kullanılarak getirilmektedir. KOYP için gerekli yüksek sıcaklıkları sağladığı gibi tekli veya çoklu stak için aynı zamanda gerekli sıkıştırma basıncını da sağlayabilecek ve ısı kayıplarının minimize edilebildiği sıcaklık kontrollü fırın (ProTHERM SOFC Furnace) deneylerde kullanılmıştır.

### Bilgisayar

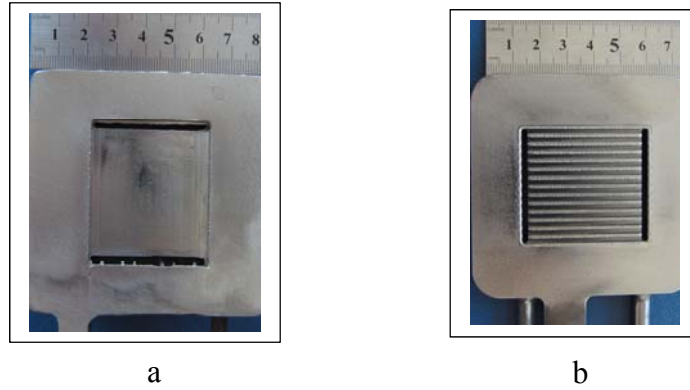
İşlemci test istasyonunun kullanımını sağlayan ara yüze sahiptir ve üzerinde test parametrelerinin belirlendiği, ölçümlerin yapıldığı, arşivlendiği ve grafiklerin oluşturulduğu birimdir.

### Tekli Stak (Tekli Hücre)

Tekli stak testi yapılacak ikişer adet interkonektör plaka, akım toplayıcı, MEG ve sızdırmazlık elemanlarından oluşmaktadır.

### İnterkonektör plakalar

İnterkonektör plakalar stak bileşenleri için hem destek yapıyı oluşturan hem de reaksiyona giren gazların dağıtımını sağlayan elemanlardır. Deneysel çalışmalarda kullanılan interkonektörler Fotoğraf 2.2’de görülmektedir.



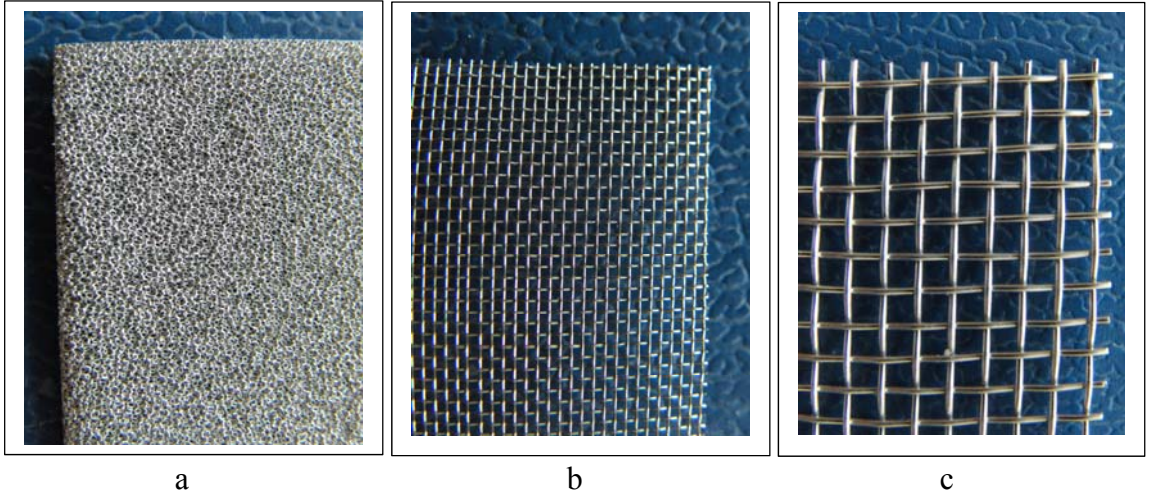
**Fotoğraf 2.2.** Deneysel olarak kullanılan interkonektörler kanalsız (a) ve düz kanallı (b)

Kanallı geometriye sahip interkonektörlerde birebir kanal ve kaburga genişliği oranı kullanılmıştır ve kanal derinliği ile kanal genişliği aynı değerdedir. İÖNE için kullanılan interkonektörlerde aktif bölge düzdür ve konektör kenar destek yüzeyleri ile aynı yüksekliğe sahiptir. Elek ile MEG arasındaki boşluk conta malzemesi ile optimize edilmiştir. KÖNE'nin puntalı veya puntasız olduğu kanalsız interkonektörlerde, elek kenar destek yüzeylerine göre daha aşağıda oyuk şeklinde hazırlanmış aktif bölgeye yerleştirilmiştir. Ayrıca interkonektör-elek-MEG arasındaki kontak yine conta ile optimize edilmiştir.

Reaksiyona girecek olan hidrojen ve hava oda sıcaklığında gönderildiğinden, bu gazlara interkonektörlerin alt kısımlarına gizlenen kanallarla ön ısıtma işlemi uygulanmıştır.

### Elekler

Yapılan çalışmalarda farklı yapı özelliklerine sahip gözenekli nikel elek (GNE), ince örgü nikel elek (İÖNE) ve kalın örgü nikel elek (KÖNE) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan elekler Fotoğraf 2.3.'de verilmiştir. İÖNE, GNE ile kıyaslandığında daha sağlam bir yapıya sahiptir, sıcaklık ve basınçtan dolayı olan deformasyonlara daha dayanıklıdır. Kalın örgü nikel elek (KÖNE) ise İÖNE göre daha ince ve İÖNE gibi birbirine dik halde örülen 2 katmanlı bir ağ şeklindedir.



**Fotoğraf 2.3.** Deneylerde kullanılan elekler GNE (a), İÖNE (b) ve KÖNE (c)

### Membran Elektrot Grup (MEG)

Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Hidrojen Teknolojileri Laboratuvarında Vestel Savunma Sanayi A.Ş. ile birlikte geliştirilen ve deneysel çalışmalarda kullanılan membran elektrot gurubu (MEG) Fotoğraf 2.4'te gösterilmiştir.



**Fotoğraf 2.4.** MEG görünümü anot (a) ve katot (b)

### Empedans ölçüm cihazı

Yakıt pillerinin verimli şekilde analiz edilebilmesi için empedans ölçümlerinin yapılması önemli bir işlemdir. Empedans ölçüm cihazı (Parstat 2273) ile tekli staklar arasında dört bağlantılı ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Referans ve çalışan elektrot anot tarafına, diğer çalışan elektrot ve karşıt elektrot katot tarafına bağlanmıştır.

Tekli hücre deneyleri 16 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip membranlar kullanılarak yapılmıştır. Elektrolit destekli kısım fotoğraflarda beyaz renkli olarak görülmektedir. Sızdırmazlık contaları bu kısmın alt ve üst yüzeyleri ile interkonektör arasına yerleştirilmektedir. MEG'lerde scale-up problemi vardır. Endüstriyel boyutlara taşıyabilmek ve scale-up problemlerini görebilmek için stakta 81 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip hücreler kullanılmıştır. Çoklu stak, son plakalar arasına interkonektörlerin konulmasıyla oluşturulmuştur. Gaz besleme ve egzozlama son plakalardan, stak içinde gazların dağıtım veya uzaklaştırılmaları ise interkonektörlerden sağlanmıştır.

Çoklu stak hazırlanması süreci, tekli stağa göre daha zordur, çünkü sızdırmazlığın sağlanması çok daha önemli hale gelmekte, interkonektör sayısına bağlı olarak oluşan interkonektör-elek-MEG temas yüzeylerinin her birinde iyi seviyede kontak sağlanması gerekmektedir. Sızdırmazlık problemi cam-seramik conta kullanılarak çözülmüş ve contanın sinterlenme işlemi çoklu stağın bütüncül bir yapıya dönüşmesini sağlamıştır. Ayrıca cam-seramik sızdırmazlık contası uzun süreli çalışmalar için de uygundur. Bunun yanı sıra interkonektörler arasındaki boşluğun ve sıkıştırma basıncının optimizasyonu ile iyi seviyede kontak her bir hücre için sağlanmıştır. Yüksek basınç stak içinde deformasyonlara veya membranlarda kırılmalara neden olacağından, temas sağlamak için yeterli düşük basınç tercih edilmiştir.

Tekli hücre deneylerinde hidrojen veya havanın aktif bölgeye girmeden ısıtılması, interkonektörlerin içindeki dahili kanallarla yapılmışken, stak deneyinde reaksiyona giren gaz debileri arttığından, bu işlem spiral şekilli harici ısıtıcılarla gerçekleştirilmiştir. Çoklu stak Fotoğraf 2.5'te verilmiştir.



**Fotoğraf 2.5.** Çoklu stak görünümü

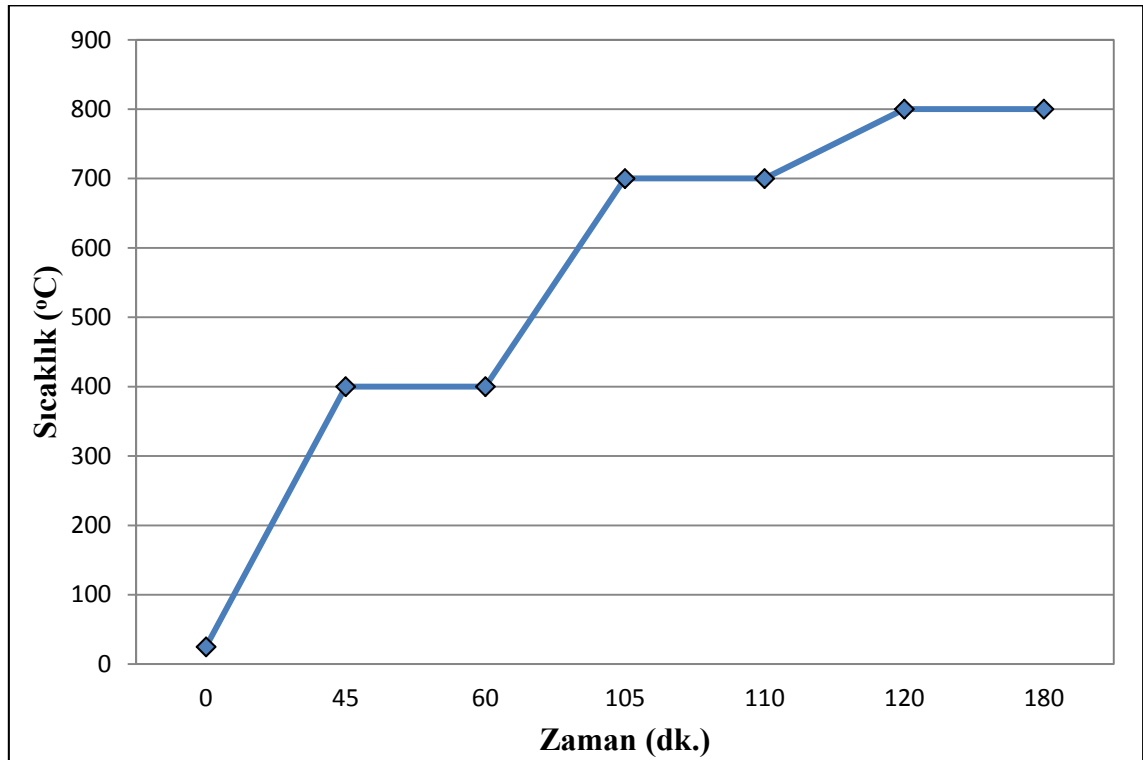
Fotoğraf 2.5 incelendiğinde, sinterleme işlemi sonrasında interkonektör plakaları bir arada tutan ve sızdırmazlığı sağlayan cam-seramik conta, interkonektör temas yüzeyleri arasında beyaz renkli olarak görülmektedir. Alt ve üst son plakalardaki harici ısıtma kanalları da fotoğrafta görülmektedir. Çoklu stakta reaksiyon gazlarının dağıtılması ve egzoz gazlarının uzaklaştırılması iç manifoldlama ile yapılmıştır, yani söz konusu gazlar interkonektör plakaları arasında interkonektör yüzeyine dik, aktif bölgede ise hücreye paralel hareket etmektedir.

Çoklu stak deneyi anot tarafında kanallı interkonektörün kullanıldığı tasarıma göre yapılmıştır ve gözenekli nikel elek (GNE), punta kaynağı yapılmadan kullanılmıştır. Tekli stakta olduğu gibi birebir kanal ile kaburga genişliği oranı ve kanal genişliği ile aynı değerlerde kanal derinliği kullanılmıştır. Akımın daha iyi toplanması için NiO kontak pasta konektör üzerine sürülmüştür. Stağın katot tarafı kanallı geometri-KE-LSM kontak pasta eşleşmesiyle hazırlanmıştır.

Kanalsız tasarımda iyi sonuçlar veren puntalanmış örgü elek ise stak testinde kullanılmamıştır. Çünkü punta kaynağı düğüm noktalarının nasıl bir geometriye sahip olacağı kontrol edilemez, dolayısıyla genellikle keskin kenarlara sahip olan kaynak bölgeleri, membrana temas ettiği noktalarda basıncında etkisiyle kırılmalara neden olabilir. Bir hücrede meydana gelecek kırılma tüm stağın performansını etkiler. Her bir hücre için en az güç üreten hücrenin performansına eşit değerler geçerli olur ve çoklu staktan alınan toplam güç bu değerlerin toplamıyla sınırlı kalır.

## 2.2 Deneysel parametreler

Yakıt pili hücresinin teste hazır hale gelmesi için yapılan düzenlemeler önemlidir, temel parametreler sıcaklık, zaman ve basınçtır. Ayrıca azot gazını kullanılarak stak içindeki organik bileşiklerin uzaklaştırılması performansı artırmak ve kararlı bir çalışma rejimi elde etmek için gereklidir. Hücreden akım çekilmeye başlanması ile test sonuçlarının alınması arasında geçen süre performans sonuçlarını etkileyen önemli bir parametredir. Her bir deney için çalışma süresi 1 saat olarak uygulanmıştır. Deneylerin hazırlık sürecinde kullanılan sıcaklık ve zaman değerleri Şekil 2.3'te görülmektedir.

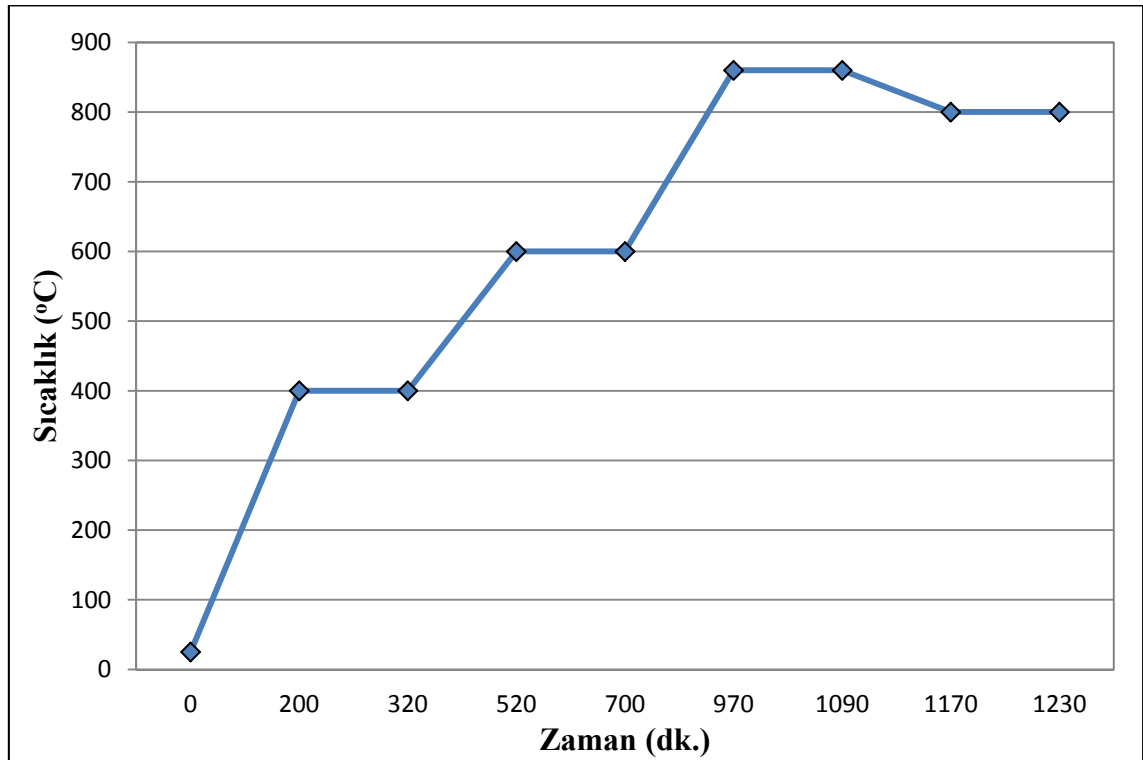


Şekil 2.3. Tekli stak için sıcaklık zaman grafiği

Fırın sıcaklığı 400 °C olduğunda azot gazı test istasyonu vasıtasıyla interkonektör girişlerinden verilmeye başlanarak organik bileşiklerin uzaklaşması sağlanmıştır. Bu sıcaklıkta stak içinde sızdırmazlığın sağlanması için basınç artırılmıştır. Sıcaklık 700 °C olduktan sonra anot girişinden hidrojen, katot girişinden oksijen verilmiştir. Fırın sıcaklığı 800 °C olduktan sonra test istasyonu kullanılarak yakıt pilinden akım çekilmeye başlanmıştır. Bir saat yük altında çalışan tekli stağın akım-güç-voltaj değerleri alınmıştır.

Tekli veya çoklu stak performansları alınırken, interkonektör yüzeyleri, akım toplayıcı elekler ve MEG arasında yeterli kontağın sağlanması için basınç kademeli olarak artırılmıştır. Fazla basınç membran grubuna zarar verecek veya gaz difüzyon direncini artırarak performans kaybı oluşturacaktır. Bunun yanı sıra aşırı basınç yüksek sıcaklıklarda çalışan interkonektörler üzerinde deformasyona sebep olabilecektir.

Çoklu stak deneylerinde sinterlemenin yapılması işlem adımlarını ve kullanılan parametrelerin değerlerini değiştirmiştir. Şekil 2.4'te çoklu stak deneyleri yapılırken kullanılan sıcaklık ve zaman değerleri verilmiştir.



Şekil 2.4. Çoklu stak için sıcaklık zaman grafiği

Grafikte sıcaklığın 800 °C olduğu bölgeye kadar olan işlemler sinterlemenin gerçekleşmesi için yapılmıştır. 800 °C sıcaklığa düşüldükten sonra performans değerleri alınmaya başlanmıştır. Sinterleme işlemi süresince 1 °C sıcaklık artması yaklaşık 1 dakikada gerçekleştirilmiştir.

### **2.3 Yapılan Değişiklikler ve Gerekçeleri**

Yapılan deneylerde farklı elek yapıları düz kanallı interkonektörlerle kullanılmıştır. Böylece elek yapılarının, KOYP tekli stak performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hem kanallı hem de kanalsız geometriye sahip interkonektörlerin punta kaynaklı testleri de yapılmıştır. Çünkü punta kaynağı performans sonuçlarını artırmaktadır. Ayrıca bu eleklerin kanalsız interkonektörlerle de testleri yapılmıştır, çünkü istenen performansı sağlayan kanalsız interkonektörlerin kullanımı bu plakaların imalatlarını kolaylaştıracak, işçiliği, üretim hatalarını ve böylece KOYP üretim maliyetlerini düşürecektir.

### **2.4 Araştırmanın Ölçme Değerlendirme Yöntemleri**

Kanal tasarımları ve hem akışı dağıtmak hem de akımı toplamak için kullanılan elek konfigürasyonlarının Akım-Güç-Voltaj değerleri alınarak performans testleri yapılmış ve yapılan değişikliklerin sonuçlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Yapılan deneylerde anot tarafında kullanılan; kanal geometrisi, elek, kontak pastası kullanımı, punta kaynağı uygulanması eşleşmeleri Çizelge 2.1 ile verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** KOYP tekli stak eşleşmeleri

	ANOT	KATOT
Deney 1	Kanallı	Kanallı
	GNE	KE
	NiO pasta	LSM pasta
Deney 2	Kanallı	Standart kanal
	İÖNE	KE
	NiO pasta	LSM pasta
Deney 3	Kanallı	Standart kanal
	KÖNE	KE
	NiO pasta	LSM pasta
Deney 4	Kanallı	Standart kanal
	KÖNE-Puntalı	KE
	NiO pasta	LSM pasta
Deney 5	Kanallı	Standart kanal
	Elek yok	KE
	NiO pasta	LSM pasta
Deney 6	Kanalsız	Standart kanal
	GNE	KE
	NiO pasta	LSM pasta
Deney 7	Kanalsız	Standart kanal
	İÖNE	KE
	NiO pasta	LSM pasta
Deney 8	Kanalsız	Standart kanal
	KÖNE	KE
	NiO pasta	LSM pasta
Deney 9	Kanalsız	Standart kanal
	KÖNE-Puntalı	KE
	NiO pasta	LSM pasta

## BÖLÜM III

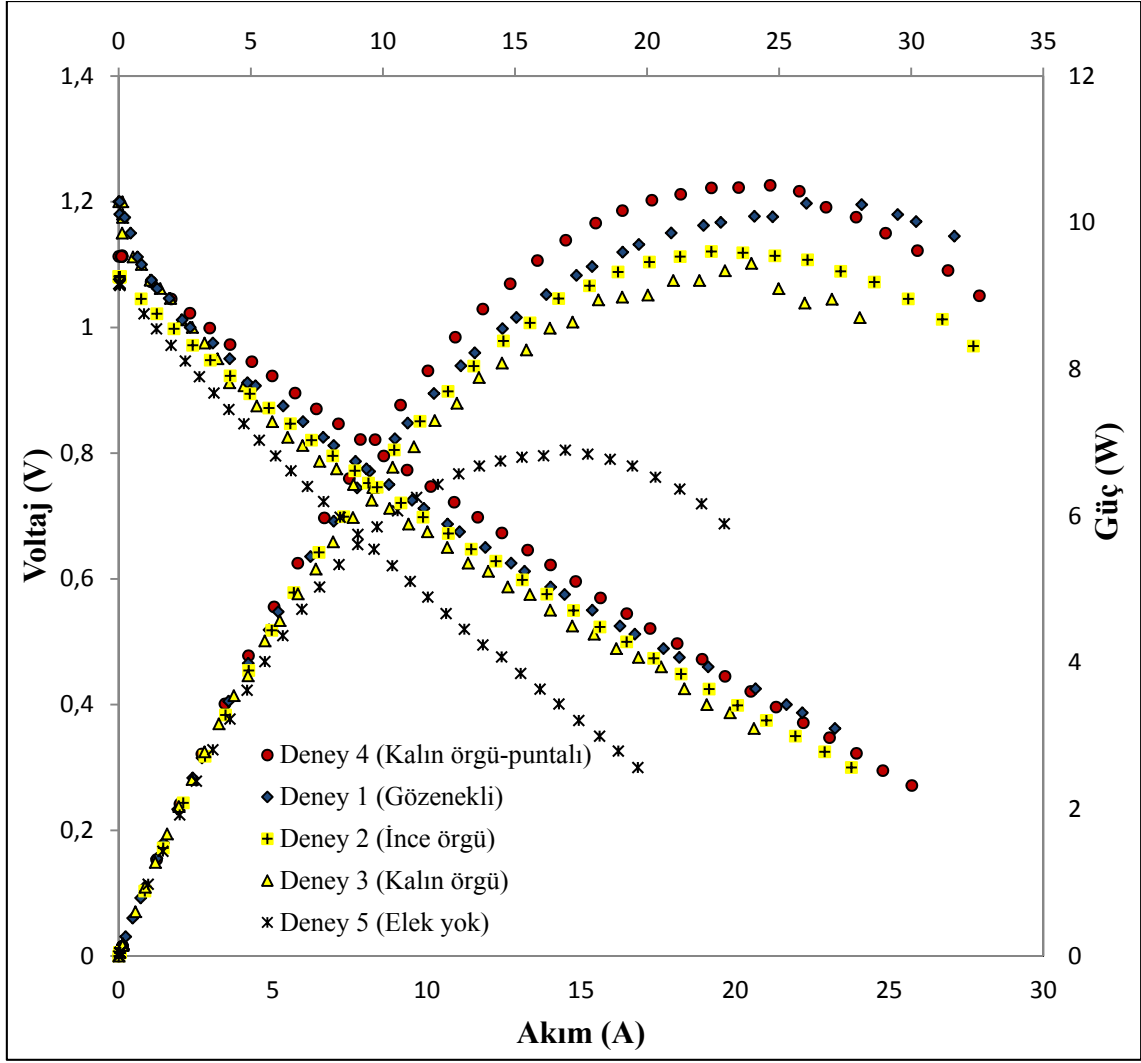
### BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu tez kapsamında öncelikle tekli stak deneylerinde kullanılacak elek ve interkonektör eşleşmeleri belirlenmiştir. Daha sonra her bir konfigürasyon için test düzeneği hazırlanmış ve aynı şartlar altında çalışan deneylerin verileri alınmıştır. Böylece elde edilen verilerden Akım-Güç, Akım-Voltaj ve empedans grafikleri oluşturulmuştur. Performans sonuçları ve empedans ölçümleri dikkate alınarak, yapılan deneyler yorumlanmıştır.

#### 3.1 Kanallı Tasarımda Elek Performansları

Kanallı interkonektör geometrisi üzerinde gözenekli nikel elek (GNE), ince örgülü nikel elek (İÖNE), kalın örgülü nikel elek (KÖNE) ve kanal üzerine puntalanmış kalın örgü nikel elek (PKÖNE) performans testleri yapılmıştır. Ayrıca kanallı geometri, anot kısmında herhangi bir elek kullanılmadan test edilmiştir. Şekil 3.1 ile deneyleri yapılan tekli stak için Akım-Voltaj ve Akım-Güç eğrilerini gösterilmektedir. Birinci ekseninde yer alan Akım-Voltaj eğrisi devreden akım çekilmediği durumdaki açık devre voltajı (ADV) ile başlayarak, devreden çekilen akıma göre potansiyel değişimini, ikinci ekseninde yer alan Akım-Güç eğrisi ise akıma karşılık üretilen güç değerlerini göstermektedir. Kanalsız interkonektörlerde yapılan empedans ölçümleri ise Şekil 3.2’de verilmiştir. Empedans sonuçları, hücrelerin aktif alanıyla çarpılarak  $\Omega\text{cm}^2$  olarak gösterilmiştir. Tekli stak deneylerinde aktif alan  $16\text{ cm}^2$  olarak kabul edilmiştir.

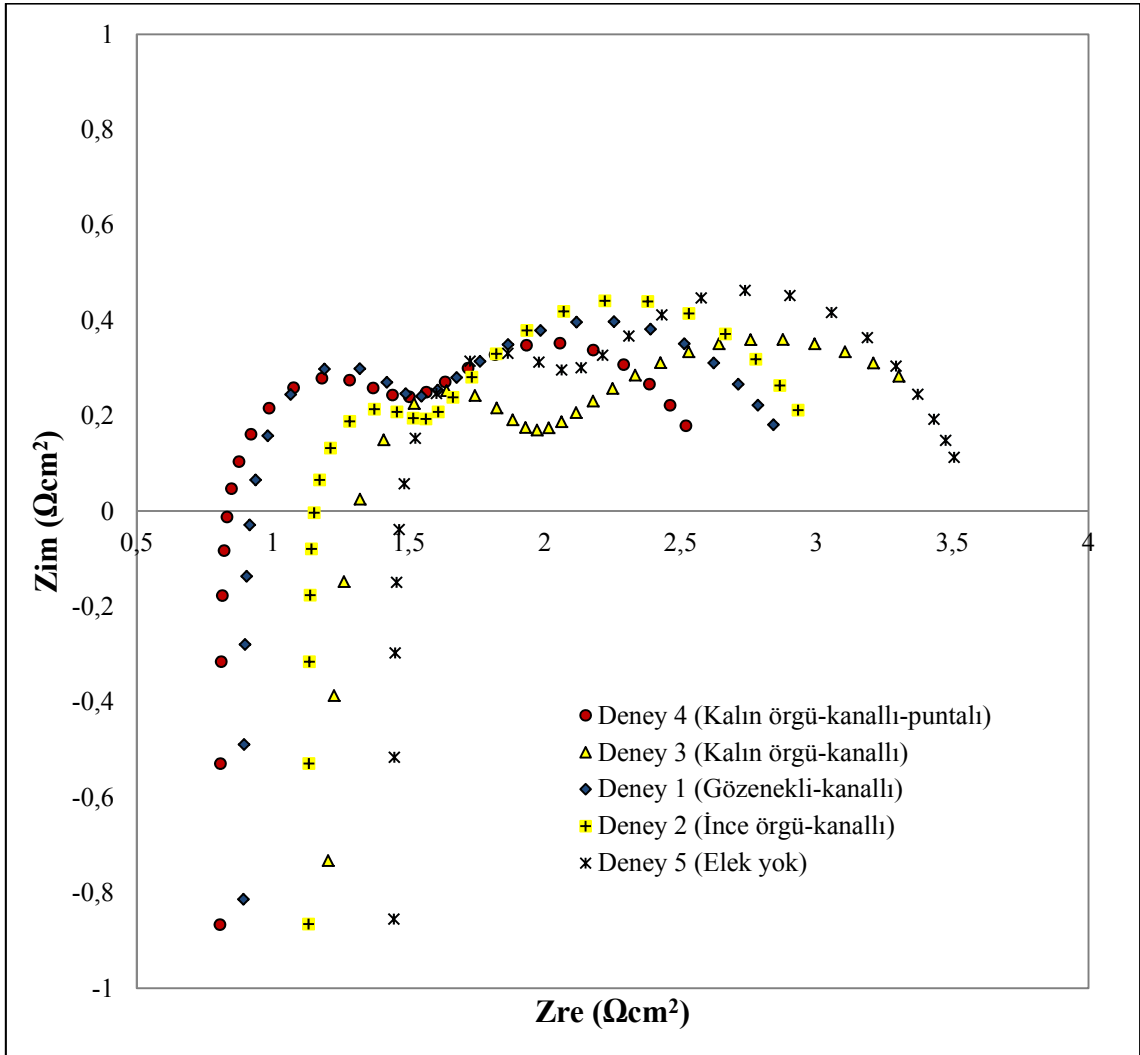
Gözenekli elek, kanal üzerine punta kaynağı yapılan kalın örgülü elek testinden sonra en iyi performansı göstermiştir (Şekil 3.1) ve Deney 1’in empedans grafiğinde yatay ekseni kestiği nokta ( $R_{\text{ohm}}$ ), yine Deney 4’ün sahip olduğu değerden sonra gelmektedir. Bu durum GNE’nin iyi bir akım toplayıcı olduğunun ayrıca kanallı tasarımda reaksiyona giren gazların dağıtımına engel olmadığına göstergesidir. Fakat iyi akım toplama ve gaz dağıtma özellikleri KOYP için ideal bir elek olma konusunda yeterli değildir. İdeal bir eleğin, KOYP gibi 40.000 saatten fazla çalışması istenen bir sistemde, yüksek performans sağlamasının yanı sıra uzun süreli çalışmalarda, basınç ve yüksek sıcaklıktan etkilenmemesi gerekir.



Şekil 3.1. Deney 1-2-3-4-5 Akım-Voltaj ve Akım-Güç eğrileri

İnce örgüli nikel elek (İÖNE), GNE'den daha düşük performans göstermiştir. Bu sonuç kontak direncinin etkisini göstermektedir ve eleğin hem elektrot hem de interkonektör ile olan kontak alanının azalmasından kaynaklanmaktadır. GNE'ye göre düşük performansa sahip olmasına karşın, İÖNE yapısal olarak GNE'den daha sağlamdır ve bu yüzden deformasyona uğramadan daha uzun süre kullanılabilir. Kalın örgü nikel elek (KÖNE), GNE ve İÖNE kadar membran yüzeyi ile interkonektör arasında kontak sağlayamadığından bu eleğin performansı diğer iki elekten düşük çıkmıştır. Bu durum elek geometrisinin dairesel, örgü boşluklarının daha büyük ve yapısının daha rijit olmasından kaynaklanmaktadır. Elektrot ve interkonektör yüzeyleri ile olan teğetsel kontak ve rijit yapıdaki pürüzlülük, kontak alanı azlığının sebeplerindedir. KÖNE'nin rijit yapıda olması, performansta düşüğe neden olsa bile önemli bir avantajdır ve bu

özelliği KÖNE'yi KOYP sistemlerinde kullanılmaya aday hale getirmektedir. Çünkü rijit yapı güç üretim sisteminin çalışma şartlarından etkilenmemektedir.



Şekil 3.2. Deney 1-2-3-4-5 empedans eğrileri

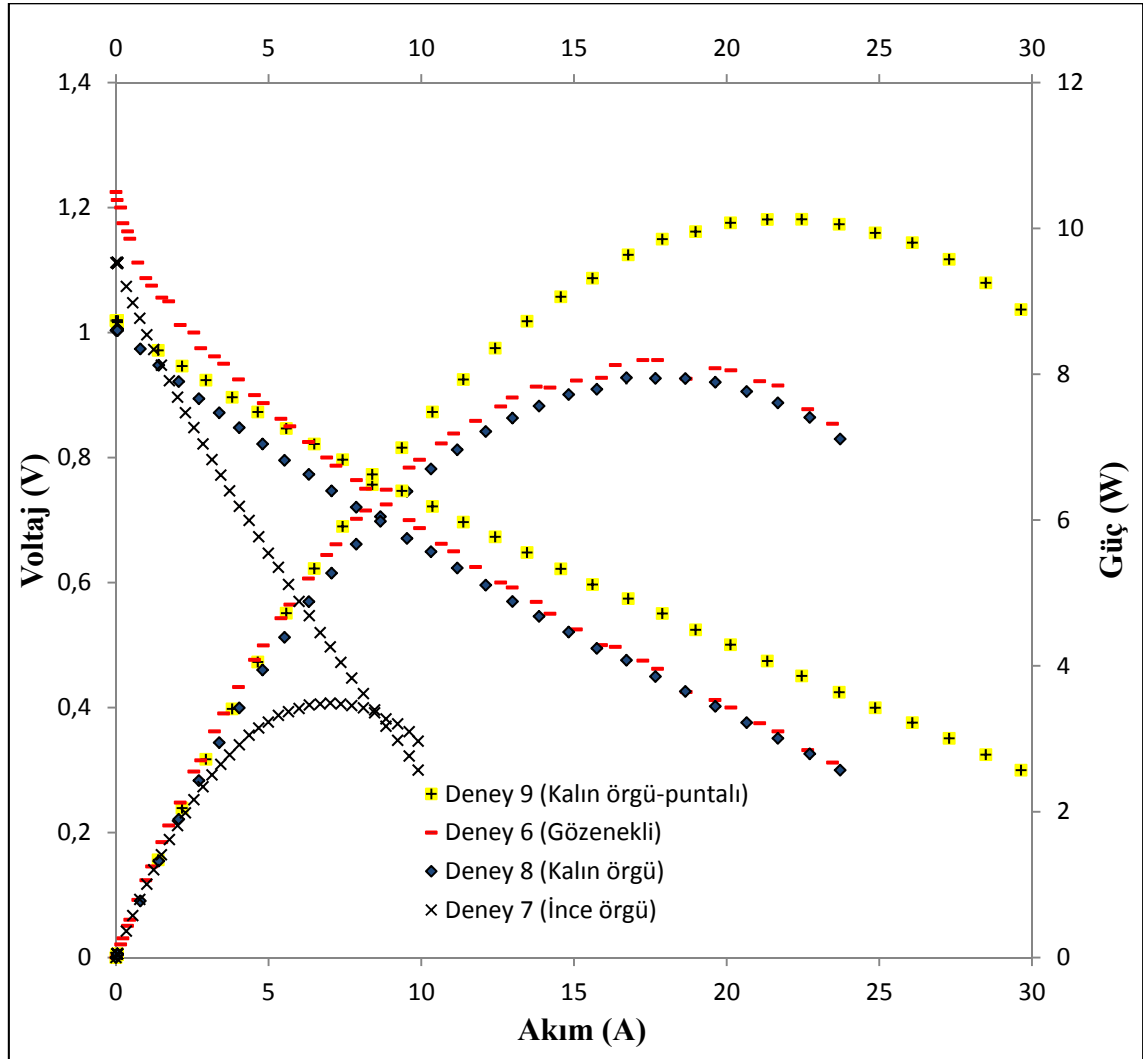
Şekil 3.1'de görüldüğü ve empedans sonuçlarından anlaşıldığı gibi, yapılan tüm kanallı interkonektör deneylerinde en düşük performansı elek kullanılmayan Deneysel 5 göstermiştir. Hidrojen gazının kolaylıkla dağıtıldığı bu deneyde, kontak direnci en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durum sadece reaksiyona girecek gazların dağıtılmasının iyi bir performans sağlamak için yeterli olmadığını ve aynı zamanda üretilen elektronların iyi bir iletken tarafından toplanması gerektiğini ispat etmiştir.

Deneysel 4'te kalın örgü nikel elek, interkonektör kaburgaları üzerine punta kaynağı yapılarak kaynak bölgeleri oluşturulmuştur, böylece kontak alanı artırılarak, kanallı

konektörlerin kullanıldığı deneyler içinde en düşük kontak direnci elde edilmiştir ve PKÖNE yapılan tüm deneyler içinde en yüksek performansı göstermiştir.

### 3.2 Kanalsız Tasarımda Elek Performansları

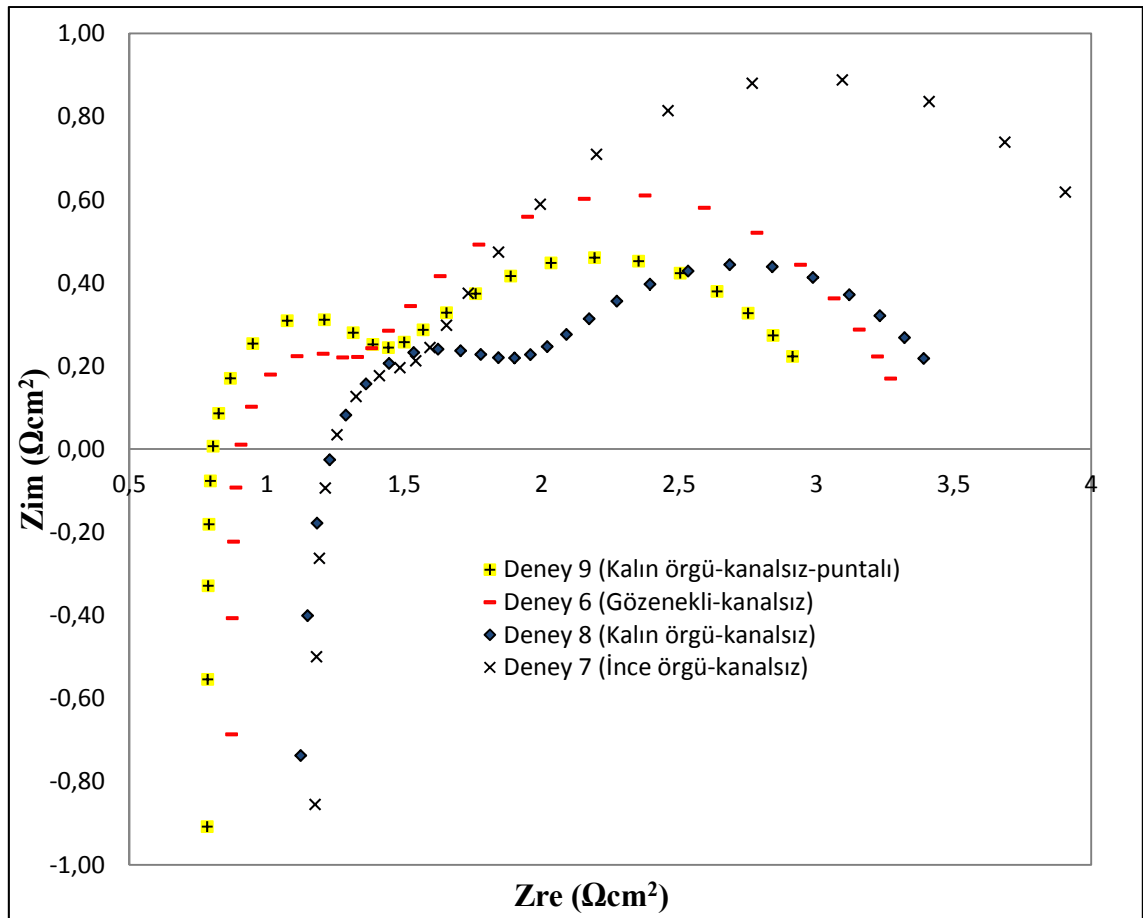
Katı oksit yakıt pilleri kullanımının yaygınlaşabilmesi için yapılması gereken önemli çalışmalardan biride üretim maliyetlerinin azaltılmasıdır. Üretim hatalarının, sürelerinin ve maliyetlerinin azaltılması için kanalsız geometriye sahip interkonektörler üzerinde deneyler yapılmıştır. Kanallı tasarımda kullanılan GNE, İÖNE, KÖNE ve PKÖNE yine kanalsız tasarım çalışmalarında kullanılarak performansları incelenmiştir. Şekil 3.3, Deney 6-7-8-9 sonucunda ulaşılan performans bulgularını ve Şekil 3.4 ise bu deneylerin empedans değerlerini göstermektedir.



Şekil 3.3. Deney 6-7-8-9 Akım-Voltaj ve Akım-Güç eğrileri

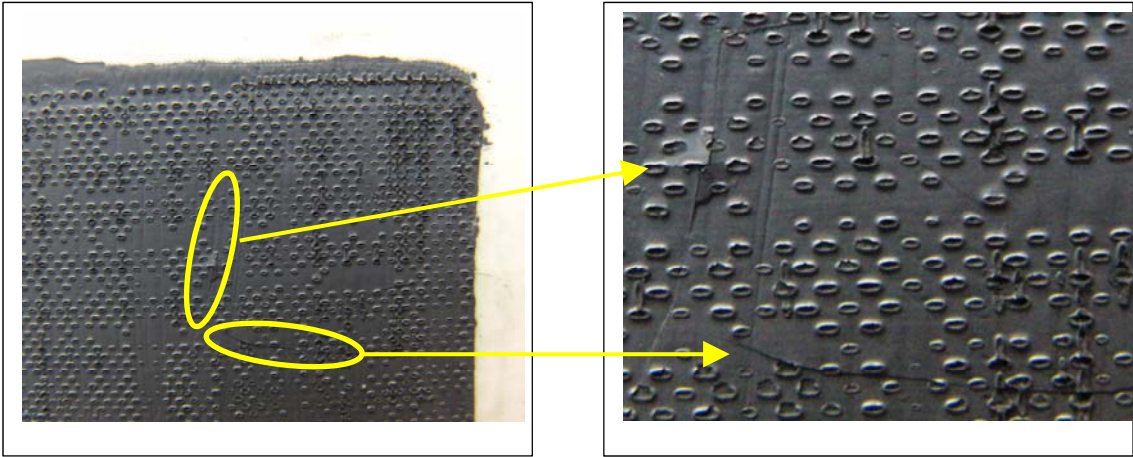
Şekil 3.2 incelendiğinde, ince örgü nikel elek ve kanalsız geometrinin kullanıldığı Deney 7, en düşük performansı göstermiştir. Bunun nedeni hem membran aktif yüzeyi ile iyi kontak sağlanamadığı için  $R_{ohm}$  artmış hem de kanalsız geometride İÖNE hidrojeni yeterince dağıtamadığından empedans grafiğindeki ikinci eğri büyümüştür. Dolayısı ile performansının düşük olması ve ayrıca punta kaynağı yapılmasına uygun olmayan fiziki yapısı İÖNE'nin kanalsız konektörlerde kullanılmasını engellemektedir.

GNE ve KÖNE'nin kullanıldığı sırasıyla Deney 6 ve Deney 8 performans ve empedans sonuçları birbirine yakındır. Empedans grafiğindeki ikinci eğri GNE için büyük çıkmıştır, çünkü gözenekli yapı hidrojen gazının hareketi için gerekli boşluğu ve gazın anot yüzeyine homojen olarak dağılmasını sağlayamamakta, bu yüzden konsantrasyon kayıpları artmaktadır. Akış dağıtma kabiliyetinin düşük olmasına karşın yüksek akım toplama yeteneğinden dolayı GÖNE, performans açısından kanalsız tasarım için KÖNE'den daha iyi bir seçim olduğu görülmüştür.



Şekil 3.4. Deney 6-7-8-9 empedans eğrileri

Deney 9’da KÖNE oyuk haldeki interkonektör yüzeyine puntalanmıştır. Akım-Güç eğrisinden, punta kaynağının performans üzerindeki önemli katkısı görülmekte ve kaynak yapılması ohmik direnci, tüm deneyler içerisinde minimum değere getirmiştir. Kaynak bölgeleri, mikro yapıda rahatlıkla görülebilen temas problemlerini gidererek üçlü faz bölgelerinden interkonektöre doğru olan elektron transferinin kolaylıkla yapılabilmesini sağlamış ve kontak alanını artırarak ohmik dirençlerin düşmesinde önemli rol oynamıştır. Ayrıca düz bölge üzerine kaynak işlemi kanallı tasarıma göre daha hatasız ve kolay yapılabilmektedir. Tüm bu sahip olduğu avantajları neticesinde PKÖNE kanalsız interkonektör tasarımları için en iyi performans sonucunu vermiştir. Buna rağmen punta yapılmış tüm deneylerden sonra membran üzerinde punta bölgelerinin deformasyona sebep olduğu görülmüştür. Kaynak bölgelerinin MEG üzerinde oluşturduğu deformasyon Fotoğraf 3.1’de görülmektedir.



**Fotoğraf 3.1.** Kaynak bölgelerinin oluşturduğu deformasyonların görünümü

Punta kaynağı, kısa süreli denemelerde performans üzerindeki tüm iyileştirici katkılarına rağmen, hücrenin uzun süreli çalışmasında bir tehdit oluşturmaktadır. Bu yüzden puntalama işleminin optimizasyonu yapılmalıdır.

### **3.3 Kanallı ve Kanalsız Tasarımda Elek Karşılaştırmaları**

Kanallı interkonektörle kullanıldığında KÖNE’den daha iyi performans gösteren İÖNE, kanalsız tasarımda kullanıldığında performansında %63 oranında ciddi bir düşüş görülmektedir (Şekil 3.3). Çünkü İÖNE ağ kalınlığı azdır, dolayısıyla kanalsız

tasarımda yakıt dar bir bölgede hareket etmek zorundadır, bu yüzden basınç ve konsantrasyon kayıpları artmaktadır.

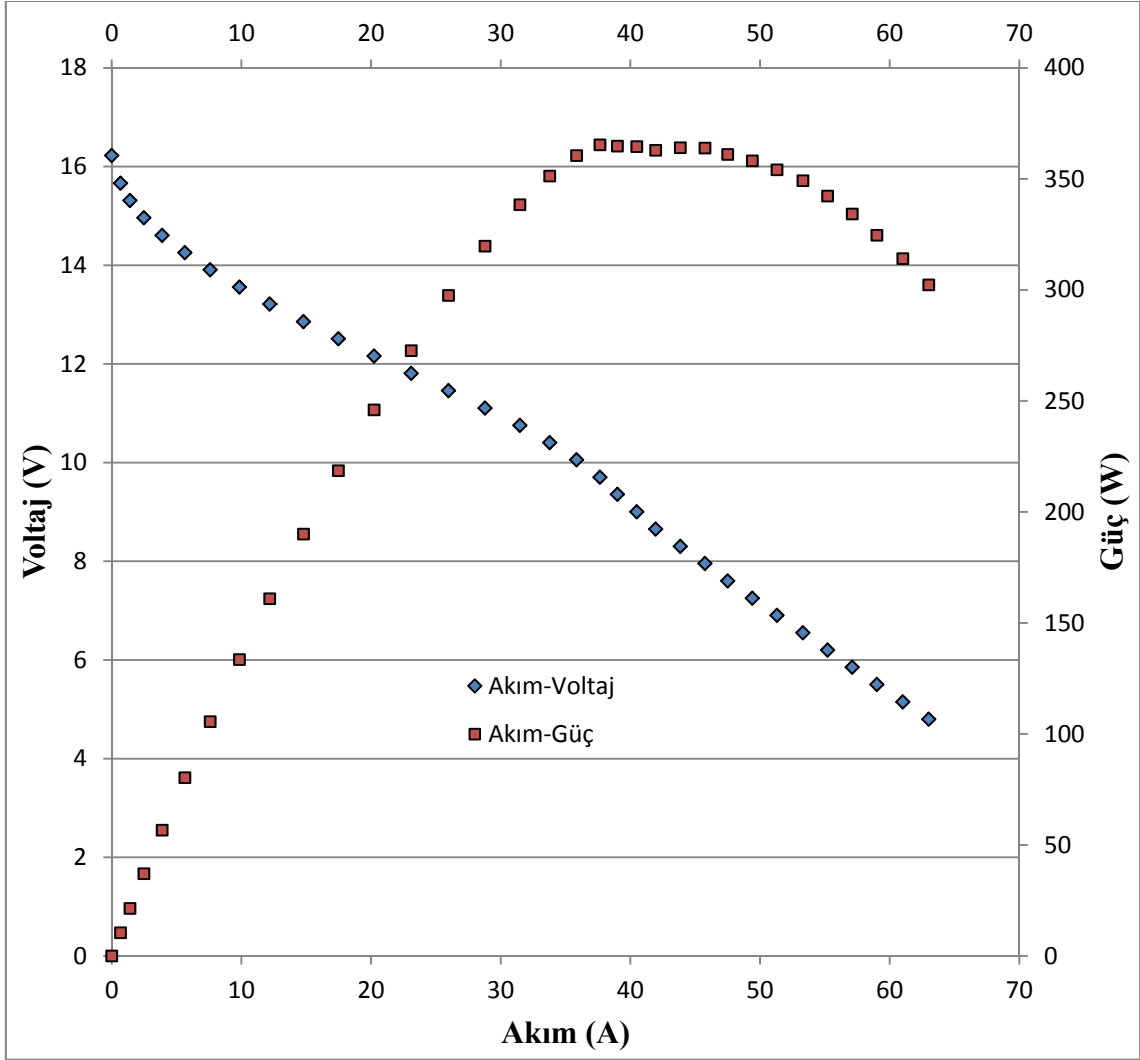
Gözenekli elek, kaburgaların olmadığı interkonektör yüzeyinde kullanıldığında performansında yaklaşık %20 oranında azalma olmuştur. Empedans grafiğinde ikinci eğrinin büyümesi bu durumu açıklamaktadır. Çünkü Deney 1’de hidrojen kanallarla yeterli miktarda ve homojen olarak hücreye taşınırken, Deney 6’da gözenekli elek üzerinden bu işlem tam olarak gerçekleşmemiştir.

Kalın örgü eleğin kullanıldığı puntasız deneylerde önce interkonektör yüzeyi NiO pasta ile boyanmış ve sonra elek bu bölge üzerine yerleştirilmiştir. Deney 4 ve 9’da ise önce elek interkonektör yüzeyine kaynaklanmış ve sonra kontak pastası hem interkonektör hem de elek yüzeyine sürülmüştür. Deney 4’ de ise performans sonuçları, kanallı konektörlerin gaz dağıtımına olan katkısından dolayı, en yakın sonuç olan ve kanalsız tasarıma kaynaklanmış olarak kullanılan KÖNE deneyinden %3’den fazla çıkmıştır. Bu sonuç kanalların hidrojen dağılımına olan katkısını göstermektedir. Bu farka rağmen kanalsız dizayn kullanımı işçilik, maliyet ve zaman gibi avantajlarından dolayı tercih edilebilir. Kanalsız interkonektörlerde kalın elek puntalanmadan kullanıldığında ise performansta %22 oranında önemli bir kayıp görülmüştür. Bu düşüş kaynak yapılmadığında ohmik dirençlerin büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Yine kanallı tasarımda punta yapılmadığında bu sebepten dolayı performansta %10 oranında azalma olduğu görülmüştür.

### **3.4 Çoklu Stak Performansı**

Çoklu stak, anot tarafı kanallı interkonektör-GNE-NiO pasta, katot tarafı kanallı interkonektör-KE-LSM pasta eşleşmeleri ile oluşturulmuştur. Yapılan stak 800 °C çalışma sıcaklığında test edilerek Akım-Voltaj-Güç değerleri alınmıştır. Çoklu stak deneyinden elde edilen Akım-Voltaj ve Akım-Güç eğrileri Şekil 3.6’da görülmektedir. Hücrelerin elektriksel olarak seri bağlanmasından dolayı herhangi bir hücreden alınan akım staktan çekilen akımı ve her bir hücrenin voltaj değerlerinin toplamı stak voltajını vermektedir. Grafiğin birinci eksenini çoklu stak deneyi sonucunda oluşan Akım-Voltaj eğrisini göstermektedir. Akımın henüz çekilmediği durum açık devre voltajı (ADV) olarak tarif edilir ve voltajın en yüksek olduğu değerdir. Açık devre voltajı (ADV) her

bir hücrenin sahip olduğu ADV'lerin toplamıdır ve yapılan deneyde 16 Volt değerindedir. KOYP hücrelerinin yüksek çalışma sıcaklığından dolayı yapılan stağın aktivasyon kayıpları çok düşük çıkmıştır. Grafiğin orta kısmı ohmik kayıpları, sağ tarafı ise konsantrasyon kayıplarını göstermektedir.



Şekil 3.6. Çoklu stak Akım-Voltaj ve Akım-Güç eğrileri

## BÖLÜM IV

### SONUÇLAR ve ÖNERİLER

#### 4.1 Sonuçlar

Tekli hücrelerden elde edilen veriler baz alınarak geliştirilen 10' lu staktan yaklaşık 400W güç alınmıştır. Her bir hücrenin aktif alanı  $81 \text{ cm}^2$ 'dir ve birim santimetrekare başına 0,49 W güç alınmıştır.

Deneylerden alınan sonuçlar en iyi akım toplayıcının gözenekli nikel elek olduğunu göstermiştir. Fakat kalın örgü nikel elek performansı, gözenekli elek performansına yakın olduğundan bu tip elekler üzerine yoğunlaşmış ve punta kaynağı yapılarak gözenekli eleğe kıyasla daha iyi bir performans alınmıştır. Gözenekli nikel elek sık ve yumuşak yapısı sebebiyle punta kaynağı yapılarak performans artırılmasına müsaade etmemektedir. Ayrıca kalın örgü nikel elek kullanılarak, kanalsız interkonektör geometrisinde yapılan çalışmalar iyi sonuçlar vermiştir. Bu bulgular daha kolay ve hatasız interkonektör plakaları üretilmesini sağlayacağından son derece önemlidir ve KOYP kullanımının yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri olan yüksek maliyetlerin azaltılmasında kritik rol oynayacaktır.

İnce örgülü nikel elek, gözenekli eleğe kıyasla daha iyi yapısal özellikler göstermektedir ve uzun süreli çalışmalar için daha uygundur. Fakat özellikle kanalsız interkonektör ile kullanıldığında istenen performansı sağlayamamaktadır.

Yapılan çoklu stakta kalın örgü nikel elek yerine gözenekli elek tercih edilmiştir. Çünkü kaynak bölgeleri membrana zarar verebilmektedir, bu yüzden punta kaynağı bölgelerinin optimizasyonu daha sonraki çalışmalarda ele alınması gereken önemli bir konudur. Bu sayede basınç ve yüksek sıcaklık altında gözenekli eleğe kıyasla daha iyi bir seçenek olan kalın örgü nikel elek, 40.000 saatin üzerinde çalışması istenen KOYP sistemleri için iyi bir alternatif olacaktır.

## 4.2 Öneriler

- İyi bir performans için eleklerin cinsi, kalınlığı ve eleklerin oryantasyonunun performans üzerinde etkileri araştırılmalıdır.
- Yapılacak çalışmalarda interkonnektör plakasına çeşitli ızgara açıklığına ve kalınlığına sahip ızgaralar punto kaynağı ile monte edilerek ve uygun ızgara açıklığı ve kalınlıkları belirlenmelidir.
- Elekler 90'ar derece döndürülerek birbirine monte edilerek uygun elek hazırlanmalıdır.
- Tekli stak için geometri ve ızgara sayıları belirlendikten sonra çalışma sıcaklığı, hava ve yakıt debilerine bağlı olarak performans belirlenmelidir.
- Farklı malzeme ve geometrik özelliklere sahip eleklerin, akım toplama ve gaz dağıtımı için değişik akış yönlerine sahip interkonnektörler ile kullanılabilirliğinin araştırılmalıdır.
- Deneysel çalışmalarda puntalama işlemi performansını artırmasına karşın membrana zarar verdiği için hassas işçilik gerektirmektedir. Dolayısı ile punta kaynağı optimizasyonu yapılmalıdır.
- Hücre içinde reaksiyon gazlarının homojen ve yeterli miktarda dağıtılmasının sağlanması için aktif alan girişinden önce manifoldlar kullanılmalıdır.
- Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, deneysel çalışmaların paralelinde teorik çalışmalar yapılmalıdır.
- Endüstriyel uygulamalar için KOYP sisteminde ejektör kullanılarak yakıt kullanım verimi artırılmalıdır.
- KOYP sistemleri geleceğin elektrik ve ısı üretim teknolojisi olarak kabul edildikleri için Üniversite-Sanayi işbirliği kapsamında ortak projeler yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

Atkins, P. W., Physical Chemistry, 5<sup>th</sup> ed., *Oxford University Press*, England, 1994.

Baker, B. S. and H. C. Maru, “A decade of progress”, *Fourth International Symposium on Carbonate Fuel Cell Technology*, USA, 14-27, 1997.

Buchkremer, H. P., *KFA SOFC-Industrieseminar*, KFA Jülich, German, 166, 1995.

Buchkremer, H. P., Diekmann, U., Haart, L. G. J. d., Kabs, H., Stimming, U. and Stöver, D., “Advances in the anode supported planar SOFC Technology”, *Proceedings of the 5th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells*, USA, 160-170, 1997.

Blum, L., Meulenber, W. A., Nabielek, H. and Steinberger-Wilckens, R., “Worldwide SOFC Technology Overview and Benchmark”, *International Journal of Applied Ceramic Technology* 6, 482-492, 2005.

Carrette, L., Friedrich, K.A. and Stimming, U., “Fuel Cells-Fundamentals and Applications”, *Fuel Cells* 1, 5-39, 2001.

Doshi, R., Richards V.L. and Krumpelt, M., “Cathodes for ceria-based fuel cells, *Proceedings of the 5th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells*, USA, 379-384, 1997.

Doshi, R., Richards, V.L., Carter, j.D., Wang X. and Krumpelt, M., “Development of Solid-Oxide Fuel Cells That Operate at 500°C”, *Journal of The Electrochemical Society* 146, 1273-1278, 1999.

Fujii, H., “Status of National Project for SOFC Development in Japan”, *Solid Oxide Fuel Cells Meeting*, Palm Springs, FL, USA, 2002.

Fujii, H., and T. Ninomiya, “Status of National Project for SOFC Development in Japan,” *Proceedings of the European Solid Oxide Fuel Cell Forum*, Lucerne, Switzerland, 2002.

Gazzarri, J.I., Kesler, O., “Short-stack modeling of degradation in solid oxide fuel cells: Part I. Contact degradation” *Journal of Power Sources* 176, 138–154, 2008.

Haart, L.G.J., Vinke, I.C., Janke, A., Ringel, H., Tietz, F, *Solid Oxide Fuel Cells*,

Huang, C.M., Shy, S.S., Lee, C.H., “On flow uniformity in various interconnects and its influence to cell performance of planar SOFC”, *Journal of Power Sources* 183, 205-213, 2008.

Huijsmans, J. P. P., van Berkel F. P. F. and Christie, G. M., “Intermediate temperature SOFC – a promise for the 21st century”, *Journal of Power Sources*, 107-110, 1998.

Kabs, H., “Materials and Processes for Advanced Technology”, *Egyptian–German Workshop*, Cairo, Egyptian, 2002.

Kornely, M., Leonidea, A., Webera, A. and Ivers-Tiffée, A., “Performance limiting factors in anode-supported cells originating from metallic interconnector design” *Journal of Power Sources* 196, 7209-7216, 2011

Kyocera, <http://global.kyocera.com/news/2003/1205.html>., 2003

Lang, M., Henne, R., Schiller G. and Wagner, N., “Production and characterization of vacuum plasmasprayed anodes for solid oxide fuel cells”, *Proceedings of the 5th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells*, USA, 461-472, 1997.

Mench, M.M., Fuel Cell Engines, *Wiley*, New Jersey, 2007.

Momma, A., Kaga, Y., Fujii, K. Hohjyo, K., Kanazawa M. and Okuo, T., “High performance of tubular type SOFC using metallic system components”, *Proceedings of the 5th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells*, USA, 311-320, 1997.

Recknagle, K. P., Williford, R. E., Chick, L.A., Rector, D.R. and Khaleel, M. A., “Three-dimensional thermo-fluid electrochemical modeling of planar SOFC stacks”, *Journal of Power Sources* 113, 109-114, 2003.

Shibuya, Y. and Nagamoto, H., “Structure and performance of composite cathode”, *Proceedings of the 5th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells*, USA, 510-518, 1997.

Singhal, S. C. and Kendall, K., High Temperature Solid Oxide Fuel Cells, *Elsevier*, Kidlington Oxford, 2003.

Steele, B. C. H., “Ceramic oxygen ion conductors”, *The Institute of Materials*, England, 1996.

Stöver D. and Bram, D., *Forschungszentrum Jülich*, Jülich, Germany, 91–101, 2002.

Tanner, C.W., Virkar, A.V., “A simple model for interconnect design of planar solid oxide fuel cells”, *Journal of Power Sources* 113, 44–56, 2003

Tietz, F., Haanappel, V.A.C., Mai, A., Mertens, J., Stöver, D., “Performance of LSCF cathodes in cell tests”, *Journal of Power Sources* 156, 20–22, 2006.

University of Cambridge, “High temperature cells”, [http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/high\\_temp\\_sofc.php](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/high_temp_sofc.php), 2013

U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, Fuel Cell Handbook, 2<sup>nd</sup> ed., *DOE*, West Virginia, 2004.

Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solid\\_oxide\\_fuel\\_cell.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solid_oxide_fuel_cell.svg), 2013

Yakabe, H., Ogiwara, T., Hishinuma, M., Yasuda, I., “3-D model calculation for planar SOFC”, *Journal of Power Sources* 102, 144-154, 2001.

Yuan, X-Z., Song, C., Wang, H., Zhang, J., Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells, *Springer*, London, 2010.

Zhu, B., Yang, X.T., Xu, J., Zhu, Z.G., Ji, S.J., Sun, M.T., Sun, J.C., “Innovative low temperature SOFCs and advanced materials”, *J. Power Sources*, 118, 47-53, 2003

## ÖZGEÇMİŞ

Murat Canavar 07.01.1980 tarihinde İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 1997 yılında girdiği Uludağ Üniversitesi Bilgisayar Destekli Tasarım Bölümü'nden Haziran 1999 tarihinde tekniker unvanı alarak mezun oldu. 1999 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Haziran 2003 tarihinde mühendis unvanı alarak mezun oldu. 2006-2012 yılları arasında Uludağ Üniversitesi'nde makine kontrol mühendisi olarak çalıştı. 2010-2011 eğitim yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2012-2013 eğitim yılı güz döneminde Düzce Üniversitesi'ne araştırma görevlisi olarak atandı. Termodinamik bilim dalında akademik çalışmalarını sürdürmektedir.

