



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

ELEKTROKİMYASAL HİDROJEN KOMPRESÖR YIĞINI
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

NEBİ YELEGEN

Haziran 2014

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

ELEKTROKİMYASAL HİDROJEN KOMPRESÖR YIĞINI
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

NEBİ YELEGEN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk SELAMET

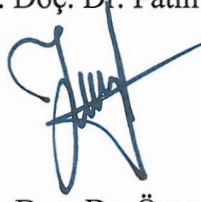
Haziran 2014

Nebi YELEGEN tarafından Yrd. Doç Dr. Ömer Faruk SELAMET danışmanlığında hazırlanan “ELEKTROKİMYASAL HİDROJEN KOMPRESÖR YİĞİNİ GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Ünal ŞEN, Abdullah Gül Üniversitesi



Üye : Yrd. Doç. Dr. Fatih AY, Niğde Üniversitesi



Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk SELAMET, Niğde Üniversitesi



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../20... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun .../.../20... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT

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.



Nebi YELEGEN

ÖZET

ELEKTROKİMYASAL HİDROJEN KOMPRESÖR YIĞINI GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

YELEGEN, Nebi

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk Selamet

Haziran 2014, 39 sayfa

Elektrokimyasal hidrojen kompresörleri (EHK) hidrojeni elektrokimyasal metotla basınçlandırabilen cihazlardır. EHK, yüksek verimle, sessiz ve titreşimsiz çalışmaları ile ön plana çıkmaktadır. Modüler yapıları nedeniyle dakikada birkaç mililitreden oldukça yüksek debilere kadar EHK geliştirilebilmektedir. Elektrokimyasal kompresörlerinin bir başka kullanım alanı da düşük saflıktaki hidrojeni basınçlandırırken saflaştırmasıdır. Bu tez çalışmasında, 50 bar diferansiyel basınçta çalışabilen EHK hücresi ve yığını geliştirilmiştir. Tasarımı yapılan EHK bileşenlerinin sızdırmazlığı sağlanarak montajlanmış, hücre ve yığın performansına etki eden çalışma akım, voltaj, hidrojen debisi ve basıncı gibi parametreler incelenmiştir. Hücre ve yığında yüksek akım yoğunluklarında voltaj dalgalanmalarının fazla olması nedeniyle $0,5 \text{ A/cm}^2$ 'de çalıştırılması, hücre bileşenlerinin anodik potansiyelden zarar görmemesi için de çalışma voltajının $0,4 \text{ V}$ 'u geçmemesi uygun görülmüştür. EHK hücresinde hidrojenin aktif alana homojen bir şekilde dağılması ve yüksek verim için $0,6 \text{ lt/dk}$ 'lık debinin 3 hücreli yığın için ise $1,5 \text{ lt/dk}$ 'lık debinin yeterli olduğu görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Elektrokimyasal hidrojen kompresörü (EHK), elektrokimyasal hidrojen kompresör yığını, hidrojen basınçlandırma, hidrojen saflaştırma, elektrokimyasal karakterizasyon.

SUMMARY

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF ELECTROCHEMICAL HYDROGEN COMPRESSOR STACK

YELEGEN, Nebi

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Ömer Faruk Selamet

June 2014, 39 pages

Electrochemical hydrogen compressors (EHC) are the device that can compress hydrogen by electrochemical methods. EHC's has drawn attention due to the higher efficiencies, noiseless and vibration free operation. Since, they have modular stack structure, it is possible to manufacture EHC from a few milliliters per minutes to any flow rates required. Electrochemical compressor can be employed not only for compressing hydrogen but also purification of hydrogen from impurities. In this thesis, electrochemical hydrogen compressor cell and 3-cell stack which can operate under 50 bar pressure difference are developed. The cell and stack are designed and manufacturing in house. The effect of operating parameters such as current density, voltage, hydrogen supply flow rate and pressure on the performance are investigated. Voltage fluctuations are found at high current densities, then 0.5 A/cm^2 is decided to be operational current density. Operating cell voltage is decided not to exceed 0.4 V to protect the cell components from anodic potential. Hydrogen supply flow rate of 0.6 liter/minute for the single cell and 1.5 liter/minute for the 3-cell stack are found to be sufficient to obtain homogeneous current distribution and higher efficiency.

Keywords: Electrochemical hydrogen compressor (EHC), electrochemical hydrogen compressor stack, compressing hydrogen, hydrogen purification, electrochemical characterization.

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, mekanik kompresörlere ihtiyaç duymadan elektrokimyasal yöntemlerle hidrojeni basınçlandıran aynı zamanda saflaştıran tek hücreli ve üç hücreden oluşan iki adet elektrokimyasal hidrojen kompresörü geliştirilerek performansına etki eden parametreler deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu EHK hücre ve yığınının çalışması için gerekli optimum akım, voltaj ve hidrojen debisi gibi parametreler belirlenerek, yüksek diferansiyel basınç farkları için sızdırmazlık stratejileri belirlenmiştir.

Yüksek lisans eğitimim süresince çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk SELAMET'e şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım esnasında bilgi ve tecrübelerine başvurduğum değerli hocam Prof. Dr. Mahmut D. MAT ve Doç. Dr. Yüksel KAPLAN'a ve emeklerini esirgemeyen Adem ÇİÇEK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımda tecrübe ve yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım, Arş. Gör. Ömer GENÇ'e ve Proje Asistanı Said ERGÖKTAŞ'a teşekkür ederim.

Bu tezi, tüm öğrenim hayatım boyunca büyük bir özveri ile maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen, desteklerini sürekli üzerimde hissettiğim babam, annem, kardeşlerim ve eşime ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Hidrojen Enerjisi ve Kullanım Alanları	2
1.2 Hidrojen Basınçlandırma Yöntemleri	3
1.3 Literatür Taraması	3
BÖLÜM II TEORİK ESASLAR	9
2.1 EHK Çalışma Prensibi	9
2.2 EHK Hücre Elemanları	11
2.2.1 Membran elektrot grubu	12
2.2.2 Elek grubu ve gözenekli titanyum	13
2.2.3 Akım dağıtma plakası	14
2.2.4 Sızdırmazlık elemanları	14
2.2.5 Sıkıştırma plakası, yalıtkan plaka ve son plaka	15
2.3 Çevre Elemanları	15
BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMALAR	17
3.1 EHK Tekli Hücre Tasarımı	17
3.2 EHK Yığın Tasarımı	18
3.3 Deneysel Düzeneğin Kurulması	20
BÖLÜM IV DENEYSEL SONUÇLAR	23
4.1 Tek Hücreli EHK Deney Sonuçları	23
4.1.1 Hidrojen debisinin hücre performansına etkisi	23

4.1.2 Basıncın hücre performansına etkisi	27
4.2 Üç Hücreli EHK Yığımı Deney Sonuçları.....	29
4.2.1 Debinin yığın performansına etkisi.....	29
4.2.2 Basıncın yığın performansına etkisi.....	33
BÖLÜM V SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	36
KAYNAKLAR	37
ÖZ GEÇMİŞ.....	39

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Mekanik ve elektrokimyasal hidrojen kompresörünün karşılaştırılması (Rohland ve ark, 1998)	4
Şekil 1.2. Sıcaklık ve basınç farkı ile hidrojen geri difüzyon hızı değişimi (Rohland vd., 1998).....	5
Şekil 1.3. Farklı membranlar için hidrojen geri difüzyonu (Ströbel ve ark., 2002)	5
Şekil 1.4. Farklı membranlar için akım-voltaj karakteristikleri (Ströbel ve ark., 2002) ..	6
Şekil 1.5. Paralel kanallı (A) ve serpantinli (B) gaz difüzyon tabakaları (Casati ve ark, 2008).....	7
Şekil 2.1. EHK çalışma prensibi (Acar, 2012)	9
Şekil 2.2. EHK hücre elemanları	12
Şekil 3.1. EHK hücre tasarım bileşenleri.....	17
Şekil 3.2. EHK yığın tasarımı	19
Şekil 3.3. Deney düzeneği şematik görünümü	20
Şekil 4.1. 10 bar basınç altında debi etkisi	23
Şekil 4.2. 20 bar basınç altında debi etkisi	24
Şekil 4.3. 30 bar basınç altında debi etkisi	24
Şekil 4.4. 40 bar basınç altında debi etkisi	25
Şekil 4.5. 50 bar basınç altında debi etkisi	25
Şekil 4.6. 30 bar diferansiyel basınç ve 0,5 A/cm ² akım yoğunluğunda debi etkisi.....	26
Şekil 4.7. 0,2 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi	27
Şekil 4.8. 0,4 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi	28
Şekil 4.9. 0,6 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi	28
Şekil 4.10. 0,4 A/cm ² akım yoğunluğu ve 0,6 lt/dk debide basınç etkisi	29
Şekil 4.11. 10 bar basınçta debi etkisi	30
Şekil 4.12. 20 bar basınçta debi etkisi	30
Şekil 4.13. 30 bar basınçta debi etkisi	31
Şekil 4.14. 40 bar basınçta debi etkisi	31
Şekil 4.15. 50 bar basınçta debi etkisi	32
Şekil 4.16. 40 bar diferansiyel basınç ve 0,5 A/cm ² akım yoğunluğunda debi etkisi.....	32
Şekil 4.17. 0,5 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi	33

Şekil 4.18. 1 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi	34
Şekil 4.19. 1.5 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi	34
Şekil 4.20. 1,5 lt/dk debi ve 0,4 A/cm ² akım yoğunluğunda basınç etkisi	35

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Membran elektrot grubu.....	13
Fotoğraf 2.2. Titanyum elek grubu (a) ve gözenekli titanyum levha (b).....	14
Fotoğraf 2.3. Sıkıştırma plakası, yalıtkan plaka ve son plaka	15
Fotoğraf 3.1. İmalatı yapılan EHK bileşenlerinin montaj hali	18
Fotoğraf 3.2. Üç hücreli EHK yığın montajı	19
Fotoğraf 3.3. EHK test kabini	21
Fotoğraf 3.4. Deneylerde kullanılan tek hücreli EHK	22
Fotoğraf 3.5. Performans testlerinde kullanılan üç hücreli EHK yığını	22

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
H^+	Hidrojen iyonu
H_2	Hidrojen atomu
e^-	Elektron
E	Potansiyel fark
R	İdeal gaz sabiti
F	Faraday sabiti

Kısaltmalar	Açıklama
EHK	Elektrokimyasal hidrojen kompresörü
PEM	Proton exchange membrane
MEG	Membran elektrot grubu

BÖLÜM I

GİRİŞ

Gelişen teknoloji, sanayileşme, nüfus artışı gibi etkenlerden dolayı enerjiye olan ihtiyaç her geçen yıl önemli ölçüde artmaktadır. Dünyada üretilen enerjide yüzde 85 oranında petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil kaynaklı yakıtlar kullanılmaktadır. Dünya çapında bilinen üretilebilir fosil yakıt rezervleri ise kömürde 216 yıl, doğalgazda 62 yıl ve petrolde ise 40 yıl yetecek miktardadır. Azalan fosil yakıt kaynakları, özellikle petrol ve doğalgazda artan enerji maliyetleri ve de kullanımı sonucu ortaya çıkan karbondioksit gazının atmosferde tabaka oluşturarak sera etkisine neden olması gibi nedenler enerji ihtiyacı için yenilenebilir kaynaklara olan ilgiyi artırmıştır. Ayrıca fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan doğal dengenin bozulması küresel ısınma sonucu denizlerin yükselmesi, asit yağmurları ve ozon tabakasının koruyucu etkisinin ortadan kalkması gibi olaylar şiddetini artırarak toplum sağlığını olumsuz yönde etkileyecektir.

Günümüzdeki enerji ihtiyacının karşılanmasında güneş, rüzgâr, hidrojen, biokütle, hidrolik, dalga ve gelgit gibi alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının üzerinde durulmaktadır. Böylece hem dünya çapında fosil kaynakların kullanımı sonucu çevreye vermiş olduğu zararlar azaltılmış olup hem de sürdürülebilir doğal kaynaklar bakımından zengin olan ülkemizin dışa bağımlılığını büyük ölçüde azaltarak ekonomik ve siyasal gelişmelerine hız kazandırılmış olunacaktır.

Alternatif enerji kaynaklarından beklenen karakteristikler; yüksek ısıl değere sahip olma, çevreyle dost olma, insan sağlığına zararı olmama, farklı enerji dönüştürücülerde kullanılabilme ve düşük maliyettir (Oral, 2005). Bu anlamda dünyada en çok bulunan hidrojenle ilgili çalışmalar hız kazanmış; üretimi, depolanması, taşınması ve yakıt hücrelerinde kullanılması gibi konularda yapılan çalışmalar ülkemizde de desteklenmektedir. Hidrojen birincil enerji kaynağı olmayıp bir başka enerji tüketilerek elde edilen bir enerji taşıyıcısıdır. Global enerji ekonomisinin itici gücü olarak görülen hidrojen teknolojileri ve yakıt hücresi teknolojilerinde geleceğin enerji alternatifleri olarak olumlu gelişmeler kat edilmiş, bu konu ile ilgili çalışmalara gösterilen ilgi artmıştır.

1.1 Hidrojen Enerjisi ve Kullanım Alanları

Hidrojen, enerji sistemleri içerisinde enerji aktarıcısı, taşıyıcısı veya değiştiricisi görevlerini gören ideal bir ara elemandır. Ayrıca hidrojen, evrenin en basit ve en çok bulunan elementi olup, renksiz, kokusuz, havadan 14,4 kez daha hafif ve tamamen zehirsiz bir gazdır. 1500'lü yıllarda keşfedilen ve 1700'lü yıllarda yanma özelliğinin farkına varılan hidrojen enerjisi, bütün yakıtlar içerisinde birim kütlede en yüksek enerji içeriğine sahip bir gazdır (Kılıç, 2008).

Hidrojen doğadaki en basit atom yapısına sahip olup; üst ısıl değeri 140,9 MJ/kg, alt ısıl değeri 120,7 MJ/kg'dır. 1 kg hidrojen 2,1 kg doğalgaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Petrol yakıtlarına göre ortalama 1,33 kat daha verimli bir yakıttır. Çok kolay tepkimeye girdiğinden başka elementlerle bağ yaparak tabiatta bileşik halde bulunur. Su, kaya, petrol gibi ortamların ve bütün bitkisel, hayvansal yaşamın temelini oluşturan birçok organik bileşenin içinde de bulunmaktadır (Usta, 2010).

Geniş kullanım alanına sahip hidrojen; alevli yanma, doğrudan buhar üretimi, katalitik yanma, kimyasal dönüştürme ve elektrokimyasal dönüştürme uygulamalarında yakıt olarak kullanılabilir (TMMOB Enerji Raporu, 2006). Ulaşım, endüstri, ev ve sanayide kullanımı yeni olmayan hidrojen kullanım çeşitliliği 1970'li yıllarda fark edilmiştir. Hidrojenin taşınabilir ve depolanabilir olması oldukça geniş alanda kullanımına imkân vermektedir (Kılıç, 2008). Yaygın olarak suni gübre üretiminde, bitkisel ve hayvansal yağ üretiminde, petrol arıtım rafinelerinde, amonyak sentezinde, meteorolojide, kaynak yapımında, cam endüstrisinde, uzay araçlarında kullanılmaktadır (Görgün, 2006).

Günümüzde hidrojen enerjisinin ulaşım, sanayi, ev ve ofislerde yakıt olarak ve elektrik üretimi amacıyla yakıt pillerinde kullanılması alanındaki çalışmalar hızla artmaktadır. Taşıtlarda kullanılması yönünde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Hidrojenin birim ağırlık başına enerji kapasitesi çok yüksek olduğu için hidrojenle çalışan hava taşıtlarının daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olacağı ve menzillerinde de önemli artışların olacağı beklenmektedir (Kılıç, 2008).

1.2 Hidrojen Basınçlandırma Yöntemleri

Hidrojenin kütleli enerji yoğunluğu çok yüksek olmasına rağmen en hafif element olması nedeniyle atmosferik koşullarda hacimsel enerji yoğunluğu düşüktür. Bu nedenle pratik kullanımı için yüksek basınçlarda depolanması gerekmektedir. Hidrojenin basınçlandırılmasında genellikle mekanik diyafram kompresörler kullanılmaktadır. Mekanik kompresörlerle saf hidrojen basıncı yüksek değerlere çıkartılabilmektedir. Yüksek basınç gereken uygulamalarda çok fazla tercih edilmesine rağmen, 100kW'ın altında verimleri oldukça düşüktür. Ayrıca mekanik kompresörlerle hidrojen basınçlandırmanın bakım masrafları, titreşimli ve gürültülü çalışmaları, yağlamada meydana gelebilecek sızıntılardan dolayı hidrojenin kirlenmesi gibi olumsuzlukları vardır.

Yüksek basınç PEM (proton geçirgenli membran) elektroliz ile su, elektrik enerjisi kullanılarak hidrojen ve oksijen gazına ayrıştırılır. Üretilen hidrojen gazı kapalı bir sistemde biriktirilerek basınçlanması sağlanır. Böylece yüksek basınç PEM elektrolizörleri ile ek bir işlem yapılmadan basınçlı hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Ancak iki tehlikeli gazın bir arada yoğun bir şekilde bulunmasından ve özellikle yüksek basınçlardaki membran üzerinden difüzyon ile karşı hücreye geçişlerden dolayı hidrojen ve oksijenin karışarak yanma ve patlama riski vardır.

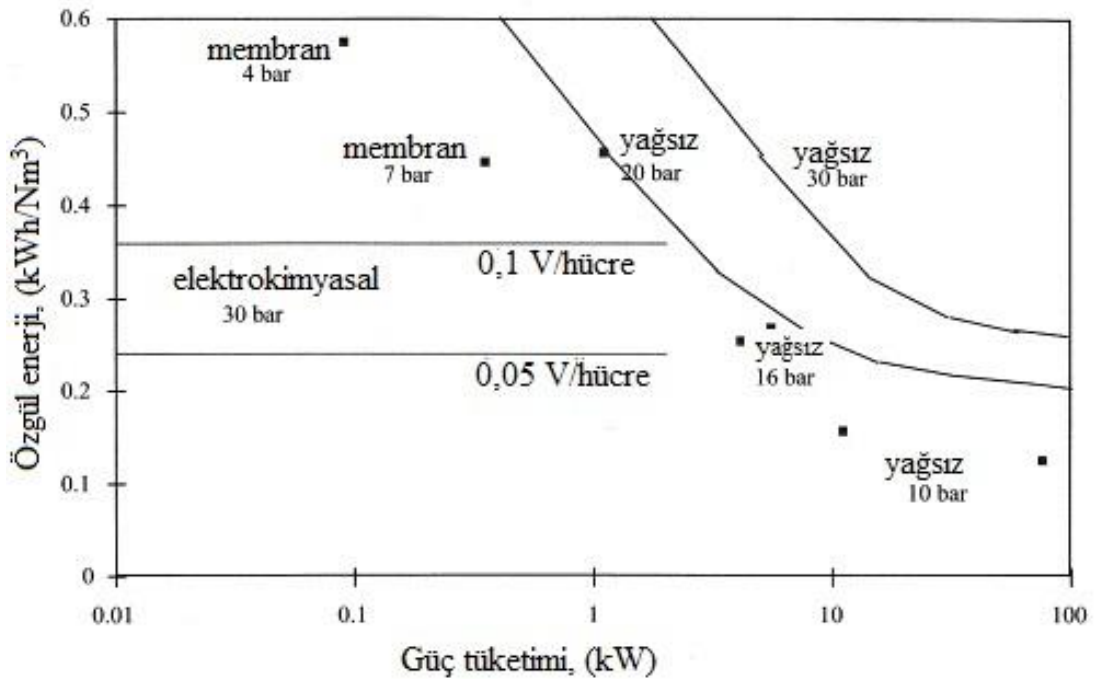
Elektrokimyasal hidrojen kompresörleri ise hidrojen gazını elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu basınçlandırabilen aynı zamanda da içinde yabancı maddeler bulunan hidrojeni saflaştırabilen sistemlerdir. Elektrokimyasal hidrojen kompresörleri sessiz, titreşimsiz, yüksek verimle güvenli bir şekilde çalışmaktadır. Yakıt pilleri gibi herhangi bir sistemde kullanılmış hidrojen gazlarını da saflaştırarak aynı zamanda basınçlandırması çok büyük avantaj sağlamaktadır.

1.3 Literatür Taraması

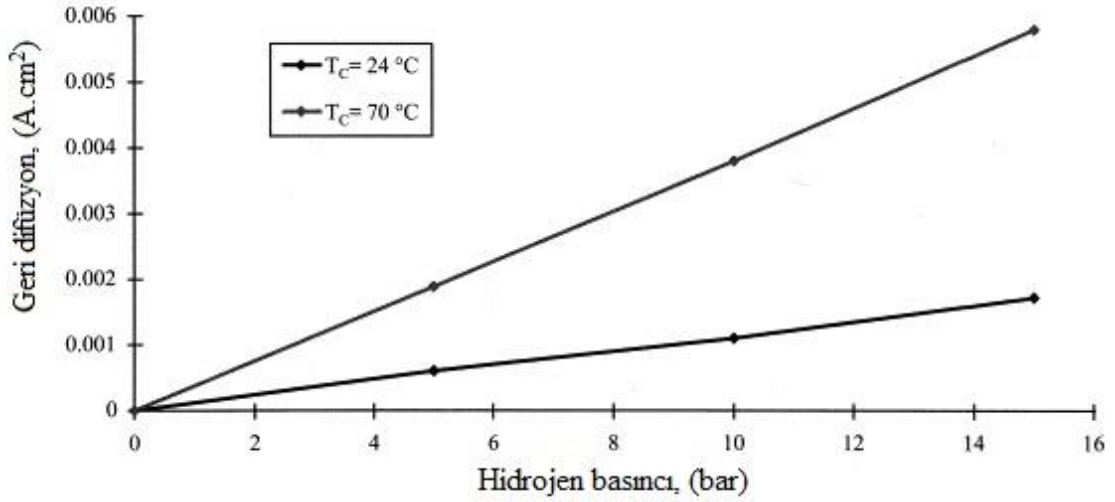
Elektrokimyasal hidrojen kompresörü ile ilgili ilk çalışmayı Rohland ve ark. (1998) yapmıştır. Mekanik kompresörler ile elektrokimyasal hidrojen kompresörlerin karşılaştırdıklarında düşük güç uygulamalarında EHK kullanımının daha avantajlı

olduğunu, daha yüksek verimde çalıştığını gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni de EHK'da düşük akım yoğunluğu veya düşük güç tüketiminde tersinmez enerji kayıpları (I^2R) azalmasıdır. Mekanik kompresörlerde ise özellikle düşük güçlerde sürtünme kayıplarından dolayı verim düşmektedir. Şekil 1.1'de Rohland ve arkadaşları (1998) tarafından mekanik ve elektrokimyasal hidrojen kompresörü karşılaştırılması verilmiştir.

Anot ve katot arasında oluşan basınç farkı nedeniyle katottan anot tarafına hidrojen geri difüzyonu meydana gelmektedir. Rohland ve ark. (1998) hidrojen geri difüzyonuna basınç farkı ve sıcaklığın etkisini araştırmak için 24 °C ve 70 °C'de, 0-16 bar aralığında deneyler yapmıştır. Şekil 1.2'de de görüldüğü üzere hidrojen geri difüzyon hızı artan basınç farkı ile lineer olarak artmaktadır. 24 °C hücre sıcaklığında geri difüzyon hızı 0.08 ml/(bar.dk.cm²) iken 70 °C'de ise 0.27 ml/(bar.dk.cm²) olarak ölçülmüştür. Beklendiği üzere yüksek sıcaklık ve basınç farkı hidrojen geri difüzyonunu artırmıştır. Geri difüzyonun artması ise kompresör verimini düşürmektedir.



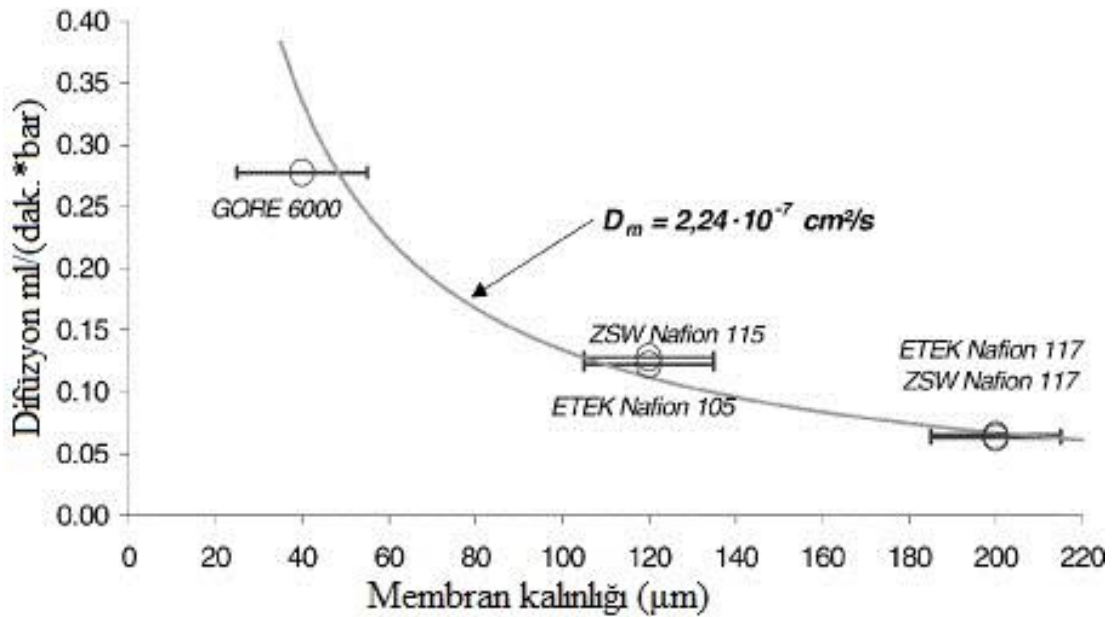
Şekil 1.1. Mekanik ve elektrokimyasal hidrojen kompresörünün karşılaştırılması (Rohland ve ark, 1998)



Şekil 1.2. Sıcaklık ve basınç farkı ile hidrojen geri difüzyon hızı değişimi (Rohland vd., 1998)

Ströbel ve ark. (2002), hidrojen geri difüzyonunun EHK hücre performansına etkisini incelemek için farklı özelliklerde membranlar kullanmışlardır. Bu membranlar için, Fick' in birinci yasasını kullanarak gaz difüzyon oranı (dm/dt) ve membran kalınlığı (x) ilişkisinden gaz difüzyon katsayısını (D_m) hesaplamışlardır.

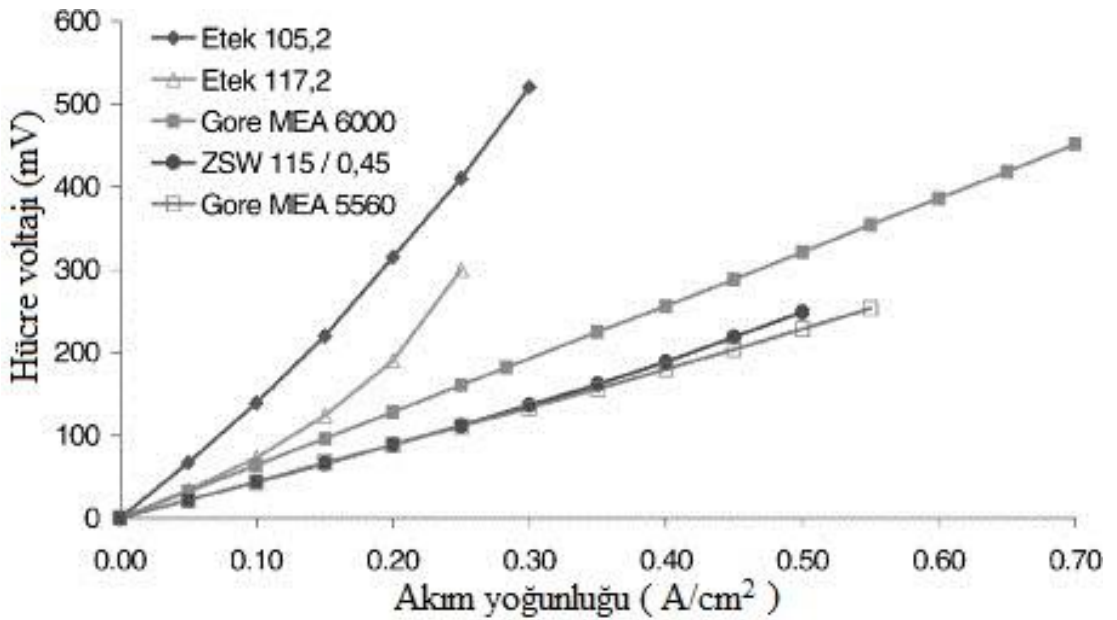
$$\frac{dm}{dt} = -D_m A \frac{dc}{dx} \quad (1.1)$$



Şekil 1.3. Farklı membranlar için hidrojen geri difüzyonu (Ströbel ve ark., 2002)

Şekil 1.3'de görüldüğü üzere membranlar için hesaplanan ortalama geri difüzyon katsayısı $2,24 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 'dir. Ströbel ve ark (2002) yaptıkları çalışmada hidrojen geri difüzyonun tamamen önlemesinin mümkün olmadığı gösteren bulgular elde etmişler. Ancak kabul edilebilir geri difüzyon oranının tanımlanabileceğini göstermektedirler. Yaklaşık 50 bar basınç ve oda sıcaklığı koşullarında kabul edilebilir geri difüzyon oranı $67 \mu\text{l}/(\text{h}.\text{bar}.\text{cm})$ 'den az olmalıdır (Ströbel ve ark, 2002).

Mekanik olarak sağlam, kalın E-TEK membranları kullanımında basıncın kısıtlayıcı bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Fakat membranın çok kalın olması sonucu hidrojen geçişlerinde zorlukların yaşandığı ve yüksek elektriksel dirence sahip olduğu görülmüştür. İnce GORE membranı kullanıldığında düşük elektriksel direnç gösterdiği ve hidrojen geçişlerinde zorluk yaşanmadığı görülmüştür. Buna rağmen yüksek basınçlarda dayanıksız olduğu gözlemlenmiştir. İnce kalınlıkta ZSW Nafion 115 membranı ile hem basınca dayanım ve elektriksel direnç bakımından yüksek performans elde etmişlerdir. Farklı membranlar ile test edilen hücrelerin polarizasyon eğrileri Şekil 1.4'de verilmiştir (Ströbel ve ark, 2002).

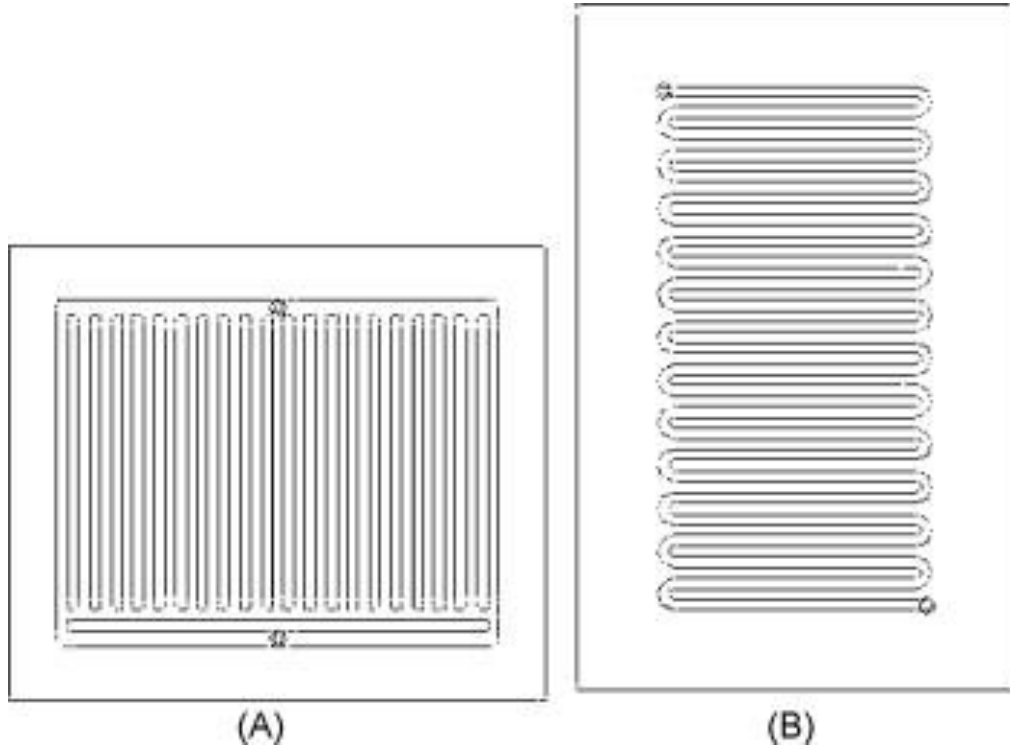


Şekil 1.4. Farklı membranlar için akım-voltaj karakteristikleri (Ströbel ve ark., 2002)

Barbir ve Grgn (2006), elektrokimyasal hidrojen kompresörünü yakıt pili sistemlerinde yakıt sirklsyonunu sağlamak için kullanmışlardır. Sıradan pompalarla saf hidrojen geri dönüşümü mümkün olmazken elektrokimyasal hidrojen kompresörü ile kullanılmış hidrojen saflaştırılarak geri dönüşümü sağlanmakta böylece genel verim artırılmaktadır.

Casati ve ark. (2008), hidrojenin elektrokimyasal / saflaştırma gibi bazı temel özellikleri hakkında çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda gaz dağıtım plakaları ile akışkanlar dinamiği ilişkisi, elektrot bölümündeki gazın debisi, suyun rolü, prosesin performans katsayısı ve elektrokimyasal işlemlerde ekserjetik kazanç araştırılmıştır.

Sistemi akışkanlar dinamiği bakımından incelemek için Şekil 1.5'te görülen farklı akış kanallarına sahip iki farklı gaz dağıtım tabakası tasarlanmıştır. İki durumda da 50 cm² aktif alana sahip Nafion 117 membran kullanılmıştır (Casati ve ark, 2008).



Şekil 1.5. Paralel kanallı (A) ve serpantinli (B) gaz difüzyon tabakaları (Casati ve ark, 2008)

Casati ve ark (2008) yaptıkları çalışmalar sonucunda, gaz dağıtım kanal şekillerinin hidrojen saflaştırma ve sıkıştırma işlemlerinde gaz fazında hidrojen difüzyon hızının membrandan geçiş hızından fazla olduğu sürece hiçbir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir.

Grigoriev ve ark. (2008), EHK çalışma parametrelerini matematiksel modelini oluşturarak ve deneysel yöntemlerle incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada membran kalınlığı, akım yoğunluğu ve çalışma sıcaklığının elektrokimyasal hidrojen kompresörünün performansı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Geliştirdikleri modelleme hidrojen geri difüzyonu da hesaba katıldığında 180 mikrometre kalınlığındaki membran ile 90 °C ve 0,5 A/cm² akım yoğunluğunda maksimum 400 bara çıkılabileceğini göstermektedir. Yaptıkları deneylerde de 1,3 A/cm² akım yoğunluğuna ve 28 bar basınca kadar hiçbir kinetik kısıtlamanın olmadığını gözlemlemişlerdir.

Grigoriev ve ark. (2011), geliştirdikleri elektrokimyasal hidrojen kompresörü ile sıkıştırma verimini artırmak ve en iyi çalışma koşullarını belirlemek aynı zamanda hidrojen geri difüzyonunu azaltmak için çalışmalar yapmışlardır. Laboratuvar ölçekli (yaklaşık 10 N litre/saat) tek hücreli kompresör ile 140 mV ve 0,2 A.cm⁻² akım yoğunluğunda 0,3 kW saat/Nm³ güç harcayarak tek kademedeki 48 bar basınca çıkmışlardır. Deneylerde 130 bar basınca kadar çıkılmış, 50 bar basınç farkını aşan durumlarda kompresörlerin seri bağlanarak kullanılması önerilmiştir. Çalışmalarda elde ettikleri voltaj – akım yoğunluğu ilişkisini, kompresör çalışma sıcaklıklarını, membranın gaz geçirgenliğini, hidrojenin nemliliği ve kompresörün güç ihtiyacı gibi verileri kaydedip değerlendirmişlerdir.

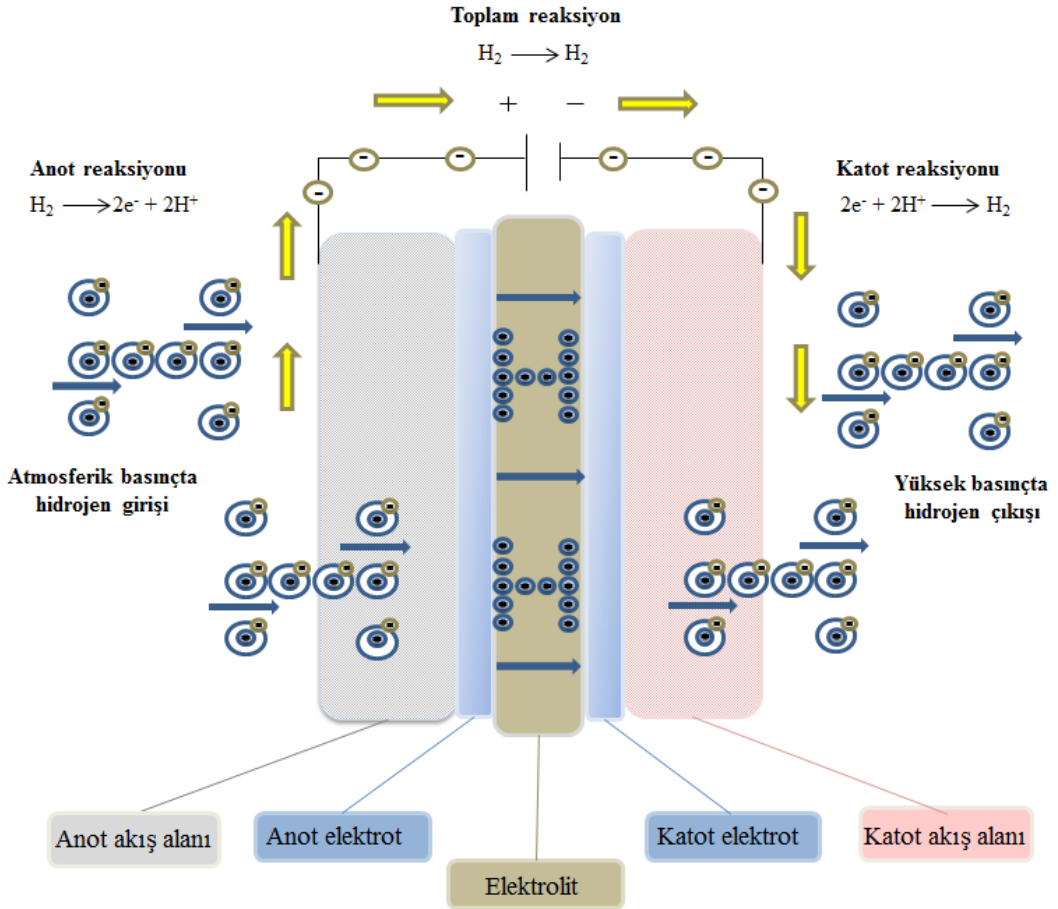
Elektrokimyasal hidrojen kompresörü kullanılmış hidrojeni tek aşamada hem saflaştırıp (%99,7 saflıkta), hem de basınçlandırarak güç tüketimini azaltmaktadır. Kompresörün 50 – 100 bar gibi yüksek basınçlarda birkaç bin saat çalıştırılmasına rağmen hücrede belirgin bir verim kaybı olmadığı gözlemlenmiştir (Grigoriev ve ark., 2011).

BÖLÜM II

TEORİK ESASLAR

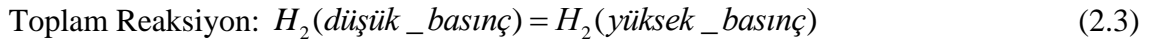
2.1 EHK Çalışma Prensibi

Elektrokimyasal hidrojen kompresörü (EHK) hidrojeni elektrokimyasal yöntemlerle basınçlandırabilen bir cihazdır. Şekil 2.1’de verilen çalışma prensibinde görüldüğü üzere anot tarafından elektrokimyasal hidrojen kompresörüne giren hidrojen atomları, dışarıdan aldığı elektrik enerjisi ile elektron vererek hidrojen iyonlarına yükseltgenmektedir. Kullanılan PEM membranı sadece iyon geçirgen özellikte olduğundan hidrojen iyonları (H^+) katot tarafına geçerken, elektronlar da dış devreden dolaşarak katot tarafına geçerler. Katot tarafına ulaşan hidrojen iyonları ve elektronları burada tekrar birleşerek hidrojen atomuna dönüşmektedir. Zamanla katot bölgesinde hidrojen atom yoğunluğu artarak yüksek basınçlara çıkmaktadır.



Şekil 2.1. EHK çalışma prensibi (Acar, 2012)

EHK'da kullanılan PEM membranı sadece hidrojen iyonlarının geçişine izin verdiğinden, basınçlandırma işlemi sırasında saflaştırma işlemi de yapmaktadır. Böylece kullanılmış atık hidrojenin tekrar saflaştırılarak kullanımına imkân sağlamaktadır. Anot ve katot bölgesinde meydana gelen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.



EHK'nın çalışması için gerekli teorik ve gerçek voltaj NERNST denkleminde hesaplanabilir. Denklem (2.4)'de verilen teorik voltaj denklemine aktivasyon kayıpları ve membran direncinden kaynaklanan omik kayıpları eklendiğinde denklem (2.6)'de verilen EHK için gerekli gerçek voltaj denklemi elde edilir. Beklendiği üzere $V_{hücre}$ değeri V_{Nernst} değerinden daha büyüktür. Denklemlerden de açıkça görüldüğü gibi katot ve anot arasındaki basınç oranı arttıkça gerekli güç ihtiyacı da artmaktadır.

$$V_{Nernst} = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_k}{P_a} \quad (2.4)$$

$$V_{hücre} = V_{Nernst} + V_{ohmik} + V_{aktivasyon} \quad (2.5)$$

$$V_{hücre} = V_{Nernst} + ir + \eta \quad (2.6)$$

Elektrokimyasal reaksiyon sonucu anot tarafından katot tarafına geçen hidrojen debisi miktarı ise Denklem (2.7)'de verilen Faraday Kanunu'ndan hesaplanabilir. Reaksiyona giren hidrojen debisi hücreye verilen akım miktarı ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{iA}{nF} = \frac{I}{nF} \quad (2.7)$$

Elektrokimyasal hidrojen kompresöründe voltaj ve akım verimi olarak iki farklı verim hesabı yapılmaktadır. Kohei ve ark. (2013), voltaj ve akım verimini sırasıyla denklem (2.8) ve denklem (2.9)'da verilen formül ile hesaplamışlardır.

$$\eta_V = \frac{V_{Nernst}}{V_{Hücre}} = \frac{V_{Nernst}}{V_{Nernst} + V_{ohm} + V_{aktivasyon}} \quad (2.8)$$

$$\eta_I = \frac{J_{H_2}^{üretilen}}{J_{H_2}^{teori}} = \frac{J_{H_2}^{üretilen}}{I/2F} \quad (2.9)$$

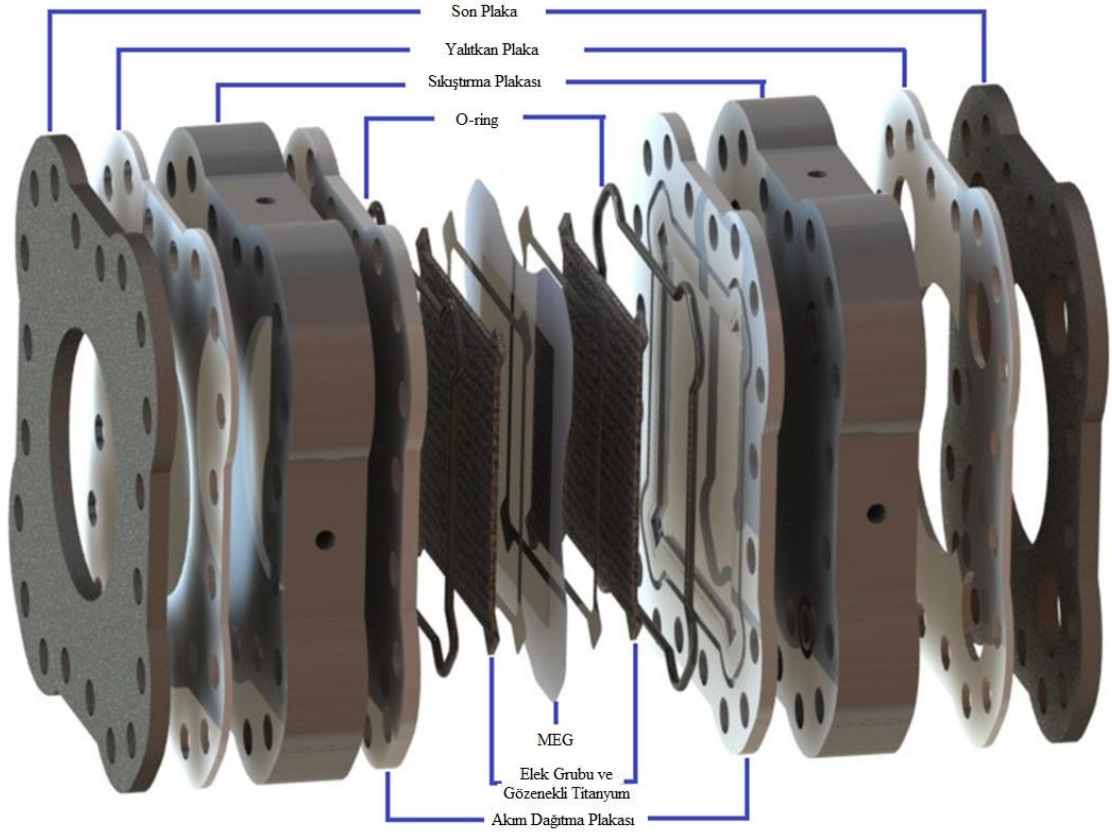
Denklemlerde kullanılan “ J ” molar akışı, “ I ” uygulanan akımı ve “ F “ Faraday sabitini ifade etmektedir.

Voltaj veriminin EHK’da meydana gelen tersinmezliklerin belirlenmesinde rolü vardır. Akım yoğunluğunun yüksek olması voltaj verimini düşürmesine karşı, düşük akım yoğunluklarında voltaj verimi artmaktadır. Akım verimi ise EHK’nın mekanik güvenilirliğinin yorumlanmasında rol almaktadır. PEM membranının kütle transfer direncinden dolayı sıkıştırılmış bir miktar hidrojen gazı katottan anoda doğru hareket eder. Ayrıca bir miktar sıkıştırılmış gaz da boru bağlantılarından sızmaktadır. Bu sızıntı ve hidrojenin katottan anoda geri kaçması akım verimini düşürmektedir. EHK’nın toplam verimi ise denklem (2.10)’da verildiği üzere voltaj ve akım veriminin çarpımına eşittir.

$$\eta_{Toplam} = \eta_I \eta_V \quad (2.10)$$

2.2 EHK Hücre Elemanları

Elektrokimyasal hidrojen kompresörü hücre bileşenleri Şekil 2.2’de belirtildiği gibi membran elektrot grubu, elek yapısı, gözenekli titanyum, sızdırmazlık elemanları, akım dağıtma plakası, sıkıştırma plakası, yalıtkan plaka ve son plakadan oluşmaktadır.



Şekil 2.2.EHK hücre elemanları

2.2.1 Membran elektrot grubu

Membran elektrot grubu EHK'nın en temel, en önemli elemanıdır. Anot ve katotta meydana gelen hidrojenin indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları ve hidrojen iyonunun geçişi bu kısımda gerçekleşmektedir. Sadece hidrojen iyonlarının geçişine izin verdiğinden, atık hidrojenin saflaştırılmasını da sağlamaktadır. Yüksek basınç farklarında dayanıklılığı açısından uygun kalınlıkta olması ve aynı zamanda elektriksel direnç ve iyon iletkenliği gibi özellikleri de membran seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlardır. EHK'da karşılaşılan en önemli sorunlardan biri olan hidrojen geri difüzyonu da optimum kalınlıkta membran seçimi ile minimize edilebilmektedir. Deneylerde kullanılan Nafion 112 membranı Fotoğraf 2.1'de verilmiştir.

Membranın verimli çalışabilmesi ve uzun ömürlü olması için neme ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden EHK hücresine hidrojen gönderilmeden nemlendirme işlemine tabi

tutulmaktadır. Oluşturduğumuz deney düzeneğinde elektrolizörde üretilen hidrojen su dolu kabın içinden geçirilerek EHK'ya gönderilmiştir.

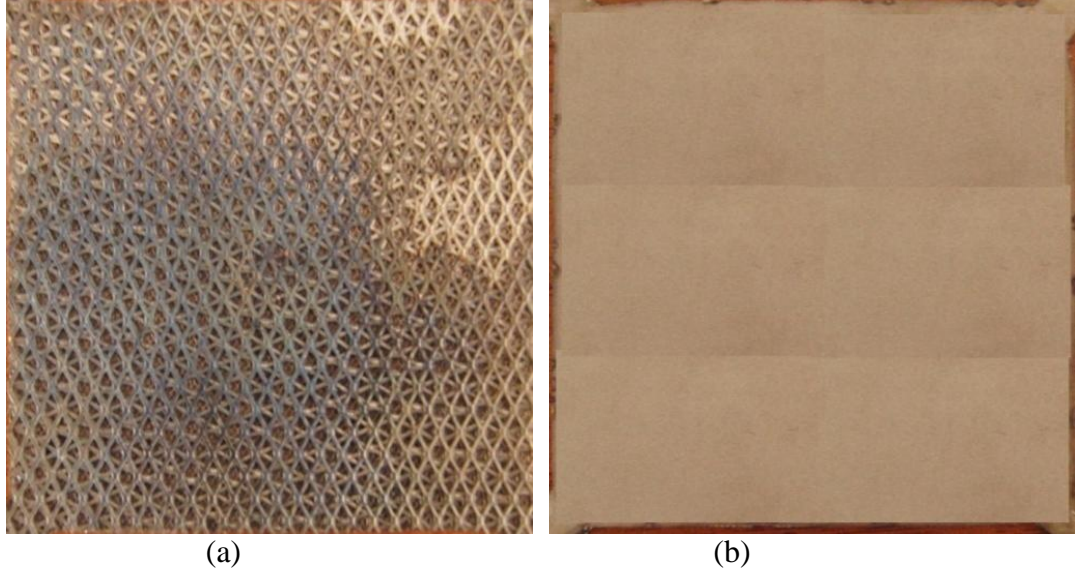


Fotoğraf 2.1. Membran elektrot grubu

2.2.2 Elek grubu ve gözenekli titanyum

Hidrojenin hücre içerisinde homojen bir şekilde dağılması sağlamak için titanyum elekler üst üste sabitlenerek akış alanı oluşturulmaktadır. Elektrokimyasal olayların verimli bir şekilde gerçekleşmesi için yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olan titanyum ızgaralar tercih edilmiştir. Aynı zamanda hücreye nemli hidrojen gönderildiğinden dolayı korozyona karşı dayanıklı olması da titanyum elek kullanılma nedenlerindedir. Kullanılan titanyum elek grubu Fotoğraf 2.2(a)'da verilmiştir.

Gözenekli titanyum plaka, membranın basınç farkına karşı korumak, akımın daha düzgün dağılmasını sağlamak ve hidrojenin katalizör tabakasına daha homojen dağılmasını sağlamak gibi görevleri yerine getirmektedir. Direk membran ile temas ettiğinden pürüzsüz yapısı sayesinde hem membranın zarar görmesini önlemekte hem de destek olmaktadır. Fotoğraf 2.2(b)'de deneylerde kullanılan gözenekli titanyum levha görülmektedir.



Fotoğraf 2.2. Titanyum elek grubu (a) ve gözenekli titanyum levha (b)

2.2.3 Akım dağıtma plakası

Hidrojen atomunun (H_2) indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları için gerekli olan elektrik enerjisinin dağılarak elektrokimyasal tepkimelerin meydana geldiği kısımdır. Korozyona karşı dayanıklı olması nedeniyle akım dağıtma plakaları titanyum malzemeden imal ettirilmiştir. Sızdırmazlık elemanlarından o-ring, ince plaka ve elek grubu akım dağıtma plakaları üzerine yerleştirilmektedir.

Akım dağıtma plakalarında bulunan akış alanında elek grubu kullanmak yerine paralel, serpantin kanal dizaynları da yapılabilmektedir. Ancak deneylerde titanyum eleklerden oluşan elek yapısı kullanımı tercih edilmiştir.

2.2.4 Sızdırmazlık elemanları

Anot ve katot arasındaki basınç farkı arttıkça meydana gelebilecek gaz kaçaklarını önlemek amacıyla ince titanyum levha ve o-ring kullanılmıştır.

Akım dağıtma plakası üzerinde ince plaka ve o-ringler için açılan kanallara yerleştirilen sızdırmazlık elemanları uygun bir cıvata torku ile sıkıştırılarak hidrojen kaçakları önlenmektedir.

2.2.5 Sıkıştırma plakası, yalıtkan plaka ve son plaka

Sıkıştırma plakası elektrokimyasal hidrojen kompresörü bileşenlerini bir arada tutarak, yüksek basınçlara dayanımı için mukavemet sağlamaktadır. Aynı zamanda elektrokimyasal reaksiyon için gerekli elektrik enerjisi bağlantısı ve hidrojen giriş – çıkış bağlantıları sıkıştırma plakası üzerinden yapılmaktadır.

Yalıtkan plaka sıkıştırma plakası ve son plaka arasında oluşabilecek kısa devreyi önlemek amacıyla kullanılmıştır. Son plaka ise EHK hücrelerini en dışında yer alan, bir arada durmasını sağlayan civata ve somunlarla temas halinde olan elemandır. Son plaka ve sıkıştırma plakası paslanmaz çelikten imal ettirilmiştir. Fotoğraf 2.3’da aşağıdan üste doğru sıkıştırma plakası, yalıtkan plaka ve son plaka dizilimi verilmiştir.



Fotoğraf 2.3. Sıkıştırma plakası, yalıtkan plaka ve son plaka

2.3 Çevre Elemanları

Güç kaynağı: İstenilen voltaj veya akım değerinde sabit tutulabilmesini sağlayan, yüksek akımlara çıkabilen güç kaynağı kullanılmıştır.

Debimetre: EHK hücrelerine gönderilen hidrojen debisini ölçmek için kullanılmıştır.

Manometre: Katot tarafında oluşan basıncı ölçmek için kullanılmıştır.

Boru ve bağlantı elemanları: Hidrojen giriş – çıkış ve manometre bağlantıları gibi yerlerde yüksek basınca ve korozyona dayanıklı paslanmaz çelik malzemeler kullanılmıştır.

PEM elektrolizörü: Suyun elektrolizi sonucu hidrojen üreterek EHK sistemine hidrojen sağlamak için kullanılmıştır. PEM elektrolizörü sistemi de elektroliz için gerekli elektrik enerjisinin karşılanması için kullanılan güç kaynağından, elektrolizöre saf su sağlayan su tankından ve EHK'ya nemli hidrojen sağlamak için kullanılan su tankından oluşmaktadır.

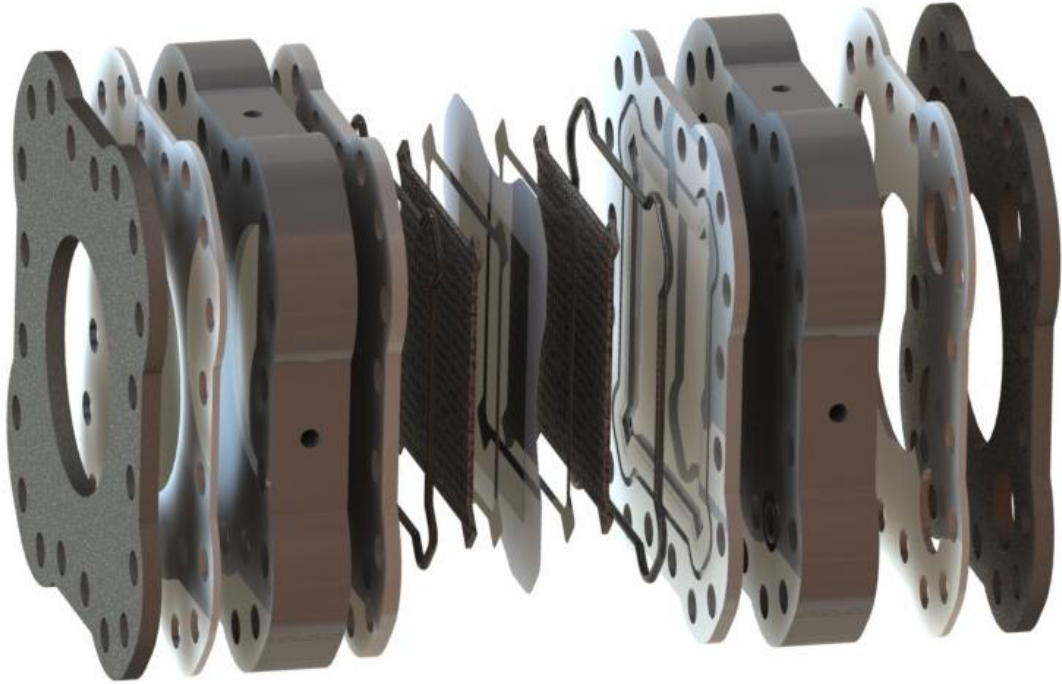
BÖLÜM III

DENEYSSEL ÇALIŞMALAR

3.1 EHK Tekli Hücre Tasarımı

Hidrojeni sıkıştırarak yüksek basınçlara çıkartabilmek ve performansına etki eden basınç, hidrojen debisi, çalışma voltaj ve akım yoğunluğu gibi parametrelerin deneysel olarak incelenebilmesi için 50 cm² aktif alana sahip elektrokimyasal hidrojen kompresör hücresi tasarımı Şekil 3.1’de verilmiştir. Tekli hücrenin anot tarafında iki adet hidrojen girişi ve iki adet reaksiyona girmeyen hidrojen çıkışı için bağlantı yeri açılmıştır. Katot tarafında ise orta kısımda basınçlı hidrojen çıkışı için bir adet manifold bağlantısı bırakılmıştır.

Tasarlanan EHK hücresi, membran elektrot grubu (MEG), akım dağıtma plakası, sıkıştırma plakası, yalıtım plakası, son plakadan oluşmaktadır. Akım dağıtma plakası üzerinde elek grubu, ince titanyum plaka ve o-ring için uygun kanallar dizayn edilmiştir.



Şekil 3.1. EHK hücre tasarım bileşenleri

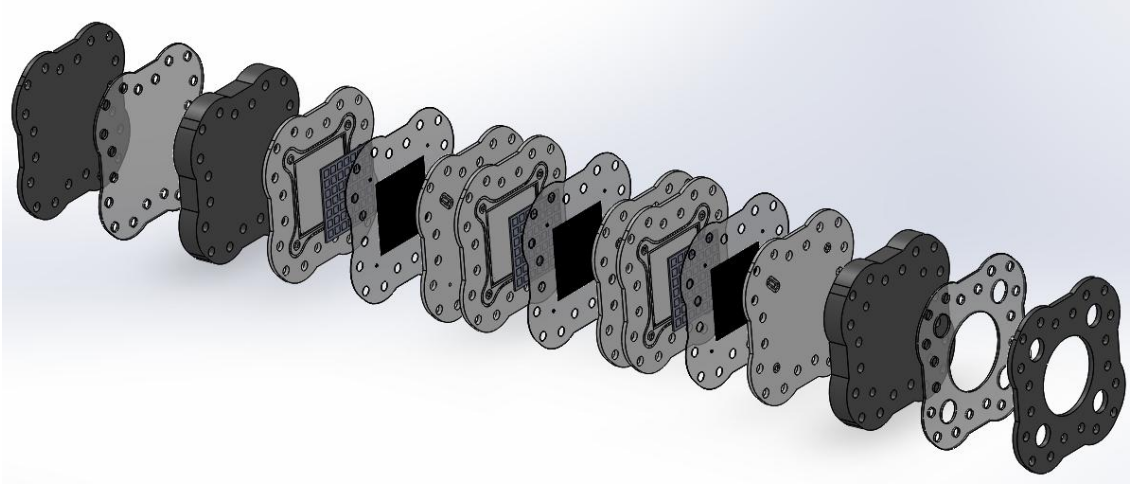
Akım dağıtma plakaları titanyum malzemeden, sıkıştırma ve son plaka paslanmaz çelikten, yalıtım plakası da delrin malzemeden imal edilmiştir. Fotoğraf 3.1’de montajı yapılmış tekli EHK hücresi görülmektedir.



Fotoğraf 3.1. İmalatı yapılan EHK bileşenlerinin montaj hali

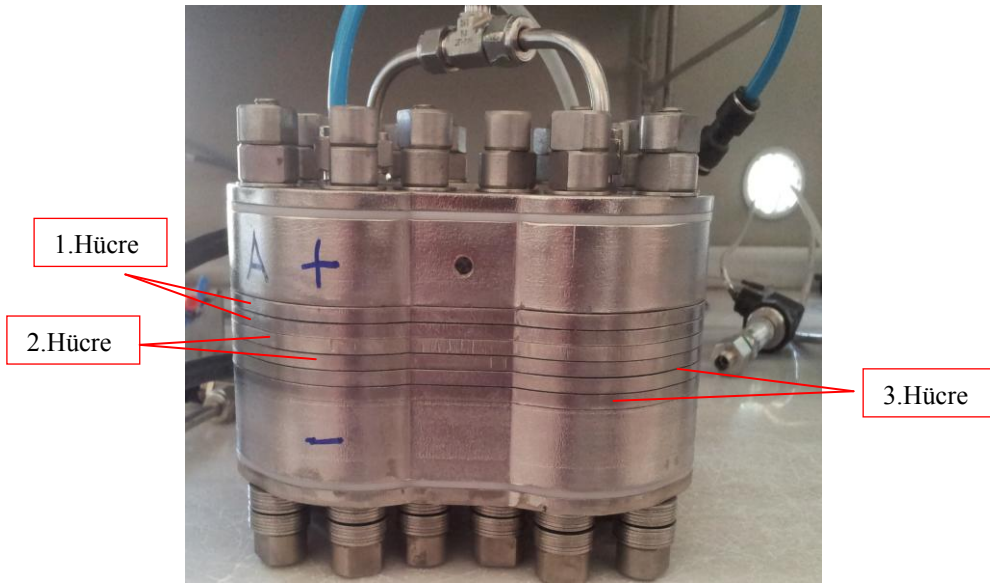
3.2 EHK Yığın Tasarımı

Elektrokimyasal hidrojen kompresörlerinde anot tarafından katot tarafına geçebilecek hidrojen iyonunun miktarı, aktif alan ve akım yoğunluğu ile doğru orantılı olduğundan istenilen debilerde EHK için hücreler seri bağlanarak kapasite artırılabilir. Hücreler arası sızdırmazlığı sağlamak için akım dağıtma plakaları üzerine o-ring kanalları açılarak atmosferik ve basınçlı hidrojen giriş-çıkışlarında ve akım dağıtma plakası etrafında sızdırmazlık sağlanmıştır. Şekil 3.2’de görülen yığın tasarımı da tekli hücre gibi 50 cm² aktif alana sahip MEG için tasarlanmıştır.



Şekil 3.2. EHK yığının tasarımı

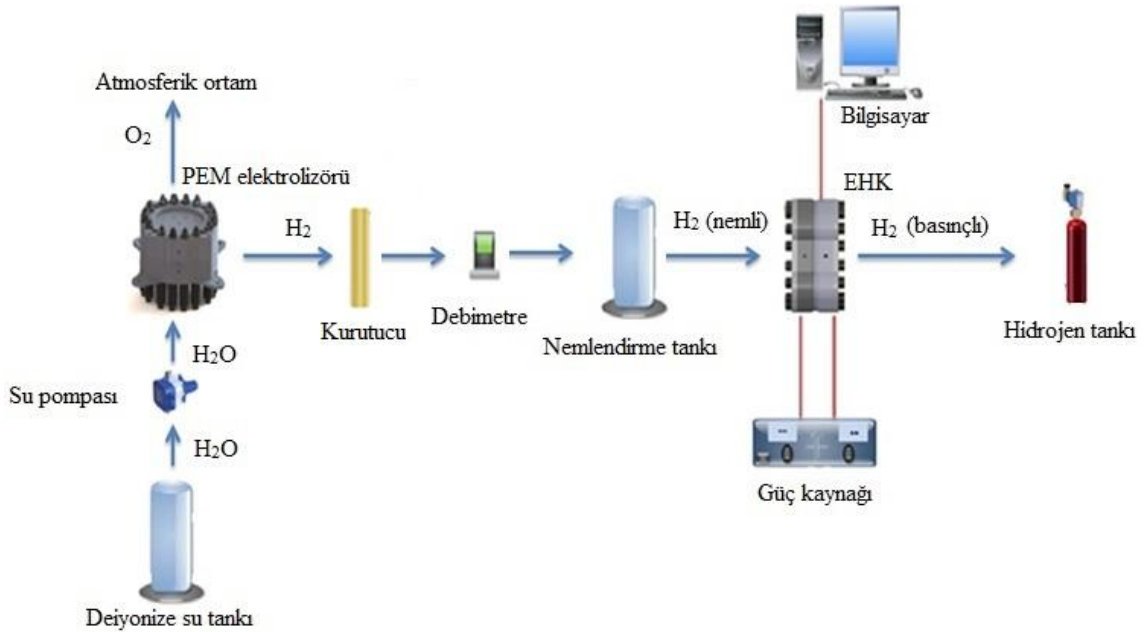
Tez kapsamında geliştirilen 3 hücreli EHK yığının parçalarının imal edilmiş montaj hali Fotoğraf 3.2’de görülmektedir. Yığının üst kısmında bir adet hidrojen girişi, bir adet reaksiyona girmeyen hidrojen çıkışı ve iki adet basınç hidrojen çıkışı için delik açılarak bağlantılar yapılmıştır. Akım dağıtma plakaları titanyumdan, yalıtkan plaka delrin malzemeden, sıkıştırma ve son plakalar da paslanmaz çelikten imal ettirilen yığın bileşenleri bir araya getirilip uygun bir tork değeri ile sıkıştırılarak montajı tamamlanmıştır. Daha sonra hidrojen giriş çıkış bağlantıları da yapılarak deneysel çalışmaya hazır hale getirilmiştir.



Fotoğraf 3.2. Üç hücreli EHK yığının montajı

3.3 Deneysel Düzeneğin Kurulması

EHK deney düzeneği genel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda PEM elektrolizörü kullanılarak hidrojen üretilmekte, ikinci kısımda ise EHK ile hidrojen basınçlandırma işlemi yapılmaktadır. PEM elektrolizör sistemi; dış devreden alınan elektrik enerjisi ile suyu ayrıştırarak hidrojen üretimini sağlayan PEM elektrolizör yığını, güç kaynağı, elektrolizöre deiyonize su sağlamak için kullanılan tank ve pompadan oluşmaktadır. PEM elektrolizöründe üretilen hidrojen EHK'ya gönderilmeden nemlendirme tankından geçirilmektedir. Elektrokimyasal hidrojen kompresörü sisteminde ise tek hücreli ve üç hücreli EHK yığını olmak üzere iki farklı kapasitede EHK kullanılmıştır. EHK için gerekli enerji ihtiyacı DC güç kaynağından sağlanarak, elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu katot tarafına geçen hidrojen de tankta biriktirilerek basınçlanması sağlanmıştır. Elde edilen akım ve voltaj değerleri de bilgisayarda kaydedilerek performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 3.3'de oluşturulan deney düzeneğinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 3.3. Deney düzeneği şematik görünümü

EHK deneylerinde yüksek basınçlara (60 bar) çıkıldığından güvenlik açısından deneyler Fotoğraf 3.3’de görülen test kabini yapılmıştır. Ayrıca deney düzeneğinde kullanılan boru ve bağlantılar da yüksek basınçlara dayanıklı paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır.

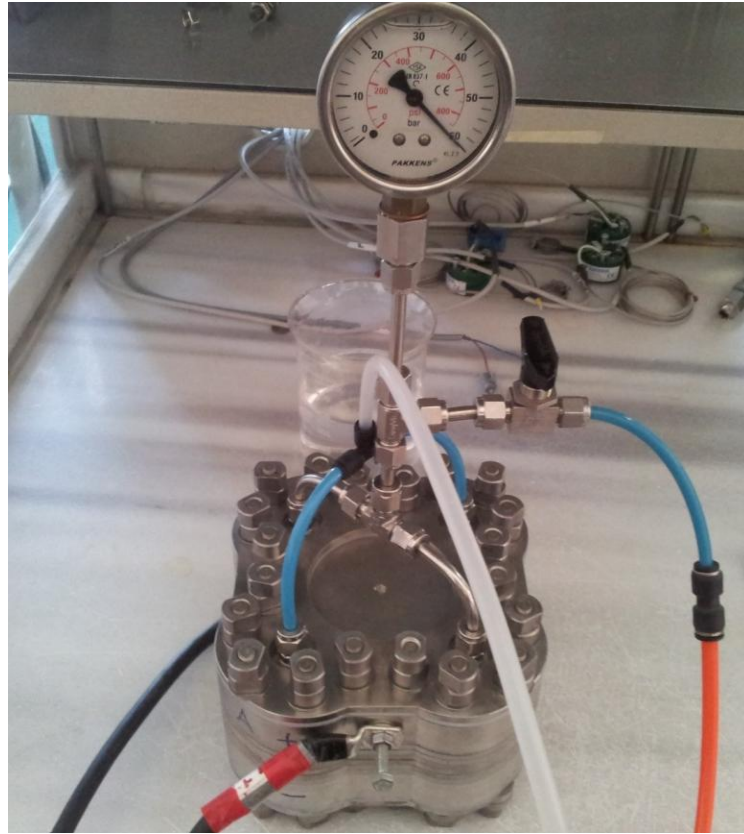


Fotoğraf 3.3. EHK test kabini

Fotoğraf 3.4 ve Fotoğraf 3.5’de görülen tek hücreli ve üç hücreli EHK yığını ile yapılan basınç deneyleri sırasında 60 bar basınca ulaşılmıştır. Membranın zarar görmesini önlemek amacıyla tek hücreli EHK’da 0,4 V değerinin, üç hücreli EHK yığında ise 1,2 V değerinin üzerine çıkılmamıştır. Çalışma parametrelerinin incelenmesi adına farklı debilerde hidrojen gönderilerek EHK hücresi ve yığını üzerinden akım – voltaj değerleri alınarak kaydedilmiştir.



Fotoğraf 3.4. Deneilerde kullanılan tek hücreli EHK



Fotoğraf 3.5. Performans testlerinde kullanılan üç hücreli EHK yığıını

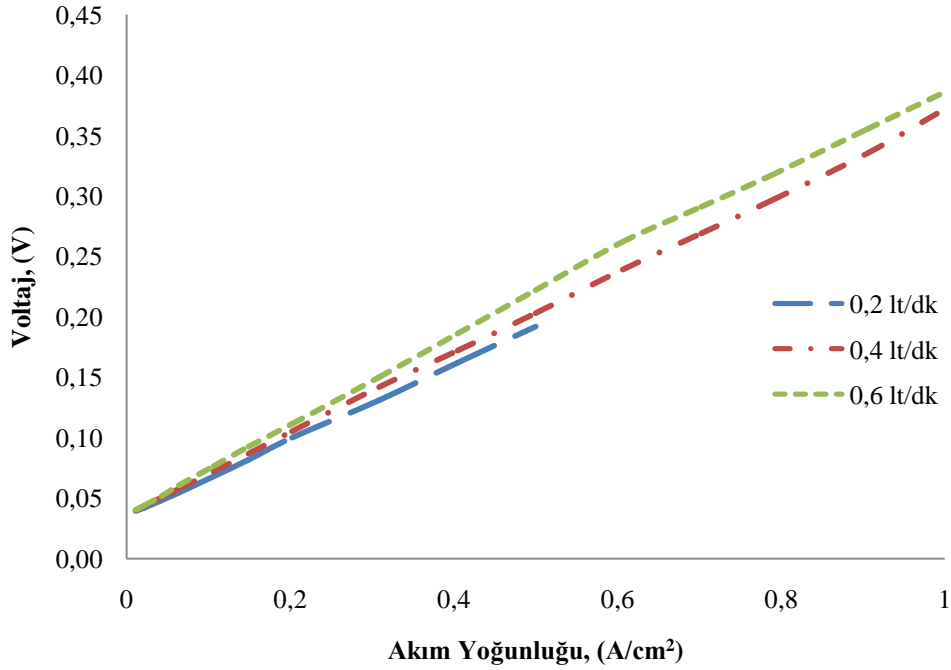
BÖLÜM IV

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Tek Hücreli EHK Deney Sonuçları

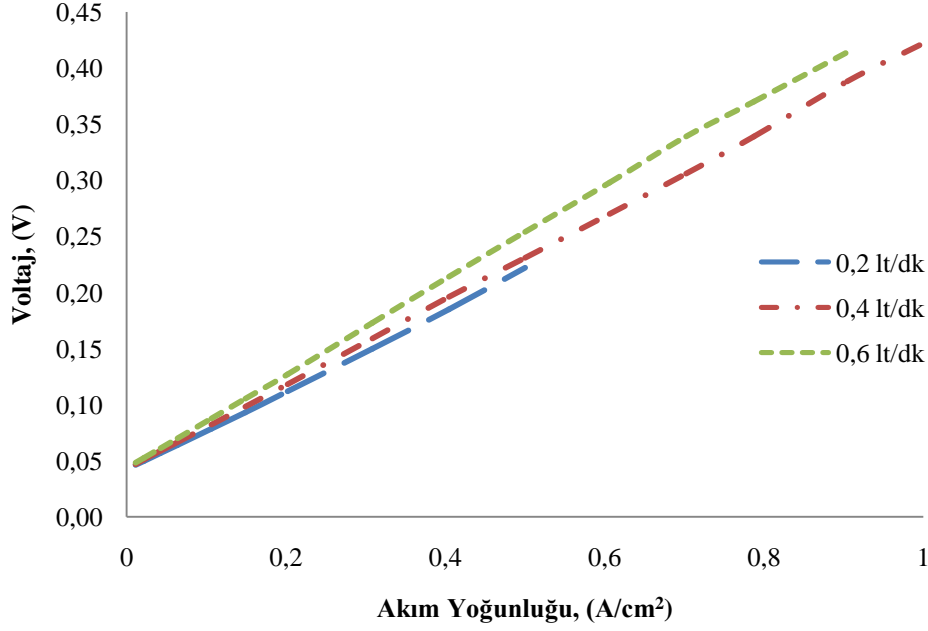
4.1.1 Hidrojen debisinin hücre performansına etkisi

EHK hücresine elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu anottan katot bölgesine geçen hidrojen miktarı Faraday Kanunu'na göre akım yoğunluğu ile arttığından, bütün akım yoğunluklarında EHK'nın yüksek verimde çalışabilmesi için yeterli debide hidrojen gönderilmesi gerekmektedir. Şekil 4.1 ile Şekil 4.5'de sırasıyla 10 bar, 20 bar, 30 bar, 40 bar ve 50 bar basınçta 0,2 lt/dk, 0,4 lt/dk ve 0,6 lt/dk debilerde gönderilen hidrojen için performans grafikleri verilmiştir. 0,8 lt/ dk hidrojen debisi ile de deneyler yapılmış ancak hidrojeni 0,6 lt/dk debi ile gönderdiğimizde elde ettiğimiz sonuçlarla neredeyse aynı olduğu için grafikte yer verilmemiştir.

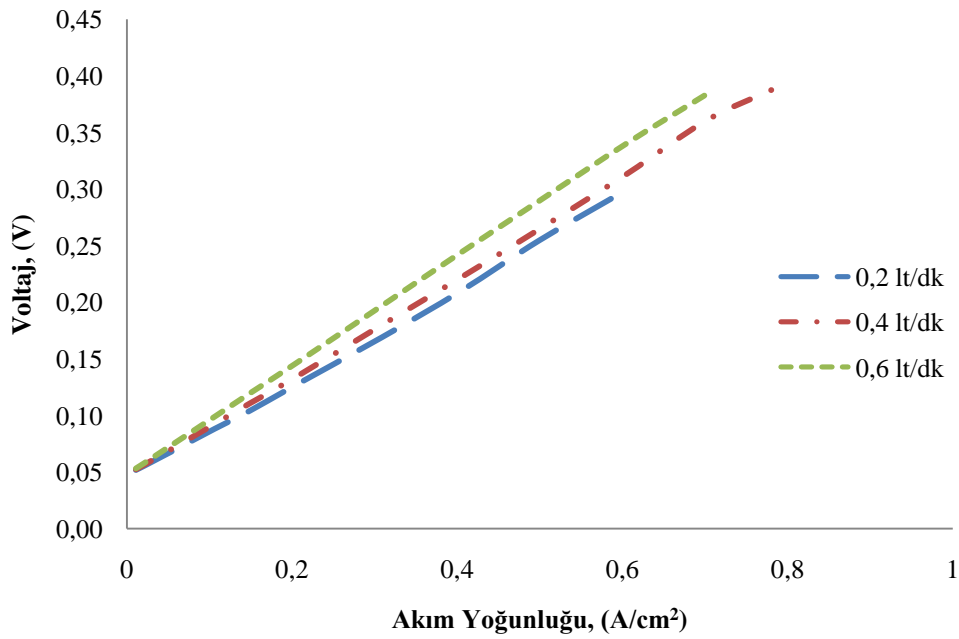


Şekil 4.1. 10 bar basınç altında debi etkisi

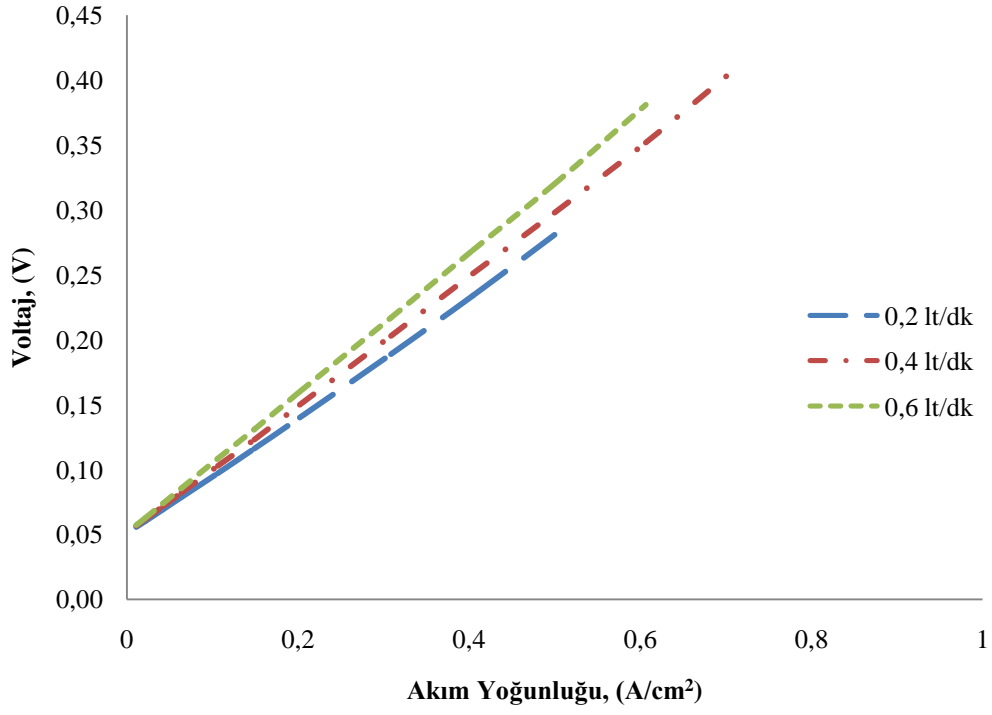
10 bar basınçta 0,2 lt/dk hidrojen debisinde yapılan değerlerde düşük akım değerlerinde akım- voltaj değerleri doğrusal bir şekilde ilerlerken akım yoğunluğu $0,5 \text{ A/cm}^2$ değerini geçtiğinde yetersiz hidrojen debisi nedeniyle ani sıçramalar meydana gelmiştir. Bu durum EHK'ya yeterli miktarda hidrojen gönderilmemesinden kaynaklanmaktadır. Akım yoğunluğunda meydana gelen bu ani artışların kullandığımız membrana zarar vermemesi için veri alınmaya devam edilmemiştir.



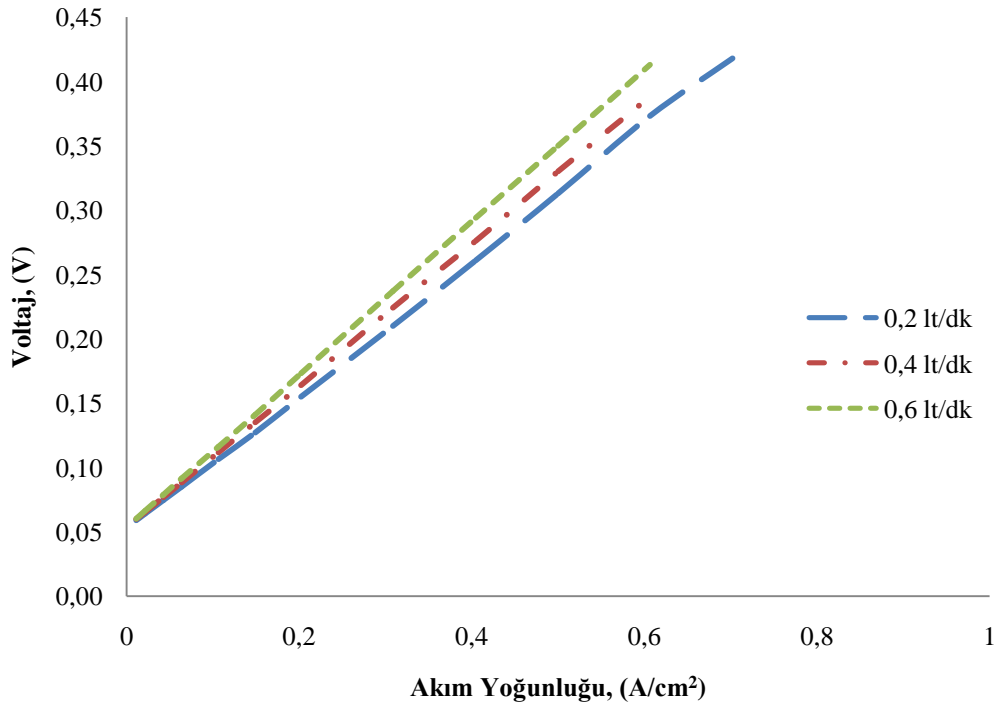
Şekil 4.2. 20 bar basınç altında debi etkisi



Şekil 4.3. 30 bar basınç altında debi etkisi



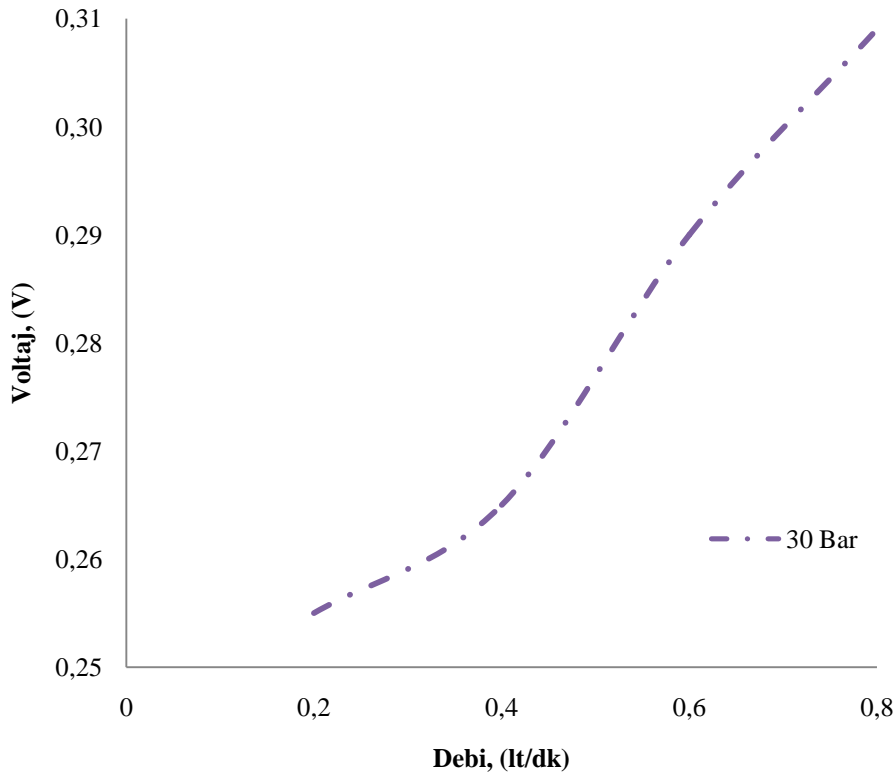
Şekil 4.4. 40 bar basınç altında debi etkisi



Şekil 4.5. 50 bar basınç altında debi etkisi

Basınç artışı ile düşük hidrojen debilerinde karşılaşılan düşük akım yoğunluklarındaki ani voltaj artışları daha az görülmüştür. Örneğin 10 barda 0,2 lt/dk'lık hidrojen debisinde görülen voltaj kararsızlığı Şekil 4.5'ten de 50 bar basınçta yapılan deneylerde görülmemiştir. Bu durum katot tarafında oluşan yüksek basınç sonucu katottan anoda hidrojen geri difüzyon miktarının artması sonucu anot bölgesine geçerek tekrar reaksiyona girmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Faraday kanununa göre yapılan hesaplamalarda 30 A'de çalışan tek hücreli 50 cm² aktif alana sahip EHK hücresi için gerekli hidrojen debisi 0,21 lt/dk olarak bulunmuştur. Ancak meydana gelen kayıplardan ve deneyler sonucunda da elde ettiğimiz grafiklerden görüldüğü üzere her akım yoğunluğu ve basınçta EHK'nın yüksek performansta çalışabilmesi için hidrojenin 0,6 lt/dk debide gönderilmesi uygun görülmüştür.

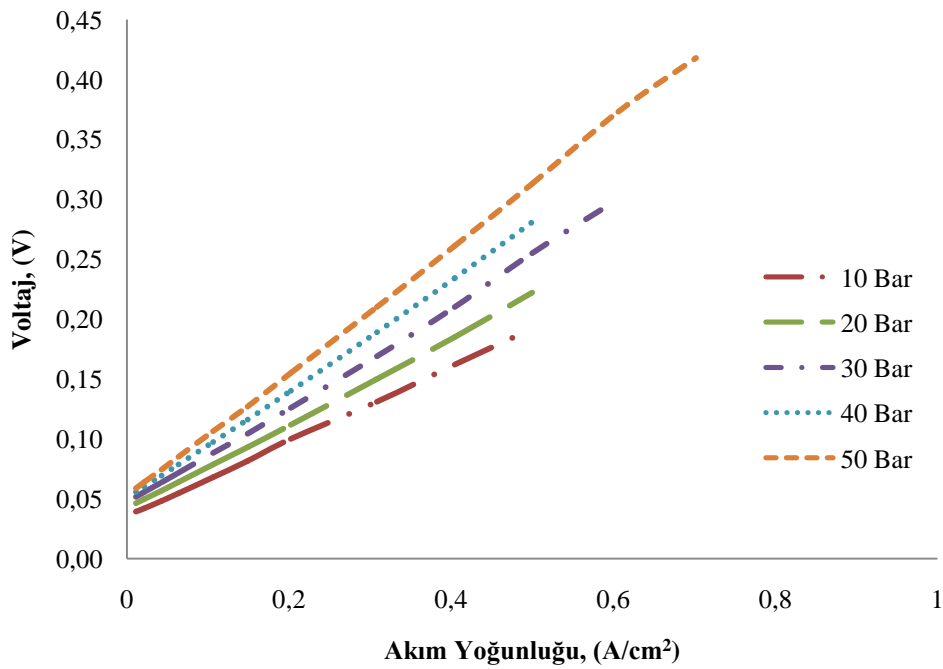
Şekil 4.6'da 30 bar diferansiyel basınç ve 0,5 A/cm² akım yoğunluğunda EHK'ya gönderilen hidrojen debisinin çalışma voltajına etkisi verilmektedir. Artan hidrojen debisi EHK'da reaksiyona girmeden ortamda meydana gelen ısıyı da üzerine alarak çıkması sonucu soğutma etkisi yaptığından sabit akım yoğunluğunda yüksek debilerde daha yüksek çalışma voltajına ihtiyaç duymaktadır.



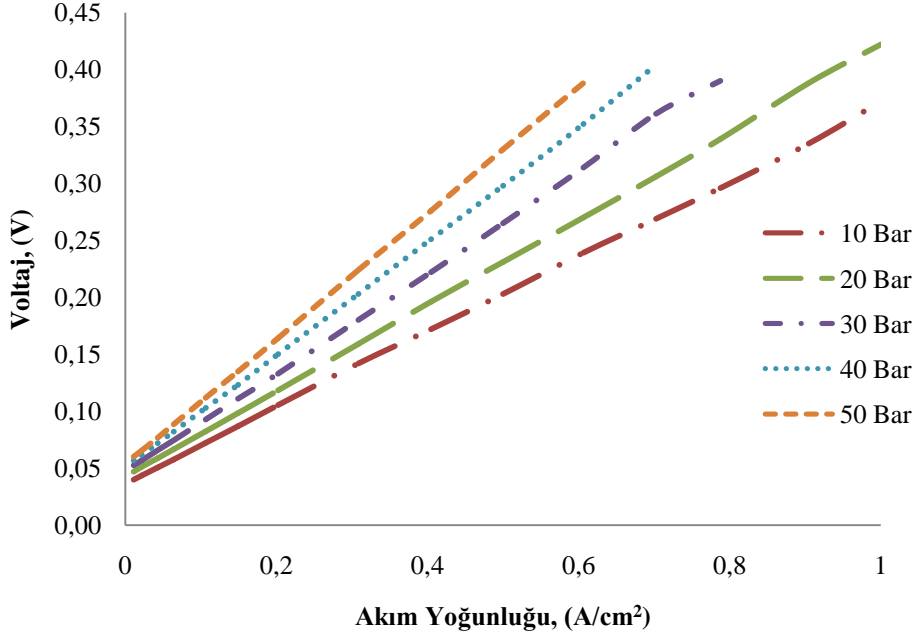
Şekil 4.6. 30 bar diferansiyel basınç ve 0,5 A/cm² akım yoğunluğunda debi etkisi

4.1.2 Basıncın hücre performansına etkisi

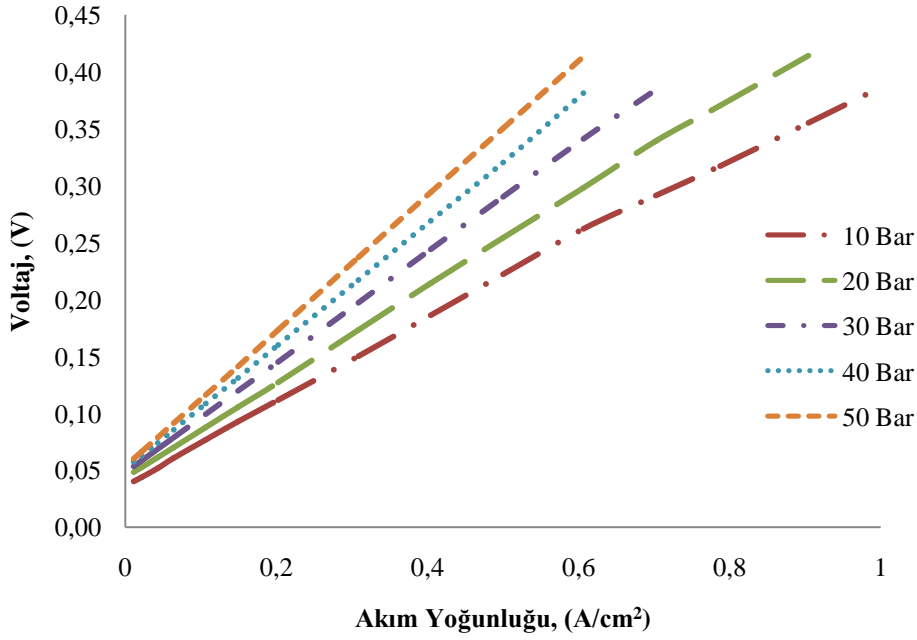
EHK hücresi ile 50 bar diferansiyel basınca kadar farklı debilerde hidrojen gönderilerek yapılan deney grafikleri Şekil 4.7 – Şekil 4.9’de verilmiştir. Denklem 2.4’de verilen Nernst denkleminde de görüldüğü üzere anot ve katot arasında meydana gelen basınç farkı arttıkça EHK hücresine uygulanması gereken voltaj da artmaktadır. Bu bölümde elde edilen grafikler de debi etkisinde elde edilen grafikleri desteklemektedir. 0,2 lt/dk debide düşük basınçlarda daha düşük basınçlarda akım yoğunluğu değerlerinde ani sapsmalar görülmesine rağmen 50 bar basınçta akım yoğunluğu ve voltaj değerleri değişimi doğrusal bir seyir izlemiştir. Bu durum yüksek basınçlara çıkmak için gerekli voltaj değerinin artması nedeniyle voltaj kayıplarının da artması ve kayıplarından kaynaklanan ısınma sonucu elektrokimyasal reaksiyonlardaki iyileşme ile açıklanabileceği gibi yüksek basınçta katottan anoda hidrojen geri difüzyonu sonucu anottaki hidrojen miktarını artırmasının da etkisi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.7. 0,2 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi

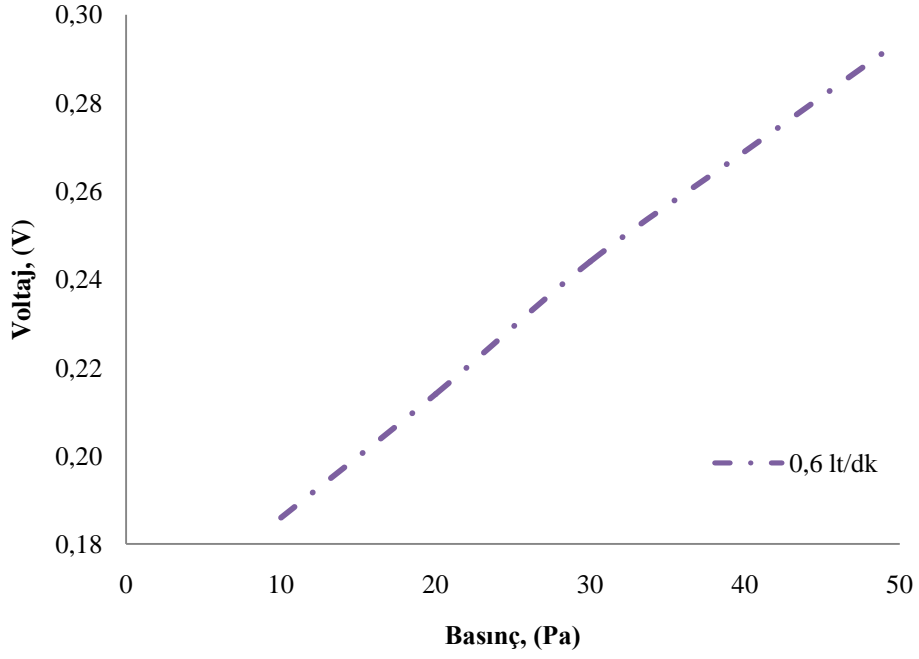


Şekil 4.8. 0,4 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi



Şekil 4.9. 0,6 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi

Şekil 4.10'da verilen 0,6 lt/dk hidrojen debisi ile 0,4 A/cm² akım yoğunluğunda çalışan EHK performans grafiğinden de açıkça görüldüğü üzere sıkıştırma oranı yükseldikçe daha yüksek voltaj çekmekte yani daha fazla güce ihtiyaç duymaktadır.



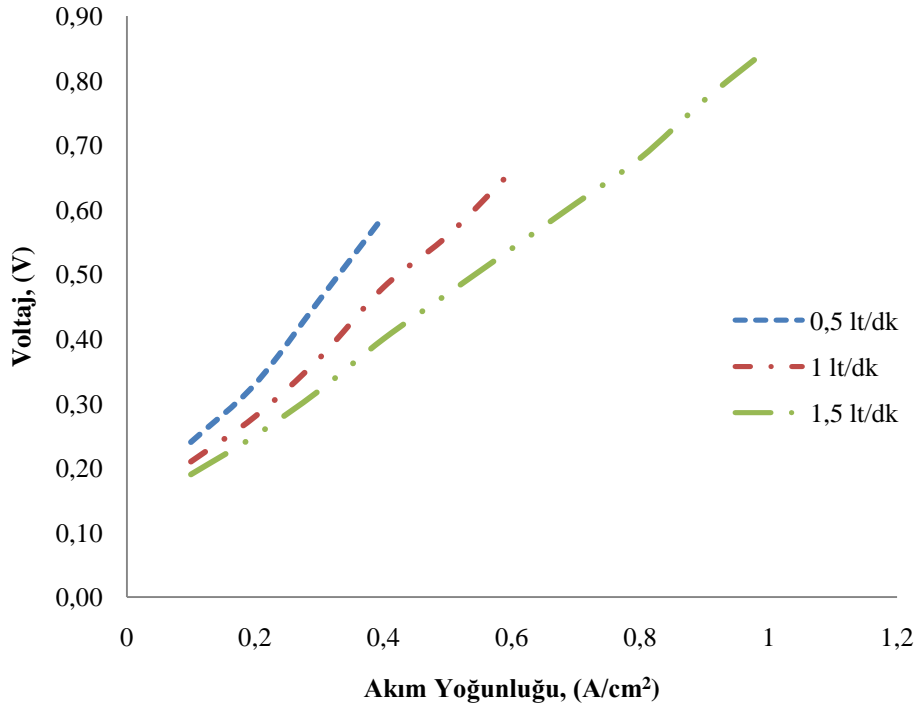
Şekil 4.10. 0,4 A/cm² akım yoğunluğu ve 0,6 lt/dk debide basınç etkisi

4.2 Üç Hücreli EHK Yığını Deney Sonuçları

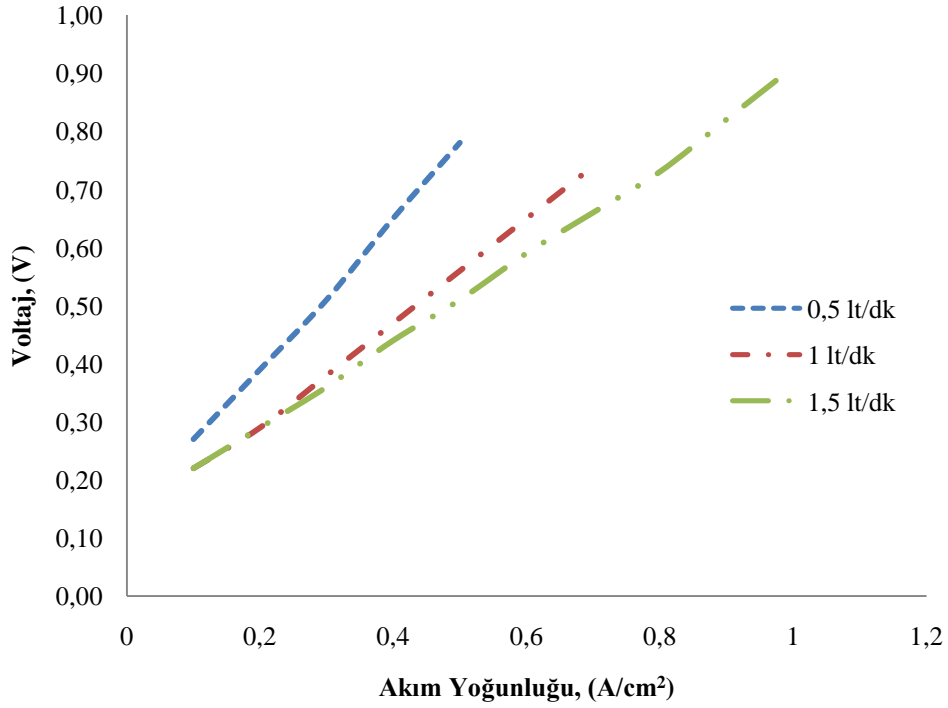
4.2.1 Debinin yığın performansına etkisi

Tasarım sonucu üretim ve montajı yapılan EHK yığını ile debinin etkisinin incelenmesi için sabit basınçta farklı hidrojen debileri ile performans deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.11'da görüldüğü üzere 10 bar basınçta 0,5 lt/dk ve 1 lt/dk debide hidrojen gönderdiğimizde akım yoğunluğunu artırdığımızda değerlerde ani sapmalar görülmektedir. Bu olay hidrojen debisinin yetersiz olduğunu göstermektedir. 1,5 lt/dk ve 2 lt/dk debide hidrojen gönderdiğimizde ise elde edilen veriler bire bir aynı olduğu görülmüştür. Buradan reaksiyona girebilecek maksimum hidrojen debisinin 1,5 lt/dk olduğu daha fazla debide hidrojen gönderdiğimizde reaksiyona girmeden EHK yığını terk ettiği görülmektedir.

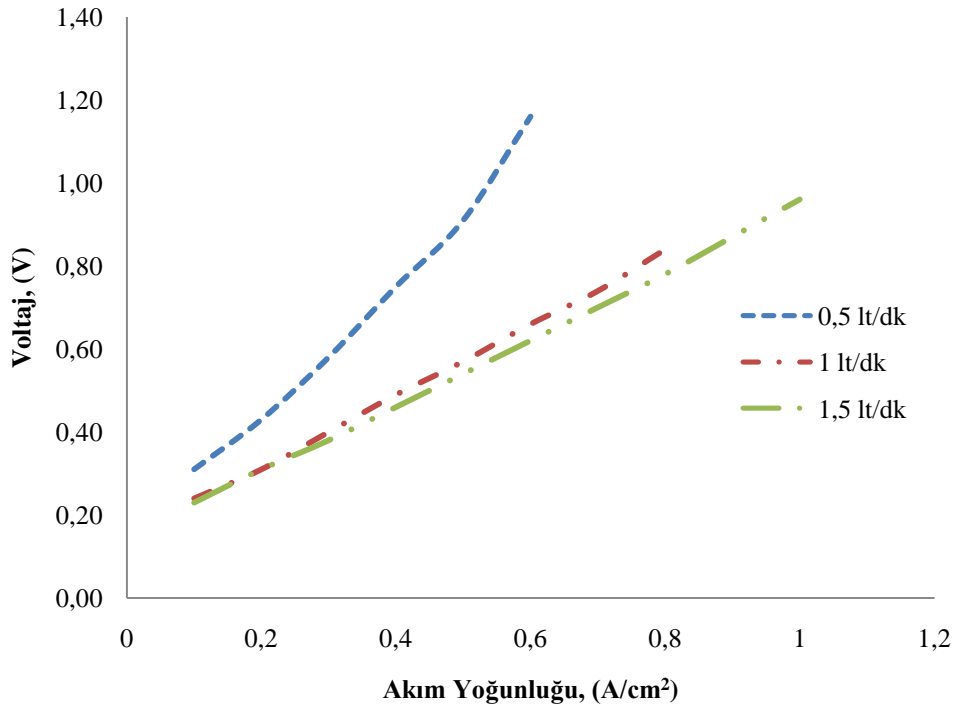
Şekil 4.12 – Şekil 4.15'de basınç yükseldikçe düşük debilerde çekilen akım yoğunlukları daha yüksek değerlerde bozulmaya başlamıştır. Ancak yine düşük hidrojen debisinde anot katalitik bölgesine yeterince hidrojen ulaşmadığı için yüksek akımlarda enerjinin önemli bir kısmı ısı enerjisine dönüşmekte ve EHK performansını düşürmektedir.



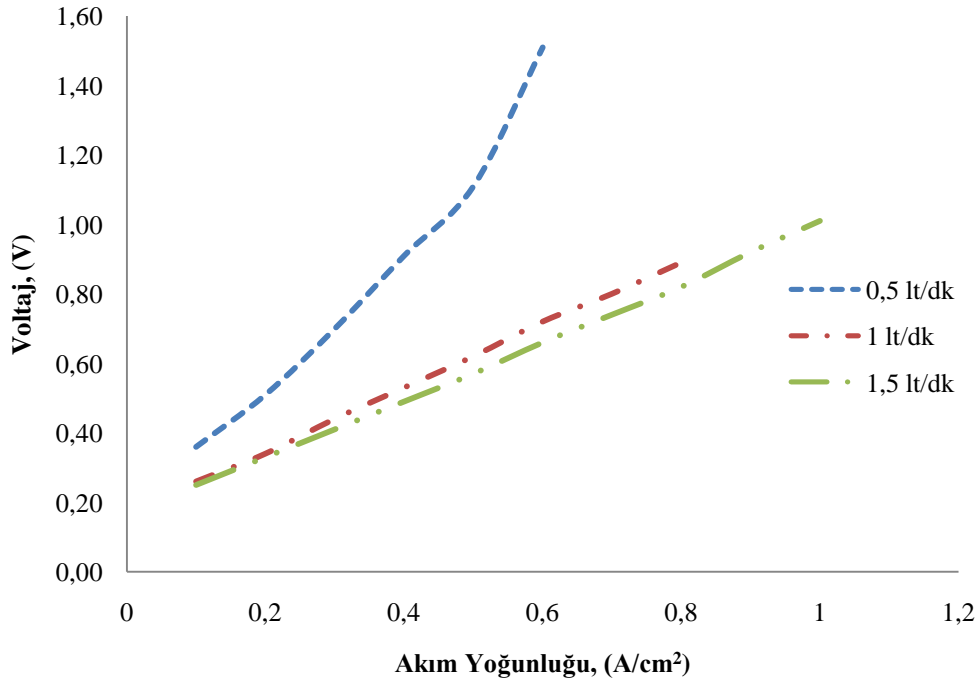
Şekil 4.11. 10 bar basınçta debi etkisi



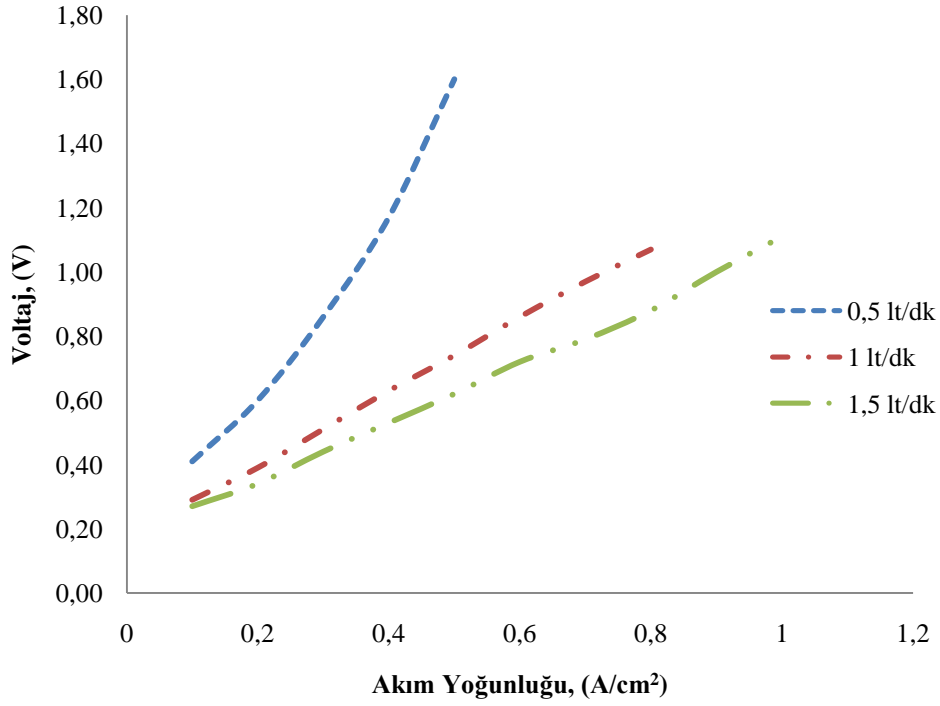
Şekil 4.12. 20 bar basınçta debi etkisi



Şekil 4.13. 30 bar basınçta debi etkisi

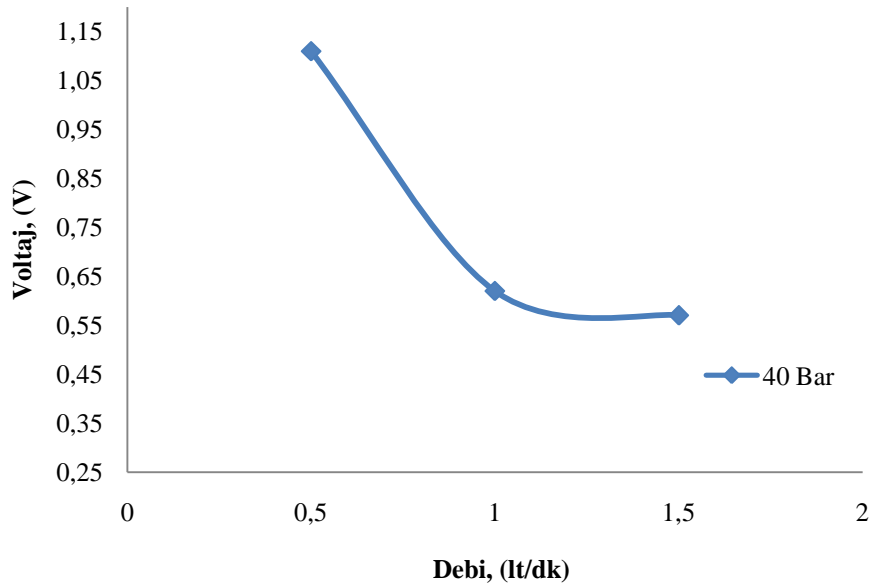


Şekil 4.14. 40 bar basınçta debi etkisi



Şekil 4.15. 50 bar basınçta debi etkisi

Teorik olarak Faraday kanunundan, her bir hücresi 50 cm² aktif alana sahip üç hücreli ve 50 A ile çalışan EHK yığımında anottan katoda geçebilen hidrojen debisi yaklaşık olarak 0,63 lt/dk olarak hesaplanmıştır. Ancak sızıntı gibi kayıplardan ve yapılan deneyler sonucu değerlendirildiğinde üç hücreli EHK yığını için 1,5 lt/dk hidrojen debisinin uygun olduğu belirlenmiştir.



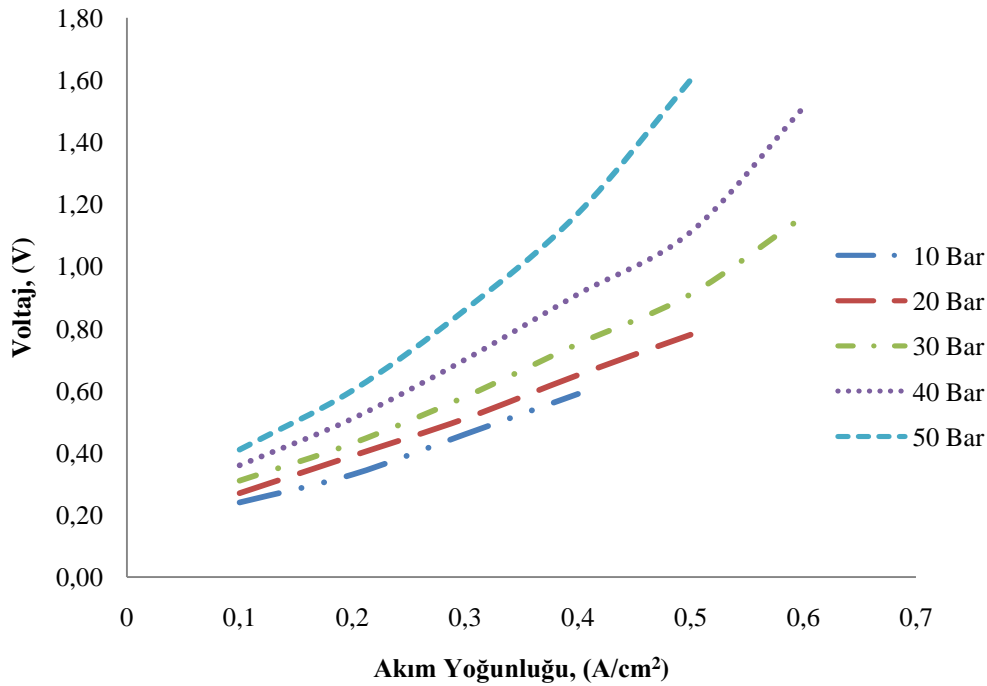
Şekil 4.16. 40 bar diferansiyel basınç ve 0,5 A/cm² akım yoğunluğunda debi etkisi

Şekil 4.16’da verilen grafikte görüldüğü üzere 40 bar diferansiyel basınç ve $0,5 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğuna EHK yığınınına gönderilen hidrojen debisi arttıkça hücrelere daha iyi dağılarak reaksiyona giren hidrojen miktarı artmış aynı akım yoğunluğunda daha az voltaj çekerek daha yüksek performansta çalışmaktadır.

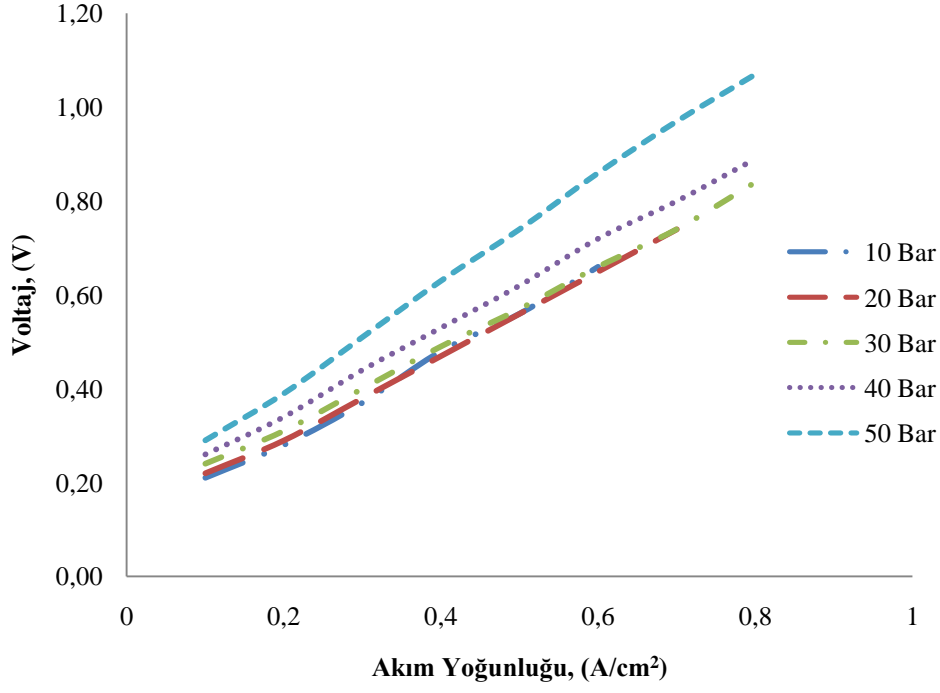
4.2.2 Basıncın yığın performansına etkisi

Üç hücreli EHK yığınınında 50 bar basınca kadar farklı debilerde hidrojen gönderilerek yığın performansına etkileri araştırılmıştır. Şekil 4.17- Şekil 4.19’da verilen grafiklerde de görüldüğü üzere düşük hidrojen debilerinde ($0,5 \text{ lt/dk}$ ve 1 lt/dk) basıncın artması ile daha üst akım değerlerine ulaşılsa da belirli bir noktadan sonra ani sapmalar meydana gelmektedir.

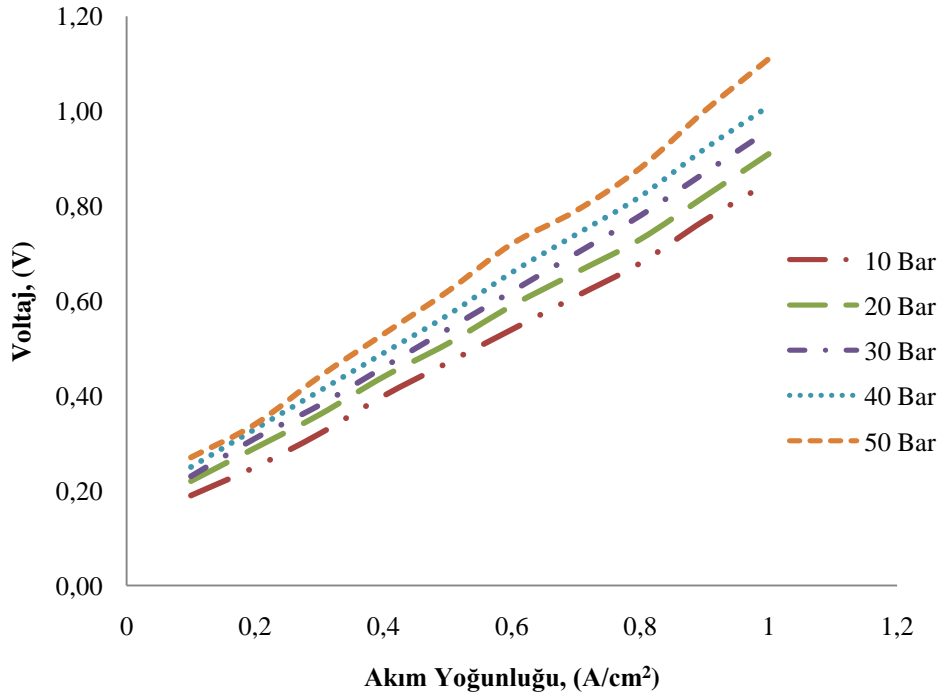
Mekanik kompresörlerde olduğu gibi elektrokimyasal hidrojen kompresöründe de istenilen basınç değeri arttıkça EHK yığınınına verilmesi gereken güç de artmaktadır.



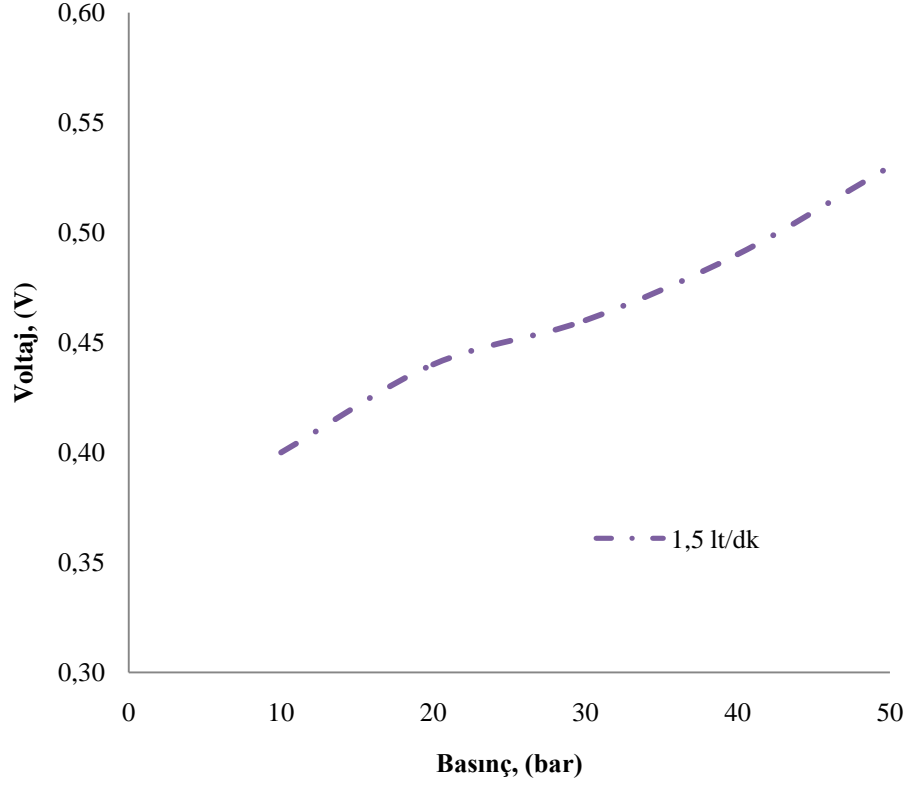
Şekil 4.17. 0,5 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi



Şekil 4.18. 1 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi



Şekil 4.19. 1.5 lt/dk hidrojen debisinde basınç etkisi



Şekil 4.20. 1,5 lt/dk debi ve 0,4 A/cm² akım yoğunluğunda basınç etkisi

Şekil 4.20’de 0,4 A/cm² akım yoğunluğunda ve 1,5 lt/dk hidrojen debisi ile çalışan EHK yığını için verilen performans grafiğinden yüksek basınç farkları için aynı akım yoğunluğunda daha çok voltaja ihtiyaç olduğunu dolayısıyla daha fazla güç harcandığı görülmektedir.

BÖLÜM V

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, hidrojeni sessiz, titreşimsiz, yüksek verimde sıkıştıran aynı zamanda da saflaştırabilen elektrokimyasal hidrojen kompresör hücre ve yığını geliştirilmiştir. Elektrokimyasal hidrojen kompresörü tek hücreli ve üç hücreli yığın olmak üzere iki farklı boyutta 50 cm² aktif alana sahip MEG için tasarlanmıştır. Tasarım sonucu EHK hücre ve yığın bileşenlerinin imalatı yapılarak uygun sıkıştırma torqu ile bir araya getirilip montajı tamamlanmıştır. Geliştirilen elektrokimyasal hidrojen kompresör hücresi ve yığını ile yapılan testlerde 60 bar diferansiyel basınca kadar çıkılmıştır. Ancak EHK hücre performansına etki eden parametrelerden akım, voltaj, basınç ve hidrojen debisinin etkisi 10 bar basınç ile 50 bar basınç aralığında incelenmiştir.

EHK performansının basınç arttıkça sıkıştırma işinden dolayı düştüğü fakat yüksek basınçlarda sıcaklığın artışı ile elektrokimyasal reaksiyon hızının arttığı tespit edilmiştir.

Debi deneyleri sonucunda ise tek hücreli EHK için 0,6 lt/dk hidrojen debisinden sonra ki değerlerin hücre performansına belirgin bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Yaklaşık 0,6 lt/dk debide hidrojenin gönderilmesi yeterli olacağı belirlenmiştir. Üç hücreli EHK yığını için ise maksimum performans 1,5 lt/dk hidrojen debisinde yakalanmıştır. Elektrokimyasal reaksiyon için gerekli hidrojen debisinden fazlasını göndermeyerek hidrojen üretim maliyetinden de kâr sağlanmış olur.

Elektrokimyasal hidrojen kompresörü, yüksek verimi ve kompakt yapısı sayesinde hidrojen kullanımı olan bütün sektörlerde rahatlıkla kullanılacak bir ürün potansiyeline sahiptir. Ancak, ticari bir değer kazanabilmesi için hidrojenin katalizör tabakasına homojen dağıtılması, geri difüzyonun azaltılması, çalışma basıncının artırılması vb. üzerine Ar-Ge çalışmalarına devam edilmelidir.

KAYNAKLAR

Acar, M. C., Elektrokimyasal hidrojen kompresörünün performansına etki eden parametrelerin deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.

Barbir, F. ve Görgün, H., Electrochemical hydrogen pump for recirculation of hydrogen in a fuel cell stack, *Journal of Applied Electrochemistry* 37, 359-365, 2007.

Casati, C., Longhi, P., Zanderighi, L., Bianchi, F., Some fundamental aspects in electrochemical hydrogen purification/compression, *Journal of Power Sources*, 108, 103-113, 2008.

Görgün, H., Hidrojenin Enerji Dışı Kullanımı, *Hidrojen Eğitim Konferansı*, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, 2006.

Grigoriev, S.A., Djous, K.A., Millet, P., Kalinnikov, A.A., Porembskiy, V.I., Fateev, V.N., Blach, R., Characterization of pem electrochemical hydrogen compressors, *Proc. Fundamentals & Development of Fuel Cells 2008 Conference*, s.10-12, Aralık 2008.

Grigoriev, S.A., Shtatniy, I.G., Millet, P., Porembsky, V.I., Fateev, V.N., Description and characterization of an electrochemical hydrogen compressor/concentrator based on solid polymer electrolyte technology, *Int. J. Hydrogen Energy* 36, 4148-4155, 2011.

Ito, K., Hao, Y. M., Nakajima, H., Yoshizumi, H., Sasaki, K., Electrochemical characterization of hydrogen pump with internal humidifier and dead-end- anode channel, *ECS Transactions*, 58 (1) 681-691, 2013.

Kılıç, N., Hidrojen Enerjisinin ve Hidrojen Teknolojilerinin Ekonomideki Yeri Pazar Gelişimi ve Pazar Payı Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Sosyal Bilimler Enstitüsü, s.6-7, 2008.

Oral, E., Hidrojen Yakıtlı Proton Dönüşüm Zarlı Yakıt Pili ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, s. 1-4, 2005.

Rohland, B., Eberle, K., Strobel, R., Scholta, J., and Garche, J., Electrochemical hydrogen compressor, *Electrochimica Acta*, Vol. 43, No. 24, pp. 3841-3846, 1998.

Ströbel, R., Oszcipok, M., Fasil, M., Rohland, B., Jörissen, L., Garche, J., The compression of hydrogen in an electrochemical cell based on a PE fuel cell design, *Journal of Power Sources* 105, 208-215, 2002.

Tamzok, Nejat ve Mehmet Torun, Türkiye Enerji Politikaları İçerisinde Kömürün Önemi, *TMMOB V. Enerji Sempozyumu*, TMMOB, 21-23 Aralık 2005, Ankara.

Usta, G., Hidrojen ve Hidrojen Metan (Hythane) Karışımının İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Fen Bilimleri Enstitüsü, s 9-10, 2010.

ÖZ GEÇMİŞ

Nebi YELEGEN 15.03.1988 tarihinde Konya/Ereğli’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ereğli’de tamamladı. 2006 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden Haziran 2011’da birincilikle mezun oldu. Aynı yılda Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Temmuz 2011 - Aralık 2013 tarihleri arasında Aks Teknik Yapı Denetim şirketinde makine mühendisi olarak çalıştı. Ocak 2014’de Niğde Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvar’ına uzman olarak atandı ve halen görevine devam etmektedir.

