



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

BUJİ PLAZMA SENTETİK JET AKTÜATÖRÜNÜN PEM YAKIT PİLİ  
PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET SEYHAN

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

BUJİ PLAZMA SENTETİK JET AKTÜATÖRÜNÜN PEM YAKIT PİLİ  
PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

MEHMET SEYHAN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU

Aralık 2015

**Mehmet SEYHAN** tarafından **Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU**'nun danışmanlığında hazırlanan "**Buji Plazma Sentetik Jet Aktüatörünün PEM Yakıt Pili Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi**" adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

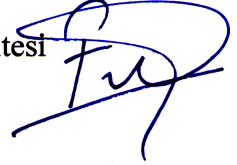
Başkan : Yrd. Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU, Karadeniz Teknik Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU (Danışman), Niğde Üniversitesi



Üye : Yrd. Doç. Dr. Fuat KARAKAYA, 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.

MEHMET SEYHAN



## ÖZET

### BUJİ PLAZMA SENTETİK JET AKTÜATÖRÜNÜN PEM YAKIT PİLİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

SEYHAN, Mehmet

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU

Aralık 2015, 74 sayfa

Bu yüksek lisans tez çalışması iki ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi, Buji Plazma Sentetik Jet diye adlandırılan yeni bir aktuatör geliştirmek ve bu geliştirilmiş yeni aktuatörü kızgın tel anemometresi kullanarak durgun havada karakterize etmektir. İkincisiyse, PEM yakıt pili performansı üzerine BPSJ aktuatörün etkilerini deneysel olarak araştırmaktır. BPSJ aktuatör üzerinde farklı yüksek voltaj güç kaynaklarının, farklı hacimlere sahip olan başlıkların, farklı h/d oranlarının, duty cycle'ın ve frekansın etkisi yaklaşık olarak jet hızının büyüklüğünü belirlemek için kızgın tel anemometresi kullanılarak incelenmiştir. BPSJ aktuatör ile 120 m/s'nin üzerinde anlık jet hızı elde edilebilmiştir. Duman tel akış görüntüleme deneyleri düz plaka üzerinde gelişen sınır tabakayı BPSJ aktuatörün nasıl etkileyebildiğini görselleştirmek için gerçekleştirilmiştir. Oluşan sentetik jetin düz plaka etrafında gelişen sınır tabakayı bozarak sınır tabakanın üzerindeki kayma tabakalarını etkileyecek kadar güçlü olduğunu göstermektedir. Maksimum normalize hız beklendiği gibi  $h/d=4$ 'de elde edilmiştir. BPSJ aktuatör yakıt pilinin katot kısmına uygulandığında, akım ve güç yoğunluğu yakıt pilinin düşük voltaj değerleri için az oranda artış sağlanmıştır. Fakat bu artış deneysel ölçüm belirsizliği içerisinde. Bu yüzden BPSJ aktuatörün, PEMYP performansı üzerine önemli bir etkinin olmadığı gösterilmiştir.

*Anahtar Sözcükler:* PEM yakıt pili, plazma aktuatör, sentetik jet.

## SUMMARY

### INVESTIGATION OF EFFECT OF SPARK-PLUG PLASMA SYNTHETIC JET ACTUATOR ON PEM FUEL CELL PERFORMANCE

SEYHAN, Mehmet

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Associate Professor Dr. Yahya Erkan AKANSU

December 2015, 74 pages

This master thesis consists of two main parts. First one is to develop a promising novel actuator that is called as Spark-Plug Plasma Synthetic Jet and characterize this developed actuator by using hot-wire anemometer in quiescent air. Second one is to investigate effects of SPSJ actuator on the performance of PEMFC experimentally. Effect of different high voltage power supplies, the caps having different cavity, different h/d ratio, duty cycle and frequency on the actuator was examined by using hot-wire anemometer in order to determine magnitude of jet velocity approximately. The maximum velocity was obtained with this actuator over 120 m/s. Smoke-wire flow visualization experiments in the wind tunnel were also carried out to visualize how the developed SPSJ actuator can affect the boundary layer developing over the flat plate. Actuator characterization results were indicated that velocity of synthetic jet is strong enough to penetrate the developed boundary layer over the flat plate. The maximum velocity was expectedly obtained at  $h/d=4$ . When SPSJ actuator applied to cathode side of PEMFC, current and power density slightly increased for low voltage level of PEMFC. However this increasing is within experimental measurement uncertainty. Thus, it can be concluded that there is no significant effect of SPSJ actuator on PEMFC performance.

*Keywords:* PEM fuel cell, plasma actuator, synthetic jet.

## ÖNSÖZ

Geliştirilmiş olan BPSJ aktuatör hareketli parça içermemesi, harici hava kaynağına ihtiyaç duymaması, hafif ve sisteme kolayca entegre edilebilir olması gibi sebeplerden dolayı bu tez çalışması kapsamında yakıt piline uygulanmasının yanı sıra aktif akış kontrol cihazı olarak havacılık uygulamalarında da umut vaat edici bir potansiyele sahiptir. Bu yüksek lisans çalışması kapsamında, bu aktuatörün yakıt pili performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Bunun için öncelikle BPSJ aktuatörün oluşturduğu jet akışının karakterizasyonu yapılarak en uygun çalışma aralıkları belirlenmiştir. Aktuatörün oluşturduğu jeti görselleştirebilmek için düz plaka üzerine yerleştirilerek rüzgar tüneline duman tel yöntemiyle akış görüntüleme deneyi yapılmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tez çalışmam sırasında tecrübelerinden yararlandığım Yrd. Doç. Dr. Fuat KARAKAYA'ya ve Yrd. Doç. Dr. Fatih AY'a teşekkürlerimi ifade etmek isterim. Bu tezin hazırlanması esnasında desteklerini esirgemeyen kıymetli meslektaşlarım Cihan YEŞİLDAĞ, Hürrem AKBIYIK ve Vuralcan HAMMUTOĞLU'na teşekkürleri bir borç bilirim

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm hayatım boyunca maddi ve manevi koruyuculuğumu üstlenen annem Hayriye SEYHAN'a ithaf ediyorum.

Bu tez çalışması, 213M179 numaralı “PEM Yakıt Pillerinde Plazma Sentetik Jet Kullanılarak Yakıt Pili Performansının İyileştirilmesi” isimli TÜBİTAK projesinden üretilmiş olup, bursiyer öğrencisi olarak bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde finansal destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
ÖNSÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ .....	xii
SİMGE VE KISALTMALAR .....	xiii
BÖLÜM I GİRİŞ .....	1
1.1 Sentetik Jet Aktüatörler .....	2
1.1.1 Piezoelektrik sentetik jet aktüatör .....	3
1.1.2 Piston silindir mekanizmalı sentetik jet aktüatör .....	4
1.1.3 Hoparlörlü sentetik jet aktüatör .....	5
1.2 Plazma .....	5
1.2.1 Plazma sentetik jet aktüatörler .....	6
1.3 Yakıt Pili ve Hidrojen .....	12
1.3.1 Hidrojen .....	12
1.3.2 Yakıt pili .....	12
1.3.2.1 Proton değişim membranlı yakıt pili .....	15
1.3.2.2 PEMYP bileşenleri ve çalışma prensibi .....	16
1.4 Sentetik Jet Aktüatörler ve Yakıt Pili Uygulamaları .....	19
1.4.1 Plazmanın yakıt piline uygulanması .....	22
1.5 Bu Tez Çalışmanın Bilimsel Önemi .....	23
1.6 Tezin Amacı .....	23
BÖLÜM II BUJİ SENTETİK JET AKTÜATÖR .....	25
2.1 BPSJ Aktüatörün Bileşenleri .....	25
2.1.1 Güç kaynağı .....	27
2.2 BPSJ Aktüatörün Çalışma Prensibi .....	27
BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	29
3.1 BPSJ Aktüatörde Kullanılan Cihazlar .....	29

3.1.1 Kızgın tel anemometresi .....	29
3.1.2 Basınç ölçerler.....	31
3.1.3 Rüzgar tüneli .....	31
3.1.4 Duman tel yöntemiyle akış görüntülemesi .....	32
3.1.5 BPSJ aktüatörde kullanılan buji modelleri.....	33
3.1.6 BPSJ aktüatörü sürmede kullanılan güç kaynağı .....	33
3.1.7 Kullanılan elektriksel ölçüm aletleri .....	36
3.1.8 Güvenlik için alınan önlemler.....	36
3.2 PEM Yakıt Pili Tasarımı ve Deneylerinde Kullanılan Cihazlar .....	37
3.2.1 PEM yakıt pili tasarım ve montajı .....	37
3.2.2 Yakıt pili test istasyonu.....	40
3.2.3 PEM yakıt pilinin aktivasyonu.....	41
3.2.4 BPSJ aktüatörü yakıt pilini bağlamada kullanılan aparatları.....	44
<b>BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>47</b>
4.1 Geliştirilmiş olan BPSJ Aktüatör Deneyleri .....	47
4.1.1 Sürüm frekansı ve farklı bujilerin BPSJ aktüatörün anlık hızı üzerine etkisi..	47
4.1.2 Farklı buji başlıklarının BPSJ aktüatörün anlık hızı üzerine etkisi.....	49
4.1.3 Kızgın tel anemometre probunun konumunun anlık hız dağılımına etkisi .....	50
4.1.4 BPSJ aktüatör üzerine duty cycle etkisi.....	51
4.1.5 Nanopuls güç kaynağı kızgın tel anemometresi hız ölçümü.....	54
4.1.6 BPSJ aktüatörlü düz plaka etrafında akış görüntülemesi.....	55
4.2 PEM Yakıt Pili Deneyi .....	57
<b>BÖLÜM V SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>61</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>63</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>70</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>73</b>
<b>TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER .....</b>	<b>74</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 1.1.</b> Yakıt pillerinin karşılaştırılması (URL-1) .....	14
<b>Çizelge 1.2.</b> MEG varyasyonları için OCV değer tablosu (Cappelli ve Kim) .....	22
<b>Çizelge 2.1.</b> BPSJ aktüatörü için üretilen başlıkların üretim ölçüleri .....	26



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil 1.1.</b> Piezoelektrik (a), piston silindir (b) ve hoparlör tipi sentetik jet aktüatörlerin (c) şematik gösterimi (Mallinson vd., 2004).....	2
<b>Şekil 1.2.</b> Piezoelektrik sentetik jet aktüatörün şematik görünümü (a) ve Schleiren akış (b) görüntülemesi (Glezer ve Amitay 2002) .....	3
<b>Şekil 1.3.</b> Piston silindir mekanizmalı sentetik jetin şematik gösterimi (Gilarranz vd., 2005a).....	4
<b>Şekil 1.4.</b> Hoparlörlü sentetik jetin şematik görünümü (Rylatt ve O'Donovan, 2013)....	5
<b>Şekil 1.5.</b> PSJ aktüatör yardımıyla aldıkları zaman bağımlı Schlieren akış görüntülemesi (Zong vd., 2015a).....	9
<b>Şekil 1.6.</b> PSJ aktüatörle aldıkları zaman bağımlı Schlieren fotoğrafları (Jin vd., 2015)	9
<b>Şekil 1.7.</b> Genel bir YP'nin şematik gösterimi (Mench, 2008) .....	13
<b>Şekil 1.8.</b> Tek ve çift kutuplu plaka.....	13
<b>Şekil 1.9.</b> YP çeşitlerinde kullanılan yakıtın ve çalışma sıcaklıklarının şematik gösterimi (Çelik, 2009).....	15
<b>Şekil 1.10.</b> PEMYP çalışması, membran, gaz difüzyon tabakası ve elektrotların detaylı şematik gösterimi (Wang vd., 2011).....	17
<b>Şekil 1.11.</b> Farklı tip akış kanalı modelleri (Mench, 2008).....	18
<b>Şekil 1.12.</b> Piezoelektrik sentetik jet aktüatör (a) ve PEM yakıt piliyle (b) birleşimi (Seo vd., 2014) .....	19
<b>Şekil 1.13.</b> Han vd. (2012) tarafından kullanılan deney düzeneğinin şematik hali.....	20
<b>Şekil 1.14.</b> Hwang vd. (2010) tarafından kullanılan deney düzeneğinin şematik hali...	21
<b>Şekil 2.1.</b> BPSJ aktüatörün şematik (a) görünümü, BPSJ aktüatör montaj (b) hali .....	25
<b>Şekil 2.2.</b> Üretilmiş farklı ölçülere sahip BPSJ aktüatörün başlıkları .....	26
<b>Şekil 2.3.</b> BPSJ aktüatörün bir çevrimindeki adımlar .....	27
<b>Şekil 3.1.</b> Hız ölçüm sisteminin şematik gösterimi .....	31
<b>Şekil 3.2.</b> Tasarlanmış yakıt pilinin şematik görünümü .....	38
<b>Şekil 3.3.</b> BK Precision elektronik yük cihazı yazılımının genel görünümü .....	40
<b>Şekil 3.4.</b> Tipik polarizasyon eğrisi (Mench, 2008) .....	43
<b>Şekil 3.5.</b> PEM yakıt pilinin normal ve su birikmiş durumdaki güç-akım eğrisi .....	43
<b>Şekil 3.6.</b> Yakıt pili deney düzeneği.....	46

<b>Şekil 4.1.</b> $f_t = 130$ Hz' da 0-0.1 saniye aralığında anlık hız dağılımı .....	48
<b>Şekil 4.2.</b> BPSJ aktüatör için farklı bujiler üzerine tekrarlama frekansı 30 Hz (a) ve 50 Hz (b) etkisi .....	48
<b>Şekil 4.3.</b> Normalize anlık hızlarda tekrarlama frekansının etkisi .....	49
<b>Şekil 4.4.</b> $f_t=55$ Hz'de M2, M3, M4 ve M5 başlıklarının normalize anlık hızlar üzerine etkisi .....	50
<b>Şekil 4.5.</b> $f_t=30$ Hz için prob konumu $h/d= 4, 5.5, 6.5$ ve 8 anlık normalize hız dağılımı üzerine etkisi .....	51
<b>Şekil 4.6.</b> $f_u=0.5$ Hz için anlık hız dağılımında duty cycle'in değişiminin etkisi.....	52
<b>Şekil 4.7.</b> $f_u=1$ Hz (a) ve $f_u=10$ Hz (b) için anlık normalize hız dağılımına duty cycle'in değişiminin etkisi .....	53
<b>Şekil 4.8.</b> $f_u=20$ Hz (a) ve $f_u=50$ Hz (b) için anlık normalize hız dağılımına duty cycle'in değişiminin etkisi .....	53
<b>Şekil 4.9.</b> Duty cycle %50'de anlık normalize hız dağılımı üzerine uyarım frekansının değişiminin etkisi .....	54
<b>Şekil 4.10.</b> $f_t= 0.6, 0.7, 0.9$ ve 10 Hz'de hız ölçümü .....	55
<b>Şekil 4.11.</b> PEM yakıt pili farklı oksijen ve hava debileri (a) ve sabit 3.5 hava debisi ve farklı hidrojen debileri (b) için güç-akım eğrileri .....	58
<b>Şekil 4.12.</b> Voltaj-akım ve güç-akım eğrileri .....	59
<b>Şekil 4.13.</b> Sabit voltajda akım-zaman grafiği .....	59

## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

<b>Fotoğraf 1.1.</b> Grossman vd. (2003) tarafından geliştirilmiş PSJ aktüatörün görünümü..	7
<b>Fotoğraf 1.2.</b> Plazma aktivasyonlu yakıt pilinin montaj (a) görünümü ve plazmanın açık (b) hali (Cappelli ve Kim).....	22
<b>Fotoğraf 3.1.</b> Kızgın tel anemometresinin nozul ile kalibrasyonu.....	30
<b>Fotoğraf 3.2.</b> Nanopuls DA yüksek voltaj (a), audio güç amfisi ve bobinden (b) oluşan (Şanlısoy, 2013), tüplü monitör (c) ve transformatörlü (d) güç kaynağı	34
<b>Fotoğraf 3.3.</b> Fonksiyon jeneratörü (a), MOSFET anahtar (b) ve giriş akımı ( $I_{pp}$ ) ve voltajının ( $V_m$ ) osiloskoptan yakalanma görüntüsü (c).....	35
<b>Fotoğraf 3.4.</b> Faraday kafesi dışardan görünüşü (a) ve kafes içerisindeki nanopuls yüksek voltaj güç kaynağı (b).....	37
<b>Fotoğraf 3.5.</b> Kesilen conta (a), myler bandı (b), üçlü paralel serpantin akış kanalı (c) ve CNC lazer (d) kesim Cihazı.....	39
<b>Fotoğraf 3.6.</b> Tek hücreli PEM yakıt pilinin montaj aşamaları .....	39
<b>Fotoğraf 3.7.</b> Yakıt pili akış kanalında oluşan su birikimi .....	44
<b>Fotoğraf 3.8.</b> Üretilmiş tekli buji kanalı (a), tekli kanal tasarımı (b), tekli kanal yakıt piline montaj (c) hali ve tekli kanal yakıt pili tasarımının montaj (d) görünümü .....	45
<b>Fotoğraf 3.9.</b> Yakıt piline BPSJ aktüatörün direk bağlanmış halinin şematik olarak patlatılmış (a) görünümü, modifiye edilmiş akış kanalı(b) ve montaj (c) hali.....	45
<b>Fotoğraf 4.1.</b> BPSJ aktüatör kapalıyken düz plaka etrafında sınır tabakanın gelişimi ..	56
<b>Fotoğraf 4.2.</b> $f_u=1, 5$ ve $50$ Hz'de BPSJ aktüatör açıkken düz plaka etrafında akış görüntülemesi .....	56
<b>Fotoğraf 4.3.</b> Sınır tabaka içerisine nüfuz etmiş jetin gelişimi .....	56

## SİMGE VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
d	Orifis çapı
dk.	Dakika
$f_u$	Uyarım frekansı
$f_t$	Tekrarlama frekansı
G	Yakıt pili gücü
h	Kızgın tel probuyla başlık arasındaki mesafe
I	Yakıt pili akımı
$I_{pp}$	Pikden pike akım
$P_{dinamik}$	Dinamik basınç
$P_{statik}$	Statik basınç
$P_{toplam}$	Toplam basınç
Re	Reynolds sayısı
T	Sıcaklık
U	Jet hızı
$U_\infty$	Serbest akış hızı
$U_{max}$	Maksimum jet hızı
V	Yakıt pili voltajı
$V_m$	Ortalama voltaj
$\rho$	Yoğunluk
$\alpha$	Lüle düzeltme katsayısı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
AA	Alternatif Akım
AAKL	Aerodinamik Akış Kontrol Laboratuvarı
APAL	Atmosferik Plazma Araştırma Laboratuvarı
ARGE	Araştırma Geliştirme
ATV	Altivar

AYP	Alkalin Yakıt Pili
B1	BUZHW-2 model buji
B2	BUHW model buji
B3	BUHW-2 model buji
BPSJ	Buji Plazma Sentetik Jet
CCA	Constant Current Anemometer
CCD	Charge Coupled Devices
CNC	Computer Numerical Control
CTA	Constant Temperature Anemometer
DA	Doğru Akım
DBD	Dielektrik Bariyer Deşarjı
DMYP	Doğrudan Metanol Yakıt Pili
EHD	Elektrohidrodinamik
EKYP	Eriyik Karbonat Yakıt Pili
FAYP	Fosforik Asit Yakıt Pili
FS	Full Scale
G1	Transformatörlü güç kaynağı
G2	Nanopuls güç kaynağı
G3	Audio amfisi
G4	Tüplü monitör
ICCD	Intensified Charge Couple Device
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
MEG	Membran Elektrot Grubu
MFC	Mass Flow Controller
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OCV	Açık Devre Voltajı
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PEM	Proton Geçirgen Membranlı
PEMYP	Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Pili
PIV	Particular Image Velocimetry

PSJ	Plasma Synthetic Jet
Re	Reynolds sayısı
RFD	Radial Field Diaphragm
RH	Relative Humidity
SA	Sabit Akım
Sc	Schmidt sayısı
SLPM	Standard Liter Per Minutes
SV	Sabit Voltaj
Wo	Womersley sayısı
YP	Yakıt Pili
YSZ	Yttria Stabilized Zirconia

# BÖLÜM I

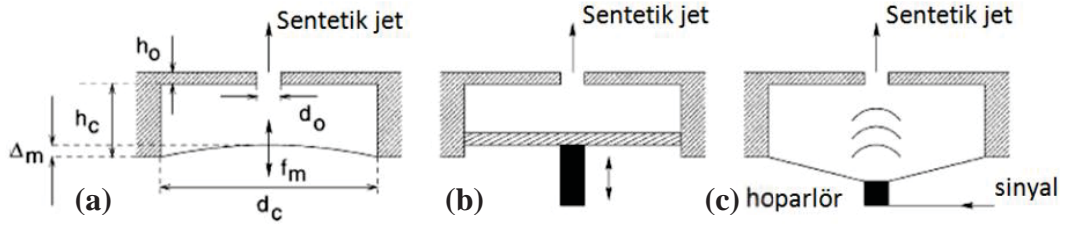
## GİRİŞ

Fosil yakıtların çevreye zarar vermesi, gün geçtikçe azalması gibi sebeplerden dolayı günümüzde tüm dünya üzerinde insanlar fosil yakıtlara alternatif olabilecek yenilenebilir, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynakları arayışı içine girmişlerdir. Dünyanın üzerinde durduğu temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi (rüzgâr türbinleri), jeotermal, biokütle, gel-git ve dalga enerjisi en revaçta olanlardır. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara nazaran çevreye çok az zarar vermelerine rağmen, verimlerinin düşük, yatırım maliyetlerinin yüksek olması ve sürekli kullanılamamaları gibi dezavantajlara sahiptirler.

Alternatif enerji kaynakları için dünya çapında araştırma faaliyetleri ve uygulama çalışmaları ivedilikle devam etmektedir. Bu kaynaklar içerisinde en kullanışlı olan hidrojenidir. Hidrojen her ne kadar enerji kaynağı olarak anılsa da iyi bir enerji taşıyıcıdır. Hidrojen fosil yakıtlardan elde edilebildiği (çevreye çok daha az zarar vererek) gibi birleşik sistem olarak yenilenebilir enerji kaynakları yardımıyla da elde edilebilir. Hidrojen, elektrokimyasal bir cihaz olan yakıt pilinde yakıt olarak kullanılarak reaksiyonun kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür ve yan ürün olarak çevreye sadece ısı ve su verir (Mench, 2008). Bu yakıt pillerinden biri olan proton geçirgen (veya değişim) membranlı (PEM) yakıt pili teorik olarak yüksek verimli, sessiz çalışma, çevre dostu olma ve birleşik sistem olarak kullanılabilmesi gibi nedenlerden dolayı endüstriden evsel kullanıma her alanda kullanılabilir. Fakat yüksek maliyetli, kısa kullanım ve yeterli verime sahip olmaması gibi nedenlerden dolayı yakıt pilinin verimini arttıracak yeni yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda literatürde piezoelektrik diyaframlı, piston silindir ve hoparlörlü sentetik jet aktüatörler kullanılarak PEM yakıt pilinin performansında iyileşme olduğunu belirten çalışmalar mevcuttur. Bu bölümde, daha önce literatürde mevcut olmayan plazma sentetik jet aktüatörlerin PEMYP sistemlerinde kullanılması üzerine disiplinler arası bir çalışma gerçekleştirilmiş olup burada Sentetik jet aktüatörler, plazma ve yakıt pili olmak üzere üç ana başlık altında anlatılacak ve her bir konu hakkında detaylı bilgi verilecektir.

## 1.1 Sentetik Jet Aktüatörler

Akış kontrol yöntemlerini aktif ve pasif akış kontrolü olarak iki kısma ayırırsak sentetik jet aktüatörler aktif akış kontrol yönteminin içine girmektedir. Pasif akış kontrol yönteminde akışı kontrol etmek için enerji kullanılmazken aktif akış kontrol yönteminde akışı kontrol etmek için akışa enerji verilerek kontrol sağlanmaktadır (Gad-el-Hak, 2006). Aktif akış kontrolünde akışı kontrol etmekte kullanılan sentetik jet aktüatör, plazma aktüatör vb. gibi pek çok farklı aktüatör çeşidi bulunmaktadır. Sentetik jet aktüatörler ısı transferinin iyileştirilmesi ve akış kontrolünde sürükleme kuvvetinin azaltılmasında kullanılan cihazlardır. Ayrıca, son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalarda sentetik jet aktüatörler PEM yakıt pilinin performansının artırılmasında da kullanılmaktadır. Sentetik jet, üfleme ve emme hareketi periyodik (peş peşe) olarak gerçekleştirilerek üretilen jet tipidir. Sentetik jet lülesinden üfleme ve emme periyodu süresince boşluk hacminden çıkan ve giren kütle miktarının aynı olmasından dolayı sıfır net kütle akılı jet (zero net mass flux) olarak da adlandırılmaktadır. Ayrıca literatürde sıfır net kütle akılı olmayan jet oluşturan aktüatörler mevcuttur. Bu tip aktüatörler harici bir hava kaynağıyla beslenmesi gerekmektedir (Trávníček vd., 2006). Sentetik jetler temel olarak üç farklı yoldan üretilmektedir. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi bunlar sırasıyla piezoelektrik, piston-silindir ve hoparlör kullanılarak üretilen salınım sayesinde sentetik jet üretilmesini sağlayan aktüatörlerdir (Mallinson vd., 2004).

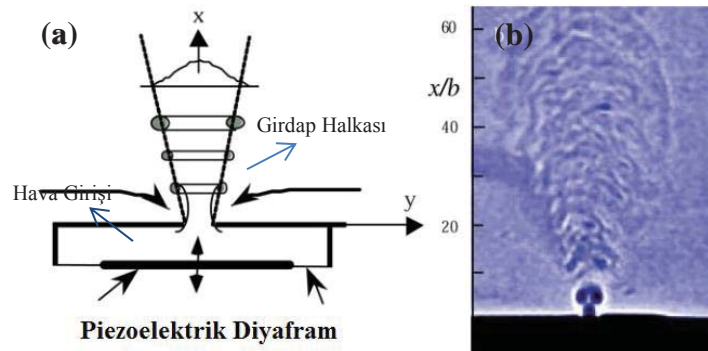


**Şekil 1.1.** Piezoelektrik (a), piston silindir (b) ve hoparlör tipi sentetik jet aktüatörlerinin (c) şematik gösterimi (Mallinson vd., 2004)

Bu sentetik jet aktüatör çeşitlerinin çalışma prensipleri, birbirlerine göre avantajlarını ve karakteristik özelliklerini ortaya koyabilmek için aşağıdaki alt başlıklarda anlatılmıştır. Bunların yanı sıra sentetik jet üretmekte kullanılan bir diğer yöntem olan plazmalı sentetik jet aktüatörler plazma başlığı altında ele alınacaktır.

### 1.1.1 Piezoelektrik sentetik jet aktüatör

Salınım diyaframı olarak piezoelektrik disk; hoparlör ve piston-silindir gibi mekanizmalara alternatif olarak birkaç araştırmacı tarafından küçük boyut, hafiflik, hızlı yanıt süresi, yüksek etkinlik ve nispeten daha az güç tüketiminden dolayı sentetik jet üretmek amacıyla kullanılmıştır (Mane vd., 2005). Piezoelektrik diyaframa gerilim uygulandığında, diyafram emme ve üfleme hareketini yapabilmek için şekil değiştirmeye başlar. Bu sayede aşağıya doğru hareket ederek çukurlaşma süresince orifis deliğinden boşluğa hava çekme ve yukarı doğru hareket ederek tümsekleşme süresince dışarıya orifis deliğinden havayı jet olarak göndermektedir. Bu işlem milisaniye mertebesinde çok hızlı gerçekleşmektedir. Orifis yoluyla emilen tüm hava diyaframın yukarı hareketiyle tekrar üflendiği için giren ve çıkan net kütle akısı sıfırdır. Piezoelektrik diyafram, piston-silindir ve hoparlör ile karşılaştırıldığında daha geniş sürüm frekans aralığına, daha az güç tüketimine, daha hafif ve daha az güç tüketimi gibi avantajlara sahiptir (Jordan vd., 1999). Piezoelektrik diyafram olarak kullanılan malzemeler Bimorph, Thunder ve RFD (Radial Field Diaphragm) örnek olarak verilebilir (Mane vd., 2005). Piezoelektrik sentetik jet aktüatör, diyaframın karşı yüzeyinde yarıklı salınım diyaframından oluşur (Şekil 1.2 (a)). Diyafram salındığında, hava jeti girdap halkaları şeklinde orifisten dışarı doğru atılmaktadır. Glezer ve Amitay (2002) yaptıkları çalışmada 1140 Hz piezoelektrik diyafram sürüm frekansında Schlieren akış görüntüleme yöntemiyle yaptıkları akış görüntülemesi Şekil 1.2 (b)'de görülmektedir.

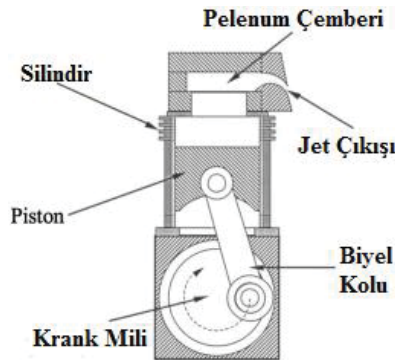


**Şekil 1.2.** Piezoelektrik sentetik jet aktüatörün şematik görünümü (a) ve Schlieren akış görüntülemesi (b) (Glezer ve Amitay 2002)

### 1.1.2 Piston silindir mekanizmalı sentetik jet aktüatör

Piston silindir mekanizmalı sentetik jet bir motor yardımıyla tahrik edilerek piston silindir mekanizmasının hareketi sayesinde silindir üzerindeki yarıktan silindir içerisine havanın girişi ve jet olarak çıkışı sağlanmaktadır. Yarıktan emilen tüm hava pistonun ileri doğru hareketiyle tekrar üflendiği için giren ve çıkan net kütle akısı sıfırdır. Piston silindir mekanizmasında silindir içerisindeki ileri-geri hareketinin sağlanmasında Krank-Biyel mekanizması (Crittenden ve Glezer 2006; Gilarranz vd., 2005a; Gilarranz vd., 2005b) veya Scotch-Yoke mekanizması (Hsu vd., 2013) kullanılmaktadır.

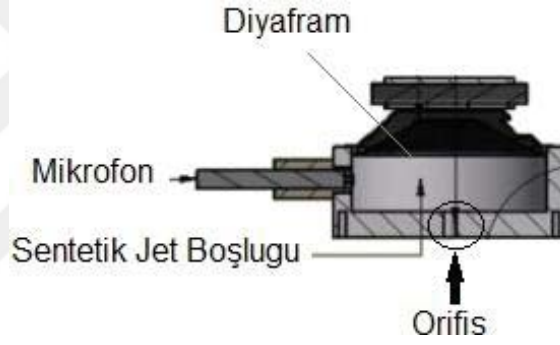
Crittenden ve Glezer (2006), hem üfleme hem de emme periyodu boyunca ses hızına ulaşabilir ve diğer sentetik jetlere kıyasla çok daha yüksek olan jet hızlarına ulaşabilmek için piston silindir mekanizmalı sentetik jetlerin (Şekil 1.3'de şematik olarak görülmektedir) kullanılabileceğini kaydetmişlerdir. Gilarranz ve diğ. (2005a), tarafından yapılan çalışmada piston-silindir mekanizmalı sentetik jet eyleyiciyi küçük ölçekte (uçak kanadının içerisine yerleştirilebilecek boyutlarda) 6 silindirli olarak tasarlayıp üretmişler ve ilk çalışmalarında karakterizasyonu üzerine çalışmışlardır. 6 silindirli aktüatörün maksimum 1200W (1.6hp) güç tüketmesiyle maksimum 124 m/s hıza ulaşılmıştır. Gilarranz vd. (2005b) çalışmalarının ikinci aşamasında üretmiş oldukları 6 silindirli eyleyiciyi NACA 0015 uçak kanadı içerisine yerleştirip  $8.96 \times 10^5$  Reynolds sayısında, akış ayrılması ve kaldırma kuvveti gibi uçak kanadının aerodinamik performansı üzerine etkisini incelemişlerdir. Eyleyici sayesinde stol açısını 12 dereceden 18 dereceye doğru kaydırırken, kaldırma kuvvetinde 80% artış sağlandığını ortaya koymuşlardır.



Şekil 1.3. Piston silindir mekanizmalı sentetik jetin şematik gösterimi (Gilarranz vd., 2005a)

### 1.1.3 Hoparlörlü sentetik jet aktüatör

Şekil 1.4’de görüldüğü gibi hoparlörlü sentetik jet; aktüatör diyaframı, jet çıkışı için orifis ve diyaframla karşı orifis duvarı arasında kalan hava boşluğundan oluşmaktadır. Bu aktüatörde de diğerlerinde olduğu gibi orifisten periyodik olarak üfleme ve emme hareketi oluşturulmaktadır. Her bir çevrim boyunca hoparlörün diyaframının aşağı (emme) ve yukarı (üfleme) hareketiyle orifisten dışarıya doğru hava jeti olarak çıkmakta ve içeriye doğru yakın çevre ortamından akışkan emişi yapılmaktadır. Orifisten emilen tüm hava diyaframın yukarı hareketiyle tekrar üflendiği için giren ve çıkan net kütle akısı sıfırdır. Rylatt ve O’Donovan (2013) elektronik endüstrisinin ihtiyacı olan işlemci gibi elektronik malzemelerin soğutma probleminin çözümüne yardımcı olabilmek için hoparlörlü deney düzeneği kurmuşlardır.



Şekil 1.4. Hoparlörlü sentetik jetin şematik görünümü (Rylatt ve O’Donovan, 2013)

Daha öncede bahsettiğimiz gibi birçok farklı sentetik jet aktüatör var olmasına rağmen hoparlörlü sentetik jet aktüatörler bunlar içerisinde en basit ve ucuz olanlardan birisidir. Hoparlör ve piezoelektrik sentetik jetler bir sinyal şartlandırıcı yardımıyla kare, sinüzoidal vb. gibi sinyalle sürülüp genlik ve frekans modülasyonu yapılabilmektedir. Ayrıca piezoelektrik ve hoparlör tipi sentetik jet aktüatör sistemlerinde diyaframın yer değiştirme mesafesi sınırlı olduğundan sürülen hava miktarı piston silindir mekanizmasına oranla çok küçük olup elde edilen jet hız değeri de düşüktür.

## 1.2 Plazma

Maddenin dördüncü hali olarak tanımlanan plazma ilk defa 1879 yılında İngiliz fizikçi Sir. William Crookes tarafından ortaya atılmıştır ve plazma ismi 1929 yılında Amerikalı

bilim adamı Irving Langmuir tarafından verilmiştir (Roth, 1995). Plazma genel manada sıcak ve soğuk plazma olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Bunlara örnek olarak güneş sıcak plazma ve günlük hayatta sürekli kullandığımız floresan ampulde bir soğuk plazma kaynağıdır.

Plazma elektron, pozitif ve negatif iyonlardan ve yüksüz parçacıklardan oluşmaktadır. Yüklü parçacıklar ihtiva etmesine rağmen plazma net elektriksel yük olarak yüksüzdür, fakat içerisinde yük taşıyıcılar olması nedeniyle iyi bir elektrik iletkenliğine sahiptir. Plazmayı oluşturabilmek için ortamda yeterince termal, elektriksel, magnetik vb. gibi farklı türden bir enerjiye ihtiyaç vardır. Ayrıca, oluşan plazmanın süreklilik arz edebilmesi için enerji kaynağının devamlı olması gerekmektedir. Plazma günümüzde endüstriden, sağlığa birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Son yıllarda, çok sayıda plazma tabanlı di-elektrik bariyer deşarj (DBD) (Roth, 2003; Feng vd., 2012; Akansu vd., 2013), DBD plazma sentetik jet (Santhanakrishnan ve Jacob, 2006; Santhanakrishnan ve Jacob, 2007a; Santhanakrishnan ve Jacob, 2007b), lokal ark filament (Samimy, vd. 2007), plasma sentetik jet (PSJ) (Grossman vd., 2003; Cybyk vd., 2005; Cybyk vd., 2006; Popkin vd., 2013; Ko vd., 2010; Haack vd., 2011; Narayanaswamy vd., 2010; Narayanaswamy vd., 2011; Zong vd., 2015a; Shin, 2010; Laurendeau vd., 2015) vb. gibi aktüatörler geliştirilmiştir. Bu ismi geçen aktüatörler üzerine; küt ve aerodinamik cisimler etrafındaki akışı kontrol etmek, kaldırma kuvvetinin artırılması ve sürüklenme kuvvetinin azaltılması amacıyla literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Sonraki bölümde PSJ aktüatörlerin literatürde ki yeri ve kullanım amaçlarına yer verilecektir.

### **1.2.1 Plazma sentetik jet aktüatörler**

Daha öncede bahsedildiği gibi sentetik jet, üfleme ve emme hareketinin arka arkaya gerçekleştirerek üretilen jet tipidir. Bu bağlamda literatürde son yıllarda bilim insanlarının büyük ölçüde dikkatini çekmesi ve umut vaat etmesi gibi nedenlerden dolayı plazma tabanlı sentetik jet aktüatörler sürekli artan bir ivmeyle geliştirilmeye devam etmektedir. Aşağıda bu aktüatörlerle alakalı literatürde yapılmış olan çalışmalar özetlenmiştir.

İlk olarak Grossman vd. (2003), Johns Hopkins Üniversitesi uygulamalı fizik laboratuvarında “Sparkjet” olarak isimlendirdikleri sentetik jet aktüatörünü geliştirmişlerdir. Bu aktüatör seramikten yapılmış küçük bir hacim içerisinde biri anot diğeri katot olmak üzere iki elektrottan oluşmaktadır. Fotoğraf 1.1’de geliştirdikleri bu aktüatörün ayrı ayrı parçalar ve montaj hali görünmektedir. Yaptıkları çalışmada geliştirdikleri aktüatörün özelliklerini araştırırken deneysel çalışmanın yanı sıra aktüatörün 2 boyutlu olarak modellemesini yaparak sayısal olarak da inceleme yapmışlardır. Aktüatörün çalışmasını üç adıma ayırmışlardır; bunlar sırasıyla enerji bırakımı (energy deposition), gaz boşalımı (gas discharge) ve yenilenmedir (recovery). Literatürde diğerk araştırmacılar tarafından Sparkjet aktüatör yerine plazma sentetik jet aktüatör (Plasma synthetic jet actuator) (Narayanaswamy vd., 2010; Narayanaswamy vd., 2011; Zong vd., 2015b; Caruana vd., 2013; Hardy vd., 2010; Caruana vd., 2009; Belinger vd., 2014; Belinger vd., 2011) olarak isimlendirilmektedir. Literatürde plazma sentetik jet aktüatör isminin kullanıldığı birbirinden farklı olan iki aktüatör tipi mevcuttur. Bunlardan birincisi Santhanakrishnan ve Jacob (2006) tarafından geliştirilen, DBD aktüatörü kapalı bir hacim içerisine alıp açtıkları yarıktan jet ürettikleri aktüatördür. İkincisi ise Grossman vd. (2003) tarafından geliştirilen aktüatördür. Bu tez çalışmasında karışıklık olmaması için Santhanakrishnan ve Jacob tarafından geliştirilen aktüatör DBD plazma sentetik jet olarak adlandırılmıştır.



**Fotoğraf 1.1.** Grossman vd. (2003) tarafından geliştirilmiş PSJ aktüatörünün görünümü

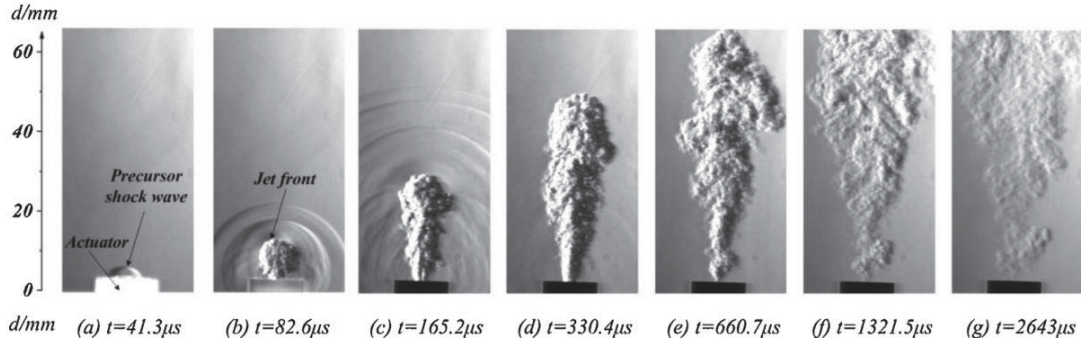
Cybyk vd. (2005 ve 2006) hem deneysel hem de sayısal olarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında PSJ aktüatörün etkinliğini ortaya koymaya çalışmışlardır. Cybyk vd. 2005 yılındaki çalışmalarında Schlieren hız ölçüm yöntemiyle jetin durgun havada görüntülemesini yaparken, Cybyk vd. 2006 yılındaki çalışmalarında ise PIV kullanarak durgun havada zamanla jetin gelişimini göstermişlerdir. Deneylelerden elde ettikleri verileri kullanarak sayısal olarak da karakteristiğini ortaya koymaya çalışmışlardır.

Hardy vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada PSJ aktüatör kullanarak 260 m/s ye kadar jet hızı ve takribi 400 K olarak jet sıcaklığını durgun havada elde etmişlerdir. Ses altı (subsonic) rüzgâr tüneline gerçekleştirdikleri çalışmalarında, 40 m/s serbest akış hızında hem PIV hem de Schlieren hız ölçüm yöntemi kullanarak düz levha üzerindeki sınır tabaka üzerine aktüatörün etkisini ortaya koymuşlardır.

Min vd. (2013) yaptıkları bu çalışmada, PSJ aktüatöre nanosaniye (nanosecond) yüksek voltaj kaynağı kullanarak ürettiği jet hızı Schlieren sistemi kullanarak incelenmiştir. Bu çalışmada boşluk hacmi 45 mm<sup>3</sup> olup orifis çapı olarak 1 mm seçmişlerdir. Jet hızı yaklaşık 93,7 m/s'den 27 m/s'ye yaklaşık 200 µs sonra düşmüştür. Aktüatör sürüm frekansını 100, 500 1000, 1500, 2000 ve 2500 Hz gibi farklı frekanslarda yaparken sürüm voltajını sabit 13,8 kV olarak seçmişlerdir. Frekansın artmasıyla elde edilen jet hızının düştüğünü gözlemlemişlerdir. Optik emisyon spektrometre kullanarak jetin rotasyonel sıcaklığını 800 K olarak ölçmüşlerdir.

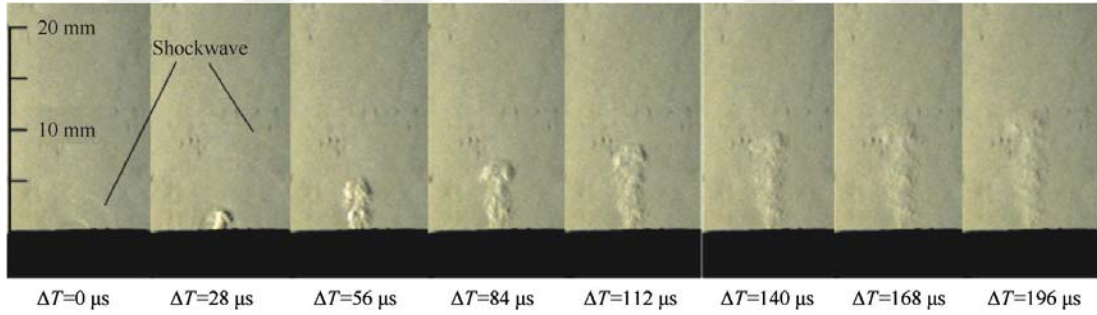
Zong vd. (2015a) yaptıkları çalışmada üç elektrotlu plazma sentetik jet aktüatörün karakteristiği üzerine kapasitör enerjisinin etkisini Schlieren akış görüntüleme yöntemiyle deneysel olarak incelemişlerdir. 3 kV yüksek voltaj güç kaynağıyla 1 Hz puls frekansında 0.1 µF'dan 1.4 µF'a değişen kapasitör sığalarında deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Jetin ilk çıkış anındaki maksimum hızı 230 m/s olarak elde etmişlerdir. Şekil 1.5'te durgun havada jetin Schlieren akış görüntüleme yöntemiyle alınmış zamana bağlı gelişimi görülmektedir. 3 mm orifis delik çapına sahip jetin 2643 µs sonra 20d mesafeye kadar etkin olduğu görülmektedir. Burada 247.8 µs sonra, jetin hızının 230 m/s'den 87 m/s hıza çabuk bir şekilde düşmüştür.

Wang vd. (2014) 3 elektrotlu PSJ aktüatör kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında aktüatörün bulunduğu atmosfer basıncını 1 atm ila 0,1 atm arasında değiştirerek sabit 10 Hz uyarım frekansının bu aktüatörün performansı üzerine etkisini incelemişlerdir. Maksimum jet hızını çevre basıncından bağımsız olarak 460 m/s olarak elde etmişlerdir fakat jetin kütle akısının basıncın artmasıyla beraber arttığını gözlemlemişlerdir.



**Şekil 1.5.** PSJ aktüatör yardımıyla aldıkları zaman bağımlı Schlieren akış görüntülemesi (Zong vd., 2015a)

Jin vd. (2015) yaptığı çalışmada PSJ aktüatörün karakteristiğini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemiştir. Ayrıca, ses üstü (supersonic) rüzgâr tüneline sınır tabaka üzerine etkisini Schlieren yöntemini kullanarak incelemiştir. PSJ aktüatörün yaklaşık 90 m/s hızdan 40 m/s hıza 140  $\mu$ s sonra düştüğünü göstermiştir. Şekil 1.6'da 1 mm olarak seçtikleri orifis çapına göre oluşan jetin zamana bağlı gelişimi verilmiştir. Burada durgun havada 196  $\mu$ s sonra jetin ancak 10 mm yüksekliğe kadar çıkabildiği ve jet genişleyerek yayıldığı için etkinliğini kaybettiği görülmektedir.



**Şekil 1.6.** PSJ aktüatörle aldıkları zaman bağımlı Schlieren fotoğrafları (Jin vd., 2015)

Belinger vd. (2014), PSJ aktüatörün çalışmasını anlamak için deşarjın elektriksel ve optik özelliklerini incelemiştir. Optik ölçümlerde, optik emisyon spektrometresi ve ICCD kamera kullanılarak deşarjın oluşma süresi, plazma hacmi ve plazma sıcaklığı belirlenmiştir. Hem elektriksel ölçümlerden hem de deşarjın makroskopik özelliklerinden elde edilen verilerden elektriksel model oluşturulmuştur. Frekans IGBT transistör kullanılarak ve deşarjda meydana gelen enerji dağılımı ise farklı sığada kapasitör değerleri kullanılarak ayarlanmıştır. PSJ aktüatörün boşluk hacmi 50 mm<sup>3</sup> olup boşluğun yüksekliğini ve çapını 4 mm olarak oluşturmuşlardır. Gerçek aktüatörde başlık bu boşluğun en üstüne yerleştirilir, fakat bu çalışmada deşarjı gözlemleyebilmek

amacıyla aktüatörün başlığını kaldırmışlardır. Deşarj anında enerji dağılımının değişiminin ortalama sıcaklığı değiştirmediğini, fakat deşarjın oluşum süresini ve hacmini değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Belinger vd. (2011a) diğer bir çalışmalarında, deşarjın ne kadar hacme sahip olduğunu CCD kamera kullanarak göstermişler ve Schlieren akış görüntüleme metodu kullanılarak jet hızını ölçmüşlerdir. PSJ aktüatörü oluşturan elektrotlar arası mesafeyi 1.4 mm ve orifis çapını ise 1 mm olarak seçmişlerdir. 15 ve 5 nF'lık sığa değerlerinde kapasitör kullanarak deneyleri gerçekleştirmişlerdir. 15 nF'lık sığada plazmanın yaydığı ışığın 5 nF'a göre 3 kat daha yoğun olduğu ve 15 nF'lık sığada 5 nF'lık sığaya göre daha uzun zaman ve daha büyük hacme sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 15 nF sığada 145 m/s jet hızına ulaşılırken 5 nF sığada 85 m/s jet hızı elde etmişlerdir.

Belinger vd. (2011b), bu çalışmalarında kendilerinin geliştirmiş olduğu indüktif güç kaynağı ve kapasitif güç kaynağının PSJ aktüatörün jet çıkış hızına, enerji dağılımına ve oluşan sıcaklık üzerine etkilerini inceleyerek karşılaştırmışlardır. PSJ aktüatörü, 50 mm<sup>3</sup> boşluk hacmi ve iki tungsten elektrottan oluşturmuşlardır. Bu elektrotlar arasındaki mesafe 1,2 mm'dir. İndüktif ve kapasitif güç kaynağı tarafından PSJ sürülerek elde edilen jet çıkış hızını, enerji dağılımını ve toplam basınç değerlerini karşılaştırmışlardır. Kapasitif güç kaynağının deşarj esnasında enerji dağılımı hızlı bir şekilde olurken, indüktif güç kaynağının deşarj sırasında enerji dağılımının daha yavaş bir şekilde olduğunu gözlemlemişlerdir. Schlieren akış görüntüleme yöntemini kullanarak jet hızını ve termal kamera yardımıyla da plazma deşarj sırasındaki sıcaklığı ölçmüşlerdir.

Narayanaswamy vd. (2010), ses üstü hızlarda akış kontrolü için PSJ aktüatörün performansını karakterize etmek üzere bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu aktüatör; 2.4 mm çapında silindirik boşluk, 2.4 mm çapında elektrotlar ve 1.8 mm çapında orifisten oluşmaktadır. Schlieren akış görüntüleme yöntemini kullanarak jet hızını ölçmüşlerdir. Plazma deşarjı sonucu açığa çıkan sıcaklığı ölçebilmek için spektrometre kullanmışlardır. Bu çalışmalarında jetin gücünü etkileyen faktörleri sırasıyla deşarj akımı, silindir malzemesi ve puls frekansı olarak ortaya koymuşlardır. Jet hızının 1.2 A akımda 230 m/s'den 12 A akımda yaklaşık 320 m/s'ye çıktığını göstermişlerdir. Seramikten yapılan silindirik boşluk yerine bor nitrürden yapılan boşluk kullanıldığında jet hızının yaklaşık %30 arttığını gözlemlemişlerdir. Jet çıkış hızı 60 Hz'den 5 kHz'e kadar yaklaşık olarak aynı olduğundan dolayı hızın puls frekansından bağımsız

olduğunu bulmuşlardır. 5-10 kHz frekans arasında iki puls için geçen süre zarfında boşluk hacminin tekrar dolmasının sınırlı olması sebebiyle eksik puls gözlemlemeye başlamışlardır.

Shin (2010) yapmış olduğu bu deneysel çalışmada doğru akım puls yüksek voltaj uygulayarak PSJ aktüatörün çalışmasını incelemiştir. Yüksek hızlı jet, küçük bir boşluğa yüksek geriliminin uygulanmasıyla elektro-termal etkileşimler sonucu oluşmuştur. Jet hızı oldukça yüksek değerler olan 300 m/s hıza ulaşmıştır. Bu aktüatör; 2,38 mm çapında boşluk hacmi, elektrotlar ve 1,78 mm çapında orifisten oluşmaktadır. Schlieren yöntemi kullanılarak hem durgun havada jetin oluşumunu hem de Plazma sentetik jet'in ses üstü hızlarda gelişmiş sınır tabakayı nasıl etkilediğini göstermek için akış görüntülemesi yapılmıştır. İki jet oluşumu arasındaki zamanın çok kısalmışından ve yeterince hava alamamasından dolayı, duty cycle (DC) ile 10 kHz den daha yüksek uyarım frekanslarında jetin bozulduğunu gözlemişlerdir.

Laurendeau vd. (2015), PSJ aktüatörün karakteristiğini PIV hız ölçüm sistemi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. 10,2 nF kapasitörle 120 m/s jet hızı elde ederken, 45,1 nF kapasitörle 240 m/s jet hızı elde etmişlerdir. Ayrıca geçmişten bugüne literatürde PSJ aktüatörü karakterize etmek için kullanılan teknikleri özetlemişlerdir. Bunlar; elektrik devresinde akım ve voltaj ölçümleri (A. Belinger vd., 2014; Haack vd., 2011; Hardy vd., 2010b; Narayanaswamy vd., 2010; Zong vd., 2015a), deşarj görüntülemesi kısa exposure zamanlı kamerayla görüntüleme (Belinger vd., 2011a), itki ölçümü (Cybyk vd., 2006), deşarjın optik emisyon spektroskopuyla ölçümü (A. Belinger vd., 2014; Narayanaswamy vd., 2010), boşluk içerisinde sıcaklık ölçümü (Zong vd., 2015b), başlığın sıcaklığının ölçülmesi (Caruana, vd., 2009), boşluk içerisinde basınç ölçümü (Haack vd., 2011), jetin toplam basıncının ölçülmesi (Hardy vd., 2010b; Zong vd., 2015b), Schlieren akış görüntülemesi (Cybyk vd., 2005a; Hardy vd., 2010b), Shadowgraph akış görüntülemesi ve PIV (Cybyk vd., 2006; Ko vd., 2010) gibi yöntemler kullanılarak jetin karakterizasyonu yapılmıştır.

## 1.3 Yakıt Pili ve Hidrojen

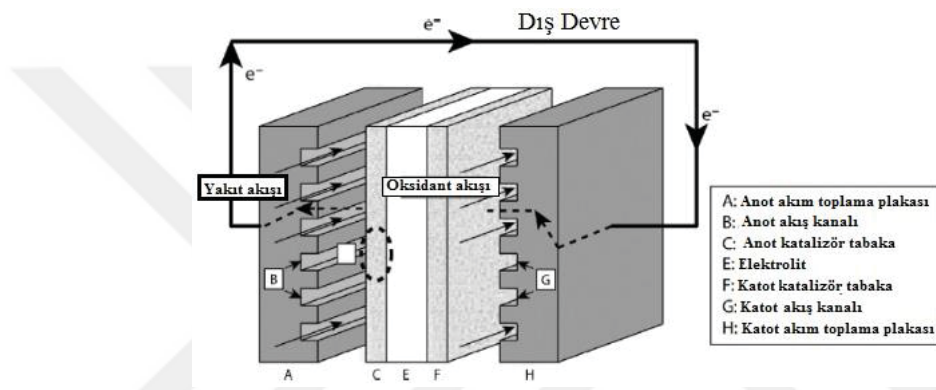
### 1.3.1 Hidrojen

Bilindiği üzere PEM yakıt pili çalışması için kullanılan ana yakıt (reaktantlar) hidrojen ve oksijendir. Atmosferinde yaklaşık %21'i oksijendir. Hidrojen evrende en bol bulunan elementtir ayrıca renksiz, kokusuz, zehirsizdir. Bunun yanında suda az çözünür ve tüm maddeler içerisinde en hafifdir (Havadan yaklaşık 14 kat daha hafif). Hidrojen en hafif element olmasından dolayı doğada serbest halde bulunmaz serbest kaldığında ya bir elementle bileşik yapar ya da yeryüzünün üst katmanlarına doğru bir anda yükselir. Dünyada en çok bulunan ve bilinen bileşiği ise yaşam kaynağı olan sudur. Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde en yüksek enerji muhteva edenidir. Hidrokarbonlar birim kütle başına hidrojene nazaran daha az enerji yoğunluğuna sahip olup yakıldıklarında çevreye CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve HC vb. gibi zararlı gaz salınımı yapmaktadırlar. Bunun yanında petrol ve türevleri gibi hazır enerji kaynaklarının yanında hidrojenin enerji olarak kullanılabilmesinin önünde birçok engel var. Bunlar doğada serbest halde bulunmaması, en küçük element olmasından mütevellit serbest haldeyken ya bileşik yapması ya da uçup gitmesi gibi sebeplerden dolayı kullanılabilmesi için bileşiklerinden ayrılmasının gerekmesi, depolanma problemi, ileri teknoloji gereksinimi bunun yanında yüksek maliyetli olması vb. nedenlerdir. Dezavantajlarının yanında diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına oranla süreklilik arz etmesi, sudan elde edilebilmesi ve kullanıldığında tekrar suya dönüşebilmesi ve diğerlerine nazaran daha yüksek verime sahip olması avantajlarıdır. Ayrıca hidrojen bir enerji kaynağı değil fakat iyi bir enerji taşıyıcıdır. Bu sebeple hidrojenin geleceğin yakıtı veya enerji kaynağı olarak görülmesine olanak sağlamaktadır.

### 1.3.2 Yakıt pili

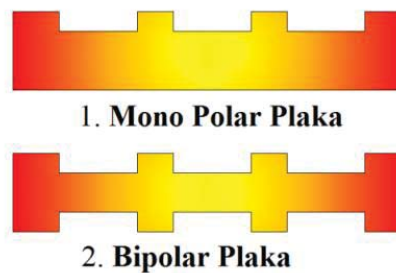
Yakıt pilinin bilinen ilk modeli 1839 yılında Sir William Grove tarafından bulunmuştur (Zhang, 2008). Yakıt pili, kimyasal enerjiyi doğrudan ve etkili bir şekilde elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal bir cihazdır. Herhangi bir hareketli parça içermez ve çalışma prensibi olarak bataryalara benzer. Fakat bataryadan farkı olarak yakıt pilinde yakıt temin edildiği sürece elektrokimyasal reaksiyonla ortamdan elektrik enerjisi üretilebilmektedir. Bataryadaysa yakıt pilinin aksine depolanan enerji bittikten

sonra tekrar doldurulması gerekmektedir. YP (yakıt pili) genel manada anot (platin), katot (platin) ve elektrolit (membran) olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Şekil 1.7’de yakıt pili genel bileşenleriyle şematik olarak görülmektedir. Anot ve katot akış kanallarından sırasıyla yakıt ve oksitleyici girişi sağlanmakta ve bunlar birbirlerinden elektrot-elektrolit birleşimi yardımıyla ayrılmaktadır. Reaktantlar (Hidrojen, hava vb.) elektrokimyasal reaksiyonun akım oluşturduğu katalizör tabakaya (elektrot) difüzyon yoluyla taşınır. Yakıtın elektrokimyasal oksidasyonu dış devreye çift kutuplu tabaka yoluyla akan elektronları üretir bunun yanı sıra üretilmiş iyonlar devreyi tamamlamak için elektrolit yoluyla taşınır (Mench, 2008).



Şekil 1.7. Genel bir YP'nin şematik gösterimi (Mench, 2008)

Sonuç itibariyle YP’de 0.5-0.6 volt aralığında bir gerilim elde edilmektedir. Gerekli olan enerjiyi üretmek için birden fazla YP seri halde bağlanılarak istenilen gerilim elde edilmesiyle oluşan sandviç şeklindeki YP sistemine yığın (stak) denilmektedir. Yakıt pillerinde anot ve katot akış kanalları, en dışta tek kutuplu (mono polar) aralarda ise çift kutuplu (bipolar) plakalar (Şekil 1.8) yardımıyla yığın haline getirilerek hücreler arasında elektriksel iletim sağlanmaktadır.



Şekil 1.8. Tek ve çift kutuplu plaka

Yakıt pilleri kullanılan elektrolit ve elektrot cinsine, çalışma sıcaklığına, yakıt ve oksitleyici cinsine göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Burada YP kullanılan elektrolitin cinsine göre 6 gruba ayrılmıştır. Bunlar;

- I. Fosforik asit yakıt pili (FAYP),
- II. Katı oksit yakıt pili (KOYP),
- III. Eriyik karbonat yakıt pili (EKYP),
- IV. Alkalın yakıt pili (AYP),
- V. Doğrudan metanol yakıt pili (DMYP),
- VI. Proton değişim membranlı yakıt pili (PEMYP).

**Çizelge 1.1.** Yakıt pillerinin karşılaştırılması (URL-1)

Yakıt Pili Çeşidi	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı	Avantajları	Dezavantajları
<b>PEMYP</b>	Nafion	50-100 °C	-Düşük Elektrolit Korozyonu -Düşük Sıcaklık -Hızlı Çalışma	-Pahalı Katalizör -Yakıtın Saf Olmama Hassasiyeti
<b>KOYP</b>	Yttria Stabilized Zirconia	700-1000 °C	-Yüksek Etkinlik -Yakıt Esnekliği -Katı Elektrolit	-Yüksek Sıcaklık Korozyonu -Uzun İlk Başlama Zamanı
<b>FAYP</b>	Fosforik Asit	150-200 °C	-Yakıt Kirliliğine Karşı Yüksek Tolerans	-Düşük Akım ve Güç Yoğunluğu
<b>AYP</b>	Potasum Hidroksit	90-100 °C	-Düşük Maliyetli Bileşenler -Yüksek Performans	-Yakıt ve Havada CO <sub>2</sub> 'ye Hassasiyet
<b>EKYP</b>	Potasyum Karbonat	600-700 °C	-Yakıt esnekliği -Yüksek Etkinlik	-Yüksek Sıcaklık Korozyonu ve Hücre Bileşenlerinin Bozulması
<b>DMYP</b>	Nafion	60-90 °C	-Düşük Çalışma Sıcaklığı	-Metanol Moleküllerinin Zardan Geçmesi

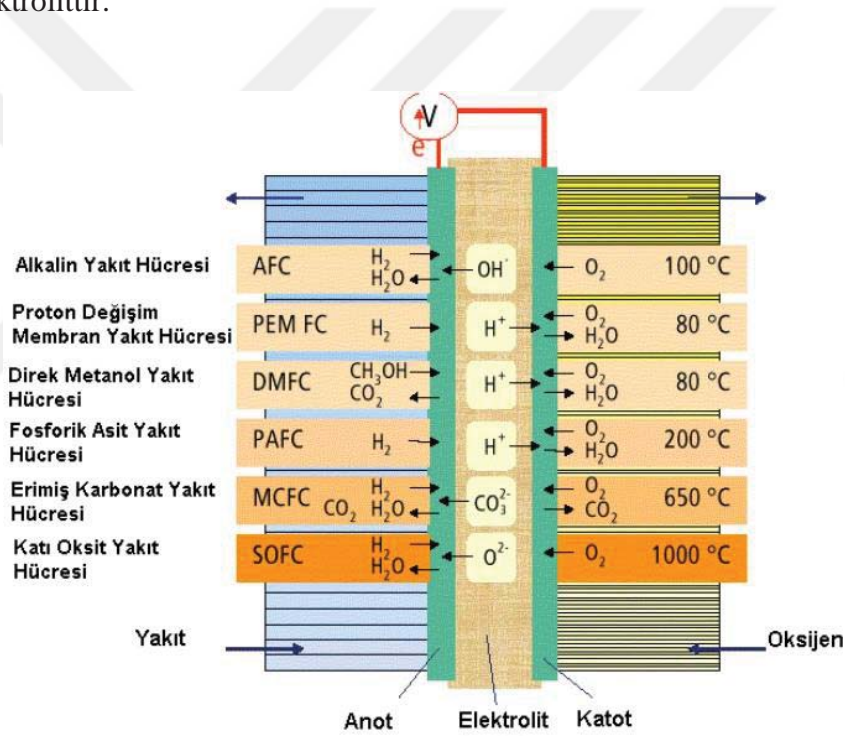
Her yakıt pili Çizelge 1.1’de görüldüğü gibi kullanım esnasında meydana gelen belirli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Düşük sıcaklıkta çalışan PEMYP, AYP ve DMYP yüksek verim ve çabuk başlama gibi avantajlara sahip olmaların yanında daha yüksek maliyetli bileşenlerden oluşma gibi dezavantajları mevcuttur. Yüksek sıcaklıkta çalışan EKYP ve KOYP düşük maliyetli bileşenlere sahip olma gibi avantajın yanı sıra yüksek

sıcaklıkta malzemenin korozyona uğraması ve uzun başlama zamanı gibi dezavantajları vardır.

### 1.3.2.1 Proton değişim membranlı yakıt pili

Bu çalışmanın ana başlıklarından birisi olan PEMYP bu başlık altında ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır. Tüm yakıt pillerinde olduğu gibi PEMYP de genel olarak üç ana kısma ayırabiliriz. Şekil 1.9’da görüldüğü gibi bunlar;

- Anot,
- Katot,
- Elektrolittir.



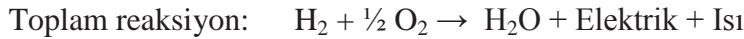
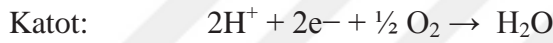
Şekil 1.9. YP çeşitlerinde kullanılan yakıtın ve çalışma sıcaklıklarının şematik gösterimi (Çelik, 2009)

PEMYP de yakıt olarak anot kısmından hidrojen, katot kısmından oksijen verilir. Burada hidrojen elektrokimyasal bir reaksiyon sonucunda proton ve elektronlarına ayrılmaktadır. Meydana gelen hidrojen protonları proton geçirgen özelliğe sahip olan membran vasıtasıyla katoda geçerek buradaki oksijenle reaksiyona girmesiyle su meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar sonucu oluşan elektronlar dış devre vasıtasıyla gerilimin oluşmasını sağlar ve bunun sonucunda su ve ortalama  $80\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta atık ısı

meydana gelmektedir. PEMYP yüksek güç yoğunluğu, düşük sıcaklık ve kompakt yapıya sahip olması gibi nedenlerden dolayı otomotiv, güç istasyonu ve portatif sistemlerde kullanılmaktadır.

### 1.3.2.2 PEMYP bileşenleri ve çalışma prensibi

PEMYP sırasıyla anot akış kanalı, gaz difüzyon tabakası (hem anot hem de katot tarafında), membran elektrot grubu (MEG) ve katot akış kanalından oluşmaktadır. MEG hem anot hem de katot tarafında katalizör elektrot tabakası, sızdırmaz conta ve proton geçirgen membrandan oluşmaktadır. PEMYP’de anotta yükseltgenme (elektron kaybı) ve katotta indirgenme (elektron kazanımı) reaksiyonları eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir. Bu iki reaksiyon hidrojen ve oksijenden su oluşumunu sağlamaktadır. Oluşan hidrojen iyonlarının anottan katoda geçişine izin veren elektrolit (membran) anot ve katodu birbirinden ayırır. PEMYP’de gerçekleşen reaksiyonlar;

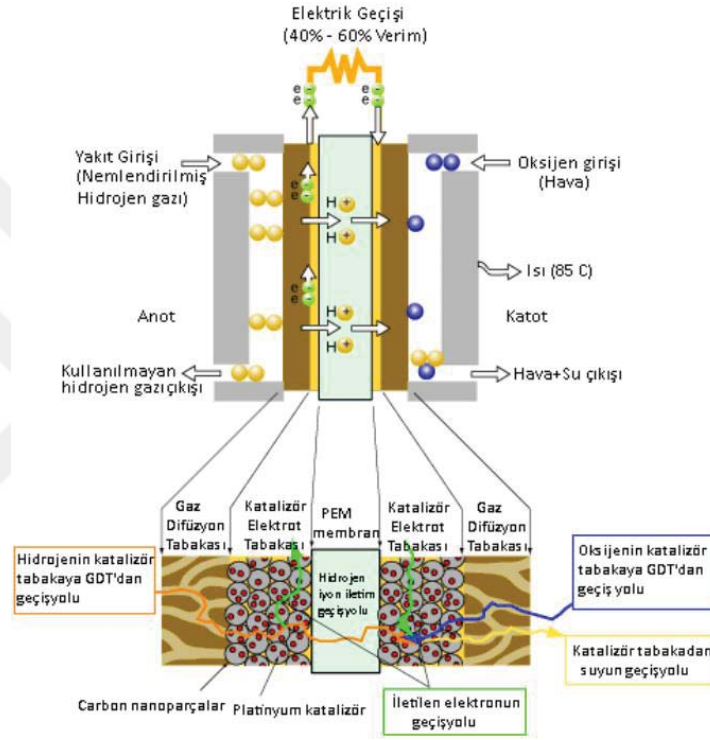


Anotta, hidrojen molekülleri ilk olarak elektrot yüzeyinde platinyum katalizörle karşılaşmakta ve platinyum atomları hidrojen molekülündeki hidrojen atomlarıyla bağ yaparak hidrojen iyonu( $\text{H}^+$ ) ve elektronun serbest kalmasını sağlamaktadır. Elektronlar anottan dış devre sayesinde gerilimi oluştururken, hidrojen iyonları proton geçirgen membran yoluyla katoda geçmektedir.

Katotta, oksijen molekülleri elektrot yüzeyinde platinyum katalizörle temas etmektedir. Oksijen molekülleri platinyum atomlarıyla O-Pt bağı yaparak indirgenme reaksiyonunu mümkün kılmaktadır. Serbest kalan her oksijen molekülü iki proton ve elektronla birleşerek su molekülünü oluşturup çevrimi tamamlamaktadır. Hidrojen ve oksijenden su oluşumu ekzotermik (ısıveren) bir reaksiyon olması münasebetiyle bir miktar ısı meydana gelmektedir.

## MEG özellikleri

Membran elektrot grubu PEMYP'nin kalbidir. Şekil 1.10'da görüldüğü gibi anot elektrot, katot elektrot ve membran birleşimi membran elektrot grubu (MEG) olarak adlandırılmaktadır. Bu membran reaktantların ( $H_2$  ve  $O_2$  gibi) geçmesine izin vermez ve yüksek proton iletkenliği gibi özellikleri ihtiva etmektedir. İyi nemlendirildiğinde, protonlar anottan katota doğru harekete geçmesine izin verir (Litster ve McLean, 2004).



**Şekil 1.10.** PEMYP çalışması, membran, gaz difüzyon tabakası ve elektrotların detaylı şematik gösterimi (Wang vd., 2011)

Bu membran tipi yaygın olan Nafion (perfluorosulfonic asit) PEMYP ve DMYP de kullanılmaktadır. Nafion, 1960'larda Dupont firması tarafından geliştirilmiş olan patentli bir üründür. Elektrotlar elektrokimyasal reaksiyonlar için zemin hazırlamaktadır. Elektrotta ana malzeme platindir fakat platinin maliyetinin yüksek olması araştırmacıları elektrotta kullanılan platin miktarının azaltılması üzerine araştırmaya sevk etmektedir (Wang vd., 2011).

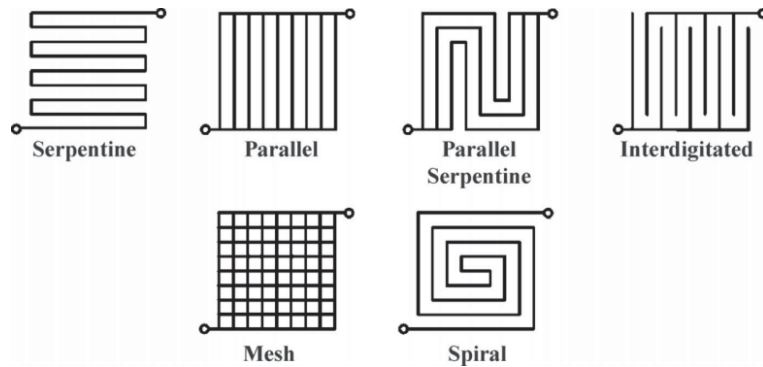
Şekil 1.10'da görüldüğü gibi büyük karbon tanecikleri üzerine tutturulmuş küçük platinyum partiküllerinin oluşturduğu yüzey alanı ve proton iletimi için bir gözenekli

katmandan oluşmaktadır. Tipik elektrot kalınlıkları mikrometreler seviyesindedir. PEMYP elektrotta kullanılan platin karbon monoksit, karbondioksit ve hidrokarbonlara karşı duyarlıdır bu yüzden yakıt piline gönderilen gazın yüksek saflıkta olması gerekmektedir.

### PEMYP akış alanı

Daha önce membran PEM yakıt pilinin kalbi olarak ifade edilmişti. Membran yakıt pilinin kalbiyse akış kanalları da yakıt pilinin damarlarıdır. Bu damarlar PEMYP performansını doğrudan etkilemektedir. Çünkü elektrokimyasal tepkimeye katılan gazlar ( $H_2$  ve  $O_2$  gibi) membran elektrolit birleşiminde son derece düzgün dağılımlı, kanalın girişinden çıkışına minimum basınç düşüşü, hücreden hücreye akım iletimi, gaz ve yakıt sızıntısını önleme ve üretilen suyun dışarı atılmasını sağlar nitelikte olmalıdır. Bu kriterler göz önünde bulundurulmadan akış kanalının yani damarların boyutları, enine kesit tipi ve kanal dağılım tipi optimum seviyede seçilmeli aksi takdirde yakıt pilinin performansını arttırması gerekirken azaltabilir.

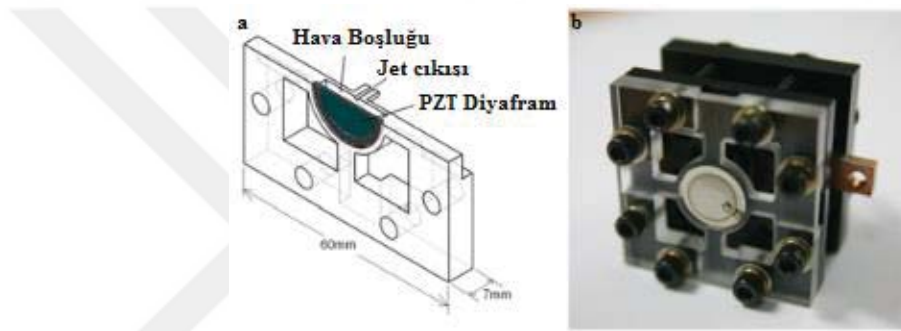
Şekil 1.11’de görüldüğü gibi birçok farklı akış kanalı tipi bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanı serpantin tipi akış kanalıdır. Akış kanalı plakaları monopolar ve bipolar plaka olmak üzere iki tiptir. Bipolar plakalar stak halindeki yakıt pillerinde arada kullanılır. Bu plakaların bir yüzeyi yakıt pili için hidrojen taşıyıp hücrenin anoduyken diğer yüzeyiyse oksijeni taşıyıp katot tabakasını oluşturmaktadır. Bipolar plakalar yakıt ve havanın daha düzgün dağılması, sızıntıların önlenmesi ve hücreden hücreye akım taşınması gibi görevleri yerine getirmektedir. Monopolar plakalar hem tek hücreli hem de yığın halindeki yakıt pillerinde kullanılmaktadır.



**Şekil 1.11.** Farklı tip akış kanalı modelleri (Mench, 2008)

#### 1.4 Sentetik Jet Aktüatörler ve Yakıt Pili Uygulamaları

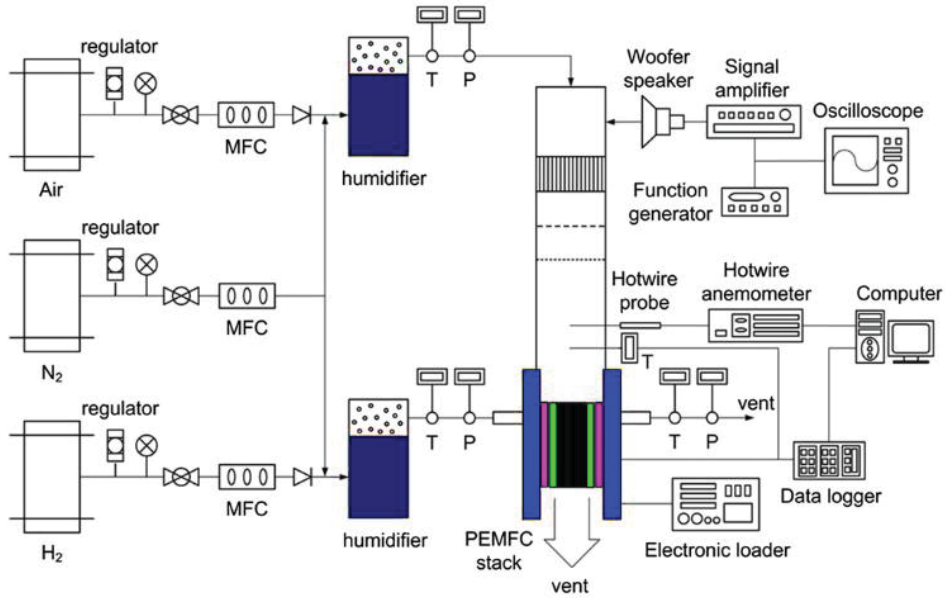
Daha önceki bölümlerde klasik sentetik jet üretim yöntemlerinden ve plazmalı sentetik jet aktüatörlerden bahsetmiştik. Tezin asıl amacı olan plazma sentetik jetle yakıt pilinin performansının artırılması yönelik literatürde mevcut çalışma bulunmamaktadır. Bu yüzden bu bölümde literatürde sentetik jetin yakıt pili performansını attırmak amacıyla kullanıldığı mevcut çalışmalara yer verilecektir. Bu çalışmalarda sentetik jet, piezoelektrik diyafram (Seo vd., 2014; Choi vd., 2009), hoparlör (Han vd., 2012; Kim vd, 2008) veya piston silindir (Hwang vd., 2010) mekanizmalı yöntemler kullanılarak elde edilmektedir.



Şekil 1.12. Piezoelektrik sentetik jet aktüatör (a) ve PEM yakıt piliyle (b) birleşimi (Seo vd., 2014)

Choi vd. (2009) tarafından yapılmış olan çalışmada hava debisi ve farklı açıklık oranlarının yakıt pili performansına ve piezoelektrik güç tüketimine etkisi incelenmiştir. Maksimum güç yoğunluğunda %40 iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir. 2014 yılında Seo ve arkadaşları bu çalışmanın devamı niteliğinde olan çalışmalarında ilaveten farklı orifis delik çapı ve farklı açıklık oranlarının yakıt pili performansına etkisinin yanı sıra kare ve sinüs dalga modülasyonlarını kullanarak piezoelektrigin güç tüketimine etkisini incelemişlerdir. Kullandıkları piezoelektrikli PEM yakıt pili Şekil 1.12 (a ve b)'de görülmektedir. Katotta açıklık oranı %61 olduğunda, hücreye yerleştirilen piezoelektrik sentetik jet ile yaygın olan PEMYP'lerinden yaklaşık %40 daha fazla güç yoğunluğu elde edildiğini gözlemişlerdir. Piezoelektrik sentetik jet 0,3 W'tan daha az enerji tüketiminin yanı sıra 550 Hz'de 400 cc/dk.'den daha fazla hava debisi elde etmişlerdir. Bu sentetik jet sayesinde daha yüksek performans ve kararlılık ve 400 mA/cm<sup>2</sup>'de 188 mW/cm<sup>2</sup> maksimum güç yoğunluğu elde etmişlerdir.

Kim vd. (2008), 10 hücreli PEMYP’de katot kısmında sentetik jet aktüatör olarak hoparlör kullanarak elde edilen akış salınımlarının yakıt pili performansına etkisini incelemiştir. Sıkıştırılmış hava tankından gelen tek yönlü akışa eklenen salınımların etkisiyle, yakıt pili veriminde çok küçük azalma olmasına rağmen YP güç çıkışı ve limit akımında önemli artış olduğu gözlemlenmiştir. Salınım düşük katot akış debilerinde oldukça etkili olmaktadır. Özellikle 10 LPM (liter per minute) debide salınımların etkisiyle maksimum güç değeri %31’lik bir verimle 34W değerinden, %29 verimli 55 W değerine çıkmaktadır. Güçte %61’lik artış olurken, verimdeki azalma sadece %2 olmaktadır. Hava debisinin 20 ve 30 LPM olduğu diğer hava debilerinde aynı seviyede oluşturulan salınımların etkisinin giderek azaldığını gözlemlenmiştir. 2008 yılında Kim ve arkadaşları tarafından yapılan yukarıdaki çalışmanın devamı niteliğindeki bir çalışma Han vd. (2012) tarafından yapılmıştır. Aynı sistemin kullanıldığı bu çalışmada ağırlıklı olarak akış karakteristikleri üzerinde durulmuştur. Şekil 1.13’de görülen deney düzeneğinde katot kanallarına gönderilen akışın karakteristikleri kızgın tel (hot wire) anemometresi kullanılarak belirlenmiştir. Burada Womersley sayısı ( $Wo$ ) ve Reynolds sayısının ( $Re$ ) yakıt pili performansına etkisi incelenmiştir.

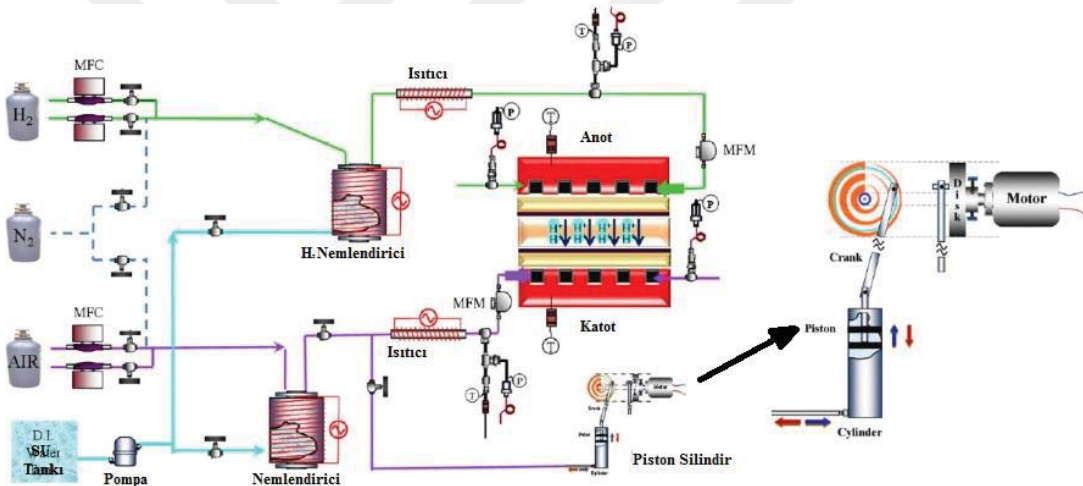


**Şekil 1.13.** Han vd. (2012) tarafından kullanılan deney düzeneğinin şematik hali

Katot kanalındaki laminer akışa ait  $Re$  sayıları 77, 112 ve 135 olup daimi akış üzerine eklenen 10 ila 50Hz aralığında oluşturulan salınımlarda frekansındaki artışın güç üretimi üzerinde (önceki çalışmanın aksine) önemli etkisinin olduğu görülmektedir. Artan  $Wo$

sayısı ile birlikte üretilen maksimum güç değeri de önemli ölçüde artmaktadır. Elde alınan  $Re=77, 112$  ve  $135$  sayıları için en yüksek  $Wo$  sayısında elde edilen maksimum güç artışları sırasıyla %35, %12.5 ve %7.9 olmuştur. Sonuç olarak, akış salınımlarının katot akış kanalındaki kütle transfer limitini, yüksek kapasiteli üfleçler ve kompresörler tarafından sağlanan daimi akış durumundakine benzer şekilde artırdığı ifade edilmiştir.

Hwang vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada Şekil 1.14’de görüldüğü gibi PEMYP katot kısmında sentetik jet aktüatör olarak piston silindir mekanizması kullanarak elde edilen akış salınımlarının yakıt pili performansına etkisini incelemişlerdir. Bilindiği üzere YP performansı akış kanalıyla katalizör tabaka arasındaki oksijen difüzyon oranına bağlıdır. Bu çalışmada  $Wo$  sayısının ve Schmidt sayısının ( $Sc$ ) etkisi incelenmiş olup bu sayıların artışıyla oksijen difüzyon oranının artışının nasıl gerçekleştiği gösterilmiştir.

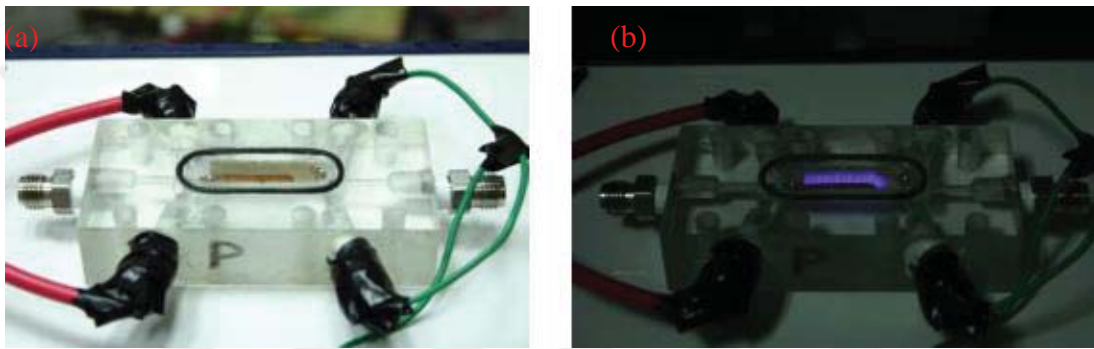


**Şekil 1.14.** Hwang vd. (2010) tarafından kullanılan deney düzeneğinin şematik hali

Yukarıda verilen çalışmalar, PEMYP’de meydana gelen difüzyon, konsantrasyon kaybı, basınç düşüşü gibi nedenlerden dolayı meydana gelen kayıpların sentetik jet aktüatörler yardımıyla akışa kazandırılan salınımla üstesinden gelenebileceğini açıkça ortaya koymaktadır. Ancak, verilen çalışmalar içerisinde Seo vd. (2014) ve Choi vd. (2009) yaptıkları çalışmalar haricindeki diğer çalışmalarda YP performansının arttırmak için salınım oluşturmada harcanan güç dahil edilmeden sonuçlar ortaya konulmuştur.

#### 1.4.1 Plazmanın yakıt piline uygulanması

Cappelli ve Kim (2015), plazma aktivasyonlu PEMYP'nin anot (yakıt girişi) ve katot (hava girişi) içerisine yerleştirilmiş olan DBD plazma aktüatör kullanarak incelenmişlerdir. Plazma,  $8 \text{ kV}_{\text{p-p}}$  gerilimde, maksimum 10 mA akımda ve 30 kHz sürüm frekansında oluşturulmuştur. Fotoğraf 1.2 (a ve b)'de yapmış oldukları plazma aktivasyonlu yakıt pilinin montaj ve çalışırken ki hali görülmektedir. Bu çalışmada, plazma açık/kapalı haldeyken membran elektrolit grubunu 3 farklı koşul altında yakıt pilinin performansının karşılaştırılmasını yapmışlardır.



**Fotoğraf 1.2.** Plazma aktivasyonlu yakıt pilinin montaj (a) görünümü ve plazmanın açık (b) hali (Cappelli ve Kim)

Çizelge 1.2'de görüldüğü gibi bu çalışmada karbon kaplı GDL ve platin katalizörle yaygın olan Nafion membranın plazma etkisi altında neredeyse hiç iyileşme göstermemiştir. Sadece GDL'nin kaldırılması durumunda bir etki olmamış, fakat yalnızca Nafion membranla yakıt pilinin çalışması durumunda, açık devre voltajında (OCV) neredeyse 1 V artış sağlanarak 1.8 V'a erişilmiştir. Bununla beraber akım değerini yaklaşık olarak  $10 \mu\text{A}$  gibi çok küçük bir değer olarak ölçmüşlerdir.

**Çizelge 1.2.** MEG varyasyonları için OCV değer tablosu (Cappelli ve Kim)

	No Plasma	Plasma
Nafion + Pt + C cloth	0.8 V	0.8 V
Nafion + Pt	0.8 V	0.8 V
Nafion	0 V	1.8 V

## 1.5 Bu Tez Çalışmanın Bilimsel Önemi

Bilindiği üzere geçmişte olduğu gibi günümüzde de insanoğlu enerji gereksiniminin büyük bir kısmını fosil yakıtlardan elde etmeye devam etmektedir. Bu fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar ve sınırlı kaynağının olması gibi nedenlerden dolayı alternatif temiz enerji üretim yöntemleri üzerine çalışmalar yoğun bir şekilde sürmektedir. Bu kapsamda temiz ve çevreci enerji üretim yöntemlerinden biri olan PEM yakıt pillerinin performansının artırılması, maliyetinin azaltılması gibi konular üzerine bilim insanları tarafından yoğun bir şekilde çalışmalar devam etmektedir. Bu tez çalışmasında PEM yakıt pillerinin performansının artırılması üzerine bir çalışma gerçekleştirilirken literatürde daha önce denenmemiş plazma tabanlı sentetik jet aktüatörler kullanılarak yakıt pilinin performansı iyileştirilmeye çalışılacaktır. Plazma sentetik jet aktüatör olarak kullanılacak olan aktüatör; yine bu tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan buji plazma sentetik jet (BPSJ) aktüatördür. Bu noktada da literatürde yeni bir kavram olarak yerini alacak olan bu aktüatörün geliştirilmiş olması bu tez çalışmasının bilimsel önemini arttırmaktadır.

## 1.6 Tezin Amacı

PEMYP'lerinin yüksek güç yoğunluğuna sahip olması, düşük çalışma sıcaklığı vb. nedenlerden dolayı günlük hayatımızda sanayiden evsel kullanıma kadar birçok uygulama alanı mevcuttur. Bu sebeple yıllardan beri araştırmacılar PEMYP'nin maliyetini düşürmek, performansını, ömrünü ve çalışma süresini arttırabilmek için yoğun bir şekilde çalışmaktadır. Fakat PEMYP'nin katot akış kanalında meydana gelen oksijen konsantrasyon kayıpları, difüzyon kayıpları, basınç düşüşü ve en büyük sorun olan su basması (flooding) gibi problemleri hala yeteri kadar çözülememiştir. Katot akış kanalında bu problemler oksijenin reaksiyona girmesine imkan vermemekte ve performansın düşmesine hatta durmasına bile neden olabilmektedir. Bu yüzden bu problemlerin çözümü büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasının birinci amacı, geliştirilmiş olan BPSJ aktüatörün oluşturduğu sentetik jet karakteristiğinin belirlenmesidir. Bunun için durgun havada kızgın tel anemometresiyle hız ölçümü yapılmış ve rüzgâr tüneline jetin duman tel yöntemiyle görsel hale getirilmesiyle sınır tabaka akış yapısı üzerine etkisi ortaya konulmuştur.

İkincisiyse, tez kapsamında geliştirilmiş olan buji plazma sentetik jet (BPSJ) aktüatör kullanılarak, tek hücreli PEMYP'nin performansının iyileştirilmesidir. Bunun için PEMYP katot akış kanalında BPSJ aktüatörle oluşturulan salınımlı akışla konsantrasyon, difüzyon, basınç düşüşü ve su basması gibi PEMYP performansını etkileyen sorunların çözümü üzerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca bu plazma aktüatörle elde edilen plazma tarafından iyonize edilmiş havanın etkilerinin ortaya konulması da amaçlanmaktadır.



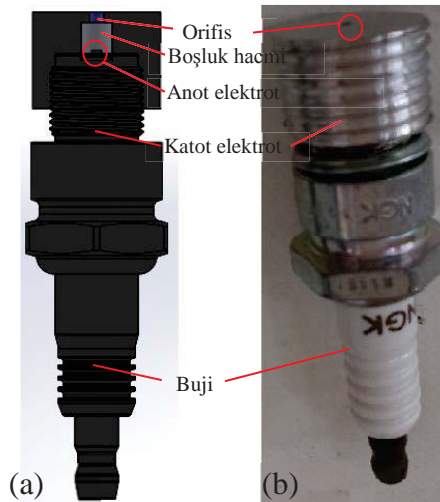
## BÖLÜM II

### BUJİ SENTETİK JET AKTÜATÖR

Buji plazma sentetik jet aktüatör olarak adlandırılan umut vaat eden yeni bir aktüatör Niğde Üniversitesinde Atmosferik Plazma Araştırma Laboratuvarında geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan bu aktüatör; düz başlı bir bujiden ve boşluk hacminin oluşturulduğu üzerinde jet deliği bulunan başlık olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Buji olarak, herkesçe bilinen 4 zamanlı buji ateşlemeli (benzinli) motorlarda mevcut olan elektriksel alet kullanılmıştır. Buji, sıkıştırma zamanının sonlarına doğru ateşlenerek bir ark oluşturur ve yanma meydana gelir. Aslında orada oluşan ark bir plazmadır. Bu aktüatörün geliştirilmesinde oluşan arkı motor silindiri gibi büyük bir hacim yerine kapalı küçük bir hacim içerisinde oluşturup tam ortadan küçük bir orifis deliği açarak jet elde edebileceği düşünülmüştür.

#### 2.1 BPSJ Aktüatörün Bileşenleri

Şekil 2.1 (a)'da geliştirilmiş olan BPSJ aktüatörün üç boyutlu ön kesit alınmış halinde orifis deliği, plazmanın oluşturulduğu boşluk hacmi ve bujinin anot elektrotu görülmektedir. Bu aktüatörde NGK buji üretim firmasının farklı modellere sahip bujileri kullanılmıştır. Şekil 2.1 (b)'de aktüatörün NGK BUHW model düz başlı bujiyle boşluk hacminin oluşturulduğu başlığın montajlı hali görülmektedir.



Şekil 2.1. BPSJ aktüatörün şematik (a) görünümü, BPSJ aktüatör montaj (b) hali

Aktüatörün PEM yakıt piline uygulanabilir, kolay sökülüp takılabilir ve modüler olacak şekilde başlıklar üretilmiştir. 30 mm çapında alüminyumdan üretilen bu başlıklar Universal torna tezgahı kullanılarak 21.5 mm dış çapa düşürülüp karşılık puntasına bağlanan freze çakısıyla; i) bujiye bağlanmasını sağlayacak kılavuzu çekebilmek için uygun çapta delik delinmiş, ii) plazmanın oluşacağı boşluk iç hacminin deliği delinmiş, iii) orifis deliği açılmıştır.



**Şekil 2.2.** Üretilmiş farklı ölçülere sahip BPSJ aktüatörün başlıkları

Şekil 2.2’de üretilmiş olan farklı hacim ve orifis çapına sahip aktüatör başlıkları görülmektedir. Bu başlıkların dışına pafta çekilerek dış açılmasının nedeni PEM yakıt piline pratik bir şekilde sökülüp takılabilir olması içindir.

**Çizelge 2.1.** BPSJ aktüatörü için üretilen başlıkların üretim ölçüleri

Buji Başlığı	İç Çap(mm)	Derinlik(mm)	Orifis Çapı(mm)	Hacim(mm <sup>3</sup> )
1. Model (M1)	4,4	4,65	2	70,70
2. Model (M2)	4,75	5	1,5	88,6
3. Model (M3)	6,35	4,7	1,5	148,8
4. Model (M4)	6,35	1,6	1,5	50,7
5. Model (M5)	6,35	3,5	1,5	110,8
6. Model (M6)	4	4	2	50,2
7. Model (M7)	4	4	4	-

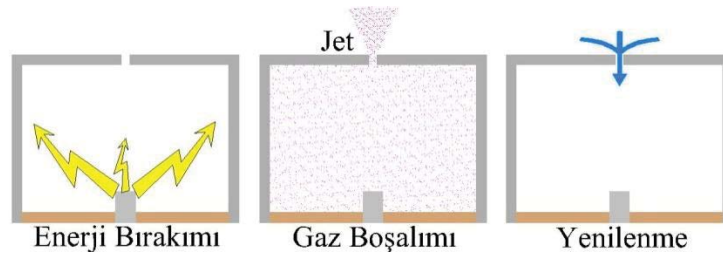
Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi farklı iç çap, orifis çapı, derinlik ve boşluk hacmine sahip başlıklardan 7 adet üretilmiştir. Alüminyum kullanılmasının nedeni sıcak plazma üretildiği için ısı iletim kat sayısı yüksek olan malzemelerden biri olması ve kolay işlenebilir olmasıdır. Farklı geometrik özelliklerde başlıklar üretilmesinin sebebi farklı model bujiler ve durgun havada kızgın tel anemometresi kullanarak karakteristiklerinin ortaya konulmak istenmesidir.

### 2.1.1 Güç kaynağı

Belinger vd. (2011) yaptıkları çalışmalarında PSJ aktüatörde kullanılan iki farklı güç kaynağından bahsetmişlerdir. Bunlardan birincisi plazma jet üretmek için yüksek voltaj doğrudan çeviren güç kaynağıdır. İkincisi, yüksek voltaj transformatörü kullanarak düşük voltajı yüksek voltaja dönüştürendir. Bu çalışmada kullanılmak üzere Belinger vd. (2011) tarafından bahsedilen ikinci tip güç kaynağı olan DA düşük voltajı doğrudan DA yüksek voltaja dönüştüren güç kaynağı tasarlanmıştır. Bu güç kaynağı DA düşük voltaj güç kaynağı, yüksek voltaj transformatör ve MOSFET anahtardan oluşmaktadır. MOSFET anahtar istenen bir frekansta jet üretebilmek için fonksiyon jeneratörü kullanılarak ayarlanmıştır. Bu anahtar yüksek voltaj transformatörle DA düşük voltaj güç kaynağının katodu arasına bağlanmıştır. Ayrıca daha sonradan alınmış olan nanopuls yüksek voltaj güç kaynağı kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Kullanılmış olan bu elemanların özellikleri 3. bölümde ayrıntılı bir şekilde verilecektir.

### 2.2 BPSJ Aktüatörün Çalışma Prensibi

Şekil 2.3' de görüldüğü gibi, geliştirilmiş olan bu aktüatör PSJ aktüatörle (Grossman vd., 2003) aynı olan üç farklı çalışma adımına sahiptir. Bunlar sırasıyla enerji bırakımı, gaz boşalımı ve yenilenme olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 2.3. BPSJ aktüatörünün bir çevrimindeki adımlar

İlk adım olan enerji boşalımında, DA (Dogru akım) yüksek voltaj anot ve katot elektrotları arasında uygulandığında ark oluşur. İkinci adım olan gaz boşalımında, bir önceki adımda oluşan arkın neticesinde boşluk hacmi içerisinde elektro termal etkiler nedeniyle aniden basınç artışı olur. Bu basınç artışı sonucu hacim içerisindeki havanın basıncının çevre basıncına oranla çok yüksek olması sebebiyle içerideki hava dışarıya jet olarak çıkmaktadır. Son adım olan yenilenmedeyse içerideki basınçlı havanın jet

olarak dışarı çıkması sonucunda hacim içerisindeki basıncın atmosfer basıncının (yani çevre basıncının) altına düşmesi neticesinde dışarıdan içeriye doğru hava girişi olmaktadır ve bu sayede jet bir sonraki çevrime hazır olur.

Gaz boşalımı adımıyla oluşan jetin kütlesi kadar kütle yenilenme adımıyla içeriye alındığı için bu tip aktüatörlere net kütle akışı sıfır (Zero net mass flux) veya sentetik jet (Synthetic jet) aktüatörler denilmektedir.



## BÖLÜM III

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde birden çok akademik çalışma konusunu içeren bu tez çalışması kapsamında deney düzenekleri BPSJ aktüatör ve PEM yakıt pili olmak üzere iki ana başlık altında bu bölümde incelenecektir. Deneysel çalışmalar Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Aerodinamik Akış Kontrol Laboratuvarı (AAKL) ve Atmosferik Plazma Araştırma Laboratuvarında (APAL) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca TUBİTAK 213M193 nolu projesinin desteği kapsamında APAL’da yakıt pili deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için deney düzeneği kurulmuştur.

#### 3.1 BPSJ Aktüatörde Kullanılan Cihazlar

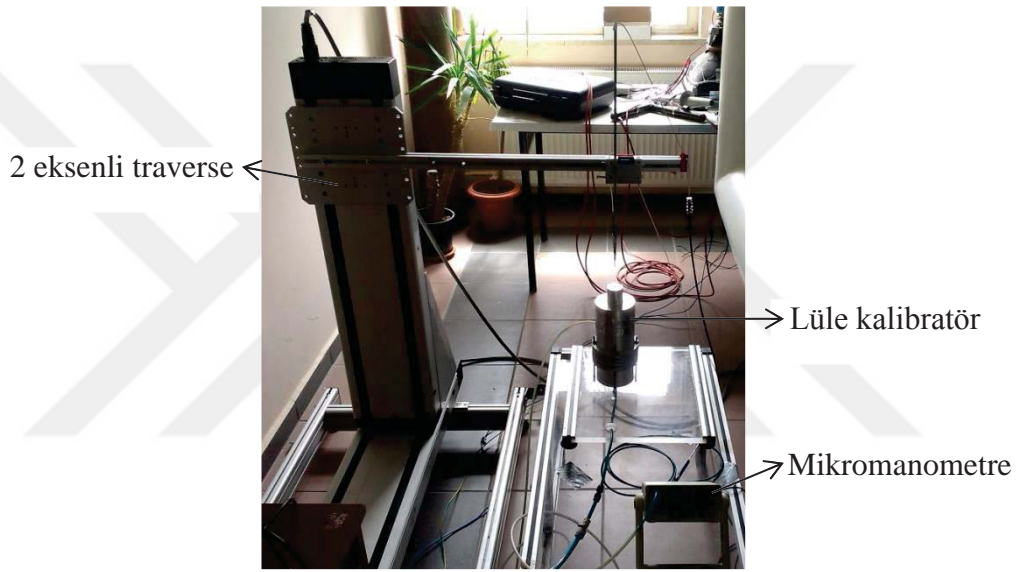
İkinci bölümde de bahsedildiği gibi, geliştirilmiş olan bu aktüatör karakteristiğini araştırmak üzere iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırasıyla, kızgın tel anemometresi kullanılarak oluşan jet hızının büyüklüğünün durgun havada ölçülmesi ve emmeli tip ses altı rüzgar tüneli içerisinde düz plaka üzerine yerleştirilmiş olan bu aktüatörün duman tel yöntemi kullanılarak gelişmiş olan sınır tabakayı nasıl etkilediğinin gözlenmesidir.

##### 3.1.1 Kızgın tel anemometresi

Sabit sıcaklık anemometresi (Constant Temperature Anemometer/CTA) ve Sabit akım anemometresi (Constant Current Anemometer/CCA) olarak iki farklı çalışma moduna sahip olan kızgın tel anemometresi hız ölçümünde ve türbülans şiddetinin mertebesinin belirlenmesinde kullanılır. Sabit sıcaklık modunda çalışan kızgın tel anemometresi kullanılarak BPSJ aktüatörün jet çıkış eksenini üzerinde farklı yüksekliklerde hız ölçümü yapılarak aktüatörün karakteristiği belirlenmeye çalışılmıştır. AAKL’da mevcut bulunan kızgın tel anemometresi DANTEC DYNAMIC marka 54N81 model 6 kanallı olup bir sabit sıcaklık anemometresidir ve 10 kHz’e kadar ölçüm alabilmektedir. Fotoğraf 3.1’de görüldüğü gibi, kızgın tel anemometresiyle hız ölçümlerine başlamadan önce kullanılan 55P11 model probun kalibratör olarak kullanılan lüle yardımıyla kalibrasyonu yapılmıştır. Bilgisayar kontrollü 2 eksenli traverse sistemine bağlı olan

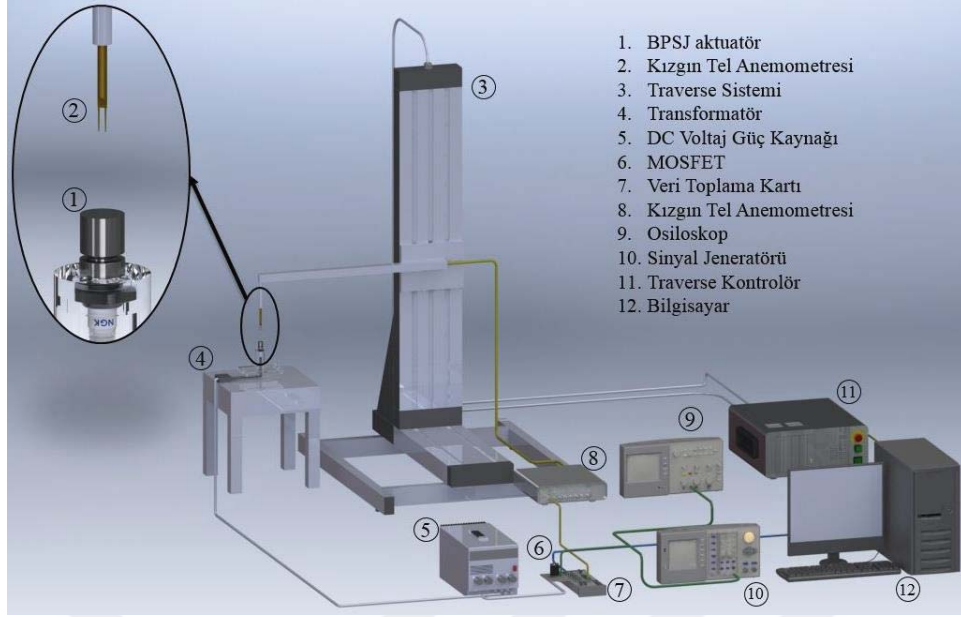
prob, kalibratör üzerinde ve hız ölçümlerinde istenilen noktaya hassas bir şekilde götürebilmek için kullanılmıştır. Prob nozul çıkış delik çapının yarısı kadar yükseklikte tam ekseninde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Probun kalibrasyonu 60 m/s hıza kadar ManoAir 500 mikromanometre yardımıyla 60 m/s'den 120 m/s hıza kadar el manometresi yardımıyla yapılmıştır. 4. dereceden polinom ifadesi olan 3.1 numaralı denklemde; hız  $U$ , polinom katsayıları  $C_0, C_1, C_2, C_3$  ve  $C_4$ , ve voltaj değeri  $E$  olarak ifade edilir.

$$U = C_0 + C_1E^1 + C_2E^2 + C_3E^3 + C_4E^4 \quad (3.1)$$



**Fotoğraf 3.1.** Kızgın tel anemometresinin nozul ile kalibrasyonu

Manometreden okunan her bir hız değerine karşılık gelen voltaj değerleri kullanılarak kalibrasyon değerleri elde edilir. Bu değerler kullanılarak her bir noktadan geçen 4. dereceden bir polinom uydurarak hız ölçümünde kullanılacak olan kalibrasyon dosyası elde edilmiş olur. Bu çalışmada farklı bujilerin, sürüm frekansının ve yüksekliğin etkisinin incelendiği çalışmalar 6 kHz örnekleme frekansında 32768 veri toplanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Diğer bir çalışma olan duty cycle etkisinin incelendiği çalışmada 4 kHz örnekleme frekansında 32000 veri toplanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'de BPSJ aktüatörün karakterizasyonun da kullanılan ölçüm sisteminin 3 boyutlu şematik hali görülmektedir.



Şekil 3.1. Hız ölçüm sisteminin şematik gösterimi

### 3.1.2 Basınç ölçerler

Bu tez çalışması kapsamında kızgın tel anemometresinin kalibrasyonunda kullanılan basınç ölçerler; ManoAir500 mikromanometre  $\pm 2000$  Pa aralığında ve tam ölçekte  $\pm 2$  Pa hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Bu manometre aynı zamanda atmosfer basıncını, basınç farkını, havanın sıcaklığını ve havanın hızını ölçebilmektedir. 60'tan 120 m/s'ye kadar hızın kalibrasyonu Lutron marka PM-9100 marka el manometresiyle yapılmıştır. El manometresi toplam basınçla statik basıncın farkını yani dinamik basıncı (denklem 3.2) verdiği için dolayı hızı hesaplamak için Bernoulli denkleminden türetilen denklem 3.3'den hızı çektiğimiz zaman hız 3.3a'daki denklem yardımıyla hesaplanır.

$$P_{dinamik} = P_{toplam} - P_{statik} \quad (3.2)$$

$$P_{dinamik} = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (3.3)$$

$$U = \alpha \sqrt{\frac{2 \times P_{dinamik}}{\rho}} \quad (3.3a)$$

### 3.1.3 Rüzgar tüneli

Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde, AAKL'de mevcut bulunan emmeli tip ses altı rüzgar tüneline duman tel yöntemiyle akış görüntüleme deneyi

gerçekleştirilmiştir. Bu rüzgar tüneli giriş ağzı, elekler, daralma konisi, test bölgesi, konnektör ve aksiyel fan olmak üzere altı kısımdan oluşmaktadır. Giriş ağzı havanın emildiği ilk kısımdır ve 1425 x1425 mm<sup>2</sup> ebatlarındadır. Sonraki kısımda ise üç adet akış düzenleyici elek kullanılmıştır. Elek kullanılmasının sebebi türbülanslı akışın laminer hale getirilmesini sağlayarak test bölgesindeki akışın türbülans şiddetini düşürmektir. Daralma konisi girişinde 1425x1425 mm<sup>2</sup> alandan 570x570 mm<sup>2</sup> alana düşmekte ve 6,25:1 daralma oranına sahip daralma konisinden geçerek test bölgesinde uniform akış elde edilmesini sağlamaktadır. Test bölgesi; girişinde 570x570 mm<sup>2</sup> kesit alanına sahip ve sınır tabaka gelişimini telafi etmek ve statik basıncı test bölgesi boyunca sabit tutabilmek için 0,3 derece genişleme açısına sahiptir. Test bölgesi çıkışı 580x580 mm<sup>2</sup> kesit alanına sahiptir. Test bölgesi akış görüntülemesi yapabilmek için şeffaf pleksiglasdan yapılmıştır. Rüzgar tüneli test bölgesinde arzu edilen hızı elde edebilmek için 4 kW'lık motor gücüne sahip aksiyel fan kullanılmıştır. Fan motorunu istenilen devir sayısına hassas bir şekilde ayarlayabilmek için Altivar (ATV) 71 model 3 fazlı 4 kW frekans inverter kullanılmıştır. Bu frekans inverter sayesinde frekansı 0-50 Hz arasında 0,1 Hz'lik adımlarla çalıştırıldığında test bölgesinde 0-20 m/s arasında hız değeri elde edilebilmektedir.

### **3.1.4 Duman tel yöntemiyle akış görüntülemesi**

Bilindiği üzere akış görüntüleme yöntemleri içerisinde en ucuz ve kolay yöntemlerden biri olan duman tel yönteminde; çok ince direnç teli, düşük sıcaklıkta buharlaşabilen ve buharlaştığında yoğunluğu havanın yoğunluğuna eşit olan sıvı, DA güç kaynağı ve ışık kaynağı gerekmektedir. Rüzgâr tünelinin test bölgesinin girişine dikey olarak bağlanan direnç telinin her iki ucuna DA güç kaynağının artı ve eksi uçları bağlanır. Güç kaynağıyla gerilim uygulandığında telin boyu uzayacağı için telin yay gibi olmasını önlemek amacıyla tünelin alt kısmından tele ağırlık asılarak telin sürekli gergin kalması sağlanmaktadır. Sıvı olarak kullanılan parafin yukardan telin üzerine damlatılır ve tel üzerinde yukarıdan aşağıya doğru çiy taneleri gibi tutunarak iner. Akış görüntülemesi sırasında daha iyi görüntü ve jeti daha iyi gözlemleyebilmek için serbest akış hızı ( $U_{\infty}$ ) 1.5 m/s olarak ayarlanmıştır. Bu sayede cisim etrafındaki akış görsel hale gerilmiş olur. Akışın görüntülenmesinde aktüatörün konumu, düz plakanın ön ucundan 3 cm arkada olup direnç teliyle orifis deliği aynı eksendedir. Uygun voltaj ve akım değerlerine

ayarlanan güç kaynağı kısa süreli olarak açılıp kapatılır bu süre zarfında elin üzerindeki parafinin hepsi buharlaşır ve açık kaldığı süre boyunca kamerayla görüntü alınır.

### **3.1.5 BPSJ aktüatörde kullanılan buji modelleri**

Geliştirilmiş olan buji plazma sentetik jet aktüatörün en temel parçası olan buji olarak NGK japon buji firmasının 3 farklı bujisi kullanılmıştır. Bunlar BUZHWH-2, BUHW ve BUHW-2 model bujilerdir. Deney sonuçları verilirken karışıklık olmaması için BUZHWH-2/ B1, BUHW/ B2 ve BUHW-2/ B3 olarak simgelenmiştir.

### **3.1.6 BPSJ aktüatörü sürmede kullanılan güç kaynağı**

Geliştirilmiş olan BPSJ aktüatörü etkin bir şekilde çalıştırıp istenen jeti elde edebilmek için birçok farklı güç kaynağı denenmiştir. Bunlar sırasıyla eski tip tüplü bilgisayar monitörlerin güç kaynağı, Audio güç amfisi (1500W) ve bobinden oluşan güç kaynağı sistemi (Sanlısoy, 2013), MOSFET anahtarlı DA düşük voltaj güç kaynağının bağlı olduğu yüksek voltaj transformatör ve Megaimpulse marka NPG-18/3500 model Nanopuls DA yüksek voltaj güç kaynağı kullanılarak jet üretim etkinlikleri incelenmiştir. Burada bahsedilen bu güç kaynakları hakkında bu bölümde bilgi verilecektir.

Fotoğraf 3.2 (a)'da görülen Nanopuls DA yüksek voltaj güç kaynağı 12-20 kV arasında çıkış voltajına ve 3.5 kHz'e kadar tekrarlama frekansına sahiptir. Harici ve dahili olarak sürülebilen bu güç kaynağı aynı zamanda 4 ns'den kısa bir sürede maksimum pulse enerjisine ulaşabilmektedir. Bu güç kaynağıyla yapılan BPSJ aktüatör deneyinde güç kaynağının kullanılıyor olması, beklenenin çok üzerinde elektrik alan oluşturması nedeniyle bilgisayar ekranının kapanıp açılması ve 2 eksenli traverse sisteminin kendi kendine hareket etmesi gibi sorunlarla karşılaşılmasına yol açmıştır. Elektrik alanın etkisini azaltmak için güç kaynağının içine konulduğu faraday kafesi yapılmıştır. Faraday kafesi, oluşan elektrik alanını az miktarda azaltmıştır. Ayrıca bu güç kaynağının elektriksel çıkış karakteristiğini belirlemek için gerekli olan 500 MHz osiloskop ve 75 ohm koaksiyel kablo gibi gereksinimlerinden dolayı voltaj probuyla çıkış voltajı ölçülemez.

Fotoğraf 3.2 (b)'de görülen her biri 1500 W olan 6 adet audi güç amfisi ve 6 adet bobinden sadece bir amfi ve bir bobin kullanılarak aktüatörün sürümü gerçekleştirilmiştir. Aktüatörü istenilen sinyal formunda sürmek için Labview'da yazılmış bir program kullanılmıştır. Bu sinyal NI PCIe-7841R model veri dönüştürücü kartı yardımıyla üretilerek güç amfisi sürülmüştür. Amfinin çıkışı bobine, bobinin çıkışı da BPSJ aktüatöre bağlanmıştır. Bu aktüatör doğru akımla çalıştığı için ofsetli duty cycle ile kare olarak sürülmüş. Nanopuls güç kaynağında olduğu gibi, bu güç kaynağında da bobinden kaynaklı elektrik alandan dolayı laboratuvar cihazları zarar görmüştür. İstenilen jet oluşumu elde edilemediğinden dolayı, bu güç kaynağından vazgeçilmiştir.

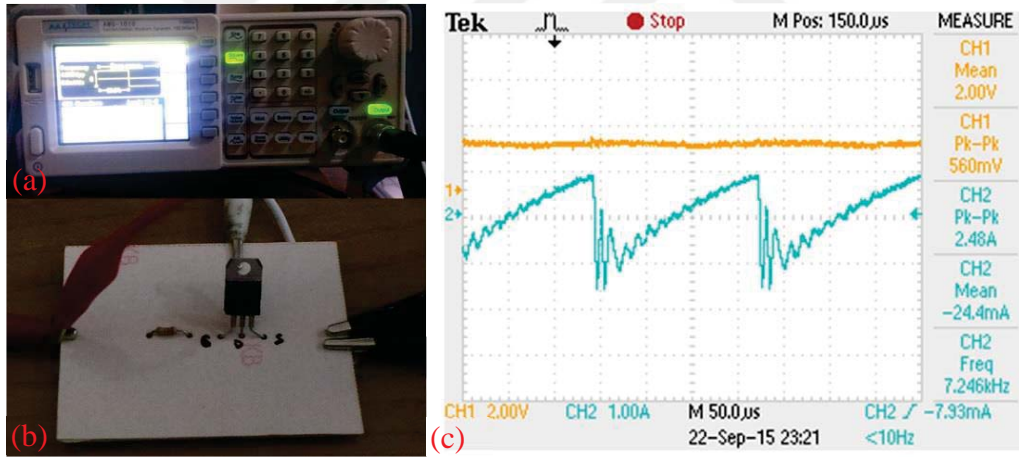


**Fotoğraf 3.2.** Nanopuls DA yüksek voltaj (a), audio güç amfisi ve bobinden (b) oluşan (Şanlısoy, 2013), tüplü monitör (c) ve transformatörlü (d) güç kaynağı

Fotoğraf 3.2 (c)'de görülen tüplü bilgisayar monitöründen sökülen doğru akım güç kaynağı kullanılarak BPSJ aktüatör sürülmüştür. Geliştirilmiş olan aktüatörün çalıştırılmasında kullanılmak üzere ilk denenen güç kaynağı bu olup, her ne kadar bu güç kaynağıyla bu aktüatörün çalıştığı gözlemlenmişse de güvensiz olması, istenilen sinyal formunda sürülememesi, kendini sürekli korumaya alıp kısa sürede kapanması vb. sebeplerden dolayı bu güç kaynağı yerine alternatif güç kaynağı arayışına gidilmiştir.

MOSFET anahtar devreli DA düşük voltaj güç kaynağının bağlı olduğu yüksek voltaj transformatörle kurulan güç kaynağı fotoğraf 3.2 (d)'de görülmektedir. Bu güç kaynağı

temel olarak DA düşük voltaj güç kaynağı, yüksek voltaj transformatör ve MOSFET anahtardan oluşmaktadır. MOSFET anahtar, istenen frekansta jet üretebilmek için fonksiyon jeneratörü kullanılarak ayarlanmıştır. Burada kullanılan fonksiyon jeneratörü AATech marka AWG-1010 modeldir. Bu anahtar yüksek voltaj transformatörle DA düşük voltaj güç kaynağının katodu arasına bağlanmıştır. Yüksek voltaj transformatörün çıkışı ise BPSJ aktüatöre bağlanarak çalışması sağlanmıştır. Fonksiyon jeneratörünün sürüm sinyali osiloskop yardımıyla izlenmiştir. Foksiyon jeneratörüyle puls modda farklı duty cycle ve frekanslarda MOSFET sürülmüştür. DA düşük voltaj güç kaynağının çıkışı Tektronix marka TDS2012B model 200 MHz osiloskobun bir kanalına bağlanarak izlenmiş ve osiloskobun ikinci kanalı ise akım probu bağlanarak giriş akımının izlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca fotoğraf 3.3 (c)'de görüldüğü gibi osiloskoptan deşarj anındaki çekilen akım ve voltajın görüntüsü yakalanmıştır. Düşük voltajı yüksek voltaja yükselten transformatörün giriş voltajı 2-6 V aralığında olup 400 kV a kadar çıkış sağlamaktadır.



**Fotoğraf 3.3.** Fonksiyon jeneratörü (a), MOSFET anahtar (b) ve giriş akımı ( $I_{pp}$ ) ve voltajının ( $V_m$ ) osiloskoptan yakalanma görüntüsü (c)

Bu transformatör 400 kV'a kadar çıkış sağladığından dolayı çıkış voltajının büyüklüğü mevcut voltaj probunun ölçüm aralığının çok üzerinde olduğu için, bu probun zarar görmemesi maksadıyla ölçülmemiştir. Bölüm IV bulgular ve tartışmalar kısmında, aktüatörü sürmede kullanılan güç kaynakları; Transformatorlü güç kaynağı-G1, Nanopuls generatör-G2, Audio amfisi-G3 ve Tüplü monitör-G4 olarak simgelenmiştir. G1 güç kaynağının kullanıldığı tüm deneylerde giriş voltajı 2V düşük voltaj güç kaynağı ile giriş voltajında gerçekleştirilmiştir.

### 3.1.7 Kullanılan elektriksel ölçüm aletleri

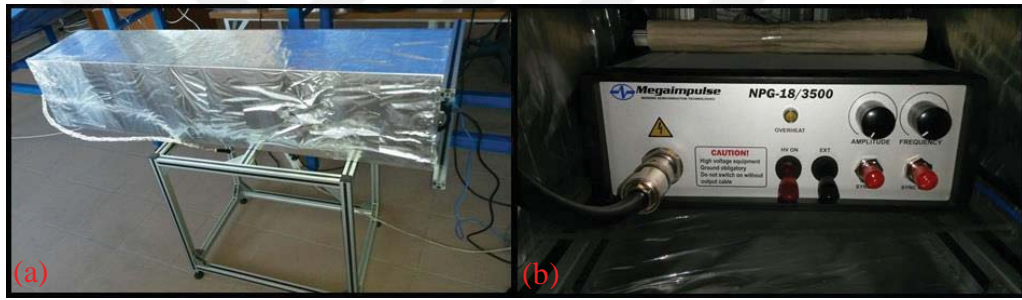
BPSJ aktüatörün sürüm voltajını, akımını, sürüm giriş sinyalini görüntülemek için 2 farklı osiloskop kullanılmıştır. Tektronix marka TDS2012B model 100 MHz 2 kanallı osiloskop sinyal jeneratörü tarafından sürülen sinyalin kontrol edilmesi için kullanılmıştır. Sistemden kaynaklanan parazitler sebebiyle sürüm sinyalinin bozulabileceğinden dolayı kontrol amacıyla sürüm sinyali izlenmiştir. Diğer osiloskop da Tektronix marka olup TDS2022 model, 200 MHz ve 2 kanallıdır. Bu osiloskobun bir kanalına düşük voltaj güç kaynağının deşarj anındaki durumunu gözlemleyebilmek için osiloskop probu yardımıyla bağlanmıştır. Osiloskobun ikinci kanalında ise deşarj anındaki akımı gözlemleyebilmek ve “peak to peak” akım değerini ölçebilmek için Fluke marka 80i-110s model AA/DA akım probu kullanılmıştır. Bu probu 50mA-100A arasındaki değerleri ölçebilmektedir. Ayrıca bu ölçümden alınmış osiloskop görüntüsü Fotoğraf 3.3 (a)'da görülmektedir ve burada turuncu renkli çizgi voltajı ve turkuaz renkli çizgi ise akımı göstermektedir. Fotoğraf 3.3 (b)'de gösterilen STMicroelectronics marka P4N150 model MOSFET anahtar 1500 V'a kadarlık voltaja kadar anahtarlama yapabilmektedir. Bu anahtarı sürmede kullanılan AATech marka AWG-1010 model sinyal jeneratörü 2 kanallı olup sinüs, kare, üçgen ve keyfi dalga formu gibi birçok farklı dalga formunda sürüm yapabilmektedir. Bu sinyal jeneratörü fotoğraf 3.3 (a)'da görülmektedir.

### 3.1.8 Güvenlik için alınan önlemler

Bu tez çalışması sırasında yapılan deneylerde ozon ( $O_3$ ),  $NO_x$  vb. gibi zararlı gazlar oluşması, yüksek voltajda çalışılması, kullanılan güç kaynaklarının aşırı derecede elektrik alan oluşturması nedeniyle insan sağlığı üzerine dönüşü olmayan zararlar vermesi riskinden dolayı deneylere başlamadan önce bir takım önlemler alınmıştır. Burada bu önlemlerden bahsedilecektir. OSHA (Occupational Safety and Health Administration) tarafından tavsiye edilen ozon seviyesi hafif bir iş için günlük 0.1ppm'i aşmaması gerekmektedir (URL-2). Bu sebeple deneylerin yapılışı esnasında laboratuvar içerisinde biri deney sisteminin yakınında ve diğeri sistemden uzak bir noktada olmak üzere iki adet ozon metre kullanılmıştır. Ozon metreler sayesinde ortamda bulunan ozon seviyesi sürekli olarak kontrol edilmektedir. BPSJ aktüatörün hız ölçüm deney düzeneği rüzgâr tünelinin giriş ağzına konulmuştur ve rüzgâr tünelinin çıkışı fan çapıyla aynı

çapta spiral boru yardımıyla dışarıya atılmaktadır. Ozon seviyesi kritik seviyeye yaklaştığı anda rüzgar tüneliyle laboratuvar havalandırılmıştır.

Yüksek voltajla çalışılmasından dolayı deney sistemi çevresinde bulunan metal malzemeler topraklanmıştır. Her deney sonunda deney düzeneği üzerinde toplanabilecek statik yükü boşaltmak amacıyla seyyar topraklama çubuğuyla topraklanarak biriken yükün boşaltılması sağlanmıştır. Ayrıca dalgınlıkla oluşabilecek bir kazayı önleyebilmek amacıyla deney esnasında yüksek voltajın açık ve kapalı olduğunu yüksek sesle söyleyerek laboratuvarında bulunanların bilgilendirilmesi sağlanmıştır. Fotoğraf 3.4 (a ve b)'de daha önceki bölümlerde bahsedilen yüksek voltaj kaynağının oluşturduğu elektrik alanın etkisini azaltmak için yapılmış faraday kafesi ve onun içerisine yerleştirilmiş olan Nanopuls güç kaynağı görülmektedir.



**Fotoğraf 3.4.** Faraday kafesi dışardan görünüşü (a) ve kafes içerisindeki nanopuls yüksek voltaj güç kaynağı (b)

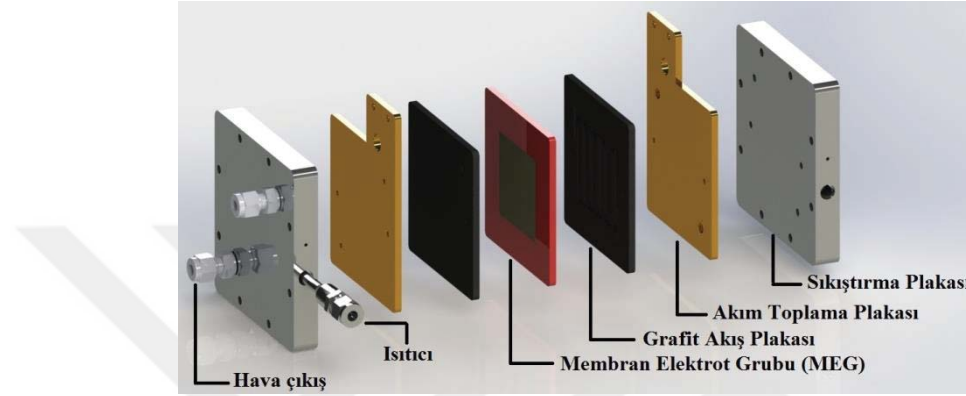
### 3.2 PEM Yakıt Pili Tasarımı ve Deneylerinde Kullanılan Cihazlar

Bu bölümde, PEM yakıt pilinin tasarımından, yakıt pilinin aktivasyonundan, geliştirilmiş olan BPSJ aktüatörü bağlamak için üretilen farklı aparatlardan ve yakıt pili test istasyonundan bahsedilecektir.

#### 3.2.1 PEM yakıt pili tasarım ve montajı

Şekil 3.2'de üç boyutlu tasarım programı kullanılarak PEM yakıt pilinin tasarlanmış hali görülmektedir. Tasarlanmış olan bu yakıt pilinin imalatı, yakıt pili imalatı yapan bir firmaya yaptırılmıştır. Yakıt pili sisteminin temel bileşenleri paslanmaz çelik sıkıştırma plakası (20 mm et kalınlığı), akım toplama plakaları, grafit akış plakaları, membran

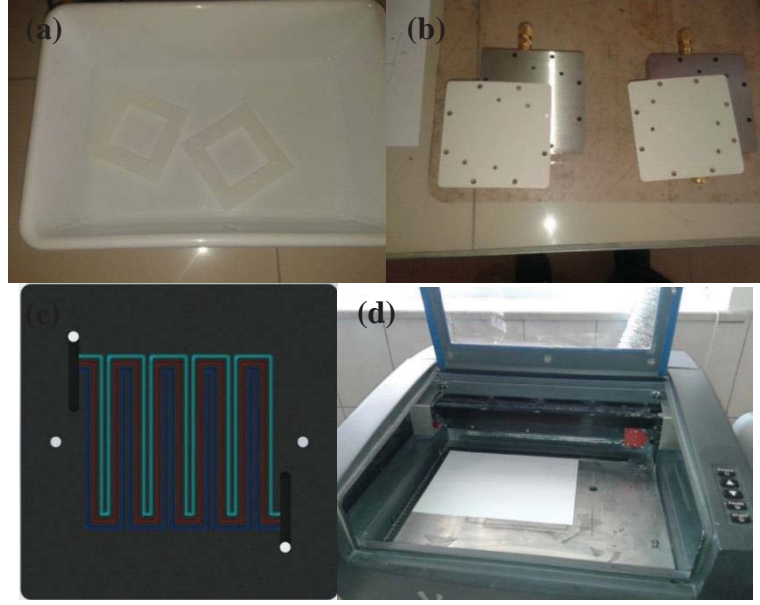
elektrot grubu (MEG), sızdırmazlık elemanları ve sıkıştırma plakalarını sıkıştırmak için gerekli olan cıvata-somunlardan oluşmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan tek hücreli yakıt pilinin membranı; 127 µm kalınlığa sahip 5 katmanlı Nafion 115 membrandır ve 25 cm<sup>2</sup> aktif alana sahiptir. Grafit akış kanallarının 25 cm<sup>2</sup>'lik aktif alan dışında kalan bölgesine, gazların (hava ve hidrojen) sızmadığı için sızdırmazlık elemanı (gasket) ile aktif alan dışında kalan alan kapatılmıştır.



Şekil 3.2. Tasarlanmış yakıt pilinin şematik görünümü

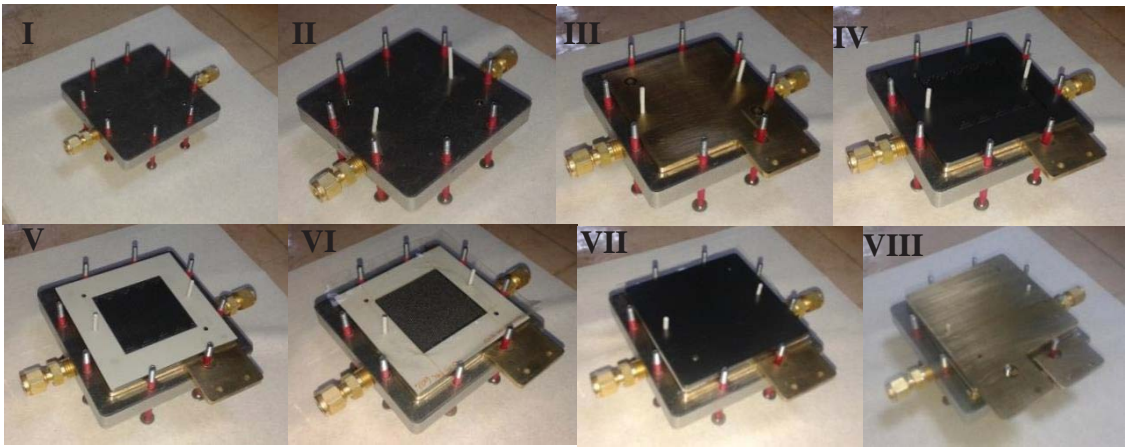
Niğde üniversitesi Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi Yakıt Hücresi Üretim Laboratuvarında bulunan ve Fotoğraf 3.5 (d) de görülen CNC lazer kullanılarak Fotoğraf 3.5 (a)'da ki contalar ve Fotoğraf 3.5 (b)'de görülen myler bantlarının her ikisinin üzerinde gaz giriş çıkışı ve cıvata için gerekli olan delikler açılmıştır.

Fotoğraf 3.5 (a)'daki kesilmiş conta, Fotoğraf 3.5 (c)'de görülen paralel serpantin aktif alanı dışındaki kısmını kapatacak şekilde kesilerek gaz sızıntılarını önlemektedir. Cıvatalar kısa devre oluşturmasın diye ısıyla daralan makaron kullanılarak yalıtımı sağlanmıştır. Isıyla daralan makaronlar cıvatalara geçirildikten sonra 150°C sıcaklıktaki fırında 10 dakika ısıtılarak cıvata gövdesine yapışması sağlanmıştır. Sıkıştırma plakası, myler bandı, akım toplama plakası, grafit akış kanalları, sızdırmazlık elemanı ve membran elektrot grubunun birleştirme safhasında bu parçaların sırasıyla yerleştirilmesi Fotoğraf 3.5'de görülmektedir.



**Fotoğraf 3.5.** Kesilen conta (a), myler bandı (b), üçlü paralel serpantin akış kanalı (c) ve CNC lazer (d) kesim cihazı

Fotoğraf 3.6’da tek hücreli PEM yakıt pilinin montaj aşamaları görülmektedir. Burada görülen roma rakamıyla I’den VIII’e kadar numaralandırılan fotoğraflar sıralamaya göre birleştirilerek yakıt pili montajı tamamlanmıştır. Yakıt pilinin anot ve katot olarak ikiye ayrıldığı membran kısmından yakıt pili simetrik olduğu için diğer tarafta aynı şekilde yerleştirilmiştir. Tüm parçalar birleştirildikten sonra yakıt pili sırasıyla 2 ve 2,5 Nm değerlerinde tork anahtarları yardımıyla çapraz olarak sıkılmıştır. Deneylerde, üçlü paralel serpantin şeklinde tasarlanmış olan akış kanalı 1 mm kanal derinliği ve genişliğine sahiptir.

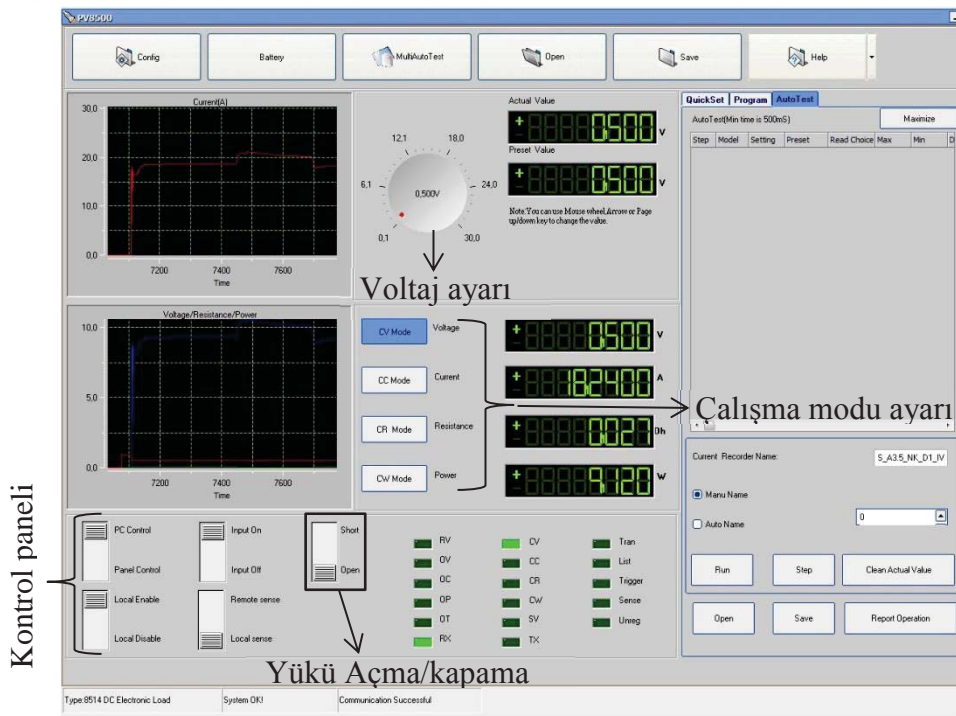


**Fotoğraf 3.6.** Tek hücreli PEM yakıt pilinin montaj aşamaları

### 3.2.2 Yakıt pili test istasyonu

Tek hücreli PEM yakıt pilinin deneylerinde BK Precision firmasının 8514 model DC elektronik yükleyicisi kullanılmıştır. Bu elektronik yükleyici sabit voltaj (SV) modunda 0.1- 18 V aralığında 1 mV çözünürlükte, sabit akım (SA) modunda ise 0-24 A aralığında ölçüm yapabilmektedir. Bu cihazla 1200 W gücüne kadar olan yakıt pillerinin performans testleri yapılabilmektedir.

Şekil 3.3'de görüldüğü gibi bu elektronik yük sistemiyle beraber gelen yazılımın arayüzü görünümüdür. Kullanımı kolay olan bu program yakıt pili testleri için sabit akım, sabit voltaj, sabit direnç ve sabit güç gibi çalışma modlarına sahiptir. Akım, voltaj güç değerlerinin zamanla değişimi programın açılmasıyla birlikte kayıt edilebilmektedir. Ayrıca akım voltaj eğrisi elde edebilmek için ayarlanan zamana bağlı voltaj değerler dosyasına göre çalışıp o aralıklarda voltaja karşılık gelen akım değerleri elde edilir. Yakıt pilinin hava ve H<sub>2</sub> girişinin kontrolü için birer adet kütleli debi ölçer (MFC, Mass Flow Controller) kullanılmıştır. Bu çalışmada ALICAT marka MC-10SLPN-D model MFC debi ölçerler kullanılmıştır.



Şekil 3.3. BK Precision elektronik yük cihazı yazılımının genel görünümü

### 3.2.3 PEM yakıt pilinin aktivasyonu

PEM Yakıt pilinin uygun şekilde montajı ve izolasyonu yapıldıktan sonra çalıştırılması için, gerekli olan hava ve hidrojen nemlendiriciye bağlanır ve oradan da yakıt piline bağlantıları yapılır. Son olarak yakıt pilinin aktivasyonunu yapabilmek ve akım (I)-voltage (V) eğrilerini elde edebilmek için elektronik yük cihazına bağlanıp aktivasyona hazır hale getirilmiş olur. MEG, ortada nafion membran ve bu membran'ın sağ ve sol taraflarındaki elektrotlardan oluşmaktadır. MEG imalatı sırasında membran ve elektrotlar sıcak pres yöntemiyle imal edilmiş olmasından dolayı nemli olması gereken membranın kurumasına neden olmaktadır. Bu sebeple membranın ilk kullanımından önce düzgün bir şekilde çalışabilmesi için aktivasyon işleminin yapılması gerekmektedir.

Yakıt pilinin aktivasyon işlemine başlamadan önce MEG'in nemlendirilmesi gerekmektedir ve bunun için iki farklı yöntem uygulanabilmektedir. Bunlar; MEG'in saf su içerisine yatırılması ve diğeri ise yakıt pili test istasyonuna bağlanarak nemlendirme işleminin yapılmasıdır. Yakıt pilinin test istasyonuna bağlanarak nemlendirilmesi yani aktivasyon işlemi yapılması, MEG için ilk yöntem nazaran daha güvenli olmasından dolayı bu tez çalışmasında yakıt pilinin aktivasyonu test istasyonuna bağlanarak yapılmıştır. Bu yöntemde ise yakıt pili normal olarak çalıştırılır ve bir süre sonra hava kapalı bir şekilde çalışmasına devam etmesi sağlanır. Bu sayede içeride kalan oksijeni kullanarak su üretmesine olanak sağlanır. Bu sayede gaz difüzyon tabakası ve elektrot tabakası suyla dolana kadar su birikir (URL-3).

Literatürde, yakıt pilinin aktivasyonunun yapılmasında kullanılan farklı yöntemler mevcuttur. Bunlardan bazıları, MEG birleştirmeden önce sıcak su veya buhar kullanmak (Qi ve Kaufman, 2002a) ve yüksek sıcaklık ve basınçta MEG çalıştırmak (Qi & Kaufman 2002b) gibi yöntemlerle aktivasyon yapılabilmektedir. Fakat bu çalışmada kullanılan yakıt pilinin aktivasyonu ABD yakıt pili kurulu (USFCC) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kurulun yayınladığı prosedüre göre;

- I. İlk başlama
- II. Yük çevrimi
- III. Son performanstır.

Tek hücreli yakıt pili için hava, hidrojen, basınç ve sıcaklık şu şekildedir;

- Yakıt : Hidrojen, stokiyometrik oran 1.2, % 100 RH
- Oksidant : Hava, stokiyometrik oran 2, % 100 RH
- Sıcaklık (°C) : 80
- Basınç (atm) : 2.7

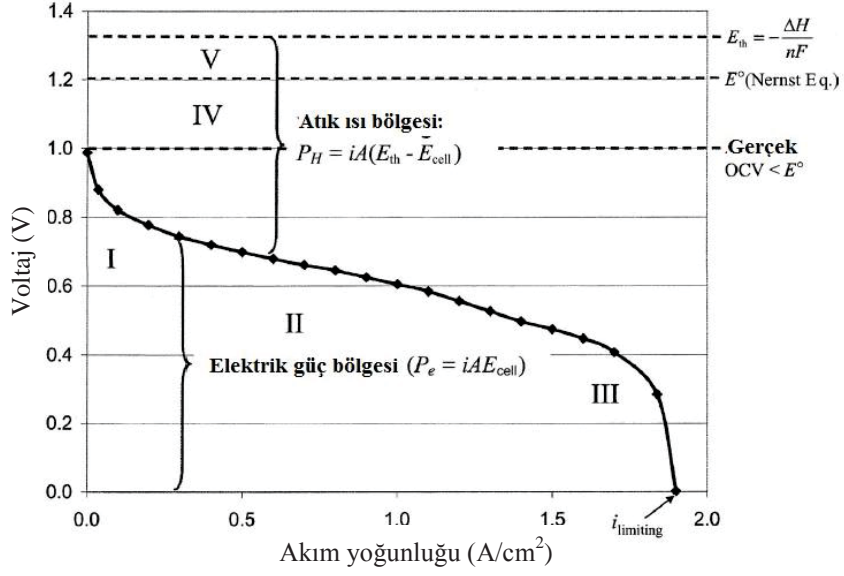
İlk başlangıç : 80 °C'ye ulaşmak için yapılır.

- ❖ Seri 1 (1 kere yapılır) : 0.6 V'da 60 dk. tutulur.
- ❖ Seri 2 (9 kere yapılır) : 0.7 V'da 20 dk, ardından 0.5 V'da 20 dk.
- ❖ Sabit akım : 200 mA/cm<sup>2</sup> de 720 dk. tutulur.

Aktivasyon sonrasında polarizasyon eğrisi 3 kere uygulanmıştır. Her bir süreç 20 dakika içinde yapılmıştır. Yakıt pili polarizasyon eğrisinde 800 mA/cm<sup>2</sup> deki voltaj değerleri arasında 5mV'luk değişim olmadığı anda aktivasyon işlemi başarıya ulaşmış denir. Polarizasyon eğrileri arasında 10 dakikalık bekleme süresi uygulanmıştır. Bu bekleme süresinde 200 mA/cm<sup>2</sup> de stokiyometrik oran 10 alınmış ve ardından 800 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğuna sabitlenmiştir (URL-3).

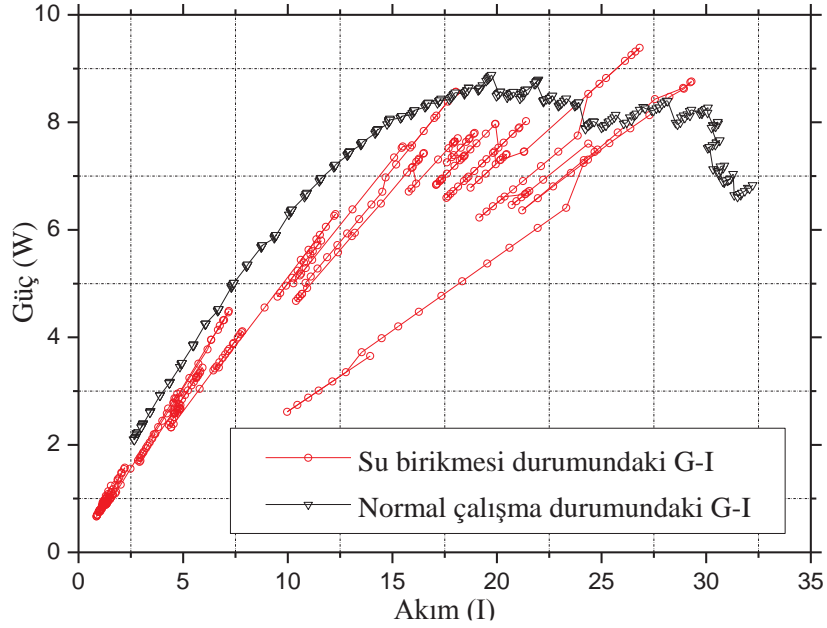
Yakıt pillerinde polarizasyon eğrileri hücrenin voltaj-akım ilişkisini göstererek yakıt pili performansı incelemesinde standart hale gelmiştir. Standart bir yakıt pilindeki kayıplar, polarizasyon eğrileri sayesinde tespit edilebilir. Buna göre polarizasyon eğrileri üzerindeki kayıplar Şekil 3.4'de gösterildiği gibi 5 bölgeye ayrılarak incelenir.

- I. Bölgedeki kayıplar elektrotlarda kinetik kayıpların baskın olduğu kısımdır.
- II. Bölgedeki kayıplar elektrolitin, katalizör tabakalarının ve temas eden parçalar içindeki elektriksel ve iyonik iletim kayıplarının baskın olduğu kısımdır.
- III. Bölgedeki kayıplar yakıt pilinde konsantrasyon kayıplarının baskın olduğu bölgedir.
- IV. Bölgedeki kayıplar elektrolit içinden sızan elektronlardan oluşan iç akımlar veya safsızlık ve pislik sonucu oluşur.
- V. Bölgedeki kayıplar çözülemeyen entropi değişiklikleri sonucu maksimum termal voltajdan sapmayı temsil eder (Mench, 2008).



Şekil 3.4. Tipik polarizasyon eğrisi (Mench, 2008)

Şekil 3.5'deki güç akım eğrileri 20 dakika boyunca 3 saniye veri toplama aralığıyla 0.8V-0.2V aralığında elde edilmiştir. Şekil 3.5'de yakıt pilinin olağan çalışma durumundaki yakıt pilinden elde edilecek gücün akıma göre değişimi görülmektedir. PEM yakıt pilinde performansı etkileyen en önemli sorunlardan biri olan su birikmesi olayının yakıt piline olan etkisi çok açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.5. PEM yakıt pilinin normal ve su birikmiş durumundaki güç-akım eğrisi

Yukarıdaki grafiklerden ve su birikmesi sonrası sökülen yakıt pilinin akış kanallarındaki su birikmesinin görüldüğü Fotoğraf 3.7’den anlaşılacağı gibi katot akış kanallarında biriken suyun iyi tahliye edilememesi, difüzyon kayıplarının meydana gelmesi ve basınç düşüşünden dolayı yakıt pili performansı düşmektedir. Birinci bölümde de bahsedildiği gibi yakıt pilinde bu tip sorunları çözebilmek ve yakıt pilinin performansını arttırabilmek için literatürde yakıt piline; piezoelektrik diyafram (Seo vd., 2009), hoparlör (Kim vd., 2008) ve piston-silindir (Hwang vd., 2010) mekanizmalı sentetik jet aktüatörler kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında; geliştirmiş olduğumuz buji sentetik jet aktüatör kullanılarak yakıt pilinin performansına etkisi incelenmiştir.



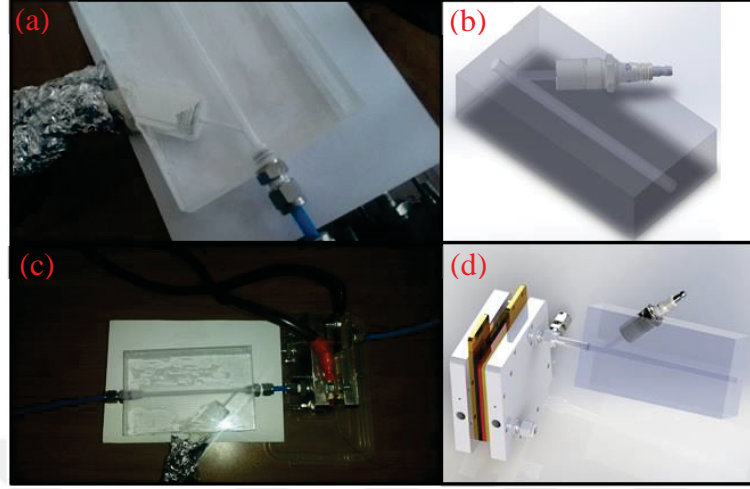
**Fotoğraf 3.7.** Yakıt pili akış kanalında oluşan su birikimi

### **3.2.4 BPSJ aktüatörü yakıt pilini bağlamada kullanılan aparatları**

Bu tez çalışması kapsamı içerisinde olan BPSJ aktüatörün yakıt piline uygulanması için birkaç farklı bağlantı aparatı tasarlanıp üretilmiştir. Fotoğraf 3.8 (a ve c)’de sırasıyla yakıt piline aktüatörü bağlamak için pleksiglastan üretilmiş olan tekli bağlantı aparatı ve tek hücreli yakıt piline bağlanış biçimi görülmektedir. Fotoğraf 3.8 (b ve d)’de sırasıyla üç boyutlu tasarım programı vasıtasıyla tasarlanmış olan tekli kanal ve bu kanalın yakıt piline montaj halinin şematik hali görülmektedir.

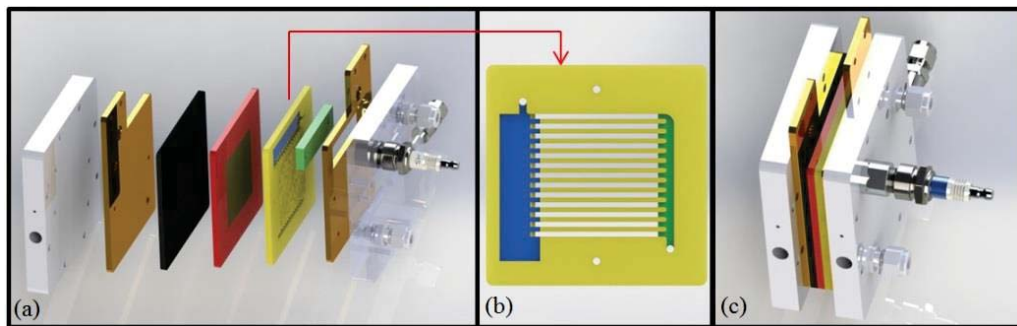
Pleksiglastan üretilen bu kanal tam ortadan ikiye ayrılmış şekilde 2 parça olarak 3 eksenli CNC router kullanılarak üretilmiştir. Daha sonra bu parçalar birleştirilmiş ve havanın giriş ve çıkış kısımlarına rakor (fitting) bağlayabilmek için kılavuzla dış

açılmıştır. Son olarak BPSJ aktüatör, kanal içerisine yerleştirip silikonlanarak hava sızdırmaması sağlanmıştır.



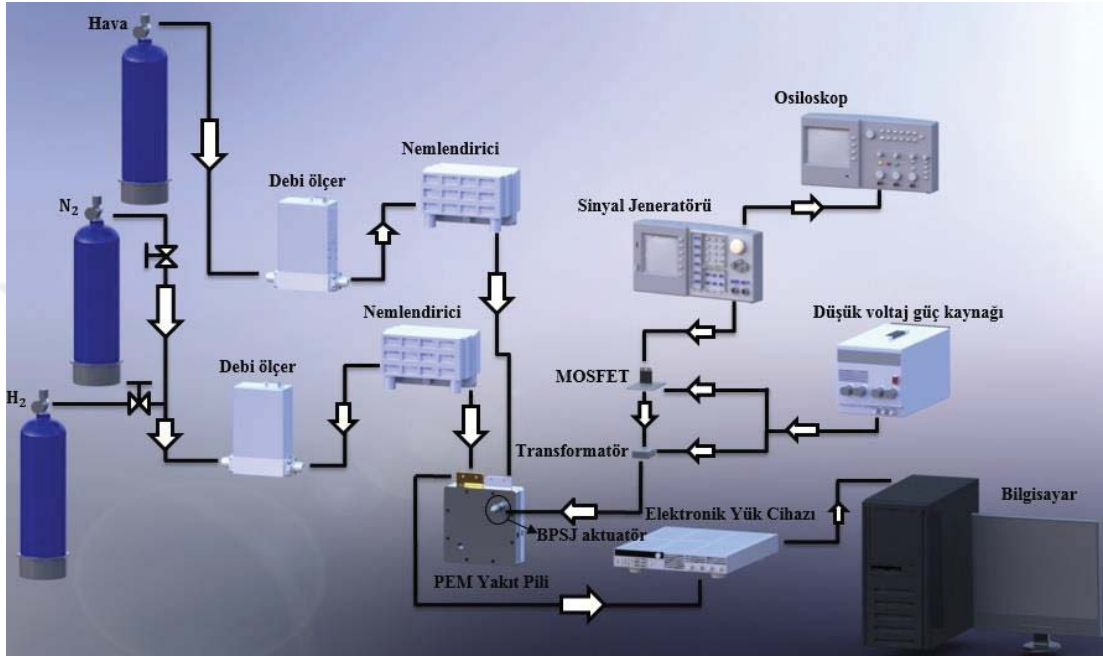
**Fotoğraf 3.8.** Üretilmiş tekli buji kanalı (a), tekli kanal tasarımı (b), tekli kanal yakıt piline montaj (c) hali ve tekli kanal yakıt pili tasarımının montaj (d) görünümü

Bir diğer aktüatör bağlama şekli olarak, aktüatörün yakıt pili üzerine direkt olarak bağlanması üzerine tasarım yapılmıştır. Fotoğraf 3.9 (a) ve (c)'de görüldüğü gibi aktüatörün katot tarafında havanın verildiği tarafa direkt olarak bağlanabilmesi için sıkıştırma plakası üzerine delik açılmıştır. Ayrıca Fotoğraf 3.9 (b)'de görülen katot akış kanalı, üçlü paralel serpantin anot ( $H_2$ ) akış kanalından farklı olarak %50 açıklığa sahip şekilde kanal tasarlanmıştır. Bu tasarıma ait parçaların imalatı yapılarak ön deneyleri yapılmıştır. Ancak elektrik alan problemi nedeniyle elektronik yük cihazından ölçüm alınamadığından bu tez çalışmasına konulamamıştır.



**Fotoğraf 3.9.** Yakıt piline BPSJ aktüatörün direk bağlanmış halinin şematik olarak patlatılmış (a) görünümü, modifiye edilmiş akış kanalı(b) ve montaj (c) hali

Şekil 3.6’da yakıt pili deneyinde kullanılan tüm deneysel ekipmanların 3 boyutlu olarak tasarlanmış hali görülmektedir. Burada deney düzeneği çalışma yönü oklarla gösterilmiştir. Sol tarafta yakıt pilini besleme sistemi görünürken, sağ üst tarafta aktüatörün çalışma devresi ve sağ alt tarafta ise yakıt pili performansının test edildiği elektronik yük sistemi görülmektedir.



Şekil 3.6. Yakıt pili deney düzeneği

## BÖLÜM IV

### BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan yüksek lisans tez çalışması kapsamında deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. PEM yakıt pilinin performansı üzerine plazma sentetik jet aktüatörün etkisinin incelendiği deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma temel olarak iki farklı deney düzeneğinden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi geliştirilmiş olan BPSJ aktüatörün karakterizasyonunun yapıldığı kızgın tel anemometresiyle hız ölçümü ve rüzgar tüneline düz plaka üzerinde yapılan akış görüntülemesidir. Temel olarak iki farklı deney düzeneğinden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi geliştirilmiş olan BPSJ aktüatörün karakterizasyonunun yapıldığı kızgın tel anemometresiyle hız ölçümü ve rüzgar tüneline düz plaka üzerinde gelişmiş sınır tabaka üzerinde bu aktüatörün etkisini gözlemlemek için yapılan akış görüntülemesidir. İkincisi ise bu aktüatörün tek hücreli 25 cm<sup>2</sup> aktif alanlı PEM yakıt pili performansı üzerine etkisinin incelendiği deneysel çalışmalardır. Deney sonuçları BPSJ aktüatör ve PEM yakıt pili olmak üzere iki ana başlık altında sunulmuştur.

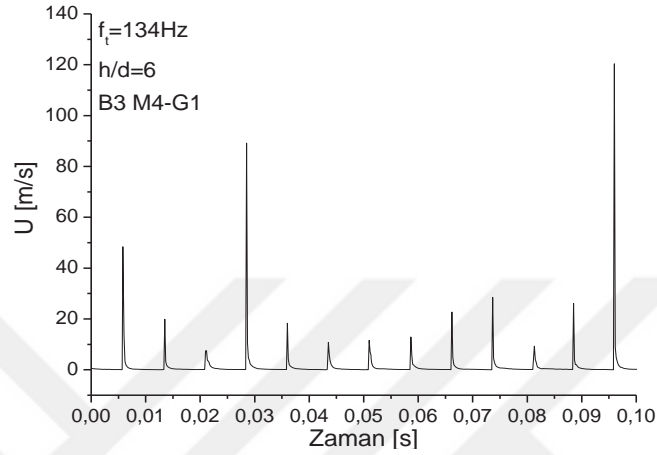
#### 4.1 Geliştirilmiş olan BPSJ Aktüatör Deneyleri

Geliştirilmiş olan Buji Plazma Sentetik Jet Aktüatörün karakterizasyonunun yapılması için gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmanın sonuçları bu bölümün alt başlıkları şeklinde verilmiştir. Burada sürüm frekansının ve duty cycle'in etkisi, güç kaynağının etkisi, farklı buji modellerinin etkisi, prob konumunun değişiminin etkisi ve rüzgâr tüneline gerçekleştirilen akış görüntüleme deneylerine yer verilmiştir. Şekil 4.1'de h/d=6 prob konumunda 0-0,1 s aralığı için hızın zamana göre anlık değişimi görülmektedir. Maksimum hız 130 Hz tekrarlama frekansında yaklaşık olarak 120 m/s olarak elde edilmiştir.

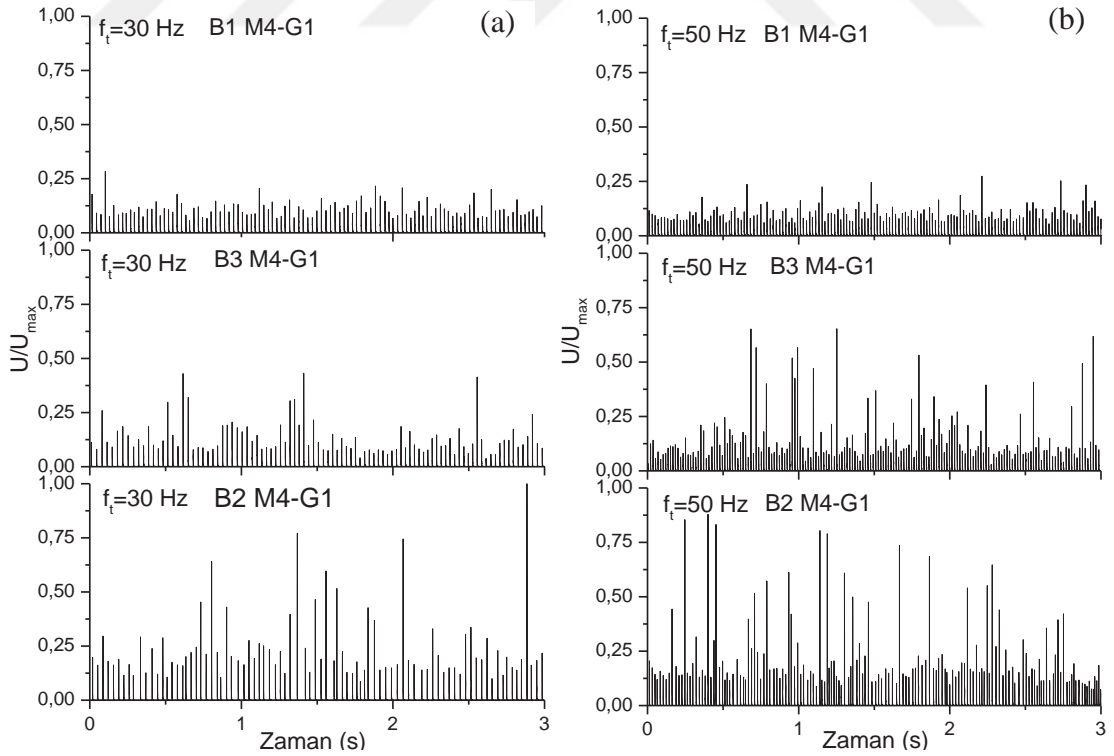
##### 4.1.1 Sürüm frekansı ve farklı bujilerin BPSJ aktüatörün anlık hızı üzerine etkisi

Şekil 4.2 (a ve b)'de verilen grafikler başlık olarak model 4 (M4), güç kaynağı olarak G1, B1, B2 ve B3 tip bujiler kullanılarak Şekil 4.2 (a)  $f_t = 30$  Hz ve (b)  $f_t = 50$  Hz için oluşturularak bujilerin çalışma karakteristikleri incelenmiştir. Grafiklerden net bir

şekilde anlaşıldığı gibi B1(BUZH-2) model buji hem  $f_t = 30$  hem de  $f_t = 50$  Hz’de B2 ve B3 model bujilere kıyasla etkili bir şekilde çalışmadığı görülmektedir.  $f_t = 30$  ve 50 Hz’de B2 model bujide en yüksek jet hız değeri elde edilmiştir. Bu grafik sonuçlarına göre daha etkin olduğu görülen B2 ve B3 bujileri kullanılarak deneylere devam edilmiştir.

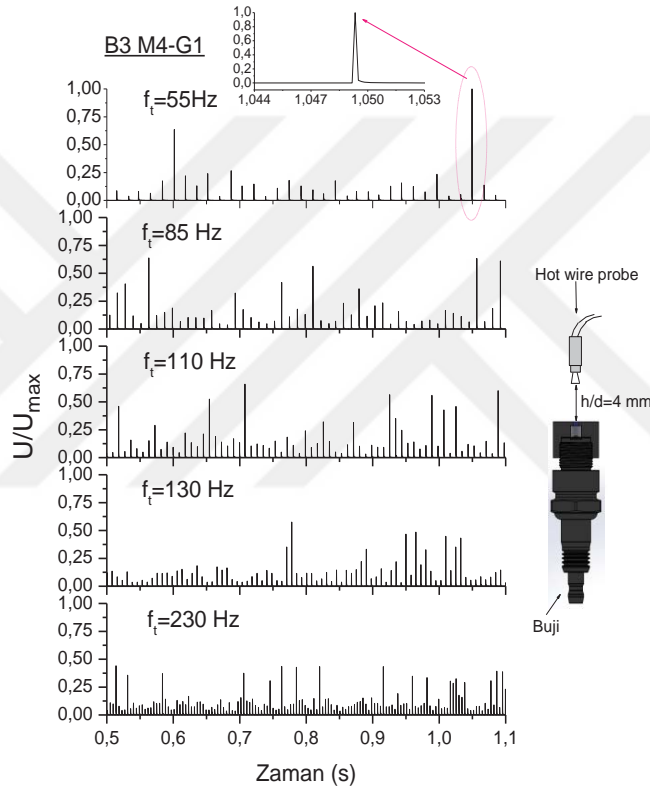


Şekil 4.1.  $f_t = 130$  Hz’ da 0-0.1 saniye aralığında anlık hız dağılımı



Şekil 4.2. BPSJ aktüatör için farklı bujiler üzerine tekrarlama frekansı 30 Hz (a) ve 50 Hz (b) etkisi

Şekil 4.3’de anlık normalize hızlarda, aktüatörün 55, 85, 110, 130 ve 230 Hz’lik tekrarlama frekansının etkisini göstermektedir. Burada deneyler; G1 (transformatörlü) güç kaynağı, başlık Model 4 (M4) ve NGK marka BUHW-2 (B3) model düz başlı buji kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki jet arasındaki yenilenme zamanı gittikçe azaldığı için 55 Hz’den 230 Hz’e tekrarlama frekansının artmasıyla maksimum normalize hızların azaldığı görülmektedir. Bu durumda, aktüatör jet çıkışından sonra yenilenme adımında yeterince havayı hacim içerisine çekemez. Pik normalize hız  $f_t=55$  Hz’de elde edilmiştir.

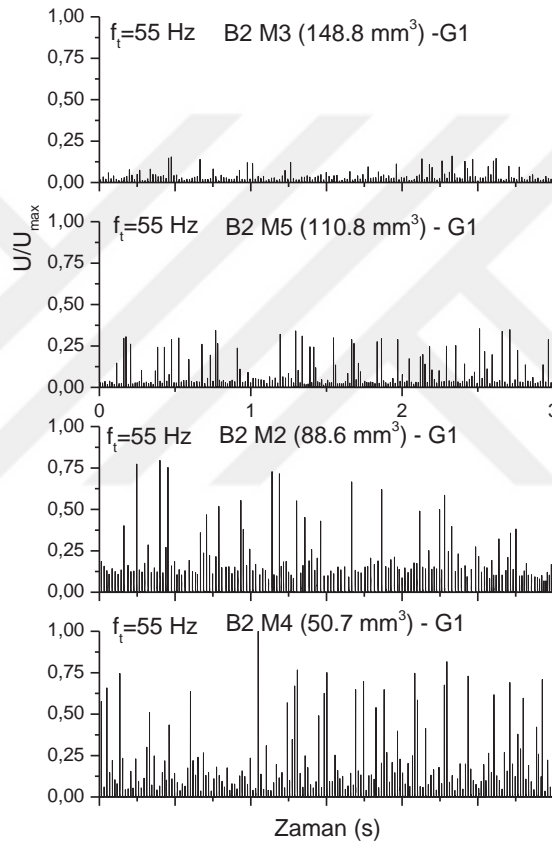


Şekil 4.3. Normalize anlık hızlarda tekrarlama frekansının etkisi

#### 4.1.2 Farklı buji başlıklarının BPSJ aktüatörün anlık hızı üzerine etkisi

B2 (BUHW) buji ve G1 güç kaynağıyla  $f_t=55$  Hz frekansta sürülen farklı boşluk hacimlerine ve aynı orifis delik çapına sahip olan M2 ( $88,6 \text{ mm}^3$ ), M3 ( $148,8 \text{ mm}^3$ ), M4 ( $50,7 \text{ mm}^3$ ) ve M5 ( $110,8 \text{ mm}^3$ ) model başlıkların normalize anlık hızlar üzerine etkisi Şekil 4.4’de verilmiştir. Ayrıca, kızgın tel probu  $h/d = 4$  konumunda ve düşük voltaj güç kaynağı 2 V’ta sürülerek deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4’te verilen grafikten anlaşıldığı üzere aynı orifis çaplarına sahip başlıkların boşluk hacimlerinin azalmasıyla

orantılı olarak jet çıkış hızının arttığı görülmüştür. En yüksek anlık hız en küçük boşluk hacmine sahip olan M4'de elde edilmiştir. Basınçla hacim arasındaki ters orantıdan dolayı aynı deney şartlarında sadece hacmin azalmasıyla hacim içerisindeki basıncın artmasına buda hacmin içiyle çevre atmosfer arasındaki basınç farkının artmasına neden olacaktır. BPSJ aktüatörle benzer çalışma prensibine sahip PSJ aktüatörün kullanıldığı Shin (2010) tarafından yapılan çalışmada jet çıkış hızının etkili bir şekilde orifis çapı ve boşluk hacmine sahip olduğunu buldukları sonuçlar bu grafikten elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.

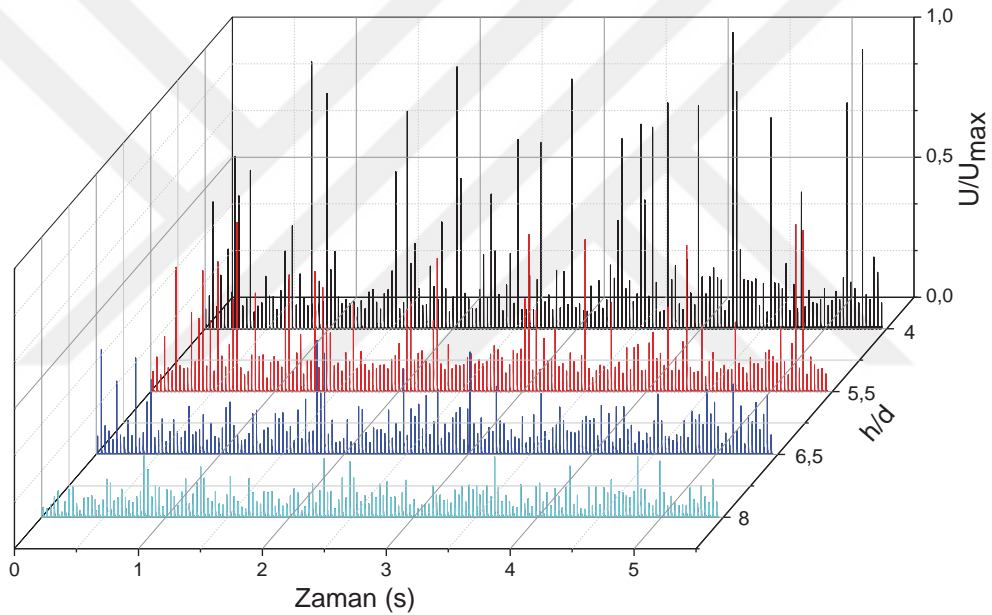


**Şekil 4.4.**  $f_t=55$  Hz'de M2, M3, M4 ve M5 başlıklarının normalize anlık hızlar üzerine etkisi

#### 4.1.3 Kızgın tel anemometre probunun konumunun anlık hız dağılımına etkisi

Şekil 4.4,  $f_t=30$  Hz tekrarlama frekansı için  $h/d=4, 5.5, 6.5$  ve  $8$ 'de zamanın fonksiyonu olarak hızın anlık değişimini göstermektedir. Başlık M4 ( $50 \text{ mm}^3$ ), buji B3 ve güç kaynağı olarak G1 kullanılarak bu deney gerçekleştirilmiştir. Prob konumu  $h/d, 4$ 'den  $8$ 'e arttığında, BPSJ aktüatörün normalize jet hızının beklendiği gibi azaldığı

görülmektedir. Burada, “h”, başlık ile kızgın tel anemometresi probunun konumunu ve “d” orifis çapını simgelemektedir. Maksimum normalize hız  $h/d=4$ 'de elde edilirken en düşük hız  $h/d = 8$ 'de elde edilmiştir. Jet ilk çıktığı andan itibaren başlık yüzeyinden uzaklaşırken aynı zamanda radyal yönde genişlemektedir. Bu da jetin yüksekliği arttıkça hızının düşmesine neden olmaktadır. Jin vd. (2015) tarafından  $50 \text{ mm}^3$  boşluk hacmi ve 1 mm orifis çapına sahip olan PSJ aktüatör kullanarak yapılan çalışmada Schlieren akış görüntülemeyle zamana bağlı elde ettikleri jetin oluşuna göre jet etkisini 10d mesafeye kadar kaybettiğini göstermektedirler. Aşağıdaki grafik sonucuna göreyse BPSJ aktüatörün oluşturduğu jet etkisini 8d mesafeye kadar etkisini %80 kaybettiği görülmektedir.

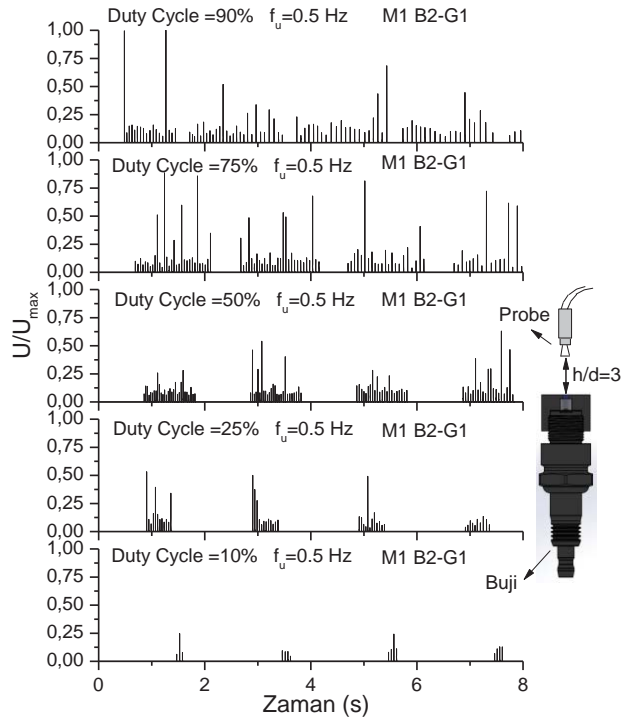


**Şekil 4.5.**  $f_t=30 \text{ Hz}$  için prob konumu  $h/d= 4, 5.5, 6.5$  ve  $8$  anlık normalize hız dağılımı üzerine etkisi

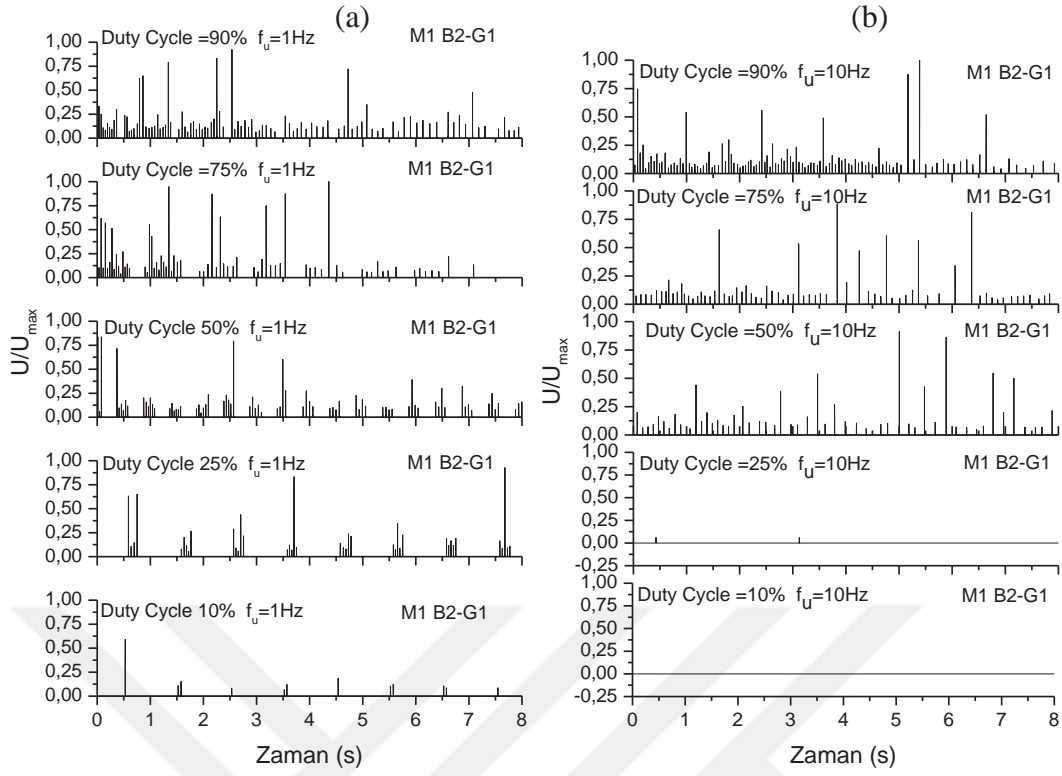
#### 4.1.4 BPSJ aktüatör üzerine duty cycle etkisi

Buji B2, başlık M1 ve G1 güç kaynağı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Farklı uyarım frekanslarında duty cycle etkisinin incelendiği bu çalışmalarda 4 kHz örnekleme frekansında 32000 veri toplanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. 8 saniye süren her bir ölçümün eş zamanlı çalışabilmesi için yeterli ekipman olmaması sebebiyle aktüatör aktif edildikten hemen sonra kızgın tel anemometresi çalıştırılmıştır. Hız değerleri normalize edilirken her grafik grubu kendi içerisinde normalize edilmiştir. Duty cycle

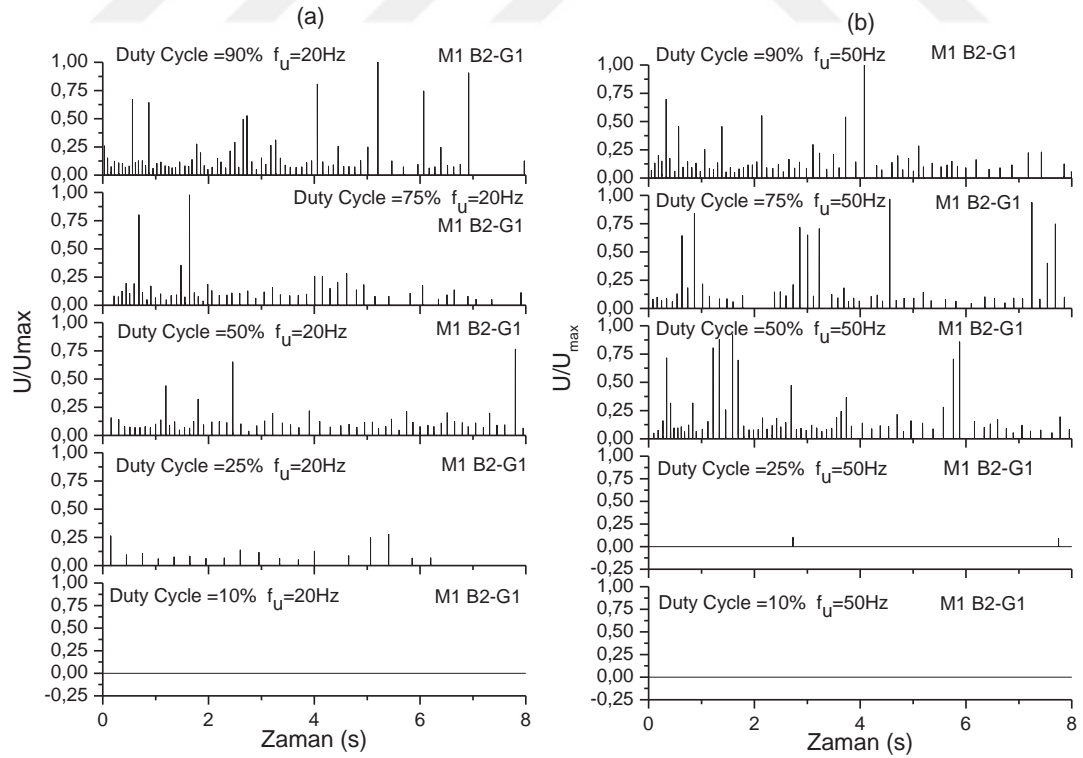
etkisinin farklı uyarım frekanslarındaki etkisini görebilmek için  $f_u = 0.5, 1, 10, 20$  ve  $50$  Hz değerlerinde duty cycle %90, %75, %50, %25 ve %10 için alınan ölçümler sırasıyla Şekil 4.6, Şekil 4.7 (a ve b) ve Şekil 4.8 (a ve b) grafiklerinde verilmiştir. Uyarım frekansı  $0.5$  Hz'de maksimum anlık hız duty cycle %90'da elde edilmiştir. Duty cycle %90'dan %10'a düştüğünde, normalize anlık hızlarda azalma gözlenmiştir. Şekil 4.7 ve 4.8'de verilen  $f_u = 10, 20$  ve  $50$  Hz'de DC= %10 ve %25 durumlarında transformatörün dolması için gerekli zamanın kısılmasından dolayı beklendiği gibi jet oluşmadığı görülmektedir. Enerji bırakımı adımı, düşük duty cycle'larda aktüatör hacmi içerisine enerji bırakımı için gereken süre kısalmaktadır. Bu yüzden boşluk hacmine enerji verilerek üretilen plazma düşük jet hızı veya hiç jet üretememektedir. Ayrıca kullanılmış olan güç kaynağı artan süreyle istikrarsız bir karakteristik sergilemeye başlamakta ve jetin tekrarlamaya frekansı azalmaktadır. Bu durum anlık hızları ciddi bir şekilde değiştirmektedir. Ayrıca anemometrenin bu deneyler için yetersiz ölçüm frekansına sahip olmasından dolayı jetin anlık hızları tam olarak doğru bir şekilde elde edilememiştir. Bu yüzden, mevcut örnekleme frekansına göre jet oluşum zamanının çok kısa olmasından dolayı pik jet hızları rastgele elde edilmiştir.  $f_u = 0.5$  ve  $1$  Hz'de duty cycle %10 ve %25 için  $f_u = 10, 20$  ve  $50$  Hz'dekinin aksine deşarj süresi daha uzun olmasından dolayı düşük seviyede de olsa bir jet oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 4.6.  $f_u=0.5$  Hz için anlık hız dağılımında duty cycle'in değişiminin etkisi

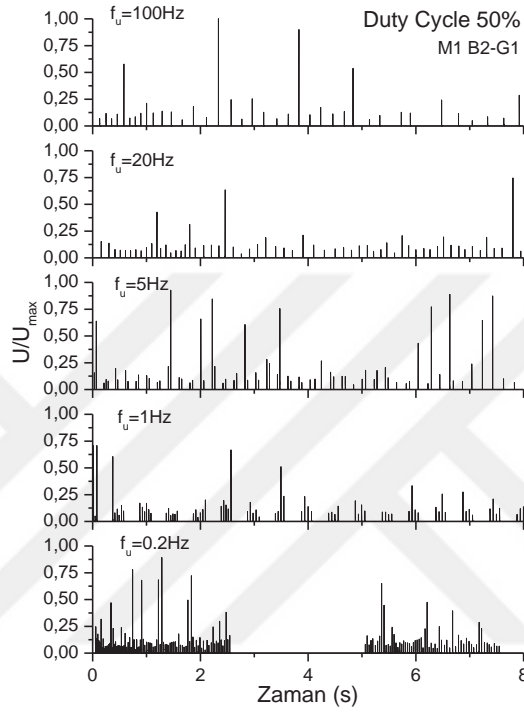


**Şekil 4.7.**  $f_u=1$  Hz (a) ve  $f_u=10$  Hz (b) için anlık normalize hız dağılımına duty cycle'in değişiminin etkisi



**Şekil 4.8.**  $f_u=20$  Hz (a) ve  $f_u=50$  Hz (b) için anlık normalize hız dağılımına duty cycle'in değişiminin etkisi

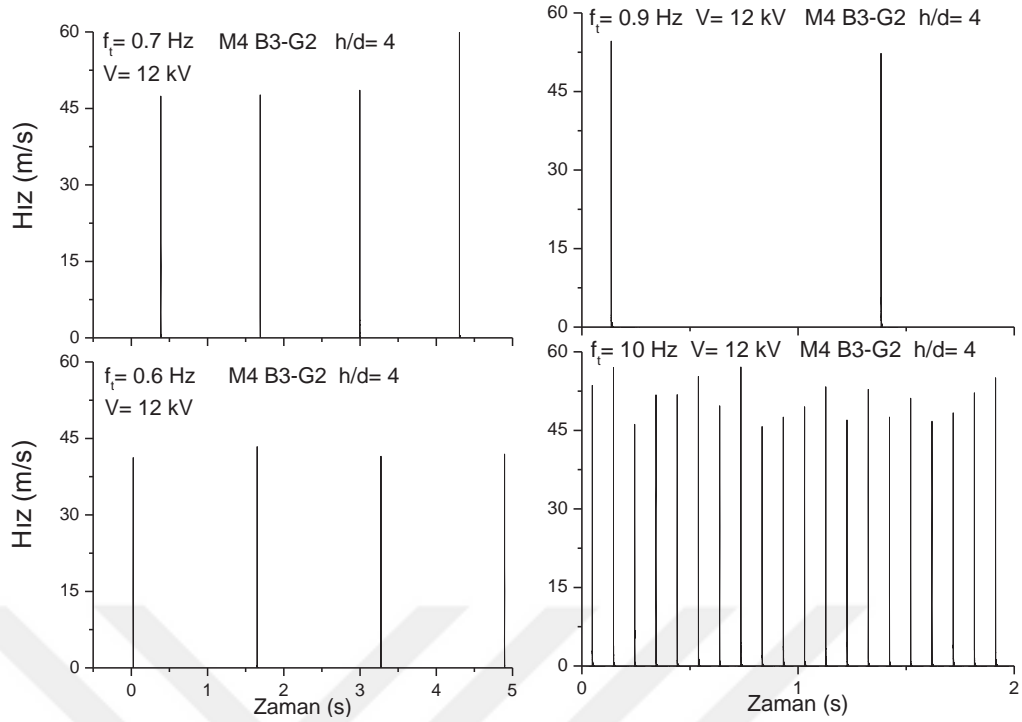
Şekil 4.9'da  $f_u = 0.2, 1, 5, 20$  ve  $100$  Hz değerlerinde duty cycle %50 için uyarım frekansının etkisi verilmiştir. Bu grafikler kendi içlerinde en büyük değere göre normalize edilmiştir. Normalize edilmiş anlık jet hızlarında frekansın etkisiyle önemli bir değişim görülmektedir. Fakat yüksek uyarım frekanslarında güç kaynağının karakteristiğinden dolayı uyarım frekansı artarak jetin tekrarlama frekansı azalmaktadır.



**Şekil 4.9.** Duty cycle %50'de anlık normalize hız dağılımı üzerine uyarım frekansının değişiminin etkisi

#### 4.1.5 Nanopuls güç kaynağı kızgın tel anemometresi hız ölçümü

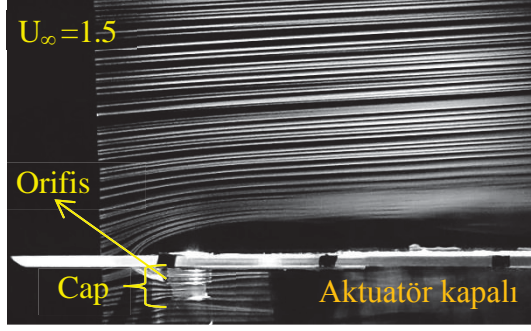
Şekil 4.10'da grafiklerin deneyleri Nanopuls güç kaynağı (G2), B3 (BUHW-2) ve başlık M4 ( $50 \text{ mm}^3$ ) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10'da  $f_t = 0.6$  ve  $0.7$  Hz tekrarlama frekansı ve  $12 \text{ kV}$  sürüm voltajı için kızgın tel anemometresi probu  $h/d = 4$  konumundayken  $5$  saniye boyunca veri toplanmıştır.  $f_t = 0.7 \text{ Hz}$ 'de BPSJ aktuatörün maksimum jet çıkış hızı  $60 \text{ m/s}$  olarak elde edilmiştir. Şekil 4.10'da  $f_t = 0.9$  ve  $10 \text{ Hz}$  tekrarlama frekansı ve  $12 \text{ kV}$  sürüm voltajı için kızgın tel anemometresi probu  $h/d = 4$  konumundayken  $2$  saniye boyunca veri toplanmıştır. Bu güç kaynağı G1 model güç kaynağına nazaran daha kararlı çalışmasına rağmen çok fazla elektrik alan oluşturmasından dolayı laboratuvar içerisindeki cihazlara zarar vermektedir. Bu sebeple bu güç kaynağıyla daha fazla deney yapılamamıştır.



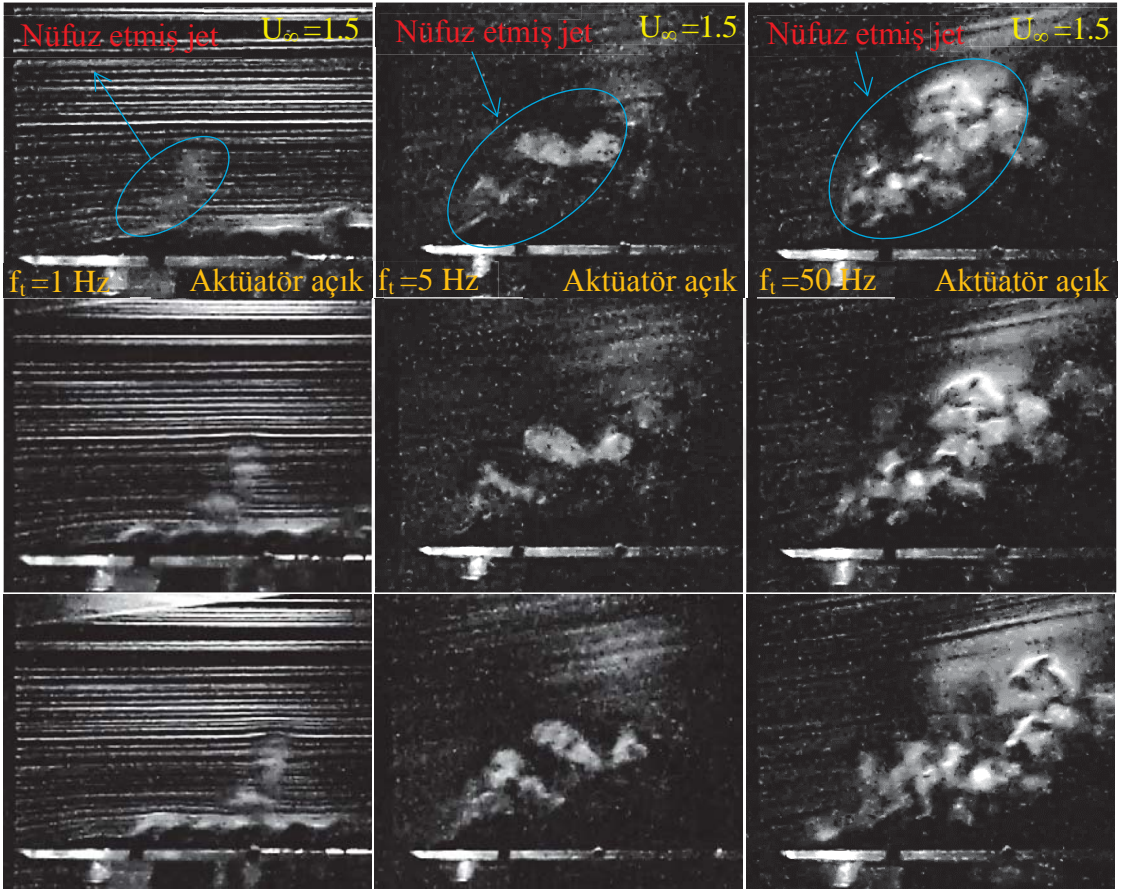
Şekil 4.10.  $f_t= 0.6, 0.7, 0.9$  ve  $10$  Hz’de hız ölçümü

#### 4.1.6 BPSJ aktüatörlü düz plaka etrafında akış görüntülemesi

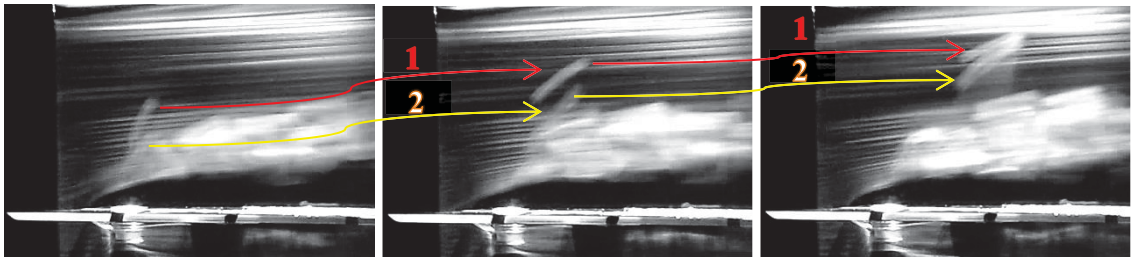
Düz plaka etrafında gelişen sınır tabakayı BPSJ aktüatörün nasıl etkileyebileceğini göstermek için rüzgâr tüneline duman tel yöntemiyle akış görüntülemesi gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tüneline deneyler,  $1,5$  m/s serbest akış hızında yapılmıştır. Fotoğraf 4.1’de aktüatör kapalı durumdayken düz plaka etrafındaki akış yapısı görülmektedir. Sınır tabaka, plaka üzerinde plakanın ön uçundan arka ucuna doğru giderek artan sınır tabaka kalınlığıyla birlikte oluşmuştur. Tekrarlama frekansı  $f_t=1, 5$  ve  $50$  Hz’de BPSJ aktüatör açık durumdayken düz plaka etrafında akış görüntülemesi Fotoğraf 4.2’de görülmektedir. Akış görüntüleme fotoğrafları videodan adım adım fotoğraf çıkartılarak elde edilmiştir. Bu yüzden aynı frekansta olan 3 er fotoğraf alt alta konulmuştur ve buradan akış tabakaları içerisine nüfus etmiş jetin zamanla ilerleyişi görülebilmektedir. Sınır tabaka bölgesinin bitişinden serbest akış bölgesine (inviscid region) kadar olan akış tabakalarına jetin nüfuz edebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca frekansın artmasıyla birim zamanda jet sayısının artmasından dolayı sınır tabaka daha fazla bozulmuştur. Fotoğraf 4.3’de sınır tabaka içerisine nüfuz etmiş çizgi şeklinde görülen iki jetin yan yana konulmuş 3 fotoğrafta zamanla gelişimi ve 2 numaralı jetin 1 numaralı jeti zaman içerisinde yakaladığı görülmektedir.



**Fotoğraf 4.1.** BPSJ aktüatör kapalıyken düz plaka etrafında sınır tabakanın gelişimi



**Fotoğraf 4.2.**  $f_t=1, 5$  ve  $50$  Hz'de BPSJ aktüatör açıkken düz plaka etrafında akış görüntülemesi



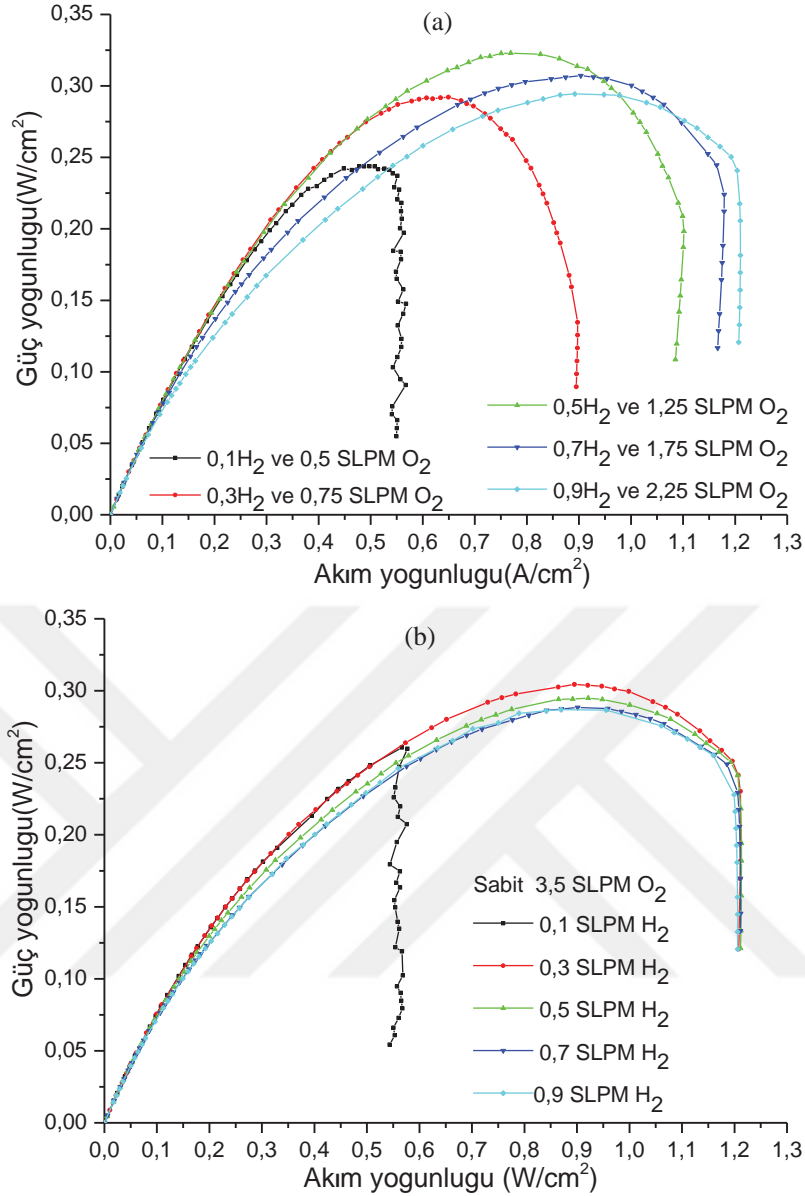
**Fotoğraf 4.3.** Sınır tabaka içerisine nüfuz etmiş jetin gelişimi

Sonuç olarak buji kullanılarak geliştirilen plazma sentetik jet aktüatörünün önemli bir akış etkisi oluşturabileceği ortaya konulmuştur. En iyi sonuçların elde edildiği aktüatör iç hacminin  $50.7 \text{ mm}^3$  olduğu M4 numaralı başlığın ve B2 numaralı bujinin PEM yakıt pili PSJ uygulamasında kullanılmasına karar verilmiştir.

#### 4.2 PEM Yakıt Pili Deneyi

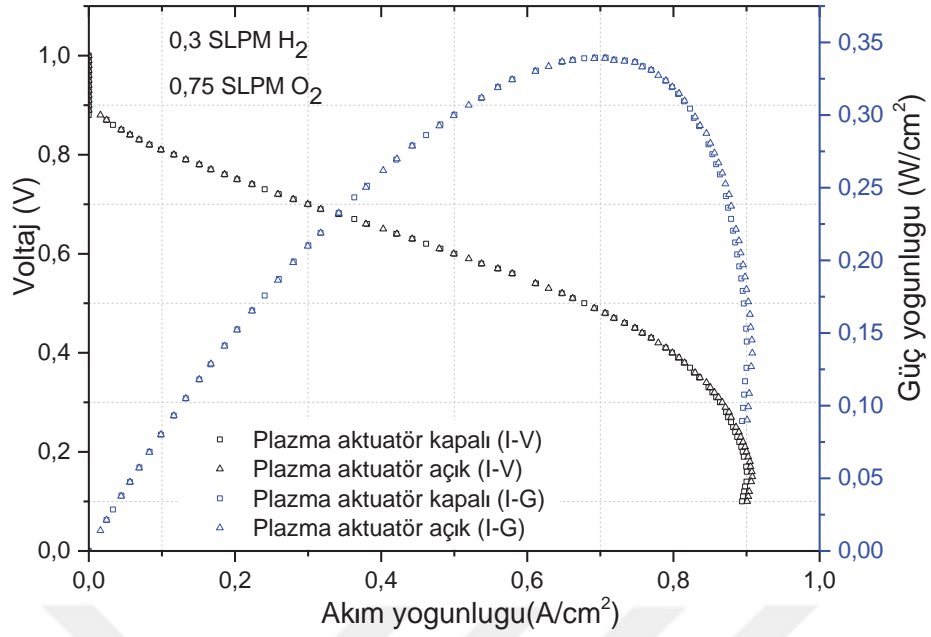
Buji plazma sentetik jet aktüatörü yakıt piline uygulamadan önce çalışma aralığını belirlemek için farklı hava ve oksijen debi değerlerinde ölçümler alınmıştır. Bu ölçümler Şekil 4.11 (a) ve (b)'de görülmektedir. Şekil 4.11 (a)'da görülen güç-akım yoğunluğu grafiğinde 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ve 0.9 SLPM (standard liter per minute)  $\text{H}_2$  debisi ve bu hidrojen debilerinin yaklaşık 2.5 katı hava debisi gönderilmiştir.

Deneylerde kullanılan yakıt pili, tek hücreli olup  $25 \text{ cm}^2$  aktif alana sahiptir. Çalışma sıcaklığı  $40^\circ\text{C}$  de sabit iken farklı debi değerlerinde yapılan ölçümler 3 kere tekrarlanmıştır. Şekil 4.11'de ki grafikler bu 3 ölçümün ortalamasına göre elde edilmiştir. Buradaki polarizasyon eğrileri arası bekleme süresi 20 dakikadır. Şekil 4.11 (a)'da ki grafik incelendiğinde 0.1 SLPM hidrojen/0.5 SLPM hava debilerinde yakıt ve oksidant yetersizliğinden kaynaklanan ani bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu grafikten görüleceği üzere en büyük güç değerine 0.5 SLPM hidrojen debisinde ulaşılmıştır. PSJ aktüatörün oluşturacağı salınımın daha fazla etki oluşturabilmesi için daha düşük debi değerleri de hedef çalışma bölgesine dahil edilmiştir. Şekil 4.11 (b)'de görülen güç-akım yoğunluğu grafiğinde 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ve 0.9 SLPM  $\text{H}_2$  debisinde ve sabit 3.5 SLPM  $\text{O}_2$  debisinde yakıt pili çalıştırılmıştır. Şekil 4.11 (b)'de ki grafik incelendiğinde 0.1 SLPM  $\text{H}_2$  debisinin Şekil 4.11 (a)'da olduğu gibi hidrojen debisinin yetersiz olduğundan dolayı güç yoğunluğu aniden düşmüştür. Maksimum güç yoğunluğu 0,3 SLPM oksijen debisinde elde edilmiştir. 0.5, 0.7 ve 0.9 SLPM  $\text{H}_2$  debisinde güç-akım yoğunluğu eğrileri neredeyse birbirine yakın olarak elde edilmiştir. Bu aktüatörün, düşük debilerde etkin olacağı düşünüldüğünden dolayı yakıt pilinin katot kısmında minimum debi seçilmeye çalışılmıştır. Bu deney sonuçlarına göre, yakıt pilinin 0.3 SLPM hidrojen/0.75 SLPM hava debi değerleri BPSJ aktüatörün uygulanması için seçilmiştir. Şekil 4.12'de 0.3 SLPM hidrojen/0.75 SLPM hava debilerinde çalışma sıcaklığı  $40^\circ\text{C}$  de sabit iken plazma aktüatör açık/kapalı durumdayken voltaj-akım ve güç-akım eğrileri görülmektedir.



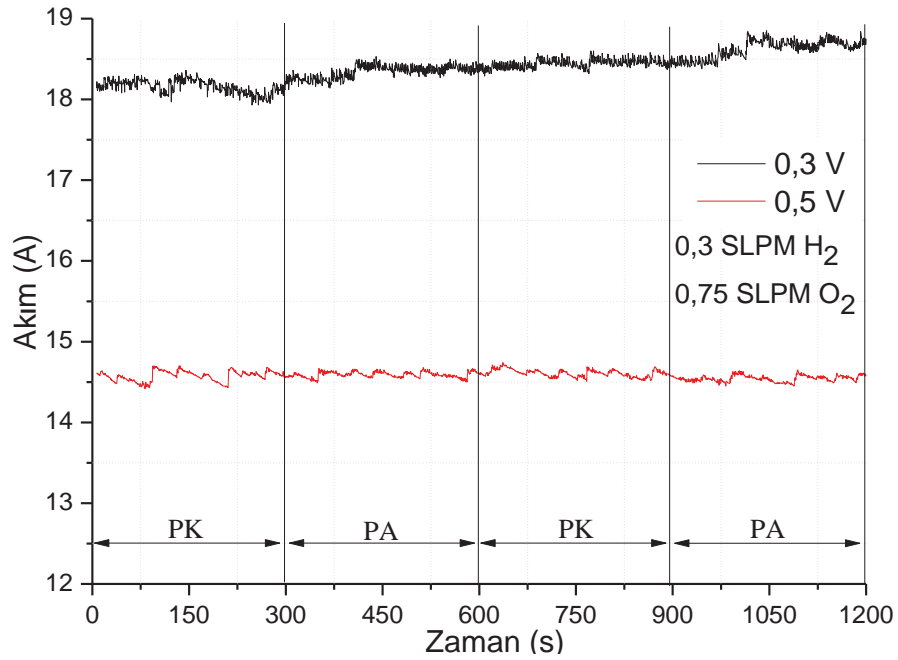
**Şekil 4.11.** PEM yakıt pili farklı oksijen ve hava debileri (a) ve sabit 3.5 hava debisi ve farklı hidrojen debileri (b) için güç-akım eğrileri

Burada aktuatör Fotoğraf 3.8’de görülen kanal içerisine yerleştirilmiş olup aktuatörün açık/kapalı durumları için yapılan ölçümler 2 kere tekrarlanmıştır. Şekil 4.12’de ki grafikler bu 2 ölçümün ortalamasına göre elde edilmiştir. PSJ aktuatörün yakıt piline uygulandığı ölçümlerde aktuatör M1 başlık, B2 model buji ve G1 model transformatör kullanılmıştır. PSJ açıkken yüksek voltaj sinyali 0.1Hz sürüm frekansında %50 duty cycle aralığında ölçümler alınmıştır. Bu grafiğe göre, 0.4 V’dan düşük voltaj değerlerindeyken yakıt pilinin akım ve güç yoğunluklarında çok az bir miktar artış vardır. Burada küçük bir artış olmakla birlikte deneysel belirsizlik sınırları içerisinde kaldığından PSJ’nin etkisinden tam olarak söz edilememektedir.



Şekil 4.12. Voltaj-akım ve güç-akım eğrileri

Şekil 4.13’de 0,3 SLPM hidrojen ve 0,75 SLPM hava debisinde sabit 0,3V ve 0,5 V yük durumlarında elde edilen akımın zamanla değişimi görülmektedir. Burada PSJ aktuatörün sırasıyla 300 saniyelik zaman dilimleri boyunca açık ve kapalı olması durumlarında sabit 0,5V’luk gerilim yüklenmesinde yakıt pilinden çekilen akım zamanla değişmediği görülmüştür.



Şekil 4.13. Sabit voltajda akım-zaman grafiği

Buna karşın, 0.3 V 'luk gerilim uygulamasında PSJ aktüatörün açık olduğu zaman dilimlerinde bir miktar akım artışı sergilenmiştir. Ancak burada da bir miktar artış olmakla birlikte deneysel belirsizlik sınırları içerisinde kaldığından PSJ'nin etkisinden tam olarak söz edilememektedir.



## BÖLÜM V

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, PEM yakıt pili performansı üzerine geliştirilmiş olan BPSJ aktüatörün etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İlk olarak geliştirilmiş olan BPSJ aktüatörün performansına etki eden frekans, voltaj, duty cycle gibi elektriksel ve boşluk hacmi, orifis çapı gibi geometrik parametrelerin etkisi kızgın tel anemometresi yardımıyla incelenmiş ve aktüatörün en iyi çalışma aralıkları belirlenmiştir. Ayrıca, aktüatörün düz plaka etrafındaki akışa etkisini görselleştirebilmek için rüzgar tüneline duman tel akış görüntüleme yöntemiyle deneyler yapılmıştır. Daha sonra tasarlanmış olan PEM yakıt pili ürettirilmiş ve performansı üzerine üretilmiş olan farklı bağlantı aparatları ve farklı katot akış kanalları yardımıyla BPSJ aktüatörün etkisi incelenmiştir.

Kızgın tel anemometresiyle durgun havada BPSJ aktüatör için yapılan deneylerden,  $h/d=8$ 'e kadar jetin gücünü önemli derecede kaybetmesinden dolayı  $h/d=4$ 'de aktüatörden maksimum anlık hız elde edilmiştir. Aynı orifis çaplarına sahip başlıkların boşluk hacimlerinin artmasıyla orantılı olarak jet çıkış hızının düştüğü görülmüştür. Farklı buji modelleri için aynı başlık kullanılarak yapılan deneylerde en iyi performansı BUHW model bujinin sağladığı gözlenmiştir. En iyi performans en düşük boşluk hacmine ve orifis çapına sahip olan M4 tipi başlıktan alınmıştır. Boşluk hacminin, buji tipinin ve orifis çapının en uygun modellerinin kullanılması durumunda sentetik jet hızının 120 m/s'nin üzerinde elde edilebileceği görülmüştür. Deney sonuçları, geometrik parametrelerin yanı sıra plazmanın oluşturulmasında kullanılan elektrik sinyalinin duty cycle ve uyarım frekansının jet kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Düz levha üzerindeki akış görüntülemesi, aktüatörün jet çıkış hızının düz plaka etrafında gelişen sınır tabakaya nüfuz etmek için yeterince güçlü olduğunu göstermektedir.

PEM yakıt pili hücrelerinin aktivasyonu ve akım voltaj eğrileri elektronik yük cihazı kullanılarak elde edilmiştir. 0.3 SLPM hidrojen/0.75 SLPM hava debilerinde BPSJ aktüatörün açık ve kapalı durumunun karşılaştırılmasında elde edilen sonuçlara göre, düşük voltajlar da yakıt pilinin akım ve güç yoğunluklarında bir miktar artış vardır.

Fakat bu artış çok küçük olmakla birlikte deneysel belirsizlik sınırları içerisinde kaldığından PSJ'nin etkisi tam olarak ortaya konulamamıştır.

Bu çalışmada literatüre uygun olarak PSJ aktüatörü geliştirilmiş ve yüksek hızlarda sentetik jet üretimi sağlanmıştır. Bu aktüatörlerin PEM yakıt pilinde salınım oluşturmak üzere kullanılması amacıyla (pleksiglas'tan yapılan y tipi) kanal üzerinden uygulaması yapılmıştır. Ancak çok sınırlı bir etkinin olduğu görülmüştür. Burada her ne kadar yüksek jet hızı elde edilebilse de katot akış kanalındaki debiye oranla aktüatör boşluk hacminin çok küçük olması nedeniyle yeterli momentum aktarımı sağlanamamıştır. Bunda plazmanın uygulandığı bölgenin mono-polar plaka üzerindeki akış kanallarına olan mesafenin büyüklüğü de etkili bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun için aktüatörün doğrudan yakıt pili akış kanalı girişine bağlandığı bir çalışmada yapılmıştır. Ancak daha öncede bahsedildiği üzere aktüatörün oluşturduğu elektrik alan sağlıklı ölçüm alınmasına engel olmakta ve elektronik yük cihazının kitlenmesine neden olmaktadır. Daha etkili kontrol sağlanabilmesi için elektrik alan probleminin uygun malzeme kullanılarak ve yalıtım yapılarak aşılması gerekmektedir. Elektrik alan probleminin çözülmesi durumunda daha etkili jet oluşturmak üzere nanopuls yüksek voltaj jeneratörünün kullanılması da uygun olacaktır.

## KAYNAKLAR

Akansu, Y.E., Karakaya, F. and Şanlısoy, A., “Active Control of Flow around NACA 0015 Airfoil by Using DBD Plasma Actuator”, *EPJ Web of Conferences* 45, 1008, 2013.

Belinger, A., Hardy, P., Gherardi, N., Naude, N., Cambronne, J. P. and Caruana, D., “Influence of the spark discharge size on a plasma synthetic jet actuator”, *IEEE Transactions on Plasma Science* 39(11), 2334–2335, 2011a.

Belinger, A., Hardy, P., Barricau, P., Cambronne, J.P. and Caruana, D., “Influence of the energy dissipation rate in the discharge of a plasma synthetic jet actuator”, *Journal of Physics D: Applied Physics* 44(36), 365201, 2011b.

Belinger, A., Naudé, N., Cambronne, J.P. and Caruana, D., “Plasma synthetic jet actuator: electrical and optical analysis of the discharge”, *Journal of Physics D: Applied Physics* 47, 345202, 2014.

Cappelli, M. A., and Kim, W., “Plasma Activated Fuel Cells”, [http://gcep.stanford.edu/pdfs/i6W09tDtK-48PTmzHazOuw/4.2.Cappelli\\_07.pdf](http://gcep.stanford.edu/pdfs/i6W09tDtK-48PTmzHazOuw/4.2.Cappelli_07.pdf), (Erişim tarihi: 14.12.2015)

Caruana, D., Barricau, P. and Hardy, P., “The “Plasma Synthetic Jet” Actuator . Aero-thermodynamic Characterization and first Flow Control Applications”, *47<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, Florida, USA, 1307, 5 - 8 January, 2009.

Caruana, D., Rogier, F., Dufour, G. and Gleyzes, C., “The Plasma Synthetic Jet Actuator, Physics, Modeling and Flow Control Application on Separation”, *AerospaceLab* 6, 1–13, 2013.

Choi, J., Lee, E.S., Jang, J.H., Seo, Y.H. and Kim, B., “Development of synthetic jet air

blower for air-breathing PEM fuel cell”, *World Acad Sci Eng Technol*, 56, 31–35, 2009.

Crittenden, T.M. and Glezer, A., “A high-speed, compressible synthetic jet”, *Physics of Fluids* 18(1), 17107, 2006.

Coleman, H.W. and Steele, W.G., Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers, *John Wiley & Sons*, New Jersey, 2009.

Cybyk, B.Z., Grossman, K.R., Wilkerson, J.T., Chen, J. and Katz, J., “Single-Pulse Performance of the SparkJet Flow Control Actuator” *43<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, USA, 401, 10–13 January, 2005.

Cybyk, B.Z., Simon, D.H., Chen, J. and Katz, J., “Experimental Characterization of a Supersonic Flow Control Actuator”, *44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, USA, 478, 9–12 January, 2006.

Çelik, S., Doğrudan metanollu yakıt pilinde iki fazlı akışın nümerik incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2009

Feng, L.H., Jukes, T.N., Choi, K.S. and Wang, J.J., “Flow control over a NACA 0012 airfoil using dielectric-barrier-discharge plasma actuator with a Gurney flap”, *Experiments in fluids* 52(6), 1533–1546, 2012.

Gad-el-Hak, M., The MEMS handbook, *CRC Press*, Florida, 2006.

Gilarranz, J.L., Traub, L.W. and Rediniotis, O.K., “A new class of synthetic jet actuators—part I: design, fabrication and bench top characterization”. *Journal of fluids engineering* 127(2), 367–376, 2005a.

Gilarranz, J.L., Traub, L.W. and Rediniotis, O.K., “A new class of synthetic jet actuators—part II: application to flow separation control”, *Journal of fluids engineering* 127(2), 377–387, 2005b.

Glezer, A. and Amitay, M., “Synthetic jets”, *Annual Review of Fluid Mechanics* 34(1), 503–529, 2002.

Grossman, K.R., Cybyk, B.Z. and VanWie, D.M., “Sparkjet actuators for flow control” *41<sup>st</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, USA, 9–12 January, 2003.

Haack, S.J., Taylor, T.M., Cybyk, B.Z., Foster, C.H. and Alvi, F.S., “Experimental Estimation of SparkJet Efficiency”, *42<sup>nd</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, Honolulu, Hawaii, 3997, 27-30 June, 2011.

Han, H. S., Kim, Y. H., Kim, S. Y. and Hyun, J.M., “Effect of flow pulsation on mass transport in a cathode channel of polymer electrolyte membrane fuel cell”, *Journal of Power Sources* 213, 145–155, 2012.

Hardy, P., Barricau, P., Belinger, A., Caruana, D., Cambronne, J.P. and Gleyzes, C., “Plasma synthetic jet for flow control”, *40<sup>th</sup> Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, Chicago, Illinois, 5103, 28 June–11 July, 2010.

Hsu, S.S., Travnicek, Z., Chou, C.C., Chen, C.C. and Wang, A.B. “Comparison of double-acting and single-acting synthetic jets”, *Sensors and Actuators A: Physical* 203, 291–299, 2013.

Hwang, Y.S., Lee, D.Y., Choi, J.W., Kim, S.Y., Cho, S.H., Joonho, P. and Cha, S.W., “Enhanced diffusion in polymer electrolyte membrane fuel cells using oscillating flow”, *International Journal of Hydrogen Energy* 35(8), 3676–3683, 2010.

Jin, D., Cui, W., Li, Y., Li, F., Jia, M., Sun, Q. and Zhang, B., “Characteristics of pulsed plasma synthetic jet and its control effect on supersonic flow”. *Chinese Journal of Aeronautics* 28(1), 66–76, 2015.

Jordan, T., Ounaies, Z., Tripp, J. and Tcheng, P., “Electrical properties and power considerations of a piezoelectric actuator”, *MRS Proceedings* 604, 203, 1999.

Kim, Y.H., Han, H.S., Kim, S.Y. and Rhee, G.H., “Influence of cathode flow pulsation on performance of proton-exchange membrane fuel cell”, *Journal of Power Sources* 185(1), 112–117, 2008.

Ko, H.S., Haack, S.J., Land, H.B., Cybyk, B., Katz, J. and Kim, H.J., “Analysis of flow distribution from high-speed flow actuator using particle image velocimetry and digital speckle tomography”, *Flow Measurement and Instrumentation* 21(4), 443–453, 2010.

Laurendeau, F., Léon, O., Chedevergne, F. and Casalis, G., “PIV and Electric Characterization of a Plasma Synthetic Jet Actuator”, *45<sup>th</sup> AIAA Fluid Dynamics Conference*, Dallas, 2465, 22-26 June, 2015.

Litster, S. and G. McLean. "PEM fuel cell electrodes.", *Journal of Power Sources* 130(1), 61-76, 2004.

Mallinson, S.G., Reizes, J.A., Hong, G. and Westbury, P.S., “Analysis of hot-wire anemometry data obtained in a synthetic jet flow”, *Experimental thermal and fluid science* 28(4), 265–272, 2004.

Mane, P., Mossi, K. and Bryant, R., “Synthetic jets with piezoelectric diaphragms”, *Proc. SPIE* 5761, 233–243, 2005.

Mench, M.M., Fuel cell engines, *John Wiley & Sons*, New Jersey, 2008.

Min, J., Di, J., Wei, C., Huimin, S. and Yun, W., “Study on the spark discharge plasma jet driven by nanosecond pulses”, *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Shenzhen, China, pp. 987–991, 20-23 October, 2013.

Narayanaswamy, V., Clemens, N.T. and Raja, L.L., “Method for acquiring pressure measurements in presence of plasma-induced interference for supersonic flow control applications”, *Measurement Science and Technology* 22, 125107, 2011.

Narayanaswamy, V., Raja, L.L. and Clemens, N.T., “Characterization of a High-

Frequency Pulsed-Plasma Jet Actuator for Supersonic Flow Control”, *AIAA Journal* 48(2), 297–305, 2010.

Popkin, S.H., Taylor, T.M. and Cybyk, B.Z., “Development and application of the Sparkjet actuator for high-speed flow control”, *Johns Hopkins APL Technical Digest* 32(1), 404–418, 2013.

Qi, Z. and Kaufman, A., “Activation of low temperature PEM fuel cells”, *Journal of Power Sources* 111(1), 181–184, 2002a.

Qi, Z. and Kaufman, A., “Enhancement of PEM fuel cell performance by steaming or boiling the electrode”, *Journal of power sources* 109(1), 227–229, 2002b.

Roth, J.R., *Industrial Plasma Engineering Volume 1 Principles*, *Institute of Physics publishing*, London, 1995.

Roth, J.R., “Aerodynamic flow acceleration using paraelectric and peristaltic electrohydrodynamic effects of a one atmosphere uniform glow discharge plasma”, *Physics of Plasmas* 10(5), 2117–2126, 2003.

Rylatt, D.I. and O’Donovan, T.S., “Heat transfer enhancement to a confined impinging synthetic air jet”, *Applied Thermal Engineering* 51(1), 468–475, 2013.

Samimy, M., Kim, J.H., Kastner, J., Adamovich, I. and Utkin, Y., “Active control of high-speed and high-Reynolds-number jets using plasma actuators”, *Journal of Fluid Mechanics* 578, 305–330, 2007.

Santhanakrishnan, A., Jacob, J.D. and Yildirim B.S., “Flow Control Using Plasma Actuators and Linear/Annular Plasma Synthetic Jet Actuators”, *3<sup>rd</sup> AIAA Flow Control Conference* 3033, 5-8 June, 2006.

Santhanakrishnan, A. and Jacob, J., “Formation and Scaling of Plasma Synthetic Jet Actuators”, *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* 783, 8–11 January, 2007a.

Santhanakrishnan, A. and Jacob, J.D., “Effect of Plasma Morphology on Flow Control Using Plasma Synthetic Jet Actuators”, *45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* 783, 8–11 January, 2007b.

Seo, Y.H., Kim, H.J., Jang, W.K. and Kim, B.H., “Development of active breathing micro PEM fuel cell”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 1(2), 101–106, 2014.

Shin, J., “Characteristics of high speed electro-thermal jet activated by pulsed DC discharge”, *Chinese Journal of Aeronautics* 23(5), 518–522, 2010.

Şanlısoy, A., Plazma aktüatörün NACA2415 model uçak kanadı etrafındaki akış kontrolü üzerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s. 26, 2013.

Trávníček, Z., Vít, T. and Tesař, V., “Hybrid synthetic jets as the nonzero-net-mass-flux synthetic jets”, *Physics of Fluids* 18(8), 81701, 2006.

URL-1, “Comparison of Fuel Cell Technologies”, U.S. Department of Energy, <http://energy.gov/eere/fuelcells/downloads/comparison-fuel-cell-technologies>, (Erişim tarihi: 01.12.2015).

URL-2, <http://www.ozonesolutions.com/info/osha-and-ozone>, (Erişim tarihi: 01.12.2015).

URL-3, “MEA Activation Procedures”, <http://fuelcellsetc.com/2013/04/membrane-electrode-assembly-mea-activation-procedures/>, (Erişim tarihi: 01.12.2015)

Wang, L., Xia, Z., Luo, Z. and Zhang, Y., “Effect of pressure on the performance of plasma synthetic jet actuator”, *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 57(12), 2309–2315, 2014.

Wang, Y., Chen, K.S., Mishler, J., Cho, S. C. and Adroher, X.C., “A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental

research”, *Applied Energy* 88(4), 981–1007, 2011.

Zalbowitz, M. and Thomas, S., Fuel cells: green power. *USA Department of Energy*, New Mexico, 1999.

Zhang, J., PEM fuel cell electrocatalysts and catalyst layers: fundamentals and applications, *Springer Science & Business Media*, Vancouver, 2008.

Zong, H., Cui, W., Wu, Y., Zhang, Z., Liang, H., Jia, M. and Li, Y., “Influence of capacitor energy on performance of a three-electrode plasma synthetic jet actuator”, *Sensors and Actuators A: Physical* 222, 114–121. 2015a.

Zong, H., Wu, Y., Li, Y., Song, H., Zhang, Z. and Jia, M., “Analytic model and frequency characteristics of plasma synthetic jet actuator”, *Physics of Fluids* 27(2), 027105, 2015b.

## EKLER

### Ek-A Belirsizlik Analizi

Coleman ve Steele (2009)'in yayınlanan kitaplarının üçüncü versiyonunda Taylor serisi metodu kullanılarak türetilen belirsizlik analiz yöntemi yardımıyla bu tez çalışmasında ölçmüş ve hesaplanmış değerler belirsizlik değerleri hesaplanmıştır.

$$r = r(X_1, X_2, \dots, X_j) \quad (\text{E.1})$$

Denklem (E.1) Taylor serisi açılımı kullanılarak denklem (E.2)'de formu elde edilmiştir.

$$\frac{u_r^2}{r^2} = \left( \left( \frac{X_1}{r} \right) \left( \frac{\partial r}{\partial X_1} \right) \right)^2 \left( \frac{u_{x1}}{X_1} \right)^2 + \left( \left( \frac{X_2}{r} \right) \left( \frac{\partial r}{\partial X_2} \right) \right)^2 \left( \frac{u_{x2}}{X_2} \right)^2 + \dots + \left( \left( \frac{X_j}{r} \right) \left( \frac{\partial r}{\partial X_j} \right) \right)^2 \left( \frac{u_{xj}}{X_j} \right)^2 \quad (\text{E.2})$$

Denklem (E.3), denklem (E.1 ve 2) kullanılarak elde edilmiştir.

$$r = kX_1^a X_2^b X_3^c \dots \quad (\text{E.3})$$

Belirsizlik hesaplamada kullanılacak formülün ifadesi denklem (E.4)'de ifade edilmiştir. Burada  $u_r$  toplam belirsizliği ifade etmektedir.

$$\left( \frac{u_r}{r} \right)^2 = a^2 \left( \frac{u_{x1}}{X_1} \right)^2 + b^2 \left( \frac{u_{x2}}{X_2} \right)^2 + c^2 \left( \frac{u_{x3}}{X_3} \right)^2 + \dots \quad (\text{E.4})$$

$$u_r = \left[ a^2 \left( \frac{u_{x1}}{X_1} \right)^2 + b^2 \left( \frac{u_{x2}}{X_2} \right)^2 + c^2 \left( \frac{u_{x3}}{X_3} \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (\text{E.4a})$$

Bu tez çalışmasında yakıt pili ve BPSJ aktüatör için yapılan deneyler için ayrı ayrı deneysel belirsizlik hesaplanacaktır.

#### Kızgın tel anemometresi ile hız ölçümünde oluşan belirsizlikler

Deneysel olarak basınç farkı, atmosfer basıncı, jet hız, sıcaklık vb. değerler ölçülmüştür. Kızgın tel anemometresinin hız ölçümüne etki eden her bir ölçüm belirsizliğinin toplam belirsizliğini hesaplamada denklem (E.4a) kullanılacaktır.

- 86 kPa atmosfer basıncının ölçümünde kullanılan micromanometre  $\pm 1$  kPa hata ile ölçüm yapabilmektedir. Bu durumda atmosfer basıncının belirsizliği %1.16 olarak hesaplanmıştır.

## Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

$$\left( u_{P_{atm}} = \frac{w_{P_{atm}}}{P_{atm}} \cong \frac{1}{86} = 0.01163 = \%1.16 \right)$$

- Sıcaklık ölçümünde kullanılan micromanometer sıcaklık probu 0.1°C hatayla ölçüm yapmaktadır. Bu durumda 26°C'deki sıcaklığın ölçümünde, sıcaklığa ait belirsizlik %0.38 olarak elde edilir.

$$\left( u_T = \frac{w_T}{T} \cong \frac{0,1}{26} = 0.00384 = \%0.38 \right)$$

- Kalibrasyon eğrisi oluşturmada oluşan maksimum belirsizlik %1,04 mertebesindedir.
- 16 bit'lik NI PCIe-7841R veri toplama kartı ±10 V aralığın da 3,97 mV hassasiyette ölçüm yapabilmektedir. Bu durumda 0-5 V aralığında, kartta ait belirsizlik %0,08 olarak hesaplanır.

$$\left( u_v = \frac{w_v}{V} \cong \frac{0,00397}{5} = 0.000794 = \%0.08 \right)$$

- Kalibrasyon işleminde kullanılan basınç ölçer 1 mbar hassasiyette ölçüm yapmaktadır. Bu durumda 7200 pascal basınçta (120 m/s hız değeri için), basınç ölçere ait belirsizlik %1.38'dir.

$$\left( u_P = \frac{w_P}{P} \cong \frac{1 \text{ mbar}}{72 \text{ mbar}} = 0.01388 = \%1.38 \right)$$

- Proben konumundaki 0.1 mm'lik hatadan kaynaklanan belirsizlik %8'dir.

$$\left( u_{Prob} = \frac{w_{Prob}}{Prob} \cong \frac{0,1}{1,25} = 0.08 = \%8 \right)$$

CTA ile hız ölçümünde belirsizliğe etki eden yukarıdaki faktörlerden başka bu çalışmaya özel olarak sentetik jetin plazma aktuatör ile üretilmesi nedeniyle jet sıcaklığı zamanın fonksiyonu olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bu çalışmada sıcaklık değişimi mikro saniyeler boyutunda olduğu için ölçülemediği. Ancak jet sıcaklığının ortam sıcaklığının üzerine çıkması durumunda prob sıcaklığı ile arasındaki fark azalacağından dolayı ölçülen hız değerinin gerçekten daha düşük olacağı ön görülmektedir. Yani gerçek jet hız değerinin ölçülen değerden daha da yüksek olması beklenmektedir.

Bu belirsizlikler dikkate alınarak hız ölçümünde oluşan toplam belirsizlik;

## Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

$$u_{U_{CTA}} = \frac{w_{U_{CTA}}}{U_{CTA}} = \left[ \left( \frac{w_{P_{atm}}}{P_{atm}} \right)^2 + \left( \frac{w_T}{T} \right)^2 + \left( \frac{w_V}{V} \right)^2 + \left( \frac{w_P}{P} \right)^2 + \left( \frac{w_{Prob}}{Prob} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{U_{CTA}} = \frac{w_{U_{CTA}}}{U_{CTA}} = [(0.01163)^2 + (0.00384)^2 + (0.000794)^2 + (0.01388)^2 + (0.08)^2]^{1/2} \cong 0.0851 = \%8.851 \text{ olarak elde edilir.}$$

### Yakıt pili akım ve voltaj ölçümünde oluşan belirsizlikler

Yakıt pili deneyinde akım ve voltaj değerleri için kullanılan elektronik yük cihazı yardımıyla ölçülmüştür. Yakıt pili güç hesabına etki eden ölçüm belirsizliğinin toplam belirsizliğini hesaplamada denklem (E.4a) kullanılacaktır.  $G=V \times I$  denklemi yardımıyla yakıt pili gücü hesaplanabilmektedir.

- Yük cihazının voltaj belirsizliği  $\pm(\%0,05 + \%0,025 \text{ FS})$  şeklinde verilmiştir. Bu durumda 1 V okunan değer ve 120 V tam ölçek için voltaja ait belirsizlik %3 olarak elde edilir.

$$\left( w_V = \frac{1V \times 0,05}{100} + \frac{120V \times 0,025}{100} = 0.0305 \cong \%3 \right)$$

$$\left( u_V = \frac{w_V}{V} \cong \frac{0,03}{1} = 0.03 = \%3 \right)$$

- Yük cihazının akım belirsizliği  $\pm(\%0,2 + \%0,15 \text{ FS})$  şeklinde verilmiştir. Bu durumda 30 A okunan değer ve 240 A tam ölçek için akıma ait belirsizlik %1,4 olarak elde edilir.

$$\left( w_A = \frac{30 \text{ A} \times 0,2}{100} + \frac{240A \times 0,15}{100} = 0.42 \right)$$

$$\left( u_A = \frac{w_A}{A} \cong \frac{0,42}{30} = 0.014 = \%1,4 \right)$$

Buna göre toplam belirsizlik;

$$u_G = \frac{w_G}{U_G} = \left[ \left( \frac{u_V}{V} \right)^2 + \left( \frac{u_I}{I} \right)^2 \right]^{1/2} = [(0,03)^2 + (0,014)^2]^{1/2} = 0,0033 = \%3,3 \text{ olarak}$$

elde edilir.

## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet SEYHAN 14.02.1990 tarihinde Adana'da doğdu. İlk, orta ve Lise öğrenimini Adana'da tamamladı. 2008 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Haziran 2013'de mezun oldu. Aynı yıl Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2014 yılında Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde 213M179 nolu projede bursiyer olarak göreve başladı. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olmuştur ve halen bu göreve devam etmektedir.

## TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 2 adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu üretilen eserler aşağıda sunulmuştur.

Seyhan M., Akansu Y.E., Karakaya F. and Ay F., “Development of Novel Plasma Synthetic Jet Actuator Based on Spark-Plug”, *13<sup>th</sup> International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization*, Doha, KATAR, 15-18 November, 2015.

Seyhan M., Akansu Y.E., Karakaya F., Yesildag C. and Akbiyik H., “Effect of the Duty Cycle on the Spark-Plug Plasma Synthetic Jet Actuator”, *Experimental fluid mechanics*, Prague, Czech Republic, 17-20 November, 2015.