KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOĞRUDAN BORHİDRÜR YAKIT PİLİNDE AKIŞ KANALI GEOMETRİSİ VE YAKIT DEBİSİNİN BASINÇ DÜŞÜMÜNE ETKİSİ

GÖZDE MENTEŞE

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOĞRUDAN BORHİDRÜR YAKIT PİLİNDE AKIŞ KANALI GEOMETRİSİ VE YAKIT DEBİSİNİN BASINÇ DÜŞÜMÜNE ETKİSİ

GÖZDE MENTEŞE

Prof. Dr. Cenk ÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof. Dr. Halil İbrahim SARAÇ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üye. İsmet TIKIZ
Jüri Üyesi, Kırklareli Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, bilgisinden ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Çenk ÇELİK'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca çalışmalarıma katkıda bulunan, değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, deney düzeneğinin kurulması ve deneylerin yapımı aşamasında yardımlarını esirgemeyen Anıl Can TÜRKMEN'e teşekkür ederim.

Akış kanallarımı CNC'de işletebilmeme imkan sağlayan Güneş Plastik Kalıphane ekibine ve çalışmalarımı destekleyen GÜNEŞ ailesine teşekkür ederim.

Tezimin yazım aşamalarında düzenleme konusunda sıkıştığım anlarda desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Emre TAŞ'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen, mutluluğum ve geleceğim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmadan beni en iyi şekilde yetiştiren aileme, sonsuz sevgi ve saygılarımı sunar, en içten duygularla teşekkür ederim.

Ve son olarak en umutsuz olduğum anlarda bile yapabileceğime olan inancını hiç kaybetmeyen, bana her koşulda güvenip destek olan, en büyük motivasyon kaynağım canım nişanlım Dr. M. Mazlum MENTEŞ'e sonsuz teşekkür ederim.

Haziran – 2019 Gözde MENTEŞE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Yakıt Pillerinin Tarihi 3
1.2. Yakıt Pillerinin Çalışma Prensibi 4
1.3. Yakıt Pillerinin Çeşitleri 5
1.4. Yakıt Pillerinin Avantajları ve Dezavantajları 8
1.5. Yakıt Pili Kullanım Alanları 9
1.5.1. Uzay çalışmaları/askeri uygulamalar 10
1.5.2. Evsel uygulamalar 10
1.5.3. Taşınabilir güç kaynağı uygulamaları 10
1.5.4. Atık/atık su uygulamaları 10
1.5.5. Taşıt uygulamaları 10
1.6. Literatür İncelemesi 11
2. DOĞRUDAN SODYUM BORHİDRÜR YAKIT PİLLERİ 22
2.1. DSBHYP Membranları 23
3. BİPOLAR PLAKALAR 25
3.1. Bipolar Plakalar ve Mekanik Özellikleri 25
3.2. Bipolar Plaka Tasarımları 25
3.3. Bipolar Plakaların Hammaddeleri 28
3.3.1. Boşluksuz grafitler 29
3.3.2. Metallar 29
3.3.2.1. Kaplanmamış Metaller 29
3.3.2.2. Kaplanmış Metaller 30
3.3.3. Kompozit Plakalar 30
3.4. Bipolar Plaka Üretimi 31
3.4.1. Boşluksuz grafit bipolar plaka üretimi 31
3.4.2. Kaplanmış metalik bipolar plaka üretimi 31
3.4.3. Kompozit bipolar plaka üretimi 31
4. DENEYSEL ÇALIŞMA 32
4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler, Kimyasallar ve Cihazlar 32
4.1.1. Akış kanalı plaka malzemesi 32
4.1.2. Akış kanalı yakıtı 34

4.1.3. Sızdırmazlık contası 35
4.1.4. CNC tezgah 36
4.1.5. Peristaltik pompa 36
4.1.6. Basınç ölçüm ekipmanı 37
4.2. Akış Kanallarının Hazırlanması 37
4.3. Deney Düzeneği ve Deneyin Yapılışı 41
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 43
5.1. Paralel Akış Kanalı Basınç Düşümü Değerleri 43
5.2. Serpantin Akış Kanalı Basınç Düşümü Değerleri 50
5.3. Pin Akış Kanalı Basınç Düşümü Değerleri 57
5.4. Akış Alanı Oranlarına Göre Kanal Tiplerinin Basınç Düşümü Değerlerinin Karşılaştırılması 64
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 66
KAYNAKLAR 68
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 73
ÖZGEÇMİŞ 74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi 3
Şekil 1.2. Yakıt Hücresinin Çalışma Prensibi 5
Şekil 1.3. Yakıt pili yığını 5
Şekil 2.1. Doğrudan sodyum borhidrürlü yakıt pili 22
Şekil 2.2. KDM'lı DSBHYP'de gerçekleşen reaksiyonlar 23
Şekil 2.3. ADM'lı DSBHYP'de gerçekleşen reaksiyonlar 24
Şekil 4.1. Polikarbonat plaka 33
Şekil 4.2. Kırmızı gıda boyası ile renklendirilmiş su 35
Şekil 4.3. Silikon conta 35
Şekil 4.4. CNC tezgah 36
Şekil 4.5. Peristaltik pompa 36
Şekil 4.6. Basınç ölçüm ekipmanı 37
Şekil 4.7. Pin akış kanallarının 3 boyutlu CAD görünümü 38
Şekil 4.8. Paralel akış kanallarının 3 boyutlu CAD görünümü 38
Şekil 4.9. Serpantin akış kanallarının 3 boyutlu CAD görünümü 39
Şekil 4.10. Akış kanalı kapağı 40
Şekil 4.11. Akış kanalı montaj öncesi hali 40
Şekil 4.12. Akış kanalı montaj sonrası hali 41
Şekil 4.13. Deney düzeneğinin şematik gösterimi 41
Şekil 4.14. Basınç düşümü deney düzeneği 42
Şekil 5.1. Debi 3 ml/dk iken 1x1x1 paralel akış kanalı 43
Şekil 5.2. Debi 6 ml/dk iken 1x1x1 paralel akış kanalı 44
Şekil 5.3. Debi 9 ml/dk iken 1x1x1 paralel akış kanalı 44
Şekil 5.4. Debi 12 ml/dk iken 1x1x1 paralel akış kanalı 44
Şekil 5.5. Debi 15 ml/dk iken 1x1x1 paralel akış kanalı 45
Şekil 5.6. Debi 3 ml/dk iken 1x1,5x1 paralel akış kanalı 45
Şekil 5.7. Debi 6 ml/dk iken 1x1,5x1 paralel akış kanalı 46
Şekil 5.8. Debi 9 ml/dk iken 1x1,5x1 paralel akış kanalı 46
Şekil 5.9. Debi 12 ml/dk iken 1x1,5x1 paralel akış kanalı 46
Şekil 5.10. Debi 15 ml/dk iken 1x1,5x1 paralel akış kanalı 47
Şekil 5.11. Debi 3 ml/dk iken 1x2,5x1 paralel akış kanalı 47
Şekil 5.12. Debi 6 ml/dk iken 1x2,5x1 paralel akış kanalı 48
Şekil 5.13. Debi 9 ml/dk iken 1x2,5x1 paralel akış kanalı 48
Şekil 5.14. Debi 12 ml/dk iken 1x2,5x1 paralel akış kanalı 48
Şekil 5.15. Debi 15 ml/dk iken 1x2,5x1 paralel akış kanalı 49
Şekil 5.16. Değişen yakıt debisine bağlı paralel akış kanalları basınç düşümü grafiği 49
Şekil 5.17. Debi 3 ml/dk iken 2x1x1 serpantin akış kanalı 50
Şekil 5.18. Debi 6 ml/dk iken 2x1x1 serpantin akış kanalı 51
Şekil 5.19. Debi 9 ml/dk iken 2x1x1 serpantin akış kanalı 51

Şekil 5.20. Debi 12 ml/dk iken 2x1x1 serpantin akış kanalı 51
Şekil 5.21. Debi 15 ml/dk iken 2x1x1 serpantin akış kanalı 52
Şekil 5.22. Debi 3 ml/dk iken 3x1,5x1 serpantin akış kanalı 52
Şekil 5.23. Debi 6 ml/dk iken 3x1,5x1 serpantin akış kanalı 53
Şekil 5.24. Debi 9 ml/dk iken 3x1,5x1 serpantin akış kanalı 53
Şekil 5.25. Debi 12 ml/dk iken 3x1,5x1 serpantin akış kanalı 53
Şekil 5.26. Debi 15 ml/dk iken 3x1,5x1 serpantin akış kanalı 54
Şekil 5.27. Debi 3 ml/dk iken 3x1x1 serpantin akış kanalı 54
Şekil 5.28. Debi 6 ml/dk iken 3x1x1 serpantin akış kanalı 55
Şekil 5.29. Debi 9 ml/dk iken 3x1x1 serpantin akış kanalı 55
Şekil 5.30. Debi 12 ml/dk iken 3x1x1 serpantin akış kanalı 55
Şekil 5.31. Debi 15 ml/dk iken 3x1x1 serpantin akış kanalı 56
Şekil 5.32. Değişen yakıt debisine bağlı serpantin akış kanalları basınç düşümü grafiği 56
Şekil 5.33. Debi 3 ml/dk iken 2,5x1x1 pin akış kanalı 58
Şekil 5.34. Debi 6 ml/dk iken 2,5x1x1 pin akış kanalı 58
Şekil 5.35. Debi 9 ml/dk iken 2,5x1x1 pin akış kanalı 58
Şekil 5.36. Debi 12 ml/dk iken 2,5x1x1 pin akış kanalı 59
Şekil 5.37. Debi 15 ml/dk iken 2,5x1x1 pin akış kanalı 59
Şekil 5.38. Debi 3 ml/dk iken 2x2,5x1 pin akış kanalı 60
Şekil 5.39. Debi 6 ml/dk iken 2x2,5x1 pin akış kanalı 60
Şekil 5.40. Debi 9 ml/dk iken 2x2,5x1 pin akış kanalı 60
Şekil 5.41. Debi 12 ml/dk iken 2x2,5x1 pin akış kanalı 61
Şekil 5.42. Debi 15 ml/dk iken 2x2,5x1 pin akış kanalı 61
Şekil 5.43. Debi 3 ml/dk iken 3x3x1 pin akış kanalı 62
Şekil 5.44. Debi 6 ml/dk iken 3x3x1 pin akış kanalı 62
Şekil 5.45. Debi 9 ml/dk iken 3x3x1 pin akış kanalı 62
Şekil 5.46. Debi 12 ml/dk iken 3x3x1 pin akış kanalı 63
Şekil 5.47. Debi 15 ml/dk iken 3x3x1 pin akış kanalı 63
Şekil 5.48. Değişen yakıt debisine bağlı pin akış kanalları basınç düşümü grafiği 64
Şekil 5.49. Farklı kanal tiplerinin basınç düşümü değerleri 65

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri..... 6
Tablo 3.1. Farklı geometrilerdeki akış kanalları.....26
Tablo 4.1. Polikarbonatların genel özellikleri. 33
Tablo 4.2. Pin akış kanallarının geometrik boyutları.....38
Tablo 4.3. Paralel akış kanallarının geometrik boyutları 39
Tablo 4.4. Serpantin akış kanallarının geometrik boyutları.....39
Tablo 5.1. 1x1x1 paralel akış kanalı basınç düşümü sonuçları 43
Tablo 5.2. 1x1,5x1 paralel akış kanalı basınç düşümü sonuçları 45
Tablo 5.3. 1x2,5x1 paralel akış kanalı basınç düşümü sonuçları 47
Tablo 5.4. 2x1x1 serpantin akış kanalı basınç düşümü sonuçları 50
Tablo 5.5. 3x1,5x1 serpantin akış kanalı basınç düşümü sonuçları.....52
Tablo 5.6. 3x1x1 serpantin akış kanalı basınç düşümü sonuçları 54
Tablo 5.7. 2,5x1x1 pin akış kanalı basınç düşümü sonuçları.....57
Tablo 5.8. 2x2,5x1 pin akış kanalı basınç düşümü sonuçları.....59
Tablo 5.9. 3x3x1 pin akış kanalı basınç düşümü sonuçları.....61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	: Alternatif Akım
M	: Molar Kütle, (kg/mol)
V	: Volt
T_g	: Camsı Geçiş Sıcaklığı
μ	: Mikro

Kısaltmalar

ADM	: Anyon Değişim Membran
AYP	: Alkali Yakıt Pili
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayar Sayımlı Yönetim)
DMYP	: Doğrudan Metanol Yakıt Pili
DSBHYP	: Doğrudan Sodyum Borhidrürlü Yakıt Pili
EKYP	: Erimiş Karbonat Yakıt Pili
FAYP	: Fosforik Asit Yakıt Pili
GDL	: Gas Diffusion Layer (Gaz Difüzyon Tabakası)
KDM	: Katyon Değişim Membran
KOYP	: Katı Oksit Yakıt pili
LPG	: Liquified Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
MEG	: Membran Elektrot Grubu
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
PC	: Polycarbonate (Polikarbonat)
PEMYP	: Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili
pH	: Potential of Hydrogen (Hidrojen Potansiyeli)
Stak	: Yığın
UV	: UltraViolet (Mor ötesi)

DOĞRUDAN BORHİDRÜR YAKIT PİLİNDE AKIŞ KANALI GEOMETRİSİ VE YAKIT DEBİSİNİN BASINÇ DÜŞÜMÜNE ETKİSİ

ÖZET

Yakıt pillerinin ağırlık ve maliyet bakımından büyük bir kısmını kapsayan bipolar plakalar yakıt pilleri için önemli bir sitem elemanıdır. Bipolar plakaların akış alanı geometrilerinin seçimi ve optimizasyonu yakıt pili performansını doğrudan etkilemektedir. Akış kanallarında meydana gelen basınç düşüşü davranışının yakıt pili performansı üzerine önemli etkileri vardır.

Bu tez kapsamında doğrudan borhidrür yakıt pilinde kullanılmak üzere farklı geometrilerde akış kanalları oluşturulmuş ve oluşturulan her bir akış kanalına belirli debilerde deneyler yapılarak basınç düşüşü davranışı incelenmiştir. Bu amaçla 3 adet pin tip, 3 adet serpantin tip ve 3 adet paralel tip akış kanalı geometrisi SOLIDWORKS yazılımında oluşturulmuş, oluşturulan CAD datası CNC tezgahta 10cmx10cm bir polikarbonat plaka üzerine işlenmiştir. İşlenen akış kanallarının her biri basınç düşümü ölçümü için oluşturulan deney düzeneğinde belirli debiler (3ml/dk, 6ml/dk, 9ml/dk, 12ml/dk ve 15ml/dk) ile test edilmiştir. Deney sonuçlarından her 3 tip akış kanalı için de artan debi ile basınç düşümünün arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte paralel akış kanalında artan kanal arası mesafe ile basınç düşümünün arttığı görülmüştür. Serpantin akış kanalında kanal genişliğinin ve kanallar arası mesafenin azalması ile basınç düşümünün arttığı görülürken, kanal genişliğinin basınç düşümü üzerindeki etkisinin kanallar arası mesafeden daha belirgin olduğu görülmüştür. Pin akış kanallarında ise akış alanı oranı arttıkça basınç düşümünün azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Akış Kanalı, Basınç Düşümü, Doğrudan Borhidrürlü Yakıt Pili, Yakıt Pili.

THE EFFECT OF FLOW CHANNEL GEOMETRY AND FUEL FLOW ON THE PRESSURE DROP IN THE DIRECT BOROHYDRIDE FUEL CELL

ABSTRACT

Bipolar plates, which cover a large proportion of fuel cells in terms of weight and cost, are an important system element for fuel cells. The selection and optimization of flow field geometries of bipolar plates directly affects fuel cell performance. Pressure drop in flow channels has significant effects on fuel cell performance.

Within the scope of this thesis, flow channels of different geometries have been formed to be used directly in boron hydride fuel cell and pressure drop behavior has been investigated by performing experiments at each flow channel. For this purpose, 3 pin type, 3 serpentine type and 3 parallel type flow channel geometry have been created in Solidworks and CAD data has been processed on a 10cmx10cm polycarbonate plate on CNC machine. Each of the processed flow channels was tested with specific flow rates (3ml / min, 6ml / min, 9ml / min, 12ml / min and 15ml / min) in the experimental setup for pressure drop measurement. It was determined from the results of the experiment that the pressure drop increased with increasing flow rate for all 3 types of flow channels. However, it was seen that the pressure drop increased with increasing distance between channels in parallel flow channel. In the serpentine flow channel, it is seen that the pressure drop increases with decreasing channel width and distance between channels, and the effect of channel width on pressure drop is more pronounced than the distance between channels. In pin flow channels, it was seen that the pressure drop decreased as the flow area ratio increased.

Keywords: Flow Channel, Pressure Drop, Direct Borohydride Fuel Cell, Fuel Cell.

GİRİŞ

Son yıllarda hem büyük bir hızla gelişen ve ilerleyen sanayileşme hem de bireylerin yaşam kalitelerini artırma istekleri gibi nedenlerle enerji tüketimi önemli ölçüde artmıştır. Artan enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılan en önemli kaynaklar kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardır. Ancak bu yakıtların kullanımında başlıca iki sorunla karşılaşılır. Birincisi bu yakıtların yakın bir gelecekte tükenme olasılığı, diğeri ise büyük oranda fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan çevre kirliliğinin artmasıdır. Fosil yakıtların yanması sonucu karbondioksit (CO_2), azot (NO_X) ve kükürt (SO_X) emisyonları ciddi değerlere ulaşmıştır. Özellikle ilk petrol krizinden beri (1973) dünyada enerji perspektifi değişmiş ve birincil enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ile petrole bağımlılığın azaltılması hedeflenmiştir [1].

Günümüzde rezervleri azalan, çevreyi kirleten fosil enerji kaynaklarının yerine doğa ile dost, yenilenebilir kaynakların kullanımı gündeme gelmiştir. Bu kaynaklar sırasıyla; güneş, rüzgar, su gücü, biyokütle ve hidrojen enerji kaynaklarıdır. İçinde bulunduğumuz yıllarda özellikle hidrojen enerjisindeki araştırma ve geliştirmeler hız kazanmıştır. Hidrojen enerjisi, doğrudan yakıt olarak kullanıldığı gibi, yakıt pili olarak en verimli şekilde elektrik enerjisine dönüşümü sağlanarak kullanılır.

Kimyasal enerjinin yüksek verimle elektrik enerjisine doğrudan dönüştürülmesi şeklinde çekici elektrik üretim teknolojisini oluşturan yakıt pilleri onlarca kilowatt isteyen taşıtlardan, sadece birkaç watt gereksinme duyan diz üstü bilgisayarlar ve pilli telefonlar gibi taşınabilir ve hareketli aletlere kadar çeşitli uygulama aralıkları için geliştirilmektedir [2]. Geçtiğimiz yirmi yıl içerisinde yakıt pili teknolojilerinde kayda değer bir gelişme sağlanmasına rağmen, maliyet ve bir takım teknik zorluklardan dolayı yakıt pilleri henüz tamamen yaygınlaşamamıştır [3].

Yakıt hücreleri temel olarak Membran Elektrot Grubu (MEG), akış kanalları (bipolar plaka), akım toplama plakaları, sıkıştırma plakaları ve bunların bağlantı elemanlarından oluşmaktadırlar. Yakıt pillerinde Membran Elektrot Grubu (MEG) için gazların dağılımının sağlanmasında ve oluşan akımın ve suyun toplanmasında

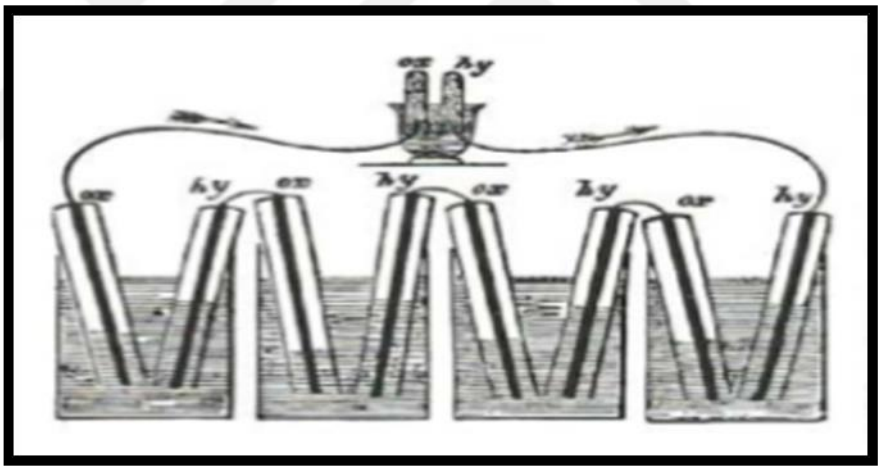
kullanılan bipolar plakalar MEG'den sonra en önemli sistem elamanıdır. Bipolar plakalar yakıt pili performansını doğrudan etkileyen, iyi bir stak performansı ve çalışma süresi için en önemli parçalardan birisidir [4]. Yakıt besleme sistemi için tüketilen pompalama gücündeki bir azalma, yakıt pili sisteminin verimliliğini arttırmaktadır. Bu nedenle, akış kanalındaki basınç düşüşü davranışının incelenmesi, bir yakıt pili sisteminin tasarımı ve optimizasyonu için gereklidir [5].

Bu yüksek lisans çalışması ile Doğrudan Borhidrür Yakıt Pilinde kullanılmak üzere farklı geometrilerde akış kanalları oluşturulmuş ve oluşturulan her bir akış kanalında belirli debilerde deneyler yapılarak basınç düşüşü davranışı incelenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Yakıt Pillerinin Tarihi

Yakıt pili teknolojisinin ilk kez Sir William Grove tarafından 1839 yılında keşfedildiği kabul edilir. Grove hücresi olarak bilinen ilk hücre çinko sülfat içerisine platin elektrot daldırılarak oluşturulmuştur. Grove, birisi sülfirik asit kabına diğeri ise oksijen ve hidrojen kabına daldırılan iki platin elektrodu düzenleyerek elektrotlar arasında sabit bir akım akacağını keşfetmiş ve yaptığı bu ilk deneyde 1,8 volt civarında 12 amperlik akım üretmiştir. Daha sonraki yıllarda Grove, kullandığı bu sistemdeki hücrelerden elli tanesini birleştirerek oluşturduğu yeni sistemde daha fazla elektrik akımı üretmiştir [6].



Şekil 1.1. Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi [6]

Yakıt pili terimi ise ilk kez 1889 yılında Ludwig Mond ve asistanı Charles Langer tarafından kullanılmıştır. Onların ilk denemeleri hava ve endüstriyel kömür gazı ile olmuştur. Bu çalışmada 1.5 watt güç üreten ve %50 çalışma verimine sahip bir yakıt pili geliştirilmiştir [6].

1932'de Francis T. Bacon ilk başarılı yakıt pilini geliştirmiştir. Bacon gözenekli metal elektrotlu alkali yakıt pili sistemleri üzerine çalışmaktaydı. Bu çalışmalar sonucunda Bacon, düşük korozif özelliğe sahip, alkalin elektrolit ile pahalı olmayan nikel elektrotlar kullanarak daha önce yapılan çalışmalardan daha yüksek çalışma

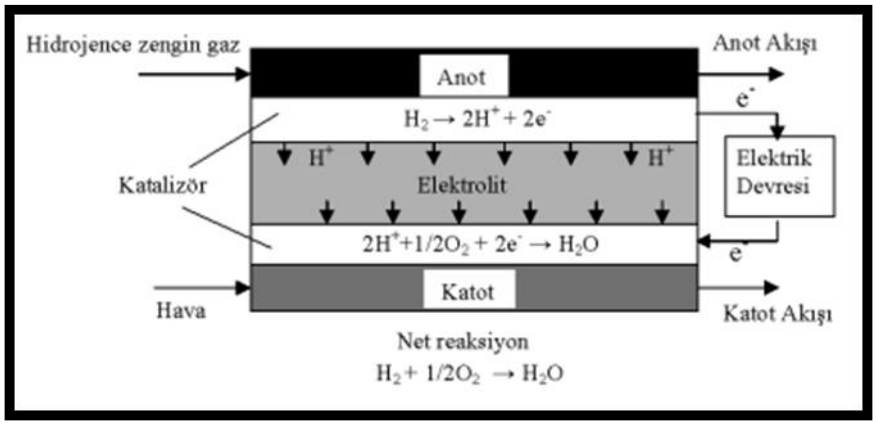
sıcaklıklarına çıktı. Bacon tarafından geliştirilen bu sistem 1968'de insanların Ay'a uçmasını sağlayan NASA yakıt pili sisteminin ilk prototipi olmuştur. Bacon ve arkadaşları 1952'de 5 kW'lık güç üreten bir yakıt hücresi yapmışlardır. Aynı yılın sonlarında Harry Karl Ihring 20 beygir gücünde bir yakıt hücresiyle çalışan bir traktör tasarlamıştır. Bu buluş günümüzdeki modern yakıt hücresiyle çalışan makinelerin başlangıcı olmuştur [6].

1960'lı yıllarda NASA yakıt pili teknolojisine oldukça ciddi yatırımlar yapmaya başlamıştır. NASA'nın yakıt pilleri ile ilgili projeleri desteklemesinin sebepleri; hafif olmaları, yüksek verimlilikleri, düşük gürültü ve titreşim özellikleri, yüksek enerji yoğunluğu ve yan ürün olarak su üretmesi sıralanabilir. Bu nedenle bugüne kadar, yakıt pillerini çeşitli yönleriyle inceleyen 200'den fazla araştırma NASA tarafından desteklenmiştir [6].

Günümüzde otel, hastane, üniversite gibi sabit uygulamalardan; otomobil, traktör, otobüs gibi taşıma sistemlerine ve hatta cep telefonu, dizüstü bilgisayar gibi mikro uygulamalara kadar çok geniş bir yelpazede yakıt pillerinin kullanıldığını görmekteyiz.

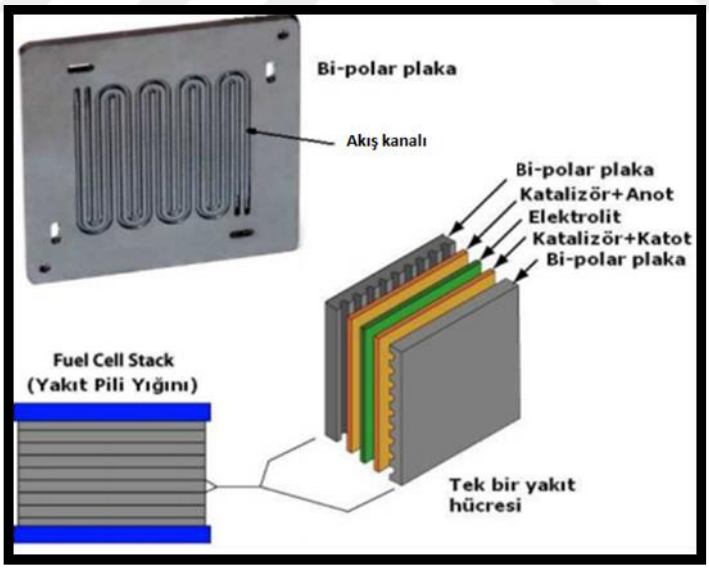
1.2. Yakıt Pillerinin Çalışma Prensibi

Yakıt pilleri, yakıtın kimyasal enerjisini yüksek verimle elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir yakıt pili temel olarak bir elektrolit ile elektrolitin her bir yüzeyi ile temas halinde bulunan anot ve katot elektrotlardan oluşmaktadır. Elektrotlar geçirgen ve gözenekli (poroz) yapıdadır. Şekil 1.2.'de gösterildiği gibi yakıt pilinin anot (negatif) elektrotuna yakıt, katot (pozitif) elektrotuna ise oksitleyici (hava ya da oksijen) gönderilir. Sistemde; anoda gönderilen yakıttan ayrılan elektronlar, bir dış devre üzerinden yoluna (katoda doğru) devam ederken, iyonlar (elektronları ayrılan yakıt) elektrolit üzerinden katoda doğru hareket eder ve burada anottan gelen elektronlar ve hava ile reaksiyona girer ve devre tamamlanır. Böylelikle dış devreden dolaştırılan elektronların bulunduğu akım kolunda elektrik akımı oluşur. Reaksiyon sonrası ısı, saf su ve karbon içerikli bir yakıt kullanılıyorsa ilave olarak da karbondioksit açığa çıkar [7].



Şekil 1.2. Yakıt Hücresinin Çalışma Prensibi [7]

Yakıt pillerinde her bir anot-elektrolit-katot grubuna "Membran Elektrot Grubu" (Membrane electrode assembly - MEA) denilir. Her bir yakıt hücresinde oluşan gerilim 1 voltun altında olduğundan çok sayıda hücre seri olarak bağlanarak yüksek gerilim seviyelerine ulaşılabilir. Bu hücrelerin arasına akış kanalı (bipolar plaka) denilen levhalar yerleştirilmekte ve elektrotlara gazın sağlanması ve hücrelerin elektriksel olarak bağlanmasını sağlanmaktadır. Sandviç şeklindeki bu hücre ve levha grubuna "Yakıt pili yığını" veya "stak" adı verilmektedir [8].



Şekil 1.3. Yakıt pili yığını [9]

1.3. Yakıt Pillerinin Çeşitleri

Yakıt pilleri temel olarak kullandıkları elektrolitlere göre sınıflandırılırlar. En yaygın kullanılan teknolojiler Tablo 1.1 de verilmiştir.

Tablo 1.1. Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri [6,10]

Yakıt Pili Tipi	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı (ºC)	Verim (%)	Pil Çıkış Gücü	Uygulamalar
Alkali Yakıt Pili (AYP)	Potasyum hidroksit	60-250	40-50	300W-5kW	Ulaşım, sabit
Proton değişim membranlı yakıt pili (PEMYP)	Katı polimer	30-100	40-50	50kW-250kW	Ulaşım, sabit, taşınabilir
Doğrudan metanol yakıt pili (DMYP)	Sülfirik asit veya polimer	30-120	30-40	100mW-1kW	Ulaşım, sabit, taşınabilir
Katı oksit yakıt pili (KOYP)	Kararlı hale gelmiş zirkon	600-1000	50-60	100kW	Sabit (kojenerasyon), ulaşım
Fosforik asit yakıt pili (FAYP)	Ortofosforik asit	160-220	40-45	200kW-11MW	Sabit (kojenerasyon)
Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP)	Lityum-potasyum karbonat	600-800	50-60	2MW-100MW	Sabit (kojenerasyon)

Alkali yakıt pilleri 1960'lardan beri uzay programlarında (Apollo ve uzay mekiği) kullanılmaktadır. Bu yakıt hücreleri, elektrolit olarak potasyum hidroksitin (KOH) sulu çözeltisini kullanırlar. Atmosferik basınçta, bu yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklığı 80 °C ile 90 °C arasındadır ve yığın verimliliği yaklaşık %50'dir. Bununla birlikte, belirli koşullar altında (basınçlı ortam ve yüksek konsantrasyonlu elektrolit), bu sıcaklık 250 °C'ye kadar yükselebilir. Alkali elektrolitlerde oksijen indirgeme kinetiği asit elektrolitlerden daha hızlıdır ve alkali yakıt hücreleri soy metal olmayan elektrokatalizörleri kullanabilme avantajına sahiptirler ve bu da üretim maliyetlerini düşürür. Bu yakıt hücresindeki temel sorun, alkali hücreleri çok saf hidrojen ihtiyaç duyarlar ve istenmeyen bir kimyasal reaksiyon hücre içindeki kimyasal reaksiyonları engelleyen katı bir karbonat oluşturmaktadır [11].

Proton değişim membranlı yakıt pili, 1950"li yıllarda General Electric tarafından bulunmuş, o yıllarda ilk defa NASA tarafından Gemini uzay aracında güç ünitesi olarak kullanılmıştır. Günümüzde PEMYP otomotiv sektöründe içten yanmalı motorlara alternatif olarak geliştirilmekte ve kullanılmaktadır [1]. PEMYP, elektrolit

olarak katı polimer, elektrot olarak ise platin katalizör tabakasıyla desteklenmiş gözenekli karbon elektrotlar kullanırlar. Diğer yakıt pillerine oranla yüksek güç yoğunluğu, düşük ağırlık ve hacime sahiptirler. PEMYP düşük sıcaklıklarda çalışırlar (~80°C). PEMYP otomotiv sektöründe kullanımını sağlayan önemli avantajları vardır. Bu avantajlar; küçük boyutta uygulanabilirlikleri, düşük sıcaklıklarda çalışmalarına rağmen bu sıcaklıklardan kolayca yüksek güç üretimine geçebilmeleridir. Bunların yanında, yüksek verimde çalışmaları, %40-50 seviyesinde maksimum teorik voltaj üretebilmeleri ve güç ihtiyacındaki değişikliklere hızlı cevap verebilmeleri de PEMYP' leri tercih edilir konuma getirmektedir. Bu teknolojinin geniş bir kullanım alanına sahip olabilmesi için, birkaç engelleyici özelliği üzerinde çalışmalar da sürmektedir. Bu özelliklerin başında katalizör ve membran malzemelerinin pahalılığından dolayı meydana gelen yüksek fiyat ve düşük sıcaklıklarda çalışmalarından dolayı karbon monoksit (CO) ve diğer safsızlıkların etkisiyle zehirleyici özelliği bulunan saf hidrojen kullanımını zorunlu kılmasıdır. Bu önemli iki problem üzerinde çalışmalar hızla devam etmektedir [12].

Doğrudan metanol yakıt pili, özellikleri ve çalışma prensipleri itibariyle proton değişim zarlı yakıt piline benzemektedir. Tek farklılık pilde yakıt olarak saf hidrojen değil de hidrojen elde edilebilen metanol kullanmasıdır. Bu tip yakıt pillerinde elektrolit olarak, proton değişim zarlı yakıt pilindeki polimer zar kullanılmaktadır. Yakıt olarak doğrudan metanol kullanılan bu tip pillerde hidrojen doğrudan sıvı metanolden elde edilmekte, böylece yakıt yakarak hidrojen elde etme ünitesine gerek kalmamaktadır. Sıvı yakıt kullanımına imkân sağlaması ve reformlama ünitesi olmadan çalışabilir olmaları önemli avantajlarıdır. Bu pillerin verimleri %40 civarındadır ve çalışma sıcaklıkları 30–120 °C arasındadır. Metanolün düşük sıcaklıkta karbondioksit ve hidrojene dönüşümü, PEMYP'den farklı olarak, daha yüksek miktarda platin katalizörüne ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Platin katalizörün miktarındaki artış, fiyatta artışa neden olmakta ve bu özellik DMYP için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Geliştirme aşamasında olan DMYP teknolojisi, gelecekte taşınabilir elektronik cihazlar için potansiyel bir güç kaynağı olarak görülmekte ve bu tip yakıt pilleri üzerindeki çalışmalar hızla devam etmektedir [10].

Katı oksit yakıt pilleri sıvı bir elektrolit yerine katı, gözeneksiz metal oksit (seramik elektrolit) kullanmaktadır. Çalışma sıcaklıkları 600-1000 ºC arasındadır. En yaygın

uygulamaları, sabit enerji santrallerinde bulunmaktadır. Çalışma verimleri %60'lara kadar ulaşabilmektedir. Sistemden atılan ısının yakalanıp iyileştirilmenin tasarlandığı uygulamalarda, ortalama yakıt kullanımı verimleri %80-85'e çıkabilmektedir. Bu yakıt pilinin düşük sıcaklık yakıt pillerine nazaran avantajı, yüksek verimlilikle çalışmalarıdır. Bir diğer avantajı ise, yakıt olarak sentez, atık veya doğalgazı kullanabiliyor olmasıdır. En büyük dezavantajı ise, yüksek çalışma sıcaklıklarında malzeme korozyonu hızlıdır [6].

Fosforik asit yakıt pilleri elektrolit olarak sıvı fosforik asit kullanmaktadır. Asit tutmak için kullanılan matris genellikle Silisyum Karbür (SiC)'dür ve anot ile katotta elektro-katalizör platindir. Çalışma sıcaklıkları genellikle 160-220 ºC arasındadır. Fosforik asitli yakıt pillerinin verimi %40–45 civarındadır. Ancak açığa çıkan ısı kojenerasyonda (eş zamanlı hem elektrik hem de ısı üretimi) kullanılırsa verim %80'i bulabilir [13].

Erimiş karbonatlı yakıt pilleri doğalgaz ve kömür yakmalı güç üretim sistemlerinin yerini alabilecek şekilde geliştirilmektedir. Elektrolit olarak alkali (Li, Na, K) karbonat karışımının kullanıldığı bu yakıt pillerinde elektrolit gözenekli ve kimyasal olarak kararlı $LiAlO_2$ seramik matrisin içinde tutulur. Oldukça yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle (600-700ºC) katalizör olarak değerli metal kullanımına gerek duyulmamaktadır. Erimiş karbonatlı yakıt pillerinin verimi %60'a ulaşmaktadır [1]. Erimiş karbonatlı yakıt pilleri diğer yakıt pili türleri gibi, dış yakıt dönüşüm sistemine ihtiyaç duymazlar. Yüksek çalışma sıcaklığından dolayı yakıtlar hücrenin içinde iç yakıt dönüşüm sistemiyle hidrojene dönüşebilir. EKYP'ler CO zehirlenmesine ve diğer empüritelere karşı dayanıklıdır. Bu sistemlerin en önemli dezavantajı ise yüksek çalışma sıcaklığı ve korozif elektrolit kullanımı sonucu parçaların ömrünün kısa olmasıdır [11].

1.4. Yakıt Pillerinin Avantajları ve Dezavantajları

Yakıt pilleri kendilerini uygun bir enerji dönüşüm cihazı yapan birçok özelliğe sahiptir. Yakıt pilleri temiz ve yüksek verimli olduğundan çevresel problemlerin çözülmesi ve enerji güvenliğinin sağlanmasında da bir çözüm sunabilecektir [1].

Başlıca avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Sessiz çalışırlar.
- Yanma olmadan doğrudan enerji dönüşümü sağlarlar.
- Düşük sıcaklıklarda çalışma imkanı sağlarlar.
- Tasarım dışı değişen yüklere hızlı yanıt vererek iyi bir işletme performansı oluştururlar.
- Uzaktan işletim kolaylığı vardır.
- Ölçü/boyut esnekliğine sahiptirler.
- Yakıt esnekliğine müsaittir. (Hidrojen, doğal gaz, etanol, metanol, LPG vs.)
- Yan ürün olarak oluşan atık ısı geri kazanılabilir.
- Katı atık problemi yoktur.
- Hızlı yük takip edebilme yeteneğine sahiptir.
- Çevreyi kirletmezler.
- Modüler sistemlerdir ve taşınabilirler.
- Düşük emisyona sahiptirler.
- Uzun ömürlüdürler.
- Hareketli parçaları yoktur.

Dezavantajları ise şu şekildedir:

- Enerji endüstrisi için tanınmayan bir teknolojidir.
- Yeni bir teknoloji olması sebebiyle maliyetler yüksektir.
- Altyapı eksik durumdadır.

1.5. Yakıt Pili Kullanım Alanları

- Uzay çalışmaları/askeri uygulamalar
- Evsel uygulamalar
- Sabit güç üretim sistemi/yüksek güç üretim sistemi uygulamaları
- Taşınabilir güç kaynağı uygulamaları
- Atık/atık su uygulamaları
- Taşıt uygulamaları

1.5.1. Uzay çalışmaları/askeri uygulamalar

Yakıt hücrelerinin ilk uygulanma alanı, uzay çalışmalarıdır. ABD'de NASA'nın çalışmaları kapsamında Apollo, Gemini, ve Space Shuttle uzay gemilerinde H_2 - O_2 yakıt hücresi birbirine bağlı 3 ünite olarak kullanılmıştır.

Stratejik bir önemi olan enerji kaynakları, ülkelerin politikalarında önemli bir yer tutmaktadır. Yakıt çeşitliliği ve veriminden dolayı, askeri amaçla kullanılabilecek en iyi yakıtlardan biri yakıt hücresidir. Gerek askeri araçlarda, gerek ısı ve elektrik ihtiyacı durumunda kolay kullanımıyla askeri yönden yakıt pilleri iyi bir alternatiftir [6].

1.5.2. Evsel uygulamalar

Sessiz çalışan yakıt hücreleri, evlerde veya apartmanlarda ısıtma ve elektrik ihtiyacını sağlamak için kullanılabilecek bir alternatiftir. Bu tipte kullanılabilecek yakıt hücreleri, propan ve doğal gazdan üretimi sağlayarak elektrik üretmekte ve oluşan ısı geri kazanılarak ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır [6].

1.5.3. Taşınabilir güç kaynağı uygulamaları

Telekomünikasyon, bilgisayar, görüntü teknolojileri, alarm sistemlerinde yakıt hücresi uygulamaları söz konusudur. Bu tip uygulamalar üzerinde çalışmalar sürmektedir. Minyatür yakıt hücreleri pazara çıktıkları zaman, cep telefonu sahipleri cep telefonlarını uzun süre şarj etmeden kullanabileceklerdir. Bu tip yakıt hücreleri metanol ile çalışabilen, çok küçük boyutta üretilen hücrelerdir [6].

1.5.4. Atık/atık su uygulamaları

Atık su ve atıkların işlenmesi sırasında yanma reaksiyonları sonucunda oluşan emisyonları azaltmak ve oluşan metan gazından güç elde etmek için yakıt hücreleri kullanılmaktadır [6].

1.5.5. Taşıt uygulamaları

Elektrikli taşıtlar 2000'li yılların yeni-temiz alternatif uygulamaları arasında ön sırada yer almaktadır. Elektrikli taşıtlar:

- Enerjiyi doğrudan hattan alarak (tren, troleybüs, tramvay, metro gibi)
- Enerjiyi depolanmış bir sistemden kullanarak (akülü taşıtlar, ultra kapasitörlü taşıtlar)
- Taşınabilir bir sistemden anında enerji üreterek (yakıt hücreli taşıtlar, güneş pilli-fotovoltaik pilli taşıtlar)
- Hibrit elektrikli taşıtlar (benzin-yakıt hücresi, motorin-yakıt hücresi taşıtları) şeklinde uygulamalardır.

Bu uygulamalar içinde yakıt hücreli elektrikli taşıtlar pek çok avantaj ile öndedir ve geleceğin otomotiv teknolojisi içinde hidrojen kullanan yakıt hücreli elektrikli taşıt uygulaması çok büyük alan kaplayacaktır [6].

1.6. Literatür İncelemesi

Yakıt pilleri istenilen güç ölçüsünde tek hücreli olarak imal edilebilmekte fakat tek hücreden alınabilecek maksimum voltaj, taşınabilir elektronik cihazların büyük bir çoğunluğu için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle yakıt pilini tek hücre yapmak yerine birbirine seri halde bağlanmış birçok hücreden yapmak gerekli olan voltajı sağlayacaktır. Yakıt pili hücrelerini birbirine seri bağlamak için bipolar plaka kullanılmaktadır. Bipolar plakanın bir yüzü hücrenin anot tarafına temas ederken diğer yüzü de diğer hücrenin katot tarafına temas etmektedir. Dolayısı ile bipolar plakalar sadece hücreleri seri bağlamakla kalmayıp aynı zamanda anot ve katota yakıt ve oksijen sağlayıcı olarak da kullanılmaktadır. Bipolar plakaların görevleri nedeniyle çok iyi elektrik iletken, korozyona dayanıklı, oksitleyici ve indirgeyici atmosferde yapısal ve kimyasal kararlığa sahip olması gerekmektedir. Bipolar plakalar yakıt pili performansını doğrudan etkilemektedir.

Bu tez kapsamında bipolar plakalardaki akış kanalı geometrilerinin yakıt pilindeki basınç düşümü davranışına etkisi incelenmiştir. Literatürde bipolar plakalar ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

1999 yılında yapılan bir çalışmada Argyropoulos ve arkadaşları, doğrudan metanol yakıt pilinde iki fazlı akışı ve kütle transferini ele alan bir matematiksel model geliştirmiştir. Model anot ve katottaki basınç düşmelerine neden olan işletme parametrelerini (akış alanı tasarımı, yakıt ve oksidan hızları, sıcaklık değişimi, akım

yoğunluğu ve basınç) kapsamaktadır. Bu model doğrudan metanol kullanan yakıt pili hücresine optimum akış alanı geometrisi tasarlamak için kullanılmıştır. Akış alanı üç bölge halinde incelenmiş ve her bölgede etkin olan basınç düşüş mekanizmaları modele eklenmiştir [14].

2001 yılında yapılan bir çalışmada Amphlett ve arkadaşları, geliştirdikleri yakıt pilinde akış geometrisi ve akışın performans üzerine etkilerini incelemek için grafit plakalara işledikleri üç ayrı akış kanal geometrisini test etmişlerdir. Sistemde E-TEK firmasından temin ettikleri standart membran elektrot grubu kullanılmıştır. Deneylerin hepsinde yakıt olarak 1 M metanol çözeltisi ile oksidan olarak saf oksijen kullanılmıştır. Değişen sıcaklığa ve kanal derinliğine göre polarizasyon ve alternatif akım (AC) empedans eğrileri elde edilmiştir. Polarizasyon ölçümleri, orta kanal derinliğine sahip akış kanallarının, sığ ve derin akış kanallarından daha iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir. Karbondioksit üretim hızı ile akış hızı arasında kompleks bir ilişki olduğu görülmüştür. AC empedans ölçümlerinin polarizasyon sonuçlarını desteklediği görülmüştür [15].

2006 yılında yapılan bir çalışmada Padhy ve arkadaşları, doğrudan metanol yakıt hücrelerinin çift kutuplu/son plakaları için ucuz ve DOE'nin standartlarına uyabilecek malzemeleri araştırmışlardır. Yapılan araştırmalar 316 paslanmaz çeliğin hem maliyet hem de iletkenlik ve korozyon dayanıklılığı özelliklerinden dolayı çift kutuplu plakalar için uygun olduğunu göstermiştir. Paslanmaz çelik üzerine serpantin, paralel ve diğer geometrilerde akış kanalları işlemiş ve bu plakaları yakıt hücresinde test etmişlerdir. Yakıt piline 100 saatin üzerinde performans ve yakıt kirlilik testi yapılmıştır. Ölçüm sonuçları yakıt pilinin veriminin %51 olduğunu göstermiştir. Az geçirgen 316 paslanmaz çeliğinin akış alanındaki basınç düşmesini arttırdığı görülmüş ve bununda yakıt pili performansını arttırdığı görülmüştür. Sonuç olarak yakıt pillerinde 316 paslanmaz çeliği kullanılarak işleme maliyetinin ve yakıt pili hacminin düşebileceğini gösterilmiştir [16].

2004 yılında yapılan bir çalışmada Jiang ve arkadaşları, geliştirdikleri yakıt pilinde kullanmak için anot ve katot akış kanallarını metal köpükten imal etmişlerdir. Bu sistem için yakıt sağlama metodu da geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yakıt hücresi ile yaptıkları deneylerde hücre sıcaklığının 20 ºC 'den 40 ºC 'ye yükseltildiğinde yakıt

pilinin çıkış gücünün de önemli miktarda arttığı tespit edilmiştir. Hücre kümesinin enerji çıktısı sabit akımda ve sabit voltajda anodu besleyecek kadar yakıt kullanarak incelenmiştir. Sabit akımda sıcaklığın artması ile yakıt pili performansının da arttığı bulunmuştur. Sabit voltajda ve 30 ºC 'de Faradic verimin %86 ve enerji veriminin %17 olduğu belirtilmiştir [17].

Yang ve arkadaşları, doğrudan metanol yakıt pilini dikey konumda yerleştirmiş, kanal geometrisi ve metanol konsantrasyonunun yakıt pili performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Paralel dizilimli kanal tipinde karbondioksit kabarcıklarının basit serpantin kanal tipine göre daha küçük olduğunu tespit etmişlerdir. Fakat paralel dizilimli kanalın çıkış kanallarında ki tıkanmanın fazla oluşu serpantin tipli kanalı daha avantajlı hale getirdiğini belirtmişlerdir [18].

Jeon ve arkadaşları, akış alanı tasarımının etkisini araştırmak için tek kanallı, çift kanallı, döngüsel tek kanallı ve simetrik tek kanallı olmak üzere dört adet 10 cm^2 serpantinli akış alanı için hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları yapmışlardır. Yüksek ve düşük giriş nemi çalışma koşullarında, farklı hücre voltajlarında potansiyeli, akım yoğunluğu dağılımını ve membran su içeriği dağılımlarını hesaplayarak incelemişlerdir. Yüksek giriş neminde, çift kanallı akış alanının daha iyi polarizasyon performansına ve düzgün akım yoğunluğu dağılımına sahip olduğu, düşük giriş neminde ise dört adet serpantin akış alanı arasında çok az performans farkı olduğunu belirtmişlerdir. Döngüsel-tek kanal ve simetrik-tek kanal akış alanlarının mevcut yoğunluk profillerinin periyodik olarak benzer alanlara sahip olduğu ve önemli ölçüde düşük basınç düşüşü gösterdiği gözlenmiştir. Döngüsel-tek kanalın ve simetrik-tek kanallı akış alanlarının düşük basınç düşüşü göz önüne alındığında, bu akış alanları daha büyük ölçekli sistemlerde ve düşük giriş nemi çalışma koşullarında avantajlı olacağı görülmüştür [19].

Yang ve arkadaşları, şirket içi üretilen bir doğrudan metanol yakıt hücresinin (DMFC) anot akış alanındaki iki fazlı akışındaki basınç düşüşü davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Anot akışı, 2 x 2 mm^2 kesit alanı ve toplam uzunluğu 420 mm olan tek bir serpantin akış kanalından oluşmuştur. Akış kanalının giriş ve çıkışı arasındaki basınç düşüşleri değişken akım yoğunluğu ile ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar düşük akım yoğunluklarında, basınç düşüşünün akım yoğunluğunun artmasıyla arttığını

göstermektedir. Bununla birlikte, belirli akım yoğunluğunda bir zirveye ulaştıktan sonra, basınç düşüşünün, artan akım yoğunluğu ile azalmaya başladığı belirtilmiştir. Ayrıca basınç düşüşünün metanol çözeltisi akış hızı ile daima arttığı gösterilmiştir. Ancak, daha düşük veya daha yüksek akış hızları hücre performansını kötüleştirmiştir. Deneysel sonuçlar ayrıca, metanol çözeltisinin akış hızı yeterince yüksek olduğunda, basınç düşüşünün mevcut yoğunluktan neredeyse bağımsız olduğunu göstermiştir. Çalışma aynı zamanda hem sıcaklık hem de metanol konsantrasyonunun hücre performansı üzerinde etkili olduğunu, ancak basınç düşüşü üzerindeki etkilerinin küçük olduğunu ortaya koymuştur [5].

Sang ve arkadaşları, bipolar plakaların yakıt hücresi sistemlerindeki ana fonksiyonlarını detaylı bir şekilde ele almışlardır. Katod kanal derinliğinin doğrudan metanol yakıt hücrelerinin performansına etkisini incelemişlerdir. Bipolar plakanın kanal derinliği 1 mm 'den 0,3 mm'ye düşürüldüğünde, hücre performansının arttığı ve hücrenin sürekli çalışması sırasında sabit kaldığı gösterilmiştir. Azalan kanal derinliği ile reaktiflerin ve ürünlerin lineer hızlarında, belirli bir hacimsel akış hızında, dolayısıyla kütle taşımalarını kolaylaştıran bir artışa yol açtığı görülmüştür. Ayrıca daha küçük kanallarda (daha sığ kanallar), basınç düşüşü arttığı ve bunun sonucunda hücre performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olan oksijenin kısmi basıncında bir artışın olabileceği belirtilmiştir. Katot kanal derinliğinin reaktiflerin ve ürünlerin taşıma davranışları üzerindeki etkisi, katot kanallarındaki reaktiflerin ve ürünlerin akışını görsel olarak izlemek için tasarlanmış saydam plakaların kullanılmasıyla incelenmiştir. Ek olarak, hücredeki basınç düşüşü ve doğrusal hız, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) tekniği kullanılarak hesaplanmıştır [20].

Arico ve arkadaşları, Serpantin (SFF) ve birbirine kenetlenmiş (IFF) akış alanlarını, doğrudan metanol yakıt hücresinde kullanımları bakımından incelemişlerdir. SFF'lerle donatılmış DMYP düşük metanol geçişi, daha yüksek yakıt kullanımı ve düşük akım yoğunluklarında biraz daha büyük voltaj verimliliği göstermiştir. IFF'lerin kütle taşınımı ve membran nemlendirmesini arttırarak, sırasıyla 130 ºC'de, oksijen ve hava beslemesi varlığında, 450 ve 290 mW/cm^2 yüksek güç yoğunluklarına ulaşılmasını sağladığı görülmüştür. IFF'lerle 130 ºC 'de 1 molar metanol beslemesi ve 500 mA/cm^2 akım yükü varlığında % 90 'lık bir yakıt verimi elde edilmiştir [21].

Wong ve arkadaşları, 1 cm x 1 cm aktif alana sahip anot akış alanı tasarımının, şirket içi üretilen bir doğrudan mikro metanol yakıt hücresinin (μDMFC) performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Mikro kanallardan oluşan tek serpantin ve paralel akış alanları test edilmiştir. Deneysel sonuçlar serpantin akış alanının, özellikle yüksek akım yoğunluklarında, paralel akış alanından çok daha yüksek hücre voltajları sergilediğini göstermiştir. Serpantin akış alanının kanal derinliğinin etkisinin incelenmesi, aynı metanol akış hızı sağlandığında, aynı kanal genişliği ve aynı açık oran için optimal bir kanal derinliği bulunduğunu göstermiştir. Daha sığ veya daha derin kanalların hücre performansında bir azalmaya yol açacağı belirtilmiştir. Son olarak, μDMFC'nin bir aktif yolla beslenen reaktiflerle performansının, literatürde bildirilen daha büyük akış kanallarına sahip geleneksel DMYP'lerden farklı olan hücre yönelimlerine duyarsız olduğu gösterilmiştir [22].

Oliveira ve arkadaşları, üç farklı anot ve katot akış alanı tasarımının tek serpantin (SFF), çok serpantin (MSFF) ve paralel ve serpantin ile karıştırılmış özgün bir tasarımın (MFF) DMYP'nin performansı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalar, ortam basıncı seviyesinde, iki metanol konsantrasyonu (0,75 M ve 2 M), yakıt hücresi sıcaklığı (20 ºC ve 60 ºC), metanol ve hava akış debisinin kullanıldığı, şirket içi olarak geliştirilmiş 25 cm^2 aktif membran alanına sahip DMYP ile gerçekleştirilmiştir. Anot akış alanı tasarımına göre, test edilen metanol akış debisinin iki değeri için düşük yakıt hücresi sıcaklığı değeri ve düşük metanol konsantrasyon değeri için MFF kullanımının hücre voltajı ve gücü üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Katot akış alanı tasarımı için, test edilen hava debisinin iki değeri için, düşük yakıt hücresi sıcaklığı değeri ve düşük metanol konsantrasyonu değeri için MSFF kullanımı daha iyi bir performansa yol açtığı tespit edilmiştir. Test edilen metanol konsantrasyonunun daha yüksek değeri için, anot akış alanı tasarımı olarak MSFF veya MFF'nin ve katod akış alanı tasarımı olarak MSFF veya SFF'nin kullanılması, gelişmiş bir yakıt hücresi performansına yol açacağı belirtilmiştir. Bildirilen deneylerin çoğu oda sıcaklığına yakın yapılmış olup, çalışma daha az ciddi çalışma koşullarının gerekli olduğu (ortam sıcaklığı ve ortam basıncı) taşınabilir bir DMYP'yi tasarlarken kullanılabilecek bilgi ve sonuçları sağlamıştır [23].

Wei-Mon Yan ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, ana odak noktası, farklı akış alanı tasarımlarıyla optimum katot yakıt akış hızı etkilerini ölçümü gösterilmiştir. Ayrıca, farklı çalışma koşullarında farklı akış alanı tasarımlarının (akış kanalı sayısı, akış kanalı uzunluğu, köşe numaraları ve bölme efektleri) PEMYP'lerin hücre performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, beş katod akış alanı tasarımında sıcaklık etkilerinin aynı eğilimi ürettiğini ortaya koymuştur. Hücre sıcaklığı 50'den 70 ºC'ye yükseldiğinde, proton değişim membranı iyonik taşınma direncinde bir artışa neden olan yetersiz bir hidrasyon yaşayacağını göstermiştir. Bu nedenle, hücre performansı hücre sıcaklığındaki artışla azalacağı görülmüştür. Ek olarak, katod nemlendirmesinin arttırılması, membranın hidrasyon seviyesini ve dolayısıyla iyonik iletkenliğini arttırarak hücre performansını arttırdığı görülmüştür. Katot yakıt akış hızının hücre performansı üzerindeki etkileri için, birbirine bağlı akış alanlı PEMYP, reaktif gazı gaz difüzör tabakası boyunca zorlayan bölme etkisinden dolayı geleneksel akış alanındakinden daha iyi bir hücre performansı göstermiştir. Ayrıca, geleneksel akış alanı ile karşılaştırıldığında, iç içe geçmiş akış alanı olan PEMYP, daha düşük yakıt tüketimi ile aynı hücre performansına ulaşabileceği görülmüştür. Optimum yakıt akış hızı koşulları altında, bölmeli paralel akış alanına sahip PEMYP, beş akış alanı tasarımında en iyi hücre performansını sağlamıştır [24].

Lİ ve arkadaşı, yaptıkları araştırmada polimer elektrolit membran yakıt hücresinin, yüksek verim, düşük sıcaklıkta çalışma, yüksek güç yoğunluğu, hızlı başlatma ve sistem sağlamlığı nedeniyle taşıma ve sabit kojenerasyon uygulamaları için sıfır emisyonlu güç kaynağı olarak umut verici bir aday olduğunu belirtmişlerdir. Bipolar plakaların, reaktif bölgelere yakıt ve oksidan sağladığını, reaksiyon ürünlerini giderdiğini, üretilen akımı topladığını ve istif içindeki hücreler için mekanik destek sağladığını ve bu sebeple PEM yakıt hücrelerinin hayati bir bileşeni olduğunu açıklamışlardır. Bipolar plakaların, bir yakıt hücresi istifinde ağırlığın %60 'ından ve toplam maliyetin %30 'undan fazlasını oluşturduğunu, bu nedenle, yakıt hücresi istifinin ağırlığı, hacmi ve maliyeti, akış alanının yerleşim konfigürasyonu ve hafif malzemelerin kullanımı iyileştirilerek önemli ölçüde azaltılabilir olduğunu açıklamışlardır. Farklı malzeme kombinasyonları, yüksek performans ve ekonomik avantajlar elde etmek amacıyla, yukarıda belirtilen işlevleri verimli bir şekilde gerçekleştirmek için bu plakalar için akış alanı düzenleri ve imalat teknikleri

geliştirilmiştir. Bu çalışmada, farklı şirketler ve araştırma grupları tarafından geliştirilen akış alanı düzenlerinin ve bu tasarımlarla ilişkili artı ve eksilerin kapsamlı bir derlemesi sunulmuştur [25].

Polimer elektrolit membran yakıt hücresinin yanlış tasarlanmış bir akış alanı, hatalı dağılımlara neden olabilir, bu da pil performansının ve ömrünün düşmesine neden olabilir. Akış kanalı tasarımı yakıt pili performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Limjeerajarus ve arkadaşları tarafından 5 cm^2 aktif alanına sahip 6 farklı geometride akış kanalı tasarımı incelenmiştir. Akış kanalı modellerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Analizlerde, akış kanalı modelleri ve kanal sayısı araştırılmıştır. Araştırma sonucunda, akış kanallarının sayısı azaldıkça, yakıt pili performansının artığını göstermişlerdir [26].

Shimplee ve arkadaşları yaptıkları çalışmada serpantin tip gaz akış kanalı için kanal genişliği, derinliğini ve uzunluğunu değiştirerek hücredeki akım yoğunluğu, sıcaklık dağılımı ve elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan su gibi parametrelerin etkilerini incelemiştir. Ayrıca çalışmalarında farklı akış kanal uzunluğu ve diğer kanal boyutlarına sahip serpantin akış kanallarının otomotiv ve yerleşik uygulamalar için kullanılan PEMYP performansını hangi yönde etkilediğini araştırmışlardır. Sonuç olarak derin kanal boyutunun o bölgedeki basıncı düşürdüğü ve o bölgedeki reaktant dağılımında değişikliğe yol açtığını göstermişlerdir [27].

Yoon ve arkadaşları akış alanı plakasının çubuk ve kanal genişliklerinin PEMYP performansına etkisini incelemişlerdir. Akış alanı kanal genişliğini sabit tutarak çubuk genişliğini 0,5 mm ile 3 mm arasında değiştirmiş ve sonuçta dar çubukların düşük hücre potansiyeli bölgesinde polarizasyon eğrisinin iyileştiğini göstermişlerdir [28].

Manso ve arkadaşları bipolar plakaların farklı geometrik parametrelerinin polimer elektrolit membran yakıt pili performansına etkisini incelemişlerdir. PEMYP performansının sadece çalışma koşulları, hücrenin içindeki taşınım olayları ve elektrokimyasal reaksiyonların kinetiği gibi faktörlere değil, aynı zamanda bipolar plakalar gibi fiziksel bileşenlerine de bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Özellikle yığın sistemlerde performansı etkileyen en önemli parametrelerden birisi olan bipolar plaka ve katalizör tabakası üzerindeki homojen gaz dağılımlarının etkisini göstermişlerdir [29].

Wang ve arkadaşları paralel ve iç içe geçmiş gaz akış kanallarında katot tarafı gaz akış kanalının genişlik ve derinlik değişiminin yakıt pili hücre performansına olan etkilerini sayısal model oluşturarak incelemişlerdir. Sıvı su oluşumunun reaktif taşınma üzerindeki etkisi modelde dikkate alınmıştır. Hücre potansiyel değerinin 0,7 V'dan büyük olduğu durumlarda gaz akış kanalı genişlik - derinlik oranının hücre performansına etkisinin az olduğunu, 0,7 V'dan küçük değerlerde ise hücre performansına arttırıcı yönde etkisi olduğunu göstermişlerdir. Çalışmalarında farklı genişlik ve derinlik boyutlarında gaz akış kanal tasarımlarını karşılaştırmışlardır. Sonuçta en iyi performans değerlerinin paralel tip gaz akış kanal tasarımı için 0,3 mm x 0,3 mm, iç içe geçmiş gaz akış kanalı için ise 1 mm x 1 mm olan genişlik ve derinlik ölçüleri olduğunu göstermişlerdir [30].

Türkmen ve diğerleri, yaptıkları bir çalışmada doğrudan metanol yakıt hücresinin anot tarafındaki akış kanalı geometrisi ile metanol akışına bağlı olarak oluşan kanallardaki basınç düşüşü arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Akış kanalı olarak paralel tip kanallar kullanmışlardır. Aktif alanı 5 x 5 cm^2olan yakıt hücresi tasarlamışlardır. Akış kanalı genişliği ve kanallar arasındaki mesafe için 1, 1.5, 2, 2.5, 3 mm ölçüm kombinasyonlarını kullanmışlardır. Tasarlanan akış kanallarının geometrik ölçümlerinin kanal içi basınç düşüşü üzerindeki etkilerini istatistiksel yöntemle belirlemişlerdir. Kanal genişliğinin basınç düşüşü üzerindeki etkisinin en yüksek olduğunu ancak istatistiksel olarak orta düzeyde bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Kanallar arasındaki mesafe ile basınç düşüşü arasında anlamlı bir ilişki bulunamamışlardır [31].

Çelik ve diğerleri, yaptıkları bir çalışmada, hücre sıcaklığı, sodyum hidroksit konsantrasyonu, oksidan koşullar ve katalizör yükleme gibi farklı çalışma koşullarının, Pd / C anot, Pt / C katot ve Na^+ 'dan Nafion membrandan oluşan doğrudan borhidrür yakıt hücresinin performansına etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, güç yoğunluğunun artan oksidan akış hızı ve sıcaklıkla arttığını göstermiştir. Ayrıca, ağırlıkça %20 NaOH konsantrasyonunun doğrudan borhidrür yakıt hücresi işlemi için optimum olduğu bulunmuştur. Oksijen, hava yerine oksidan olarak kullanıldığında, daha iyi performans gözlenmiştir. Deneyler ayrıca elektrokimyasal performansın nemlendirme seviyelerinden önemli ölçüde etkilenmediğini göstermiştir. Anodik katalizörün yüklenmesinin arttırılmasıyla arttırılmış bir güç yoğunluğu bulunmuştur.

Bu çalışmada, nemlendirilmiş hava kullanıldığında, 60 °C'de 55 mA/cm^2'de, 0.85 V hücre voltajında maksimum 27.6 mW/cm^2güç yoğunluğu sağlanmıştır [32].

Çelik ve diğerleri, başka bir çalışmada, sodyum borhidrür konsantrasyonunun, Pd / C anot, Pt / C katot ve elektrolit olarak Na^+ 'dan Nafion membrandan oluşan doğrudan borhidrür yakıt hücresinin performansına etkisini kararlı durum / sürekli akış ve düzgün durum / düzgün akış sistemlerinde araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, kararlı durum / kararlı akış sisteminde sodyum borhidrür konsantrasyonu arttıkça güç yoğunluğunun arttığını göstermiştir. Düzgün durum / düzgün akış sisteminde ise sodyum borhidrür konsantrasyonu arttırıldığında performansın düştüğü görülmüştür [33].

Li ve arkadaşları, yakıt olarak alkali borhidrür çözeltileri kullanılarak bir yakıt hücresi hazırlamışlardır. Borhidrür çözeltilerin özgül ağırlığı, özgül viskozitesi ve erime noktalarını değerlendirmişlerdir. $NaBH_4$ konsantrasyonunun arttırılmasıyla özgül ağırlığın azaldığını, ancak viskozitenin sürekli arttığını görmüşlerdir. $NaBH_4$ ve NaOH konsantrasyonlarının hücre ve elektrot polarizasyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar yüksek konsantre borhidrür çözeltileri kullanıldığında hücre polarizasyonunun arttığını göstermiştir. Nernst'in denklemine göre, NaOH konsantrasyonunun artışı anot için elverişlidir, ancak katod polarizasyonuna olumsuzdur. Prensip olarak, hücre polarizasyonunun, $NABH_4 + O_2 = NaBO_2 + 2H_2O$ hücre reaksiyonuna göre NaOH konsantrasyonu ile ilgisi yoktur. Bununla birlikte, deneysel sonuçlar, yüksek NaOH konsantrasyonunun, daha yüksek akım yoğunluklarında hücre polarizasyonunu arttırdığını göstermiştir [34].

Alkali ortamlardaki borhidrürler, yüksek enerji ve güç yoğunluğu nedeniyle yakıt hücreleri için potansiyel yakıtlardır. Liu ve arkadaşları, bir nikel elektrotunda borhidrürlerin anodik oksidasyonunu çalışmışlardır. Açık devre potansiyelinin BH_4^- konsantrasyonuna bağlı olarak hidrojen potansiyelinden yaklaşık 0,15 – 0,2 V daha negatif olduğu görülmüştür. Polarizasyon ölçümlerinin sonuçları BH_4^- / Ni sistemi için yüksek bir güç yoğunluğunun elde edilebileceğini göstermiştir. Ancak, kulon verimliliğinin hidrojen evrimi nedeniyle %50 veya daha az olduğu bulunmuştur.

Hidrojen gazının sadece hidroliz reaksiyonundan değil, aynı zamanda elektrokimyasal reaksiyondan da üretildiğini görülmüştür. Ni elektrotunda borhidrürün gerçek anodik reaksiyonunun sekiz elektrondan ziyade dört elektronlu bir işlem olduğu kanıtlanmıştır [3].

Jamard ve arkadaşları, doğrudan borhidrür yakıt hücrelerinin potansiyelleri üzerine çalışmışlardır. Platinin anottaki yüklemesinin miktarı ve katalizörün yapısıyla oynanarak, hem spesifik kapasite hem de güç açısından olumlu sonuçlar bulunmuştur. Pratik kapasite, teorik olanın sadece %18'ini temsil ederken, çalışma sonunda teorik olanın yaklaşık % 64'ünü temsil etmiştir [35].

Li ve arkadaşları, yakıt olarak borhidrür çözeltileri kullanarak bir yakıt hücresi geliştirmişlerdir. Hücre, bir zirkonyum-nikel (Zr-Ni) alaşımından yapılmış bir anottan, platin-karbondan (Pt / C) yapılan bir katoddan ve elektrolit olarak bir nafion membranından oluşmuştur. Borhidrür yakıtlı hücre 1,3 V'luk bir açık devre voltajı göstermiştir. Nafion 112 membranı ile karşılaştırıldığında, Nafion 117 membranı borhidrür geçitine karşı önemli bir direnç göstermiştir ve kabul edilebilir hücre performansı ile sonuçlanmıştır [36].

Liu ve arkadaşları, doğrudan borohidrür yakıt hücresinin güç üretimini arttırmak için, tek hücreli başarılara dayanarak 10 hücreli ve 20 hücreli yığınlar oluşturmuşlardır. Doğrudan borhidrür yakıt pilinde yığın kaybının esas olarak yığının her bir hücresinde eşit olmayan yakıt dağılımına yol açan hidrojen çıkışı kaynaklı olduğunu bulmuşlardır. Yığın kaybını azaltmak için, yığın performansı üzerinde hidrojen oluşumunu azaltmak için birkaç çaba gösterilmiştir. Anot hazırlama yöntemi kuru bir yöntemden ıslak bir yönteme dönüştürülerek hidrojen çıkışı azaltılmaya çalışılmıştır. Hidrojen oluşumu baskılandığında, 10 hücreli yığının maksimum gücü 229 W'a ulaşmıştır [37].

Kim ve arkadaşları, sodyum borohidrürün elektro-oksidasyonuna dayanan doğrudan borhidrür sıvı yakıt hücreleri üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Doğrudan borhidrür yakıt hücresi için karbon destekli ve desteklenmeyen Pt anot katalizörlerinin kullanımı üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Katalizör yüklemesinin anot ve yakıt hücresi performansını, bağlayıcı içeriğini, yakıt konsantrasyonu ve $NaBH_4$'ü eriten destekleyici çözeltinin pH'ını doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Pil performansı, 1,5 mg/cm^2 karbon destekli Pt anot katalizör kullanılması ile 6 mg/cm^2 desteksiz Pt anot

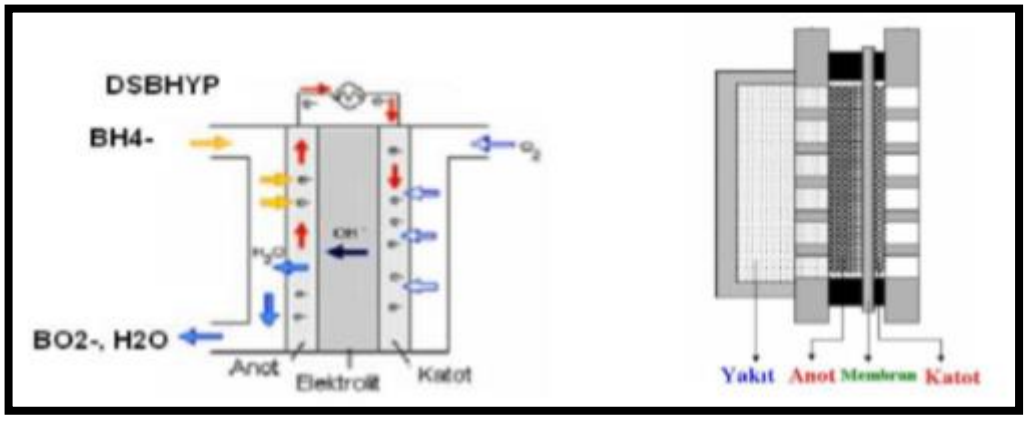
katalizörün kullanıldığı durumla karşılaştırılmıştır. Karbon destekli katalizörlerin daha uygun maliyetli olduğu ve desteklenmeyen katalizörlerden daha yüksek katalitik aktiviteye sahip oldukları bulunmuştur. Desteklenmeyen ve karbon destekli Pt anot katalizörleri için enerji yoğunluğundan hesaplanan kulon verimleri sırasıyla %62,3 ve %68,1 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada geliştirilen doğrudan borhidrür yakıt hücresinin, geleneksel yakıt hücrelerinden daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmüştür [38].

Feng ve arkadaşları, bir manganez dioksit (MnO_2) katalizörlü hava katodu ve bir altın (Au) katalizörlü anot kullanılarak basit bir doğrudan borhidrür yakıt hücresi oluşturmuşlardır. MnO_2 katodunun, çözeltilerdeki oksijenin azaltılması için sadece önemli bir elektrokatalitik aktivite sergilemekle kalmayıp, aynı zamanda iyonların elektro-oksidasyonu ve kimyasal hidrolizi için ayrılmaz katalitik aktiviteler gösterdiği bulunmuştur. Sonuç olarak, bu doğrudan borhidrür hücreleri, yalnızca "geçit" kaynaklı katotun performans düşüşünü engellemekle kalmayıp, aynı zamanda katod içinde pahalı iyon değiştirme membranları ve Pt katalizörü kullanmaları gerektirmediğini göstermiştir [39].

2. DOĞRUDAN SODYUM BORHİDRÜR YAKIT PİLLERİ

Sodyum borhidrür (sodyum tetrahidroborat, sodyum borat, $NaBH_4$), yapısında bulundurduğu negatif yüklü hidrojen atomundan dolayı çok iyi bir indirgen olan, genellikle beyaz kristal yapıda bulunan, 1,074 g/cm^3 yoğunluğa sahip bir bileşiktir. Kuru havada kararlı halde olup, nem ile yavaş bir şekilde reaksiyona girer [40].

Doğrudan sodyum borhidrürlü yakıt pilleri (DSBHYP), yakıt olarak, sıvı fazdaki sodyum borhidrür çözeltisini doğrudan kullanarak enerji üreten bir yakıt pili türüdür. Bu yakıt pilinin geleneksel yakıt pillerinden farkı yakıt olarak sulu çözelti içerisine sodyum borhidrür koyulmasıdır. Çalışma prensibi bakımından DMYP'ye benzemekle birlikte ondan farklı olarak enerji kaynağı metanol yerine sodyum borhidrürdür. Yakıt olarak gaz hidrojen kullanılmayıp, onun yerine bor hidrür kullanılan metodun birçok avantajları vardır. Bunlardan en önemlisi depolama sorunu ortadan kalkmış olup hareketli uygulamalar için, tehlikeli yüksek basınç silindirleri veya sıvı hidrojen durumu için soğutulan enerji tüketim aparatları gibi özel aletlere gerek kalmamasıdır. Ayrıca daha yüksek teorik voltaja sahip olması, ucuz elektrokatalizörlerin kullanılabilirliği, nemlendiricinin elimine edilebilir olması, pil çalışmasının kolayca başlatılabilmesi gibi bir takım avantajları vardır [41]. Şekil 2.1. 'de DSBHYP şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Doğrudan sodyum borhidrürlü yakıt pili [42]

DSBHYP'lerinde elektrik üretimi sırasında gerçekleşen anot reaksiyonu Denklem (2.1)'de, katot reaksiyonu Denklem (2.2)'de ve genel pil reaksiyonu ile teorik pil potansiyeli Denklem (2.3)'de verilmiştir.

$$NaBH_4 + 8OH^- \rightarrow NaBO_2 + 6H_2O + 8e^- \qquad E_{anot}{}^0 = -1{,}24\ V \qquad (2.1)$$

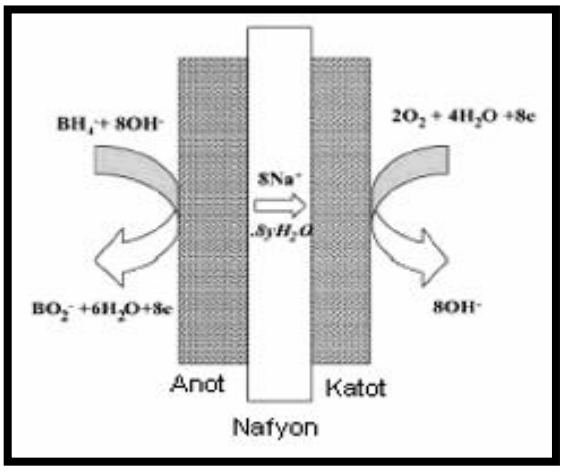
$$2O_2 + 4H_2O + 8e^- \rightarrow 8OH^- \qquad E_{katot}{}^0 = 0{,}40\ V \qquad (2.2)$$

$$NaBH_4 + 2O_2 \rightarrow NaBO_2 + 2H_2O \qquad E_{pil}{}^0 = 1{,}64\ V \qquad (2.3)$$

Doğrudan sodyum borhidrürlü yakıt pilleri kullanılan elektrolite göre katyon değişim membran (KDM)'lı DSBHYP ve anyon değişim membran (ADM)'lı DSBHYP 2'ye ayrılır.

2.1. DSBHYP Membranları

DSBHYP sisteminde elektrolit olarak katyon değişim membranı kullanıldığı zaman yük taşıyıcı iyon olarak anottan katoda transfer olan Na+ iyonu kullanılır [43]. Şekil 2.2.'de KDM'lı DSBHYP'de gerçekleşen reaksiyonlar şematik olarak gösterilmiştir.

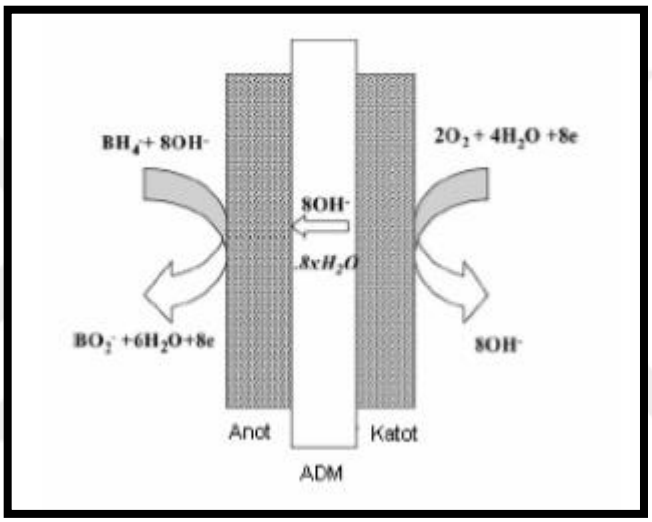


Şekil 2.2. KDM'lı DSBHYP'de gerçekleşen reaksiyonlar [2]

KDM olan nafyon membranlar iki sebepten dolayı tercih edilir. Birincisi, bir anyon olan BH_4^-'ün geçişine gösterilen direnç bakımından ADM'den daha etkilidirler. İkincisi, kuvvetli alkali ortamlarda ADM'lerden daha fazla mekanik ve kimyasal dayanım gösterirler [2]. Bununla birlikte KDM kullanıldığında pilden akım geçtiği zaman katotta NaOH oluşumu meydana gelir ve katolitteki NaOH artarken anolitteki

NaOH azalır. Yakıt pili çalışırken borhidrür anolitindeki alkali konsantrasyonundaki azalma borhidrürdeki dengenin azalıp ve düşük verimli yakıt kullanımına sebep olur. Bu da KDM'nin dezavantajı olarak gösterilebilir [44].

Borhidrürler sadece alkali ortamda dengelidir. Yakıtı katottan ayrı tutmak ve hidroksit iyonlarının transferine olanak sağlamak amacıyla membran olarak ADM'nın kullanılabilir [2]. ADM kullanıldığı zaman yük taşıyıcı iyon olarak katottan anoda transfer olan OH^- iyonu kullanılır [43]. Şekil 2.3.'de ADM'lı DSBHYP'de gerçekleşen reaksiyonlar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. ADM'lı DSBHYP'de gerçekleşen reaksiyonlar [2]

ADM kullanıldığı zaman katot tarafı su bakımından eksik kalır ve su ile elektrolit nemlendirilemez. Öbür taraftan nafyon membran kullanıldığı zaman katot tarafı su ve elektrolitçe zengindir. Bu sebeple aynı şartlar altında nafyon membran kullanan DSBHYP'nin ADM'lı olana göre daha iyi performans göstermesi beklenir [2].

3. BİPOLAR PLAKALAR

3.1. Bipolar Plakalar ve Mekanik Özellikleri

Yakıt pilleri temel olarak membran elektrot grubu, akım toplama plakaları, sıkıştırma plakaları, bağlantı elemanları ve bipolar plakadan oluşan tek bir hücre ve bu hücrelerin birleştirilmesinden oluşan staktan (hücre yığını) oluşmaktadır. Yakıt hücrelerinin ağırlıkça %80, maliyet olarak %45'ini kaplayan bipolar plakalar oldukça önemli bileşenlerdir [45].

Bipolar plakaların yakıt pili sistemindeki başlıca görevleri aşağıdaki gibidir:

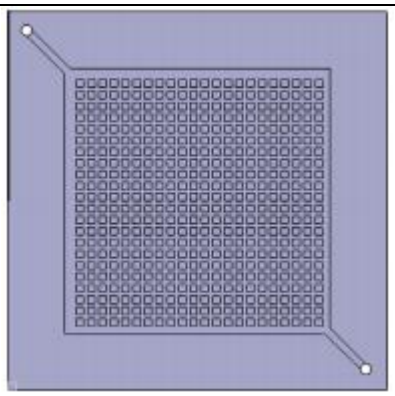
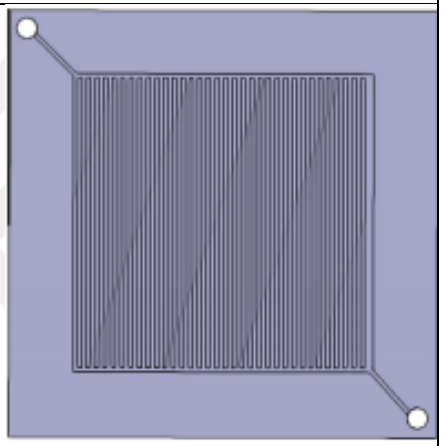
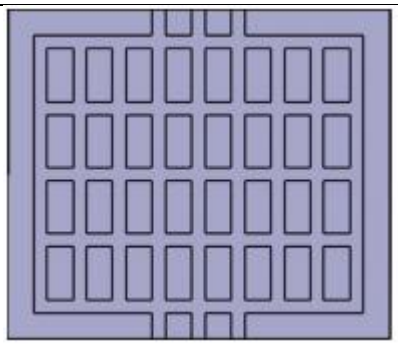
- Yakıt ve oksitleyicinin hücre içindeki homojen dağılımını sağlamak,
- Yığın içinde birim hücreleri birbirinden ayırmak,
- Yığın içindeki hücrelere mekanik destek sağlamak,
- Oluşan akımın hücreden taşımını sağlamak,
- Hücre içindeki su yönetimini sağlamak,
- Hücre içindeki ısı dağılımını yönetmek,
- Reaktanlar ile soğutucuların (sıvı veya hava) sızıntısının önlemektir [25].

Bipolar plakaların görevlerini yerine getirebilmesi için sahip olması gereken özellikler; Elektriksel iletkenlik, korozyon direnci, kimyasal kararlılık, ısısal kararlılık, gaz geçirmezliği, mekanik dayanım, hafiflik ve üretim kolaylığıdır [46].

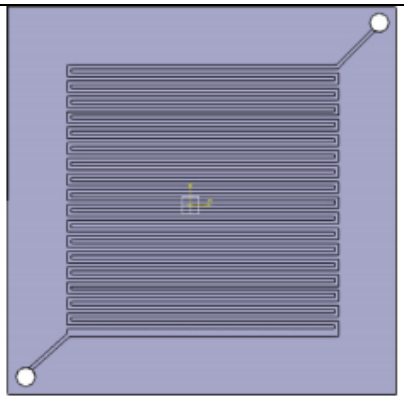
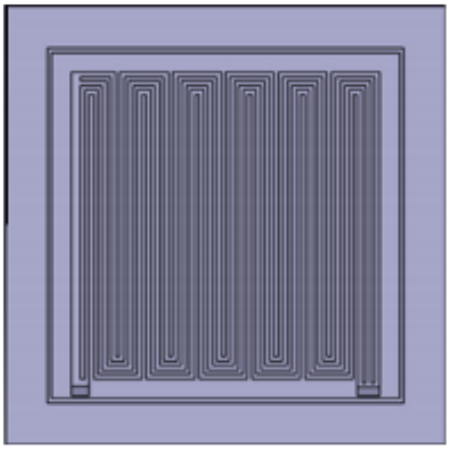
3.2. Bipolar Plaka Tasarımları

Tablo 3.1.'de şemaları, avantajları ve dezavantajları ile birçok akış kanalı tasarımı gösterilmiştir. Pin tip, paralel tip, serpantin tip ve iç içe geçmiş tip akış alanları en çok kabul edilen ve ticarileştirilmiş tiplerdir. Tabloda ayrıca diğer yenilikçi ve geleneksel olmayan tasarımlar da verilmiştir. Uygun bir akış kanalı tasarımı, bir yakıt pili yığınında maliyet azaltma ve performans iyileştirme için en önemli noktalardan biridir. Akış kanallarının optimizasyonu ile orijinal çıkış gücü yoğunluğunun %50'sine varan iyileştirmeler mümkündür [47].

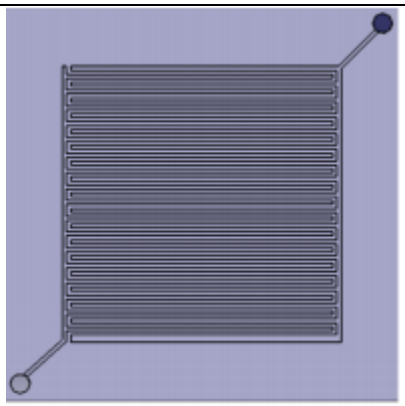
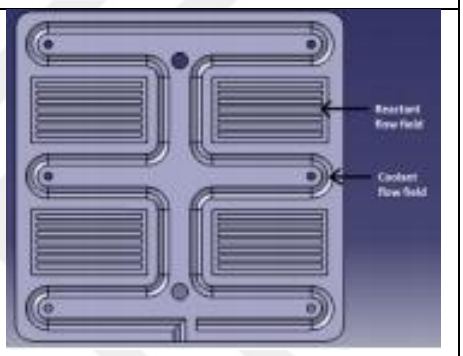
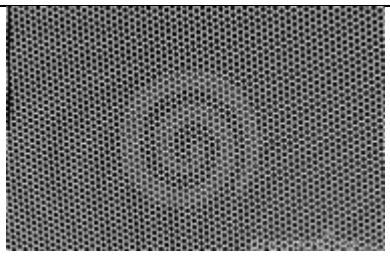
Tablo 3.1. Farklı geometrilerdeki akış kanalları [47]

Model	Avantajları	Dezavantajları	Şekil
Pin tip	• Düşük basınç düşüşü, • Düşük kullanım seviyelerine sahip yüksek reaktif akış hızları için uygundur.	• Homojen olmayan reaktiflerin dağılımı, • Homojen olmayan su giderimi, • Düzensiz akım yoğunluk dağılımı.	
Paralel tip	• Düşük basınç düşüşü, • Düzgün gaz dağıtımı	• Kanaldaki su tıkanması tıkanmış bir akışa veya ölü bir bölgeye neden olur, • Yetersiz su tahliyesi • Çıkışa yakın kanallardaki yetersiz basınç düşümüi, düzgün olmayan gaz akışı ile sonuçlanır. • Uzun çalışmadan sonra dengesiz voltaj • Düşük kanal hızı	
Çapraz tip	• Gelişmiş su yönetimi • Paralel tip ile benzer avantajlar	• Paralel tip ile benzer dezavantajlara sahiptir.	

Tablo 3.1. (Devam) Farklı geometrilerdeki akış kanalları [47]

Model	Avantajları	Dezavantajları	Şekil
Tek serpantin tip	• Yüksek akış hızı sayesinde iyi su giderme • Tüm aktif alanın kapsamı • Küçük aktif alanlar için en yaygın olanı	• Kanalların uzunluğu boyunca reaktiflerin tükenmesi eşit olmayan reaktant dağılımına yol açar, • Yüksek basınç düşüşü, • Hava oksidan sorunları, • Yüksek akım yoğunluklarında taşma tehlikesi, • Bükümlerde su birikmesi yerel akım yoğunluğunun azalmasına neden olur.	
Çoklu serpantin tip (paralel-serpantin)	• Tek serpantinden daha az basınç düşmesi • Yeterli su giderme • Tüm aktif alanın kapsamı • Daha yüksek performans • Geniş aktif alanlar için optimum	• Kanalların uzunluğu nedeniyle hala nispeten yüksek basınç düşüşü • Düzensiz reaktant dağılımına yol açan kanalların uzunluğu boyunca reaktiflerin tükenmesi	
Ayna serpantin	• Tek serpantinden daha az basınç düşmesi • Tek ve çoklu serpantin avantajlarının bir kombinasyonu • Çoklu giriş ve çıkışlara sahip geniş aktif alanlar için optimum	• Tek ve çoklu serpantin dezavantajlarının bir kombinasyonu	

Tablo 3.1. (Devam) Farklı geometrilerdeki akış kanalları [47]

Model	Avantajları	Dezavantajları	Şekil
İç içe geçmiş tip	• Difüzyon yerine gaz difüzyon tabakasından (GDL) zorla konveksiyon kullanılması nedeniyle iyi su giderme • İyi kütle transferi • Yüksek akım yoğunluklarında su basmasını önler • Yüksek performans • Homojen gaz dağılımı	• GDL porozitesine ve kalınlığına bağlı olarak yüksek basınç düşüşü • GDL'ye olası uzun vadeli hasar • Yaygın olarak kullanılmaz	
Birleştirilmiş tip	• Hem reaktif akış alanını (aktif alana bakan) hem de soğutucu akış alanını (reaktif akış alanları arasında) aynı plaka yüzeyine entegre ederek, ayrı soğutma plakalarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır • Geliştirilmiş güç yoğunluğu	• Tüm yakıt hücresi yüzeyinde düzgün olmayan sıcaklık dağılımı	
Metal kafes tip	• Sıvılar, gözenekli metal ağ yapısından akar • Sınırlı akım aralığında iyi performans • Düşük basınç düşüşü • Kontrol edilebilir temas alanı	• Kötü su giderme • Merkezde odaklanmış gaz dağıtımı ve yüksek güç çıkışı altında kenarlarda düşük dağılma • Aynı gözeneklilikte üretilme zorluğu • Korozyon problemi	

3.3. Bipolar Plakaların Hammaddeleri

Metal olmayan (Boşluksuz grafitler), metal ve kompozit malzemeler olmak üzere 3 çeşit bipolar plaka malzemesi vardır.

3.3.1. Boşluksuz grafitler

Özellikle kimyasal dayanımı ve elektrik iletkenliğinin çok iyi olmasıyla grafitler bipolar plaka malzemesi olarak en çok kullanılan malzemelerdir. İyi ısıl iletkenlik ve yüksek hidrofobikliğe sahip olmalarıyla ısı ve su iletimini kolaylaştırır. Ayrıca grafitler hafif bir malzemedir [48].

Grafitin en zayıf yönü mekanik mukavemetinin düşük olmasıdır. Ayrıca kırılgan olmasından dolayı işlenmesi çok zordur. Grafitin zayıf özelliklerini iyileştirmek için genellikle polimer malzeme takviyesi yapılmaktadır. Bunun sonucunda grafitin mekanik mukavemeti artarken, elektrik ve ısıl iletkenliği azalmakta ve çalışma sıcaklığı da sınırlanmaktadır [48].

3.3.2. Metallar

Metaller, yüksek mekanik dayanımı, elektriksel ve ısıl iletkenlik ile kolay işlenebilme özellikleriyle bipolar plakalar için potansiyel adaylardır. Fakat bunun yanında pH değeri 2-3 ve sıcaklığı 80 ºC civarında olan bir çalışma ortamında bipolar plakalar çözünmeye ve korozyona maruz kalmaktadırlar. Bu da iyon iletkenliğinde istenmeyen bir düşüşe neden olmaktadır. Metal bipolar plakalar kaplanmış ve kaplanmamış olmak üzere 2'ye ayrılır.

3.3.2.1.Kaplanmamış Metaller

Kaplanmamış metal bipolar plaka kategorisinde tek dikkat çekici malzeme paslanmaz çeliklerdir. Bunun sebebi yüksek mukavemet ve kimyasal dayanım, düşük gaz geçirgenliği, geniş alaşım seçeneği, seri üretime uygunluğu ve düşük maliyetli oluşudur. Bu plakalarda en büyük problem korozyon ve yüzeyde meydana gelen korozyon tabakalarının elektrik ve ısıl iletkenliğini olumsuz yönde etkilemesidir. Birçok paslanmaz çelik bipolar plaka olarak araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Yüksek krom içerikli östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin bipolar plakalar için uygun olacağı, AISI 446 çeliğinin ise temas dayanımı açısından daha fazla iyileştirilmesi gerektiği görülmüştür [49,50].

3.3.2.2.Kaplanmış Metaller

Alüminyum, paslanmaz çelik, titanyum ve nikel bipolar plaka olarak kullanılan metalik malzemelerdir. Ancak bu malzemeler yakıt pili çalışma koşullarında korozyona uğramaktadır. Metalik bipolar plakalar, korozyon probleminin önüne geçmek için koruyucu bir tabaka ile kaplanmaktadırlar. Kaplamalar iletken olmalı ve alttaki metalin yüzeyine iyice yapışmalıdır [51]. Kaplamada orantısız ısıl genleşme sonucu mikro çatlak ve boşlukların oluşmaması için kaplama ile altındaki metalin ısıl genleşme katsayılarının birbirine yakın olması gerekmektedir [52].

Karbon ve metal bazlı olmak üzere iki çeşit kaplama üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan birinde altın kaplama yapılmış paslanmaz çelikli (316L) bipolar plakanın performansının grafit ile yapılmış olana çok yakın olduğunu ifade edilmiştir [53]. Başka bir çalışmada ise kimyasal çöktürme yöntemi ile paslanmaz çelik üzerine uygun bir kaplama yapılabileceği ispat edilmiştir [54]. Karbon esaslı kaplamalar grafit iletken polimer, karbon benzer elmas ve kendinden oluşumlu organik tekli polimerleri içermektedir. Soymetaller (Platin, altın, gümüş vb.) metal nitrürler ve metal karbürler metal esaslı kaplamalardır.

3.3.3. Kompozit Plakalar

Bipolar plaka malzemelerine başka bir alternatifte polimer kompozitlerdir. Hafif, mukavemetli ve üretim kolaylığına sahip olmaları bu malzemeleri bipolar plakalar için cazip hale getirmiştir. Kompozit plakalar, metal ve karbon esaslı olmak üzere sınıflandırılmaktadır [55].

Los Alamos Amerikan Ulusal laboratuarında metal esaslı bir kompozit bipolar plaka geliştirilmiştir. Bu tasarım gözenekli grafit, polikarbonat plastik ve paslanmaz çeliğin bir araya getirilmesi ile oluşmuştur. Paslanmaz çelik yapıya mukavemet kazandırırken, grafit de korozyona karşı direnci sağlamıştır [55].

Karbon esaslı kompozitler termoplastik (polipropilen, polietilen, polivinilidenflorid) veya termoset (fenolikler, epoksiler ve vinilesterler) reçineler kullanılarak katkılı ve fiber destekli/desteksiz olarak üretilebilmektedirler [55].

3.4. Bipolar Plaka Üretimi

3.4.1. Boşluksuz grafit bipolar plaka üretimi

Boşluksuz grafit bipolar plakaların 2 şekilde üretim yöntemleri vardır. Grafit plaka üzerine akış kanallarının işlenmesi yöntemlerden biri iken, diğer yöntem de plakaların akış kanalı ile birlikte kalıplanmasıdır [56].

3.4.2. Kaplanmış metalik bipolar plaka üretimi

Kaplanmış metalik bipolar plaka üretimi, altlık plaka şekillendirilmesi, yüzeyin hazırlanması ve temizlenmesi ile kaplanma süreçlerinden oluşur. Altlık plaka şekillendirmesi için makine ile işleme, damgalama, soğuk metal şekillendirme, pres döküm, hassas döküm, toz metal şekillendirme, elektrolizle şekillendirme yöntemleri önerilmektedir. Kaplama süreçleri fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme ve sıvı faz kimyasal biriktirme gibi bir dizi biriktirme süreçlerinden oluşmaktadır [46].

3.4.3. Kompozit bipolar plaka üretimi

Termoplastik ve fenolik, epoksi reçine, vinil ester gibi termosetlerin kullanıldığı basınçlı kalıplama, enjeksiyon kalıplama, transfer kalıplama ve reaksiyon enjekiyon kalıplama gibi farklı üretim süreçleri ile kompozit bipolar plakalar üretilmektedir [46].

Enjeksiyonla kalıplama, kapama, enjeksiyon, soğutma, kalıp açma ve çıkarma işlemlerinden oluşmaktadır. İletkenlik için yüksek miktarda grafit kullanımı bu yöntem için oldukça güçtür. Düşük grafit miktarı elektrik iletkenliğini azaltacağı için yakıt hücresi performansını da düşürecektir. Ayrıca şu anki üretim miktarlarının enjeksiyon makinesinin ve kullanılacak kalıpların maliyetlerini karşılayacak seviyede olmaması da bu yöntemin diğer sınırlayıcısıdır [56].

Basınçlı kalıplama, daha önce ısıtılmış olan kalıp boşluğuna, malzemenin yerleştirilip basınç altında şekillendirildiği bir yöntemdir. Bu yöntemle enjeksiyon kalıplamada olduğundan çok daha düşük oranda polimer kullanıldığından üretilen plakaların elektriksel iletkenliğinde daha az kayıplar meydana gelmektedir. Ancak bu yöntemle plaka üretim süresi daha uzun zaman sürmektedir [56].

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yakıt pilinde MEG'den sonra en önemli sistem elemanı bipolar plakalardır. Bipolar plakaların akış alanı geometrilerinin seçimi ve optimizasyonu yakıt pili performansını doğrudan etkilemektedir. Akış kanallarında meydana gelen basınç düşümü davranışının yakıt pili performansı üzerinde önemli etkileri vardır. Anot ve katottaki basınç düşmelerine neden olan işletme parametreleri, sıcaklık değişimi, akım yoğunluğu, akış alanı geometrisi, yakıt konsantrasyonu, basınç, yakıt ve oksidan akış debileri olarak sıralanabilir.

Bu deneysel çalışmada doğrudan borhidrür yakıt pilinde kullanılmak üzere farklı geometrilerde akış kanalları oluşturulup, oluşturulan her bir akış kanalında belirli debilerde çalışılarak, akış kanalı geometrisi ve yakıt debisinin basınç düşümüne etkileri incelenmiştir.

4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler, Kimyasallar ve Cihazlar

4.1.1. Akış kanalı plaka malzemesi

Akış kanalı plakası olarak 4 mm kalınlığında polikarbonat (PC) plaka kullanıldı. Polikarbonatlar;

- Tok ve şeffaf termoplastiklerdir.
- Yüksek darbe dayanımına sahip olup, camdan yaklaşık 150 kat daha dayanıklıdırlar.
- Akustik özellikleri iyidir.
- Elektrik özellikleri, özellikle de diyalektikleri yüksektir.
- Optik olarak çok temiz, ışık geçirgenliği yüksek, düşük duman oranına sahiptirler.
- İyi mekanik özelliklere sahiptirler.
- Yüksek boyut kararlılığına sahiptirler.
- Dolgulu, alaşım ve kopolimer türlerinde özellikler daha da iyileştirilmiştir.

- Dayanabilecekleri sıcaklık -40°C ile 135°C aralığındadır.
- 140°C'ye kadar kullanılabilmekte olup yakıldıklarında yanmasını kendi başına devam ettirmeden sönerler ve alev almazlar.
- Kimyasal olarak asitlere karşı dirençli ancak alkaliler tarafından etkilenir, petrol kaynaklı yakıt ve yağlara karşı ise dirençsizdirler.
- Termoplastiklere has bütün işleme süreçlerine uygun olarak üretilirler.
- Çeşitli sıcaklıklarda ve nem şartlarında çok iyi yalıtkanlığa sahiptirler [57].

Polikarbonat plaka örneği Şekil 4.1.'de verilmiştir. Polikarbonatların genel özellikleri ise Tablo 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Polikarbonat plaka

Tablo 4.1. Polikarbonatların genel özellikleri [57].

Yapı	Amorf
Yoğunluk	1,1-1,25 g/cm^3
T_g	158 ^{0}C
• Kısa süreli kullanım sıcaklık sınırı • Uzun süreli kullanım sıcaklık sınırı	• ~135 ºC • ~100 ºC
Çekme kopma mukavemeti	56-66 N/mm^2
Çekme elastiklik modülü	2000-3000 N/mm^2
Çekme kopma uzaması	100-130 (%)

Tablo 4.1. (Devam) Polikarbonatların genel özellikleri [57]

Eğilme kopma mukavemeti	90-100 N/mm^2
Eğilme elastiklik modülü	2100-2400 N/mm^2
Çentik darbe	20-30 N/mm
Eğilmede bükülme sıcaklığı	130-145 ^0C
Lineer ısıl genleşme	4-7 $^oC.10^{-5}$
Isıl iletkenlik	0,14-0,2 W/m.K
Su emme	0,16 (% ;24 saatte)
Suya dayanıklılık	Dayanıklı
Darbe karşısında davranışı • -20 ve 10 arasında • 10 ve 50 arasında	 • Sivri çentikli numuneler gevrek davranır. • Sivri çentikli numuneler dahi kırılmaz.
• Asit karşısında davranışı • Baz karşısında davranışı • Yağ ve alkol (metil alkol hariç)	• Dayanıklı • Dayanıksız • Dayanıklı
UV ışınlarına dayanım	Yüksek oranda dayanım gösterir.

4.1.2. Akış kanalı yakıtı

Doğrudan sodyum borhidrürlü yakıt pilleri yakıt olarak, sıvı fazdaki sodyum borhidrür çözeltisini doğrudan kullanarak enerji üreten bir yakıt pili türüdür. Bu çalışmada doğrudan sodyum borhidrür yakıt pili için üretilen akış kanallarında basınç düşümü etkisini görebilmek için sodyum borhidrür yerine yakıt olarak gıda boyası ile renklendirilmiş su kullanıldı. Bunun sebebi sodyum borhidrür içeriğinde bulunan bazik olan sodyum hidroksit (NaOH) ile akış kanalı malzemesi olan polikarbonatın reaksiyon göstermesidir. Sodyum borhidrürün yoğunluğu (1,07 g/cm^3) ve viskozitesi,

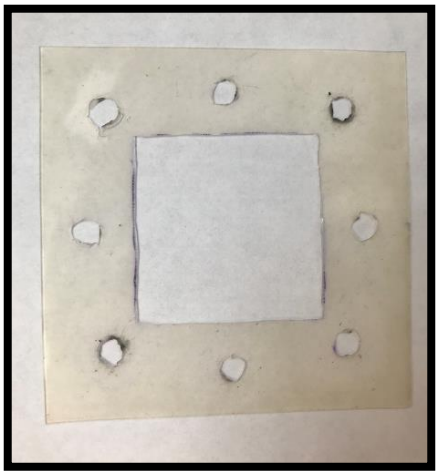
suyun yoğunluğu (0,997 g/ cm^3) ve viskozitesine çok yakın olduğu için deney de yakıt olarak su tercih edildi. Şekil 4.2.'de kırmızı gıda boyası ile renklendirilmiş su verilmiştir.



Şekil 4.2. Kırmızı gıda boyası ile renklendirilmiş su

4.1.3. Sızdırmazlık contası

Suyun akış kanalı içerisinden sızmadan ilerleyebilmesi için kalınlığı 0,3 mm olan silikon conta kullanıldı. Kullanılan silikon conta Şekil 4.3.'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Silikon conta

4.1.4. CNC tezgah

Polikarbonat plakalar CNC tezgah ile işlenerek akış kanalı oluşturuldu. Deneyde kullanılan akış kanalları Güneş Plastik Kalıp San. Tic. A.Ş bünyesinde yer alan 1800 kg kapasiteli 600x900x1200 ölçülerinde hareket mesafesine sahip HERMLE marka CNC ile işletildi. Akış kanallarının işletildiği CNC tezgah Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. CNC tezgah

4.1.5. Peristaltik pompa

Suyun akış kanalına gönderimi peristaltik pompa ile sağlandı. Deneyde kullanılan peristaltik pompa Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Peristaltik pompa

4.1.6. Basınç ölçüm ekipmanı

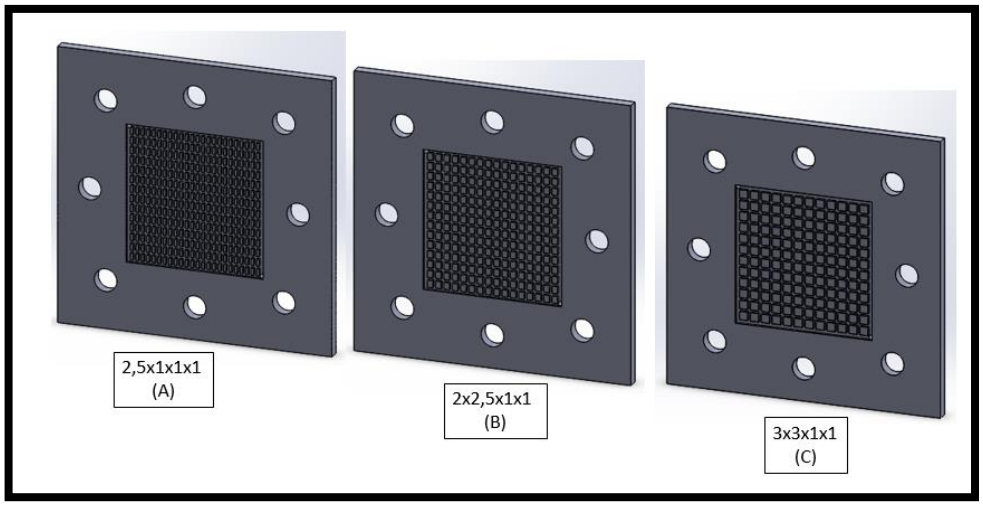
Akış kanalındaki basınç düşümünü görmek için manuel bir düzenek oluşturuldu. Bu düzenek ile akış kanalının giriş ve çıkışına 2 adet dış çapı 6 mm, iç çapı 4 mm olan hortumla bağlantı kurup, milimetrik kağıt yardımı ile giriş ve çıkış hortumlarındaki sıvı seviyesi farkı ölçülüp basınç tespiti yapıldı. Deneyde kullanılan basınç ölçüm ekipmanı Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Basınç ölçüm ekipmanı

4.2. Akış Kanallarının Hazırlanması

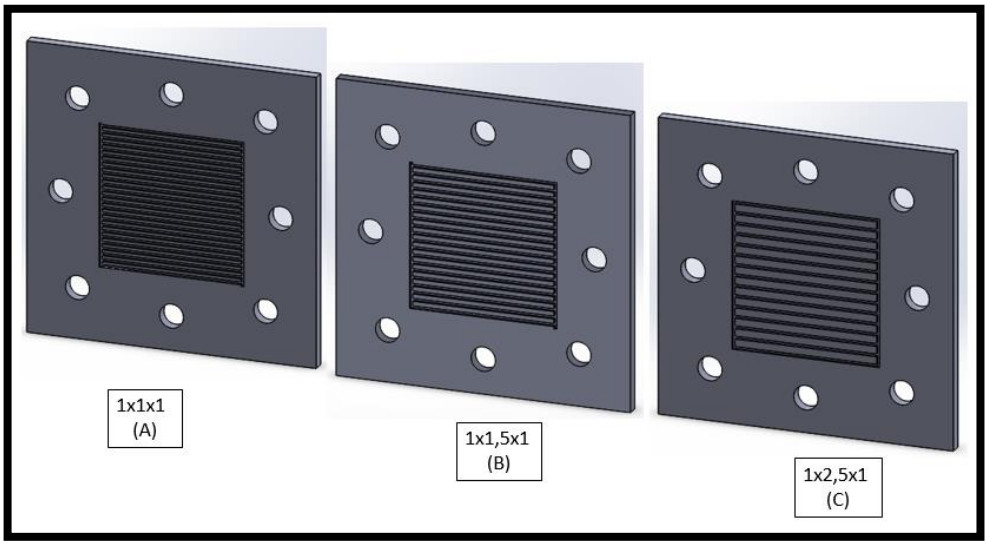
Deneyde pin tip akış kanalından 3 farklı geometri, paralel tip akış kanalından 3 farklı geometri ve serpantip tip akış kanalından da 3 farklı geometri tasarımı SOLIDWORKS programı kullanılarak oluşturuldu. Oluşturulan CAD tasarımlar Güneş Plastik Kalıp San. Ve Tic. A.Ş bünyesinde yer alan HERMLE marka bir CNC'de işletildi. Pin akış kanallarının CAD modeli Şekil 4.7.'de gösterilmiş olup, geometrik boyutları Tablo 4.2.'de verilmiştir. Paralel akış kanallarının CAD modeli Şekil 4.8.'de gösterilmiş olup, geometrik boyutları Tablo 4.3.'de verilmiştir. Serpantin akış kanallarının CAD modeli Şekil 4.9.'da gösterilmiş olup, geometrik boyutları Tablo 4.4.'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Pin akış kanallarının 3 boyutlu CAD görünümü

Tablo 4.2. Pin akış kanallarının geometrik boyutları

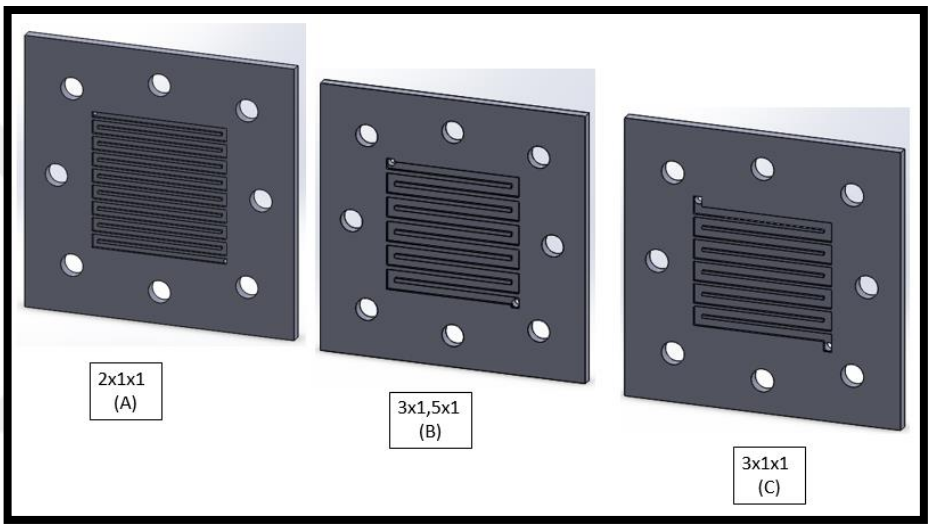
Kanal	Destek eni (mm)	Destek boyu (mm)	Kanallar arası mesafe (mm)	Kanal derinliği (mm)	Yakıt pili aktif alanı (cm^2)	Akış kanalı aktif alanı (cm^2)	Akış alanı oranı (%)
A	2,5	1	1	1	25	16,6	66,4
B	2	2,5	1	1	25	13,8	55,2
C	3	3	1	1	25	12,04	48,16



Şekil 4.8. Paralel akış kanallarının 3 boyutlu CAD görünümü

Tablo 4.3. Paralel akış kanallarının geometrik boyutları

Kanal	Kanal genişliği (mm)	Kanallar arası mesafe (mm)	Kanal derinliği (mm)	Yakıt pili aktif alanı (cm^2)	Akış kanalı aktif alanı (cm^2)	Akış alanı oranı (%)
A	1	1	1	25	12,9	51,6
B	1	1,5	1	25	10,5	42
C	1	2,5	1	25	8,2	32,8



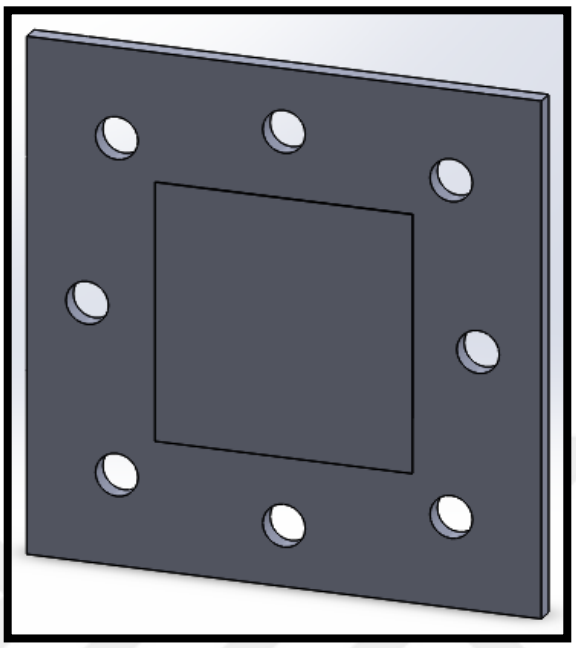
Şekil 4.9. Serpantin akış kanallarının 3 boyutlu CAD görünümü

Tablo 4.4. Serpantin akış kanallarının geometrik boyutları

Kanal	Kanal genişliği (mm)	Kanallar arası mesafe (mm)	Kanal derinliği (mm)	Yakıt pili aktif alanı (cm^2)	Akış kanalı aktif alanı (cm^2)	Akış alanı oranı (%)
A	2	1	1	25	17,3	69,2
B	3	1,5	1	25	17,01	68,04
C	3	1	1	25	17,01	68,04

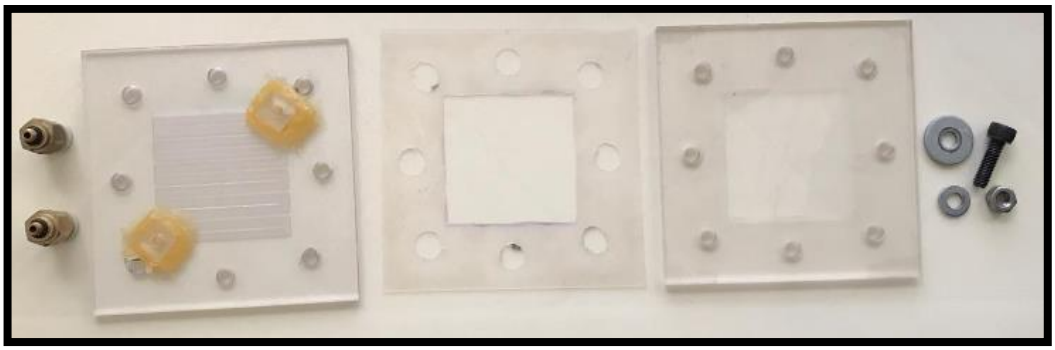
Akış kanallarını kapatmak için yine SOLIDWORKS programında kapak tasarlandı. Akış kanalının montajı esnasında kapağa conta takılabilmesi için tasarım aşamasında

0,2 mm kademe verildi. Oluşturulan kapak aynı CNC tezgahta işletildi. Kapak parçasının CAD modeli Şekil 4.10.'da gösterilmiştir.

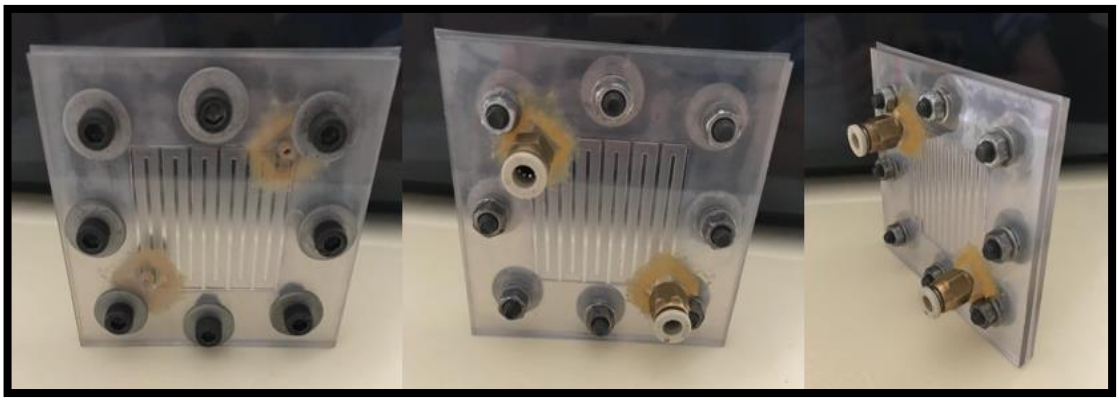


Şekil 4.10. Akış kanalı kapağı

Deneyde kullanılan akış kanallarından biri için montaj öncesi hali Şekil 4.11.'de verilmiş olup, aynı akış kanalının montaj sonrası hali Şekil 4.12.'de verilmiştir.



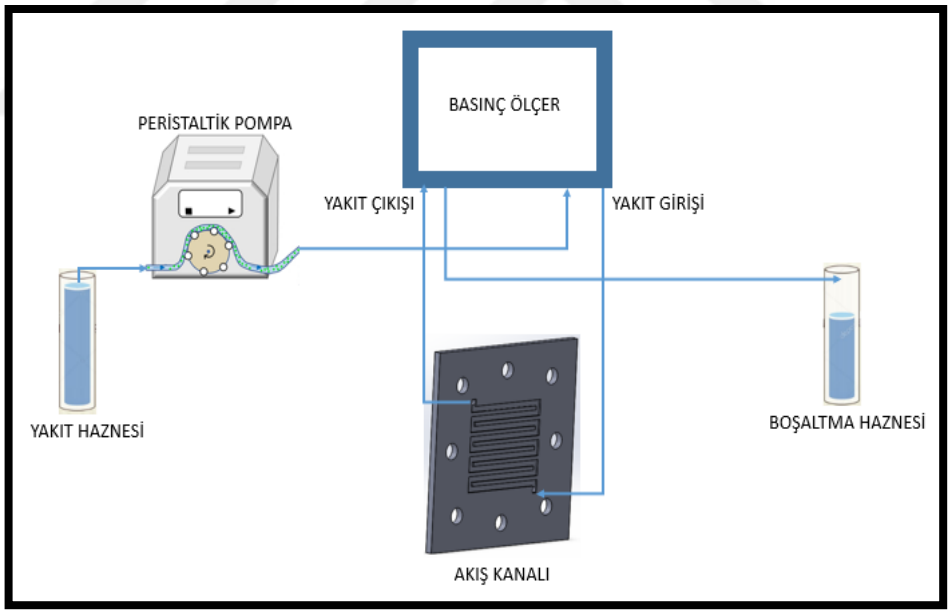
Şekil 4.11. Akış kanalı montaj öncesi hali



Şekil 4.12. Akış kanalı montaj sonrası hali

4.3. Deney Düzeneği ve Deneyin Yapılışı

Hazırlanan akış kanallarını test etmek için peristaltik pompa, basınç ölçmek için manuel olarak hazırladığım basınç ölçme ekipmanı, yakıt haznesi ve boşaltma haznesinden oluşan deney düzeneği oluşturuldu. Deneysel çalışmada kullanılan düzeneğin şematik hali Şekil 4.13.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Pompaya su beslenmesi pompanın emiş hortumu aracılığı ile 500 ml'lik bir plastik şişeden yapılmakta olup, pompanın çıkış hortumuyla da su önce basınç ölçüm ekipmanı bağlantısı ile akış kanalının alt yakıt girişinden girer. Ardından akış kanalı boyunca ilerleyip akış kanalının üst yakıt çıkışından kanalı terk eder. Kanaldan çıkan su basınç ölçüm ekipmanından geçerek boşaltma haznesine gider.

Bu döngü sırasında basınç ölçüm ekipmanının borularındaki su seviyeleri farkı akış kanalının giriş ve çıkışındaki basınç farkını verir.

Hazırlanan pin, serpantin ve paralel akış kanallarının her 3 geometrisi için bu test 5 farklı debide yapıldı. Yapılan testlerin her biri oda koşullarında, sabit sıcaklık ve basınçta gerçekleştirildi. Deneysel çalışmada kullanılan debiler sırası ile 3 ml/dk, 6 ml/dk, 9 ml/dk, 12 ml/dk ve 15 ml/dk'dır. Deneysel düzenek Şekil 4.14.'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Basınç düşümü deney düzeneği

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

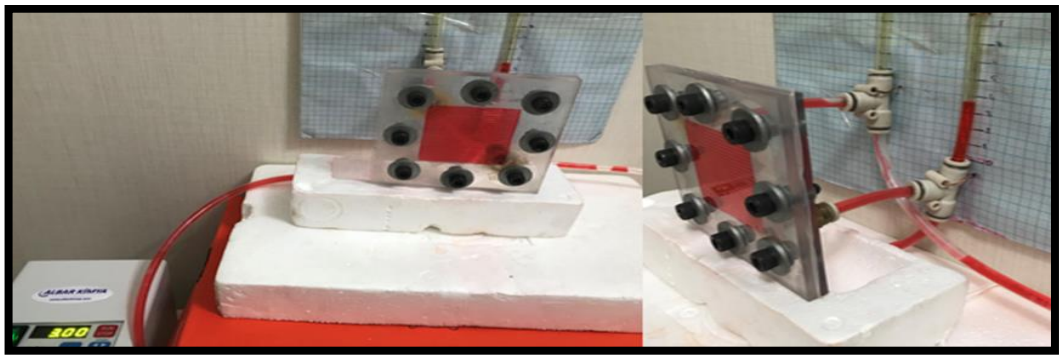
Bu bölümde, hazırlanan akış kanallarının 5 farklı debi için basınç düşümü değerleri hesaplanmıştır.

5.1. Paralel Akış Kanalı Basınç Düşümü Değerleri

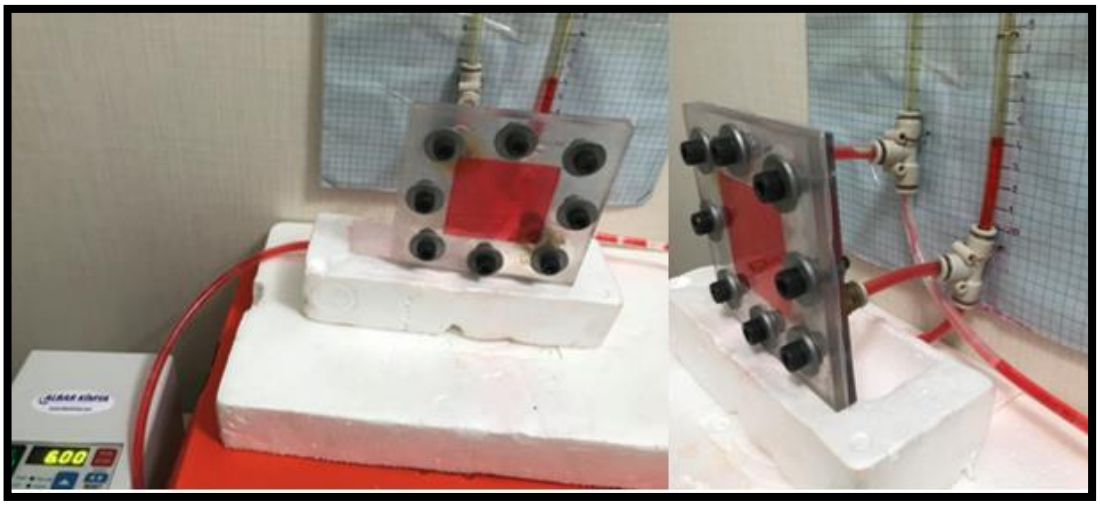
Paralel akış kanallarının her 3 geometrisi için sırasıyla 3ml/dk, 6 ml/dk, 9ml/dk, 12ml/dk ve 15ml/dk debi de basınç düşümü testi yapıldı. Basınç ölçüm ekipmanının borularından okunan basınç değerleri birimi cmH_2O olup, bu değerler pascala (Pa) dönüştürüldü. 1x1x1 paralel akış kanalı için test sırasında borulardan okunan değerlerin görselleri Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te verilmiş olup, test sonuçları Tablo 5.1.'de gösterilmiştir. Test sonuçlarından 1x1x1 paralel akış kanalında basınç düşümünün artan debi ile arttığı görülmüştür.

Tablo 5.1. 1x1x1 paralel akış kanalı basınç düşümü sonuçları

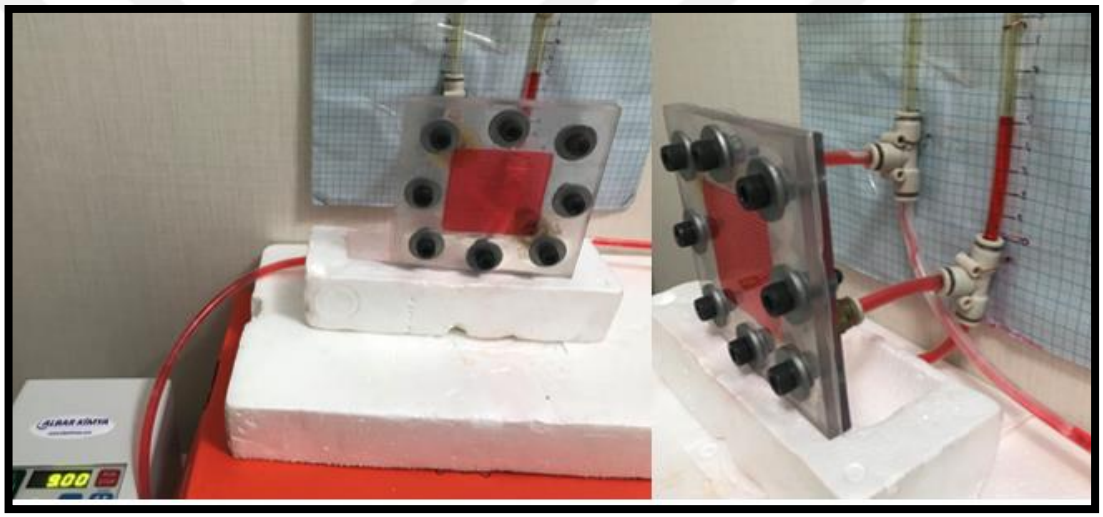
1x1x1 PARALEL		
DEBİ (ml/dk)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (cmH_2O)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (Pa)
3	3,7	362,84
6	4,3	421,67
9	5,2	509,93
12	6,3	617,8
15	7,4	725,67



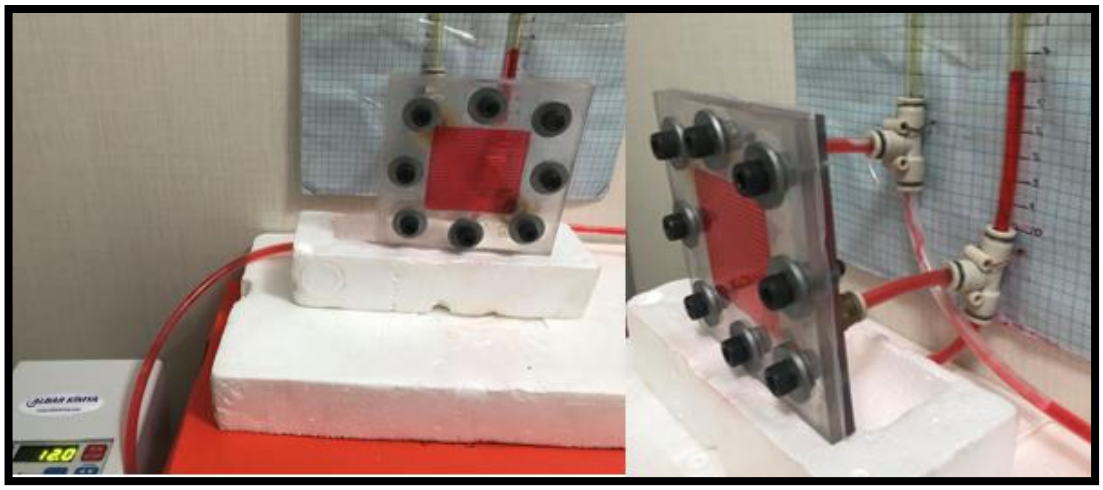
Şekil 5.1. Debi 3 ml/dk iken 1x1x1 paralel akış kanalı



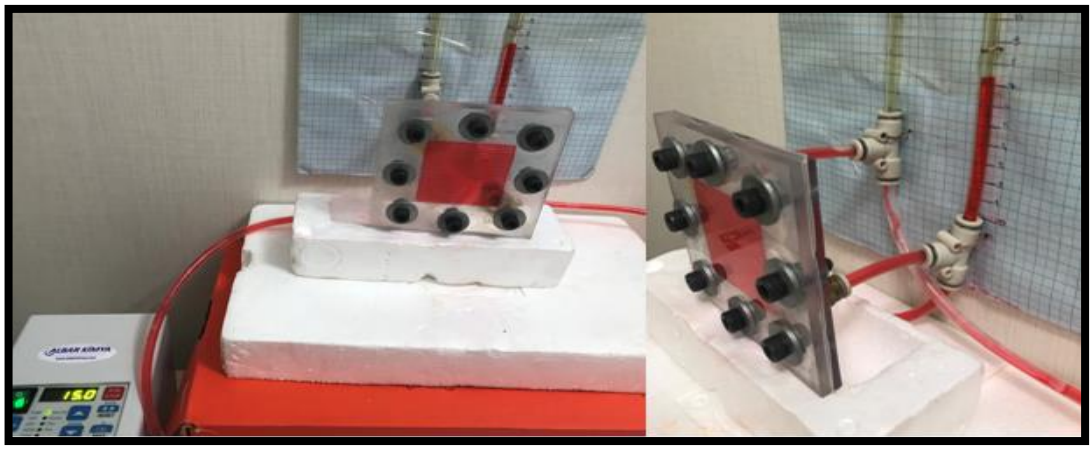
Şekil 5.2. Debi 6 ml/dk iken 1x1x1 paralel akış kanalı



Şekil 5.3. Debi 9 ml/dk iken 1x1x1 paralel akış kanalı



Şekil 5.4. Debi 12 ml/dk iken 1x1x1 paralel akış kanalı

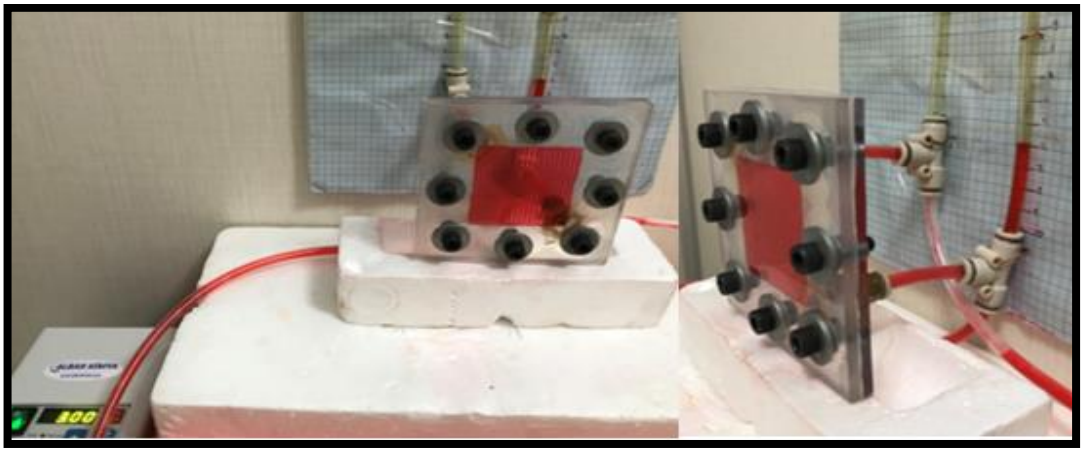


Şekil 5.5. Debi 15 ml/dk iken 1x1x1 paralel akış kanalı

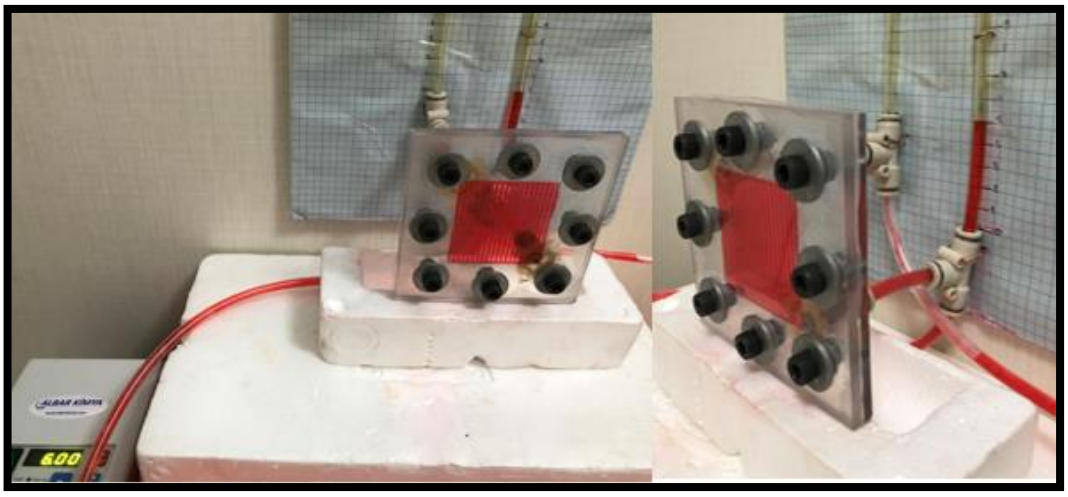
1x1,5x1 paralel akış kanalı için test sırasında borulardan okunan değerlerin görselleri Şekil 5.6, Şekil 5.7., Şekil 5.8., Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'da verilmiş olup, test sonuçları Tablo 5.2.'de gösterilmiştir. Test sonuçlarından 1x1,5x1 paralel akış kanalında basınç düşümünün artan debi ile arttığı görülmüştür.

Tablo 5.2. 1x1,5x1 paralel akış kanalı basınç düşümü sonuçları

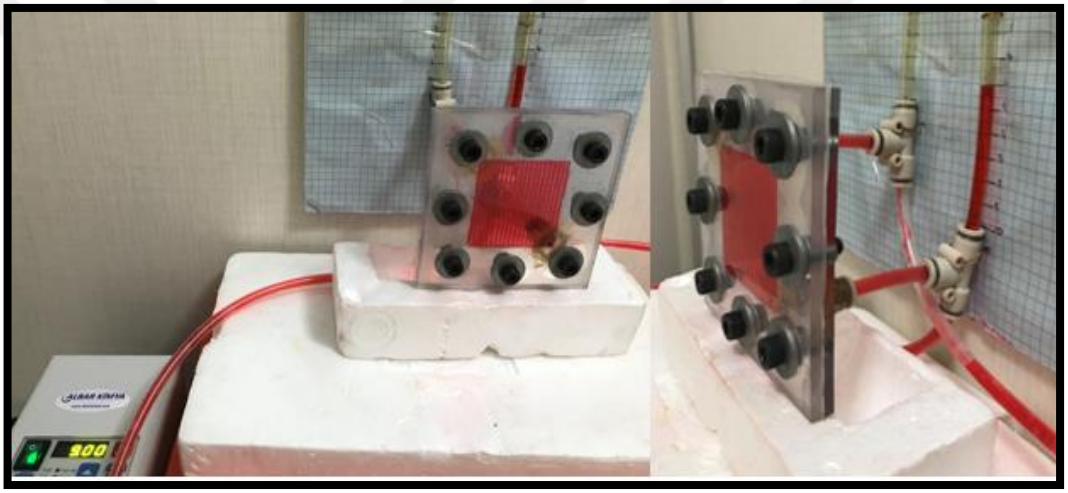
1x1,5x1 PARALEL		
DEBİ (ml/dk)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (cmH_2O)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (Pa)
3	4,2	411,87
6	5,05	495,22
9	6	588,38
12	7	686,45
15	7,7	755,09



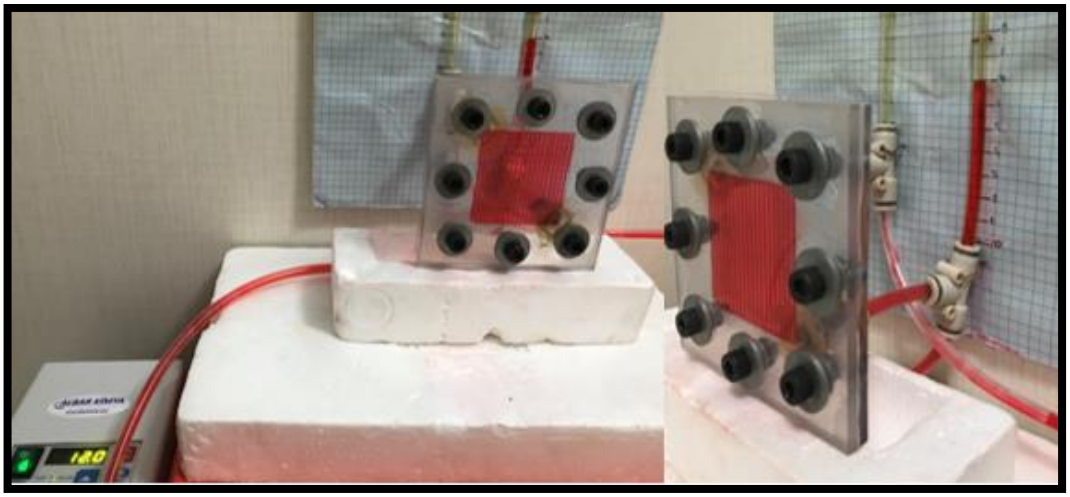
Şekil 5.6. Debi 3 ml/dk iken 1x1,5x1 paralel akış kanalı



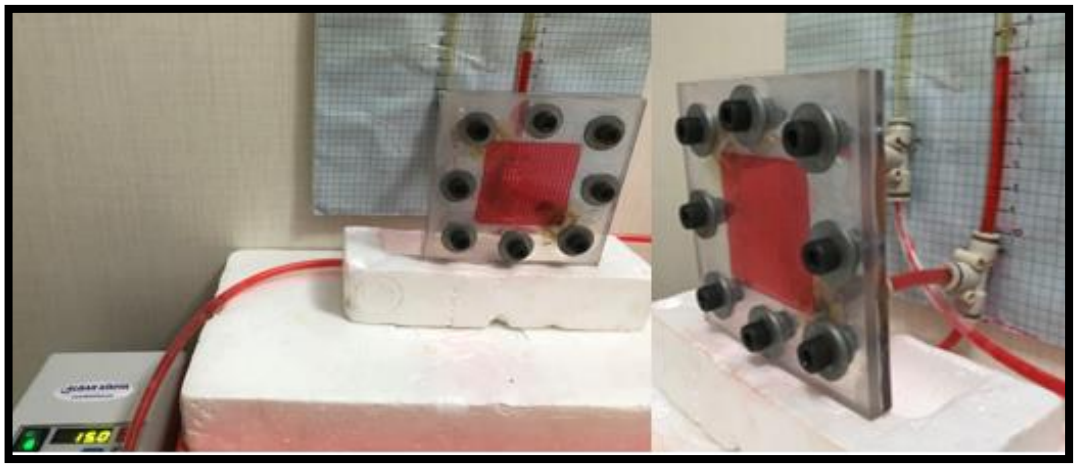
Şekil 5.7. Debi 6 ml/dk iken 1x1,5x1 paralel akış kanalı



Şekil 5.8. Debi 9 ml/dk iken 1x1,5x1 paralel akış kanalı



Şekil 5.9. Debi 12 ml/dk iken 1x1,5x1 paralel akış kanalı

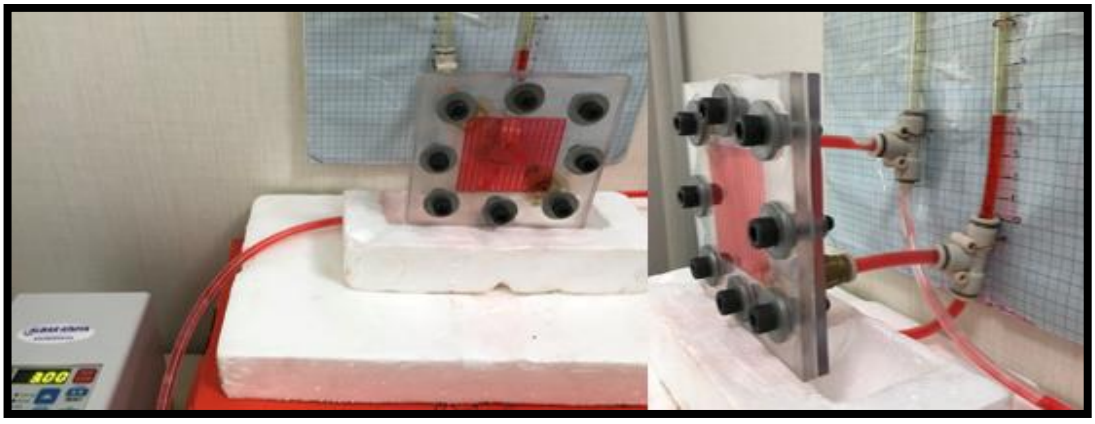


Şekil 5.10. Debi 15 ml/dk iken 1x1,5x1 paralel akış kanalı

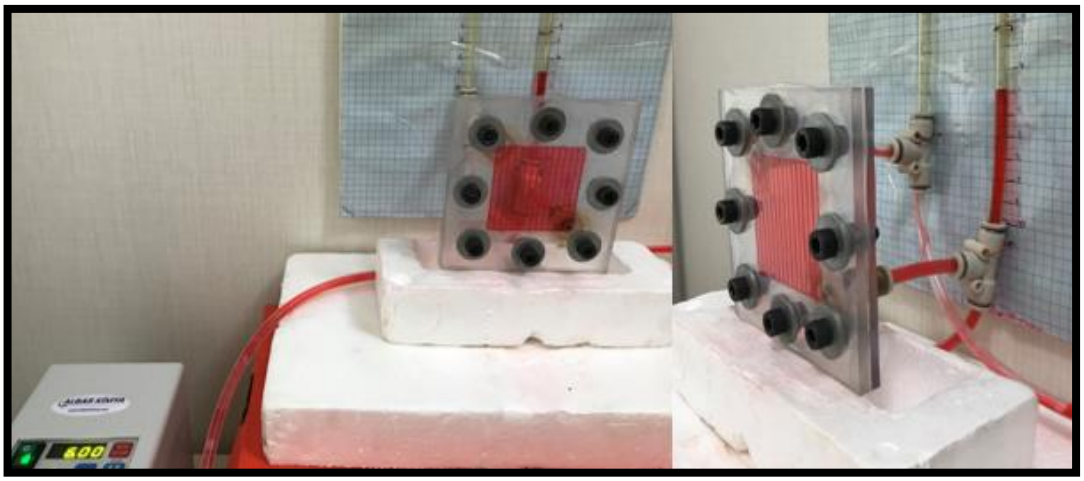
1x2,5x1 paralel akış kanalı için test sırasında borulardan okunan değerlerin görselleri Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te verilmiş olup, test sonuçları Tablo 5.3.'de gösterilmiştir. Test sonuçlarından 1x2,5x1 paralel akış kanalında basınç düşümünün artan debi ile arttığı görülmüştür.

Tablo 5.3. 1x2,5x1 paralel akış kanalı basınç düşümü sonuçları

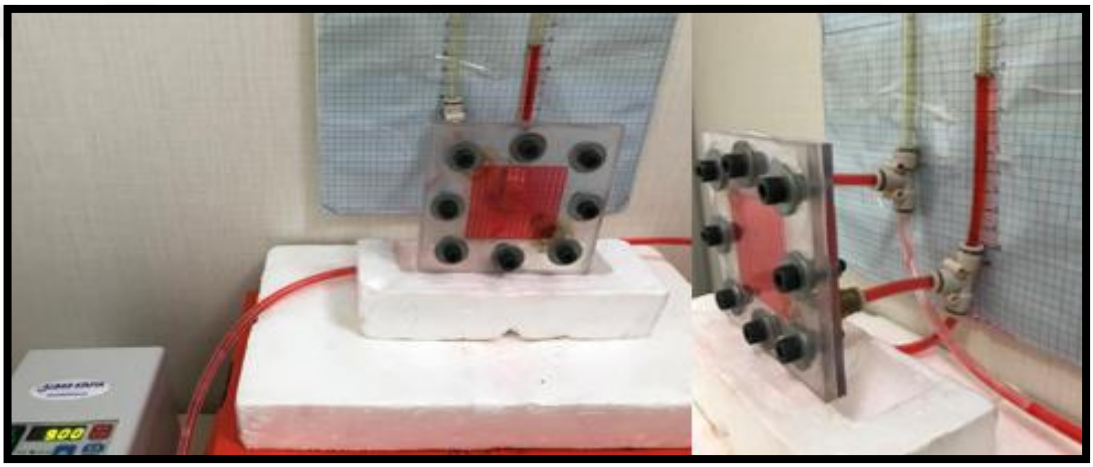
1x2,5x1 PARALEL		
DEBİ (ml/dk)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (cmH_2O)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (Pa)
3	4,8	470,71
6	6,2	608
9	8,7	853,16
12	12,8	1255,22
15	17,55	1721,02



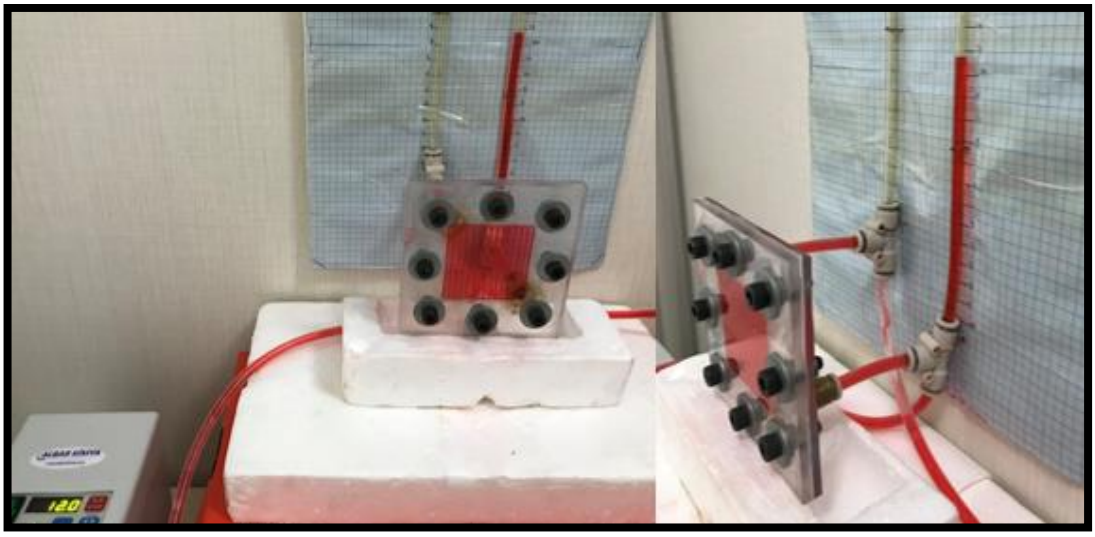
Şekil 5.11. Debi 3 ml/dk iken 1x2,5x1 paralel akış kanalı



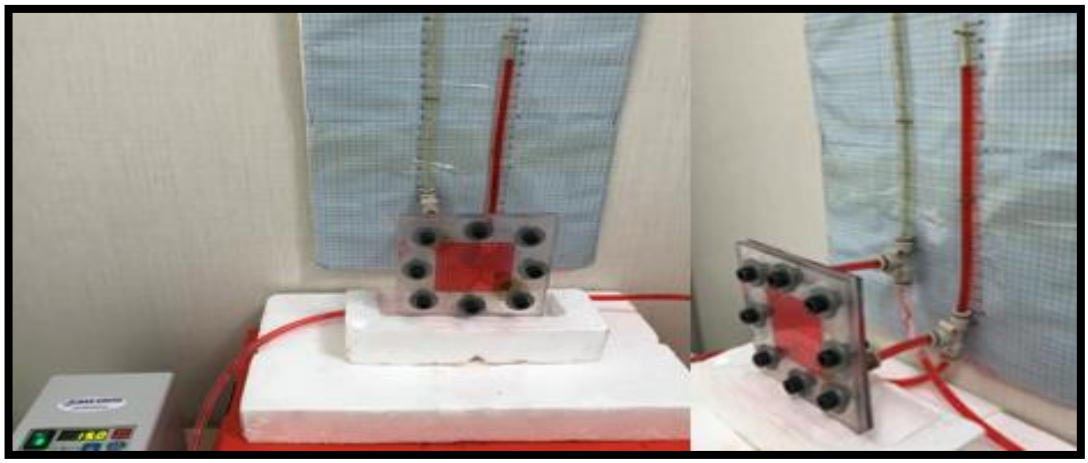
Şekil 5.12. Debi 6 ml/dk iken 1x2,5x1 paralel akış kanalı



Şekil 5.13. Debi 9 ml/dk iken 1x2,5x1 paralel akış kanalı

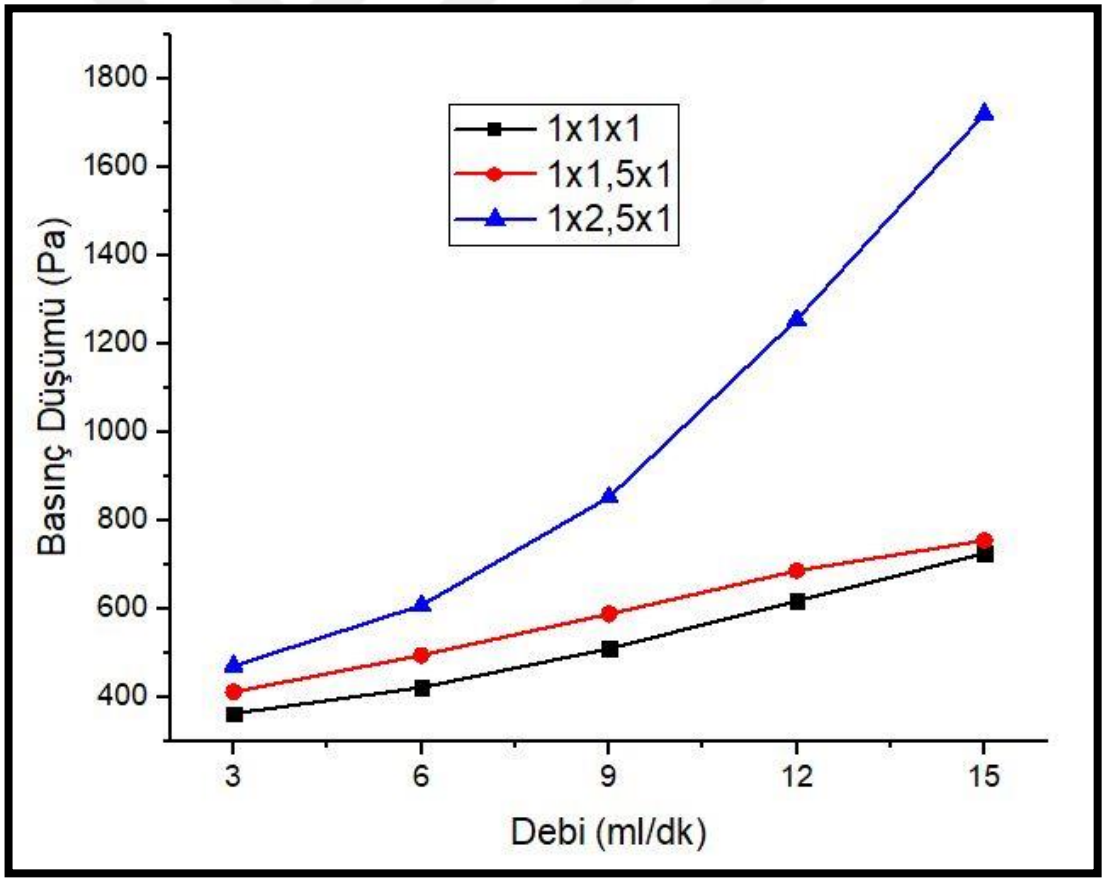


Şekil 5.14. Debi 12 ml/dk iken 1x2,5x1 paralel akış kanalı



Şekil 5.15. Debi 15 ml/dk iken 1x2,5x1 paralel akış kanalı

Paralel akış kanalının her 3 geometrisi için farklı debilerde (3ml/dk, 6 ml/dk, 9ml/dk, 12ml/dk,15ml/dk) elde dilen basınç düşümü sonuçları Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16. Değişen yakıt debisine bağlı paralel akış kanalları basınç düşümü grafiği

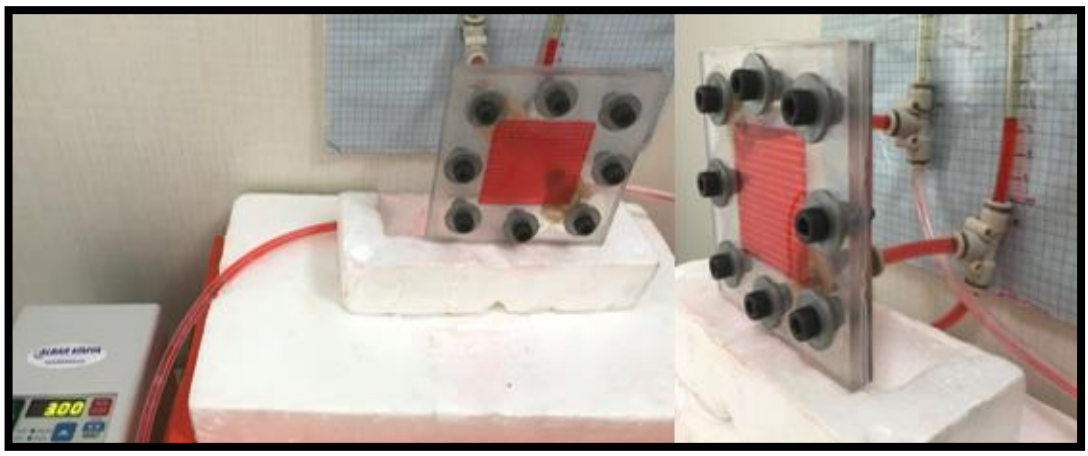
Şekil 5.16.'daki grafikten de görüldüğü gibi paralel akış kanallarının 3 geometrisi için de artan debi ile basınç düşümü artmıştır. Ayrıca paralel akış kanallarında, kanallar arası mesafe arttıkça basınç düşümünün arttığı görülmüştür.

5.2. Serpantin Akış Kanalı Basınç Düşümü Değerleri

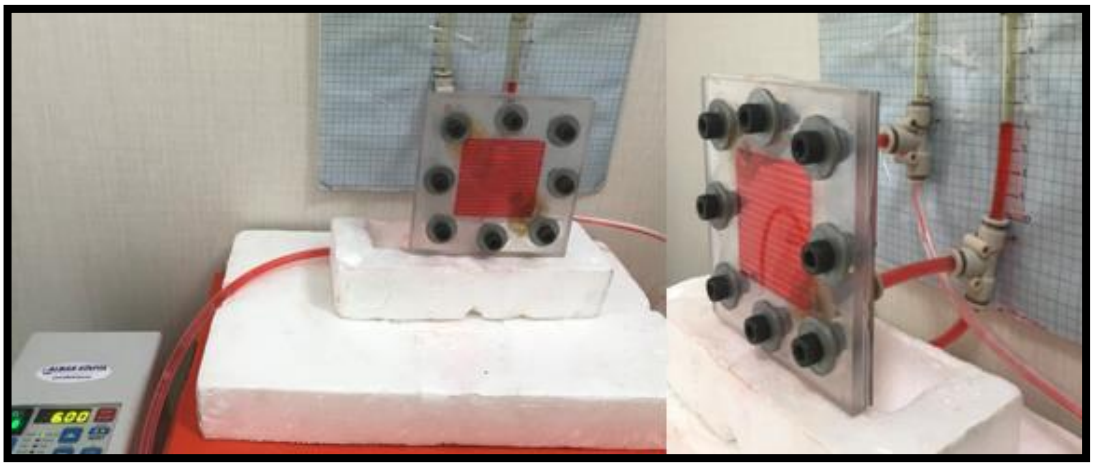
Serpantin akış kanallarının her 3 geometrisi için sırasıyla 3ml/dk, 6 ml/dk, 9ml/dk, 12ml/dk ve 15ml/dk debi de basınç düşümü testi yapıldı. Basınç ölçüm ekipmanının borularından okunan basınç değerleri birimi cmH_2O olup, bu değerler pascala (Pa) dönüştürüldü. 2x1x1 serpantin akış kanalı için test sırasında borulardan okunan değerlerin görselleri Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de verilmiş olup, test sonuçları Tablo 5.4.'de gösterilmiştir. Test sonuçlarından 2x1x1 serpantin akış kanalında basınç düşümünün artan debi ile arttığı görülmüştür.

Tablo 5.4. 2x1x1 serpantin akış kanalı basınç düşümü sonuçları

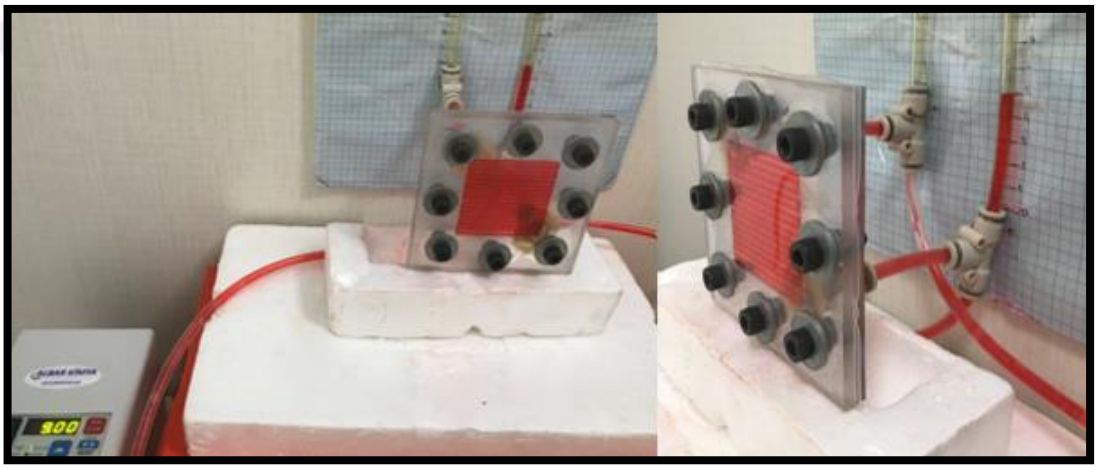
2x1x1 SERPANTİN		
DEBİ (ml/dk)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (cmH_2O)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (Pa)
3	3,5	343,22
6	4,1	402,06
9	4,95	485,42
12	5,6	549,16
15	6,4	627,61



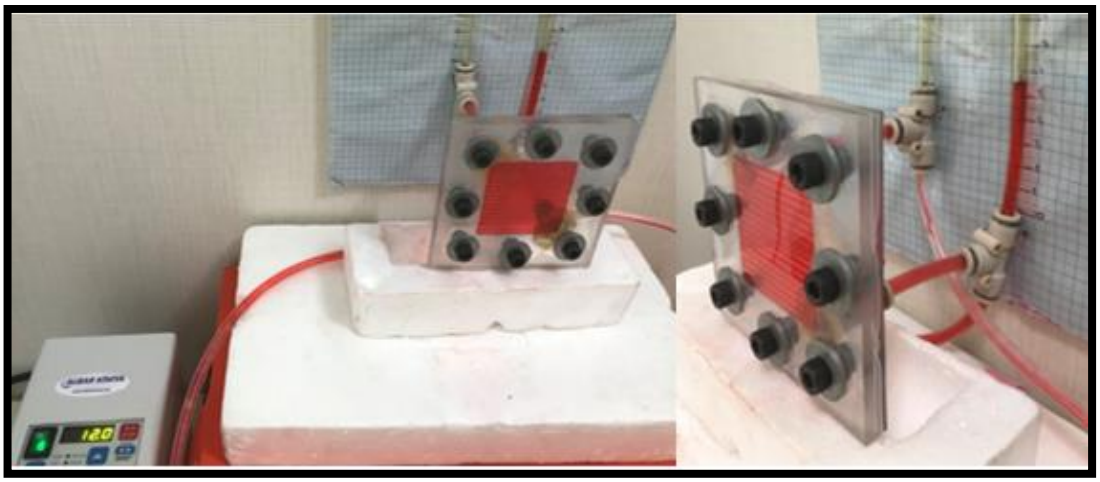
Şekil 5.17. Debi 3 ml/dk iken 2x1x1 serpantin akış kanalı



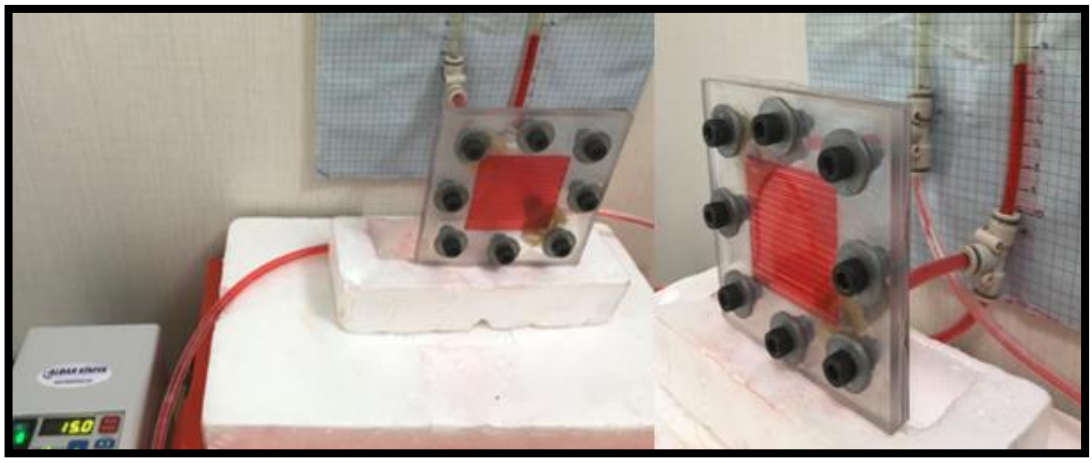
Şekil 5.18. Debi 6 ml/dk iken 2x1x1 serpantin akış kanalı



Şekil 5.19. Debi 9 ml/dk iken 2x1x1 serpantin akış kanalı



Şekil 5.20. Debi 12 ml/dk iken 2x1x1 serpantin akış kanalı

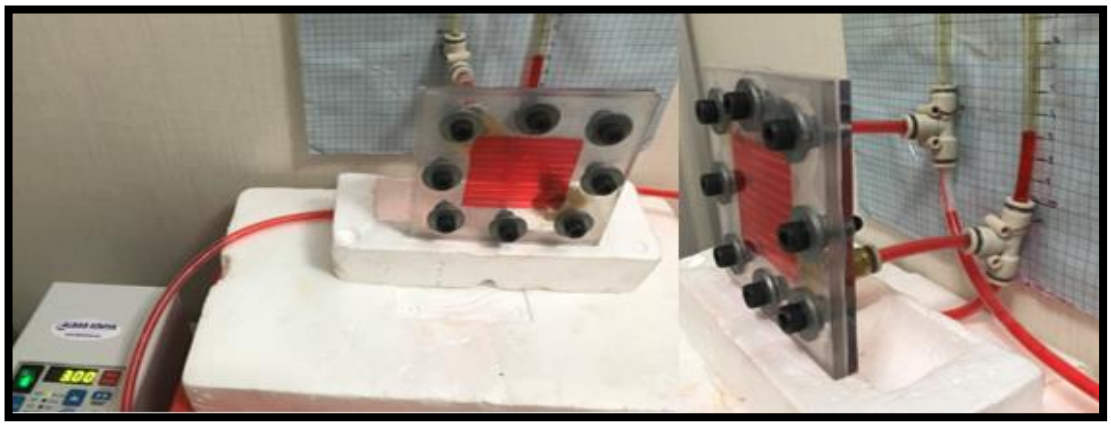


Şekil 5.21. Debi 15 ml/dk iken 2x1x1 serpantin akış kanalı

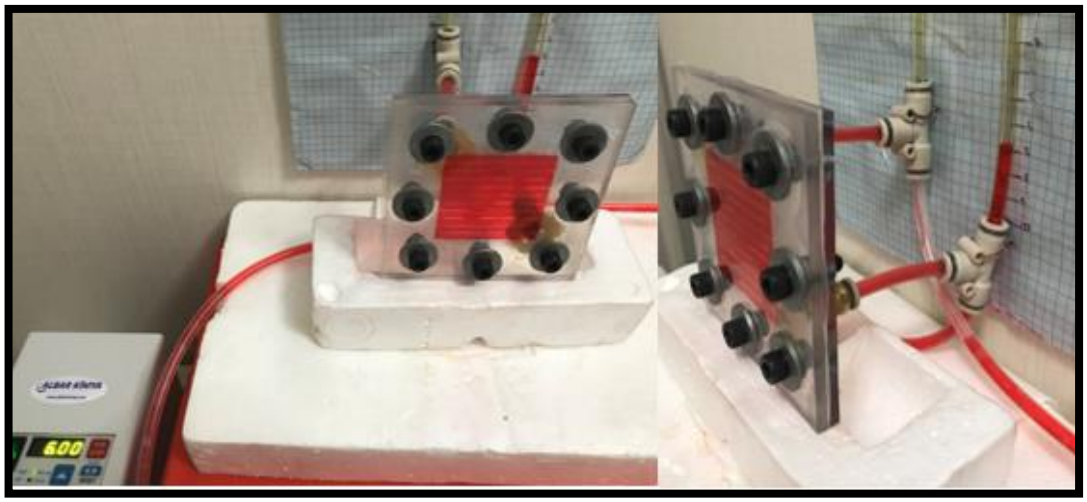
3x1,5x1 serpantin akış kanalı için test sırasında borulardan okunan değerlerin görselleri Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da verilmiş olup, test sonuçları Tablo 5.5.'te gösterilmiştir. Test sonuçlarından 3x1,5x1 serpantin akış kanalında basınç düşümünün artan debi ile arttığı görülmüştür.

Tablo 5.5. 3x1,5x1 serpantin akış kanalı basınç düşümü sonuçları

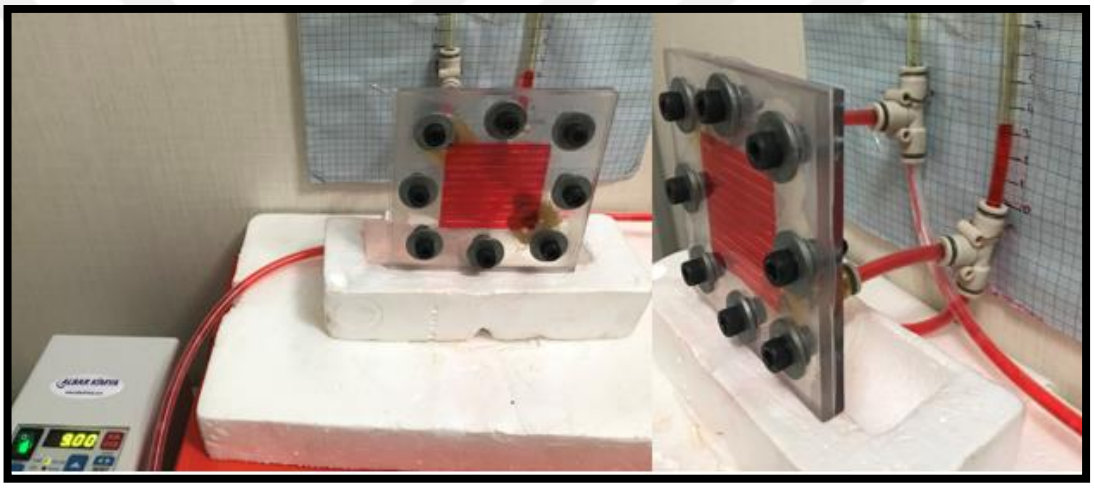
3x1,5x1 SERPANTİN		
DEBİ (ml/dk)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (cmH_2O)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (Pa)
3	3,2	313,8
6	3,25	318,71
9	3,35	328,51
12	3,5	343,22
15	3,7	363,84



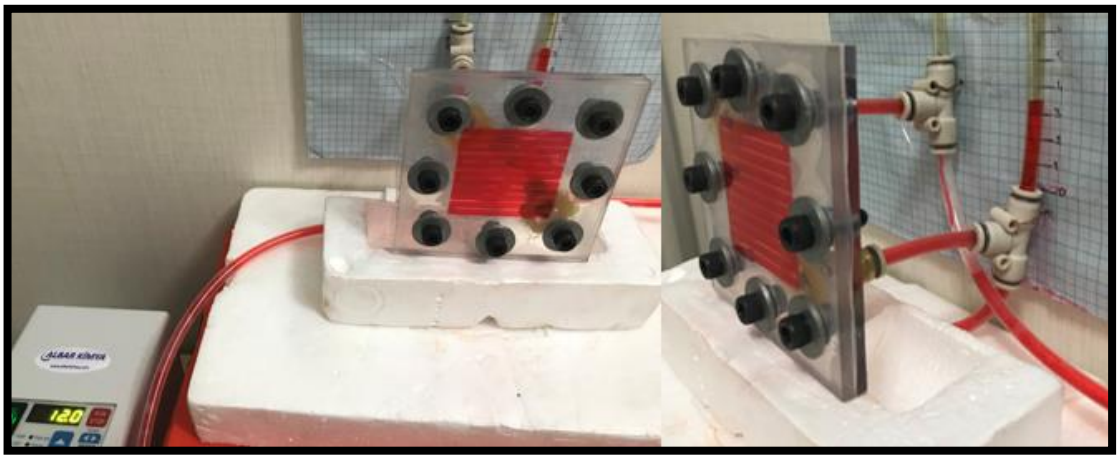
Şekil 5.22. Debi 3 ml/dk iken 3x1,5x1 serpantin akış kanalı



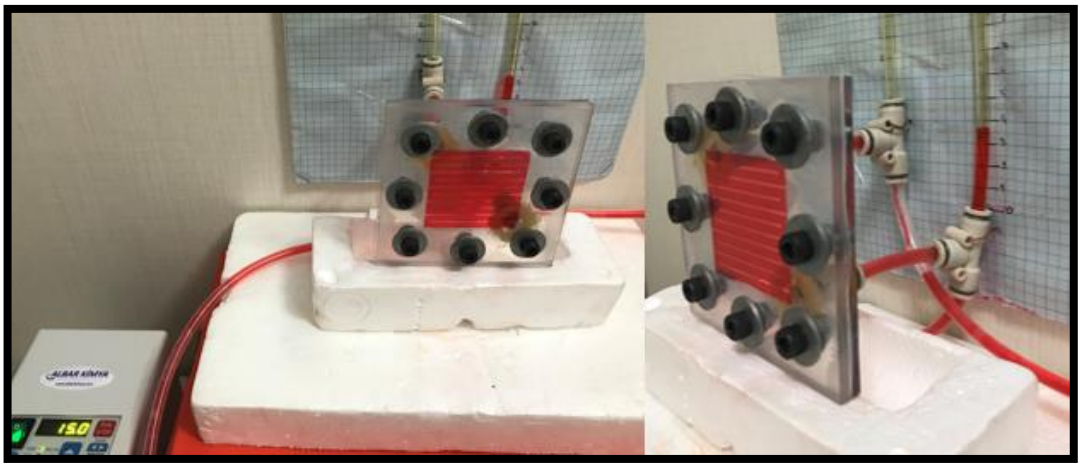
Şekil 5.23. Debi 6 ml/dk iken 3x1,5x1 serpantin akış kanalı



Şekil 5.24. Debi 9 ml/dk iken 3x1,5x1 serpantin akış kanalı



Şekil 5.25. Debi 12 ml/dk iken 3x1,5x1 serpantin akış kanalı

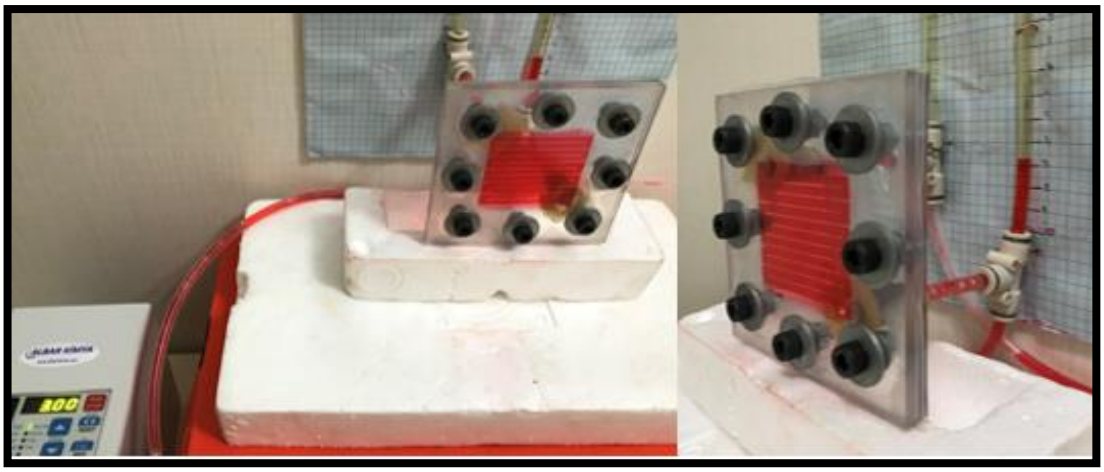


Şekil 5.26. Debi 15 ml/dk iken 3x1,5x1 serpantin akış kanalı

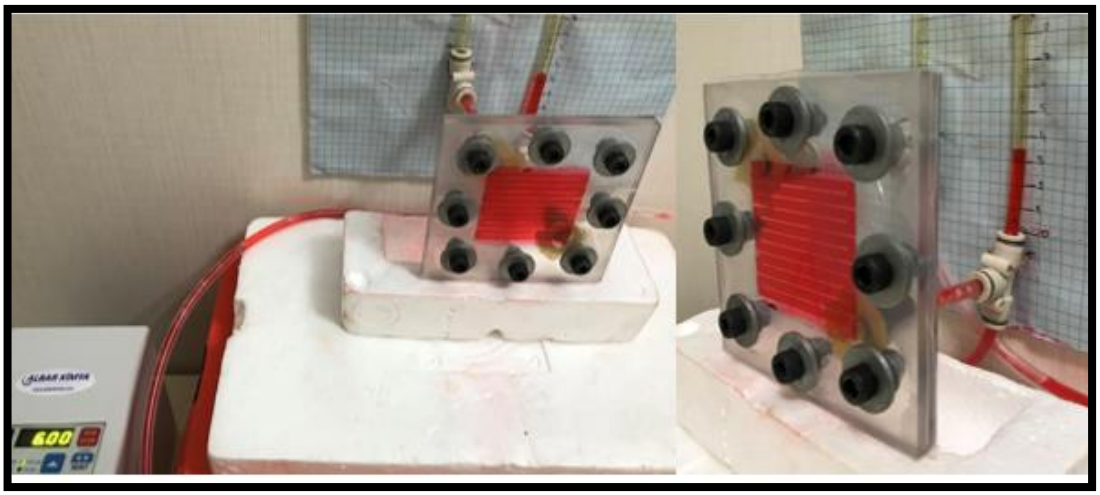
3x1x1 serpantin akış kanalı için test sırasında borulardan okunan değerlerin görselleri Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de verilmiş olup, test sonuçları Tablo 5.6.'da gösterilmiştir. Test sonuçlarından 3x1x1 serpantin akış kanalında basınç düşümünün artan debi ile arttığı görülmüştür.

Tablo 5.6. 3x1x1 serpantin akış kanalı basınç düşümü sonuçları

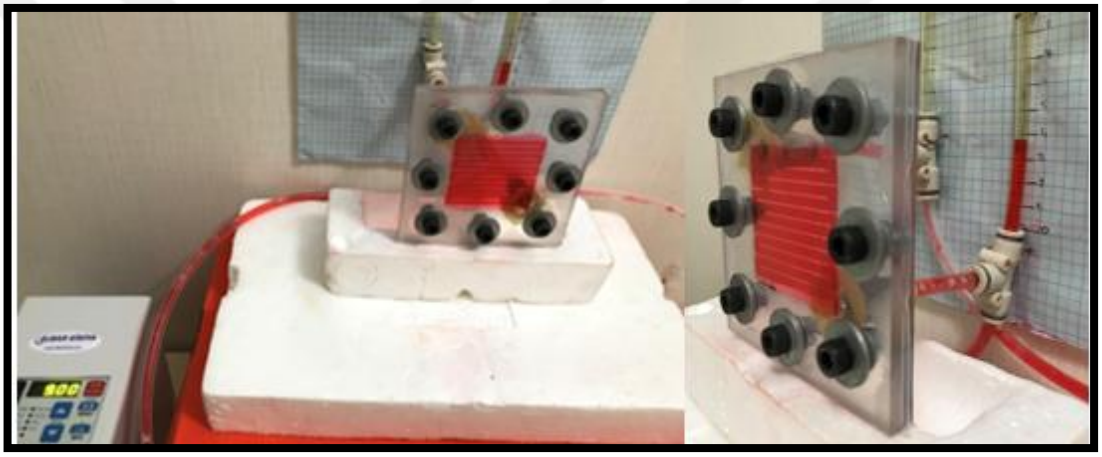
3x1x1 SERPANTİN		
DEBİ (ml/dk)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (cmH_2O)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (Pa)
3	3,3	323,61
6	3,5	343,22
9	3,8	372,64
12	3,95	387,35
15	4,15	406,96



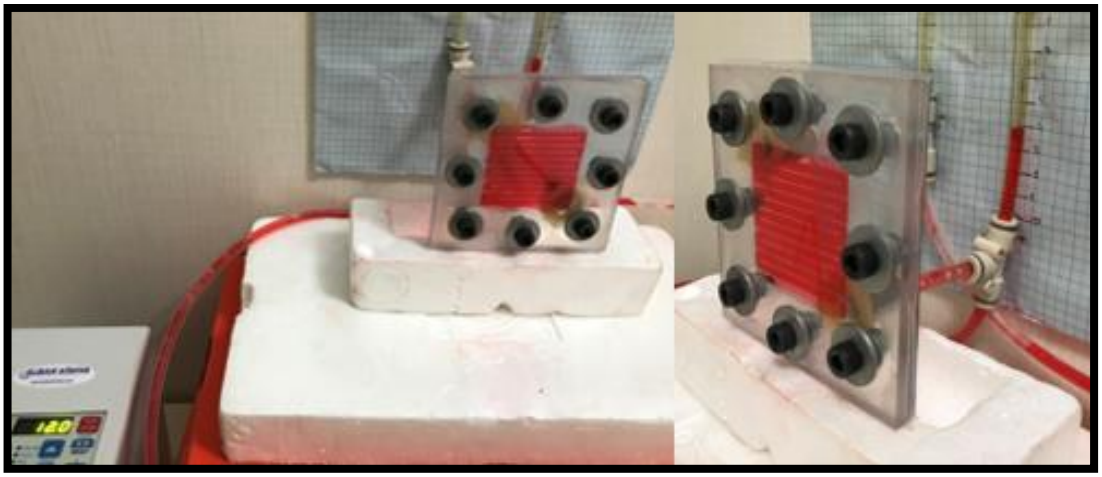
Şekil 5.27. Debi 3 ml/dk iken 3x1x1 serpantin akış kanalı



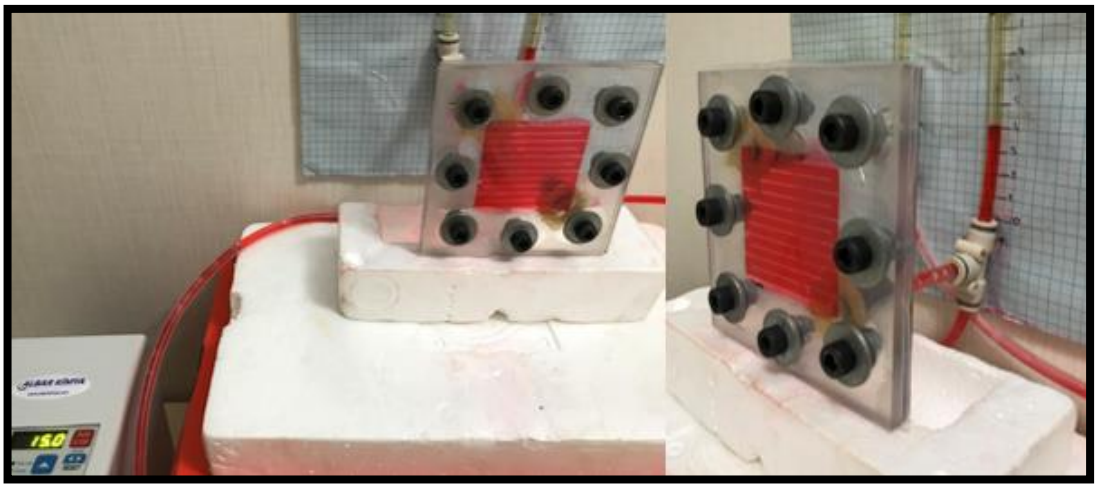
Şekil 5.28. Debi 6 ml/dk iken 3x1x1 serpantin akış kanalı



Şekil 5.29. Debi 9 ml/dk iken 3x1x1 serpantin akış kanalı

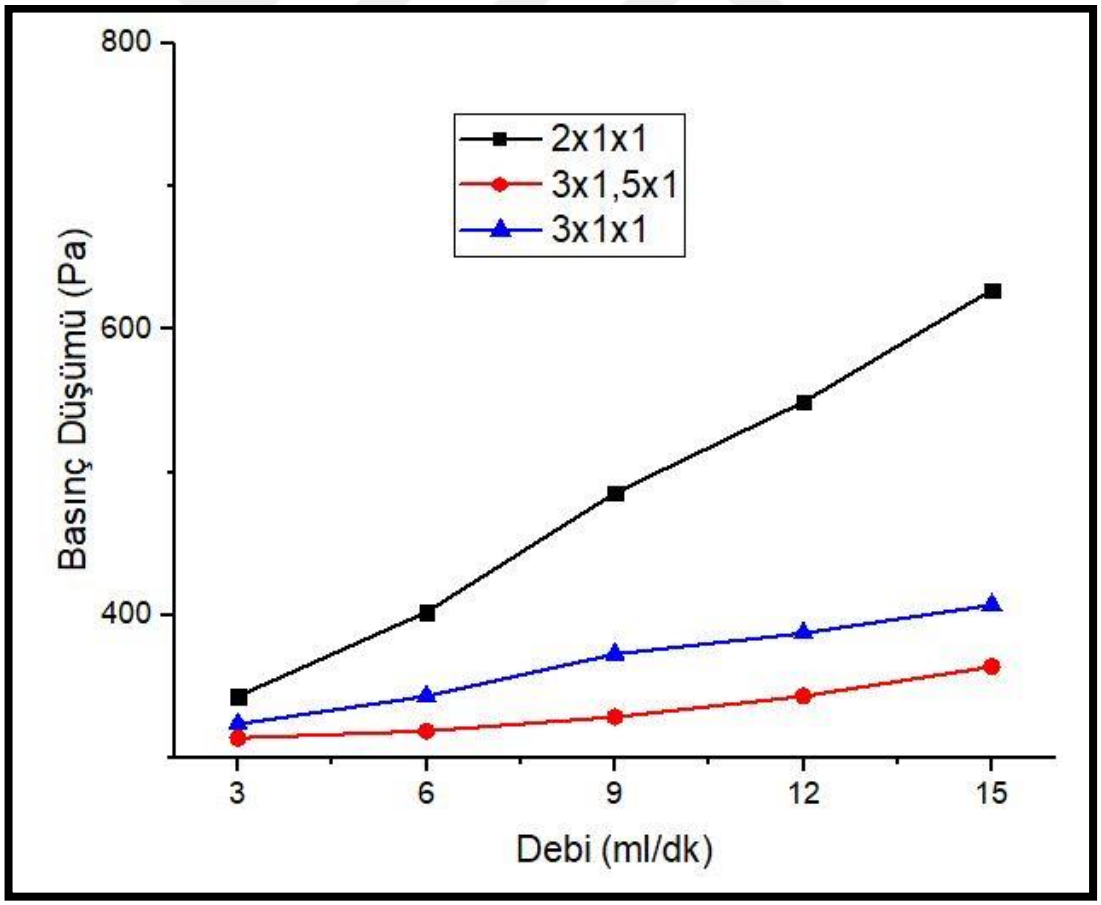


Şekil 5.30. Debi 12 ml/dk iken 3x1x1 serpantin akış kanalı



Şekil 5.31. Debi 15 ml/dk iken 3x1x1 serpantin akış kanalı

Serpantin akış kanalının her 3 geometrisi için farklı debilerde (3ml/dk, 6 ml/dk, 9ml/dk, 12ml/dk,15ml/dk) elde dilen basınç düşümü sonuçları Şekil 5.32'de verilmiştir.



Şekil 5.32. Değişen yakıt debisine bağlı serpantin akış kanalları basınç düşümü grafiği

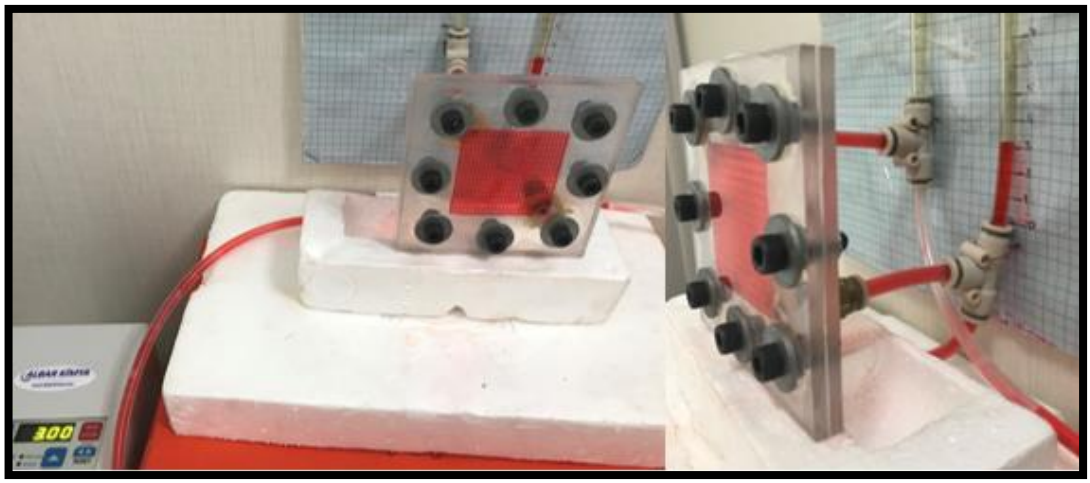
Şekil 5.32.'deki grafikten de görüldüğü gibi serpantin akış kanallarının 3 geometrisi için de artan debi ile basınç düşümü artmıştır. Ayrıca serpantin akış kanallarından 2x1x1 ile 3x1x1 geometrilerini karşılaştırdığımızda kanal genişliğinin azalması ile basınç düşümünde belirgin bir artış görülmüştür. 3x1,5x1 ve 3x1x1 geometrilerini karşılaştırdığımızda ise kanallar arası mesafenin azalması ile basınç düşümünün arttığı görülmüştür. Bu veriler ışığında serpantin akış kanallarında, kanal genişliği ve kanallar arası mesafe parametrelerini incelediğimizde, kanal genişliğinin basınç düşümü üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu görülmüştür.

5.3. Pin Akış Kanalı Basınç Düşümü Değerleri

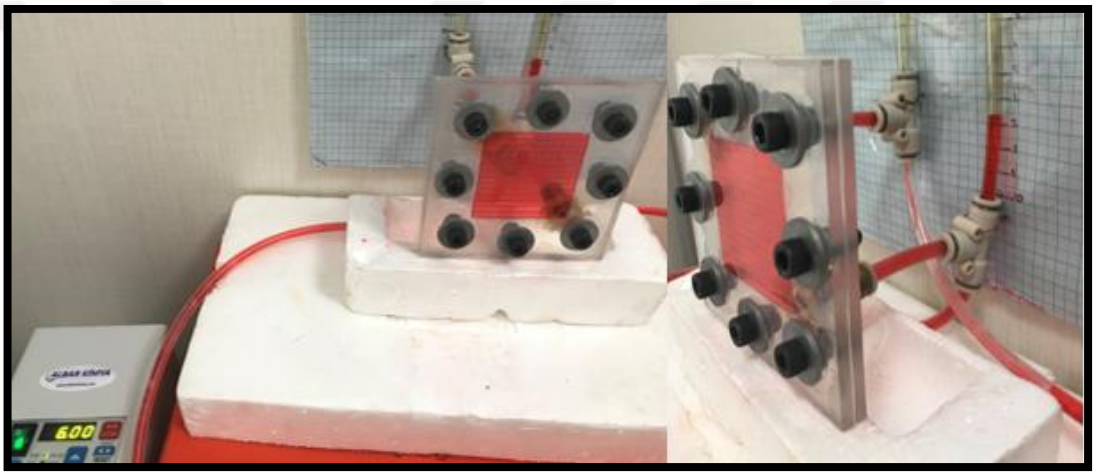
Pin akış kanallarının her 3 geometrisi için sırasıyla 3ml/dk, 6 ml/dk, 9ml/dk, 12ml/dk ve 15ml/dk debi de basınç düşümü testi yapıldı. Basınç ölçüm ekipmanının borularından okunan basınç değerleri birimi cmH_2O olup, bu değerler pascala (Pa) dönüştürüldü. 2,5x1x1 pin akış kanalı için test sırasında borulardan okunan değerlerin görselleri Şekil 5.33, Şekil 5.34, Şekil 5.35, Şekil 5.36 ve Şekil 5.37'de verilmiş olup, test sonuçları Tablo 5.7.'de gösterilmiştir. Test sonuçlarından 2,5x1x1 pin akış kanalında basınç düşümünün artan debi ile arttığı görülmüştür.

Tablo 5.7. 2,5x1x1 pin akış kanalı basınç düşümü sonuçları

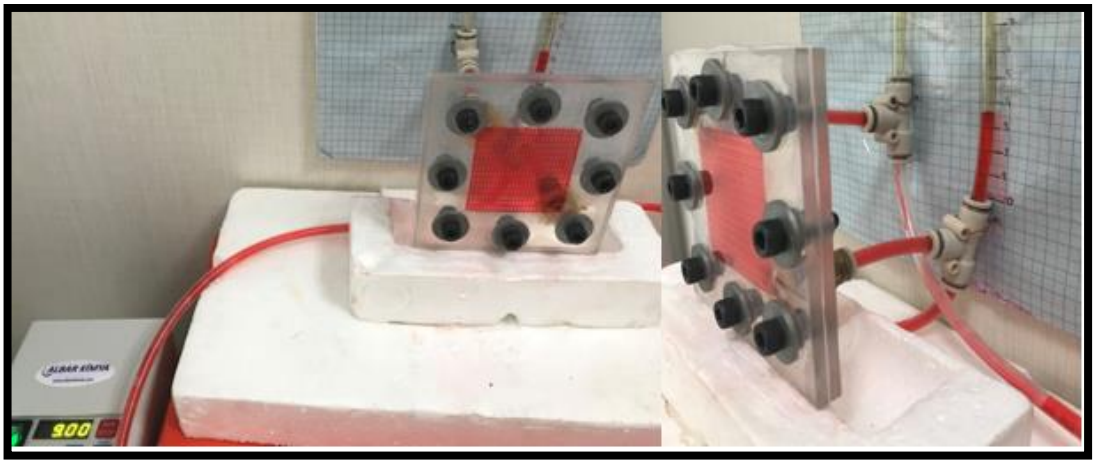
2,5x1x1 PİN		
DEBİ (ml/dk)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (cmH_2O)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (Pa)
3	3,2	313,8
6	3,4	333,42
9	3,6	353,03
12	4	392,26
15	4,5	441,29



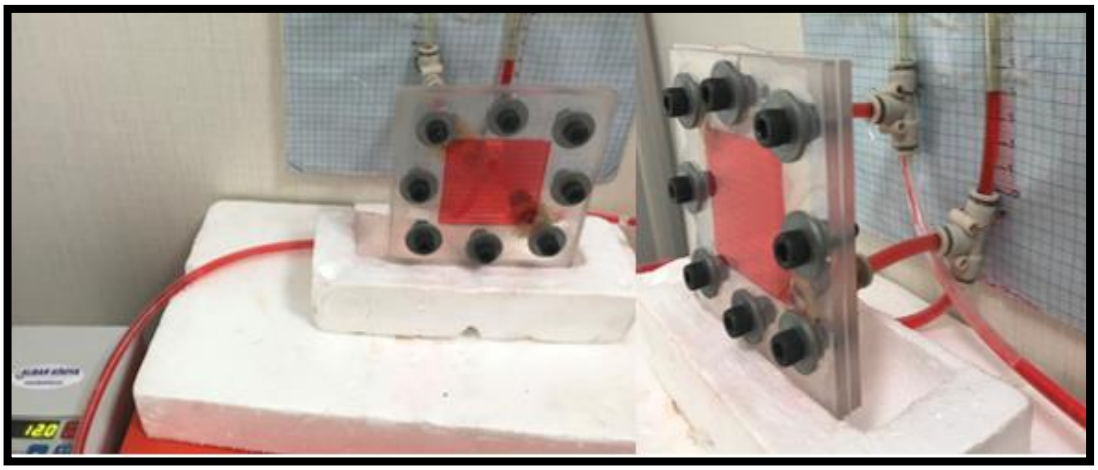
Şekil 5.33. Debi 3 ml/dk iken 2,5x1x1 pin akış kanalı



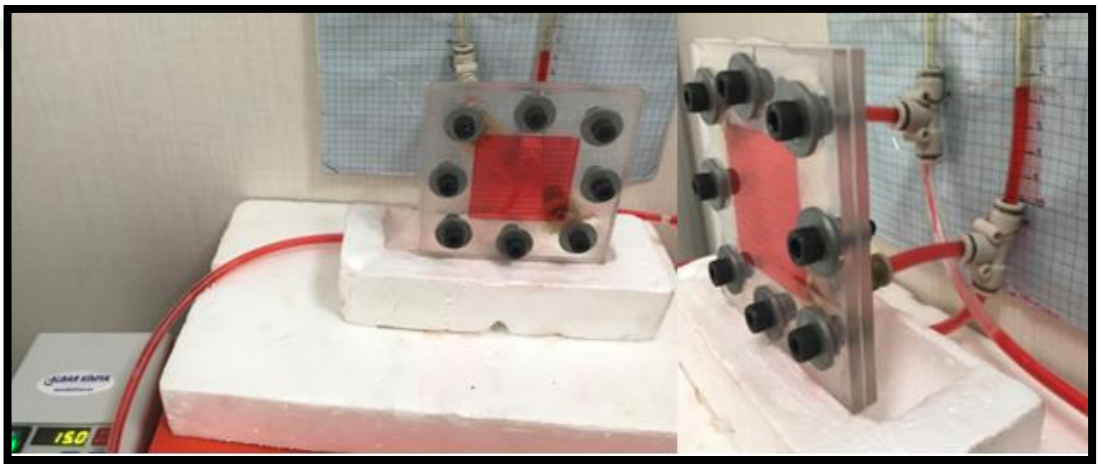
Şekil 5.34. Debi 6 ml/dk iken 2,5x1x1 pin akış kanalı



Şekil 5.35. Debi 9 ml/dk iken 2,5x1x1 pin akış kanalı



Şekil 5.36. Debi 12 ml/dk iken 2,5x1x1 pin akış kanalı

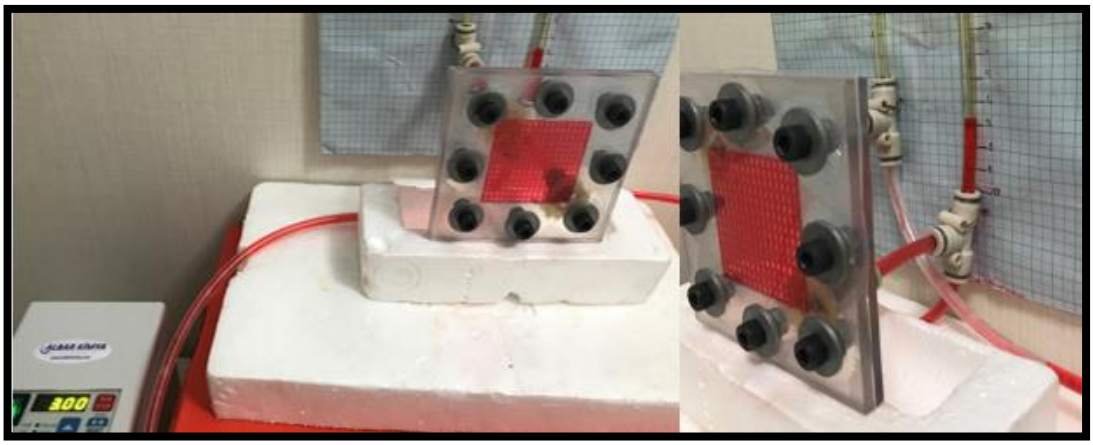


Şekil 5.37. Debi 15 ml/dk iken 2,5x1x1 pin akış kanalı

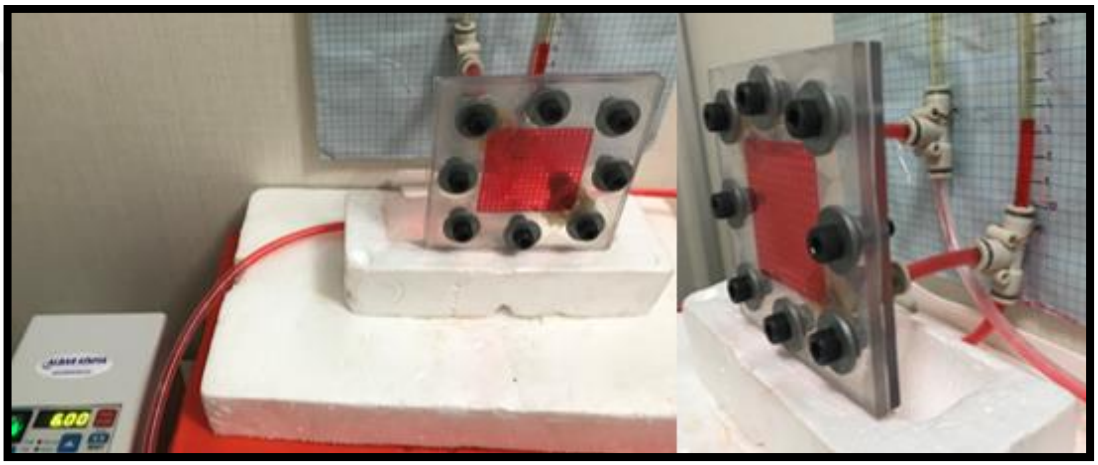
2x2,5x1 pin akış kanalı için test sırasında borulardan okunan değerlerin görselleri Şekil 5.38, Şekil 5.39, Şekil 5.40, Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'de verilmiş olup, test sonuçları Tablo 5.8.'de gösterilmiştir. Test sonuçlarından 2x2,5x1 pin akış kanalında basınç düşümünün artan debi ile arttığı görülmüştür.

Tablo 5.8. 2x2,5x1 pin akış kanalı basınç düşümü sonuçları

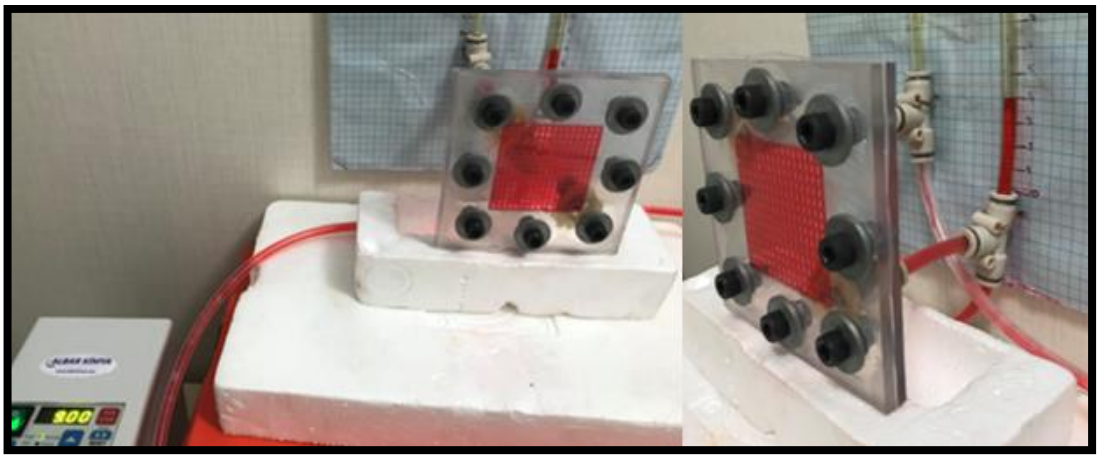
2x2,5x1 PİN		
DEBİ (ml/dk)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (cmH_2O)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (Pa)
3	3,3	323,61
6	3,6	353,03
9	4	392,26
12	4,4	431,48
15	4,95	485,42



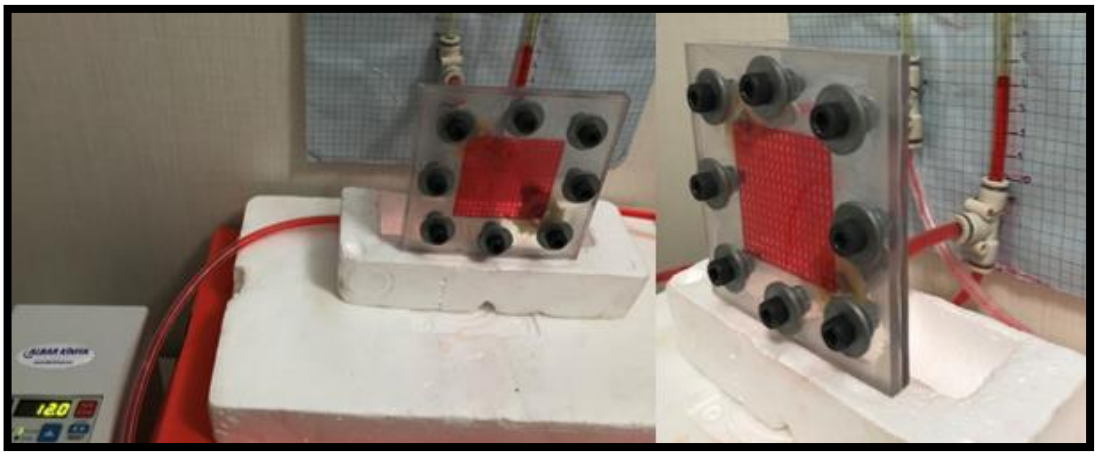
Şekil 5.38. Debi 3 ml/dk iken 2x2,5x1 pin akış kanalı



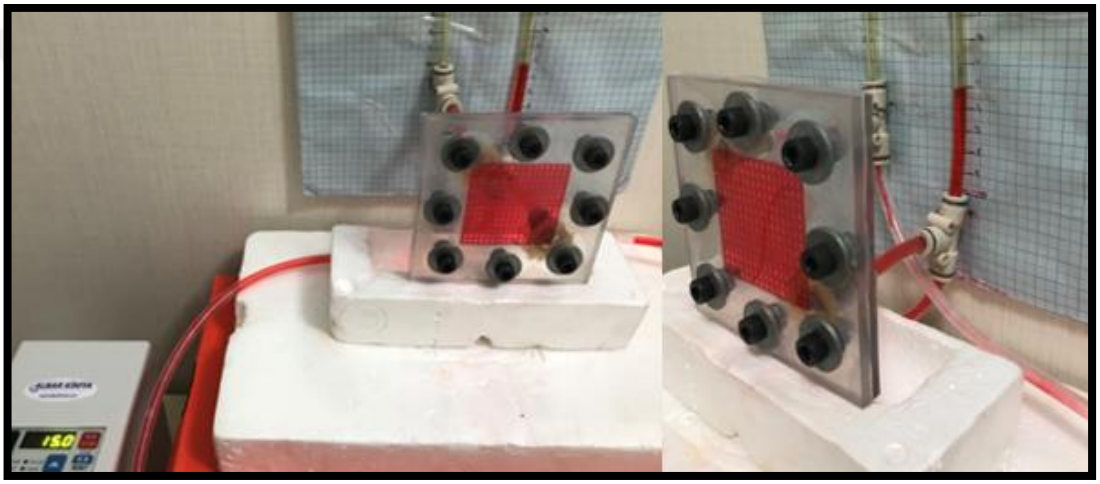
Şekil 5.39. Debi 6 ml/dk iken 2x2,5x1 pin akış kanalı



Şekil 5.40. Debi 9 ml/dk iken 2x2,5x1 pin akış kanalı



Şekil 5.41. Debi 12 ml/dk iken 2x2,5x1 pin akış kanalı

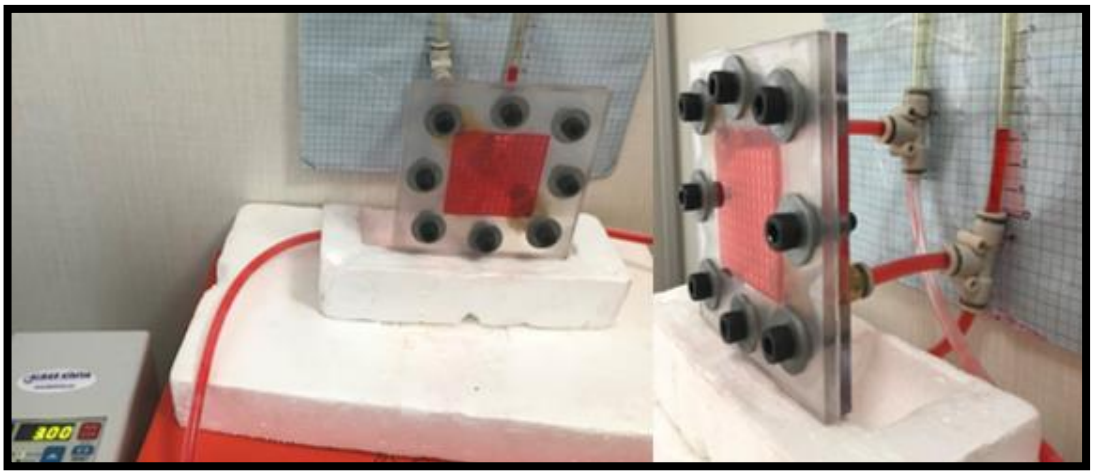


Şekil 5.42. Debi 15 ml/dk iken 2x2,5x1 pin akış kanalı

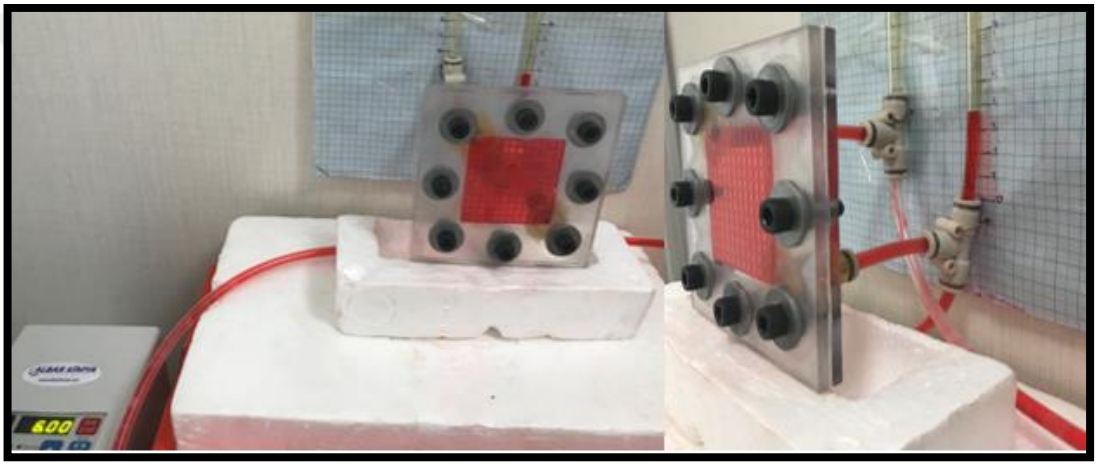
3x3x1 pin akış kanalı için test sırasında borulardan okunan değerlerin görselleri Şekil 5.43, Şekil 5.44, Şekil 5.45, Şekil 5.46 ve Şekil 5.47'de verilmiş olup, test sonuçları Tablo 5.9.'da gösterilmiştir. Test sonuçlarından 3x3x1 pin akış kanalında basınç düşümünün artan debi ile arttığı görülmüştür.

Tablo 5.9. 3x3x1 pin akış kanalı basınç düşümü sonuçları

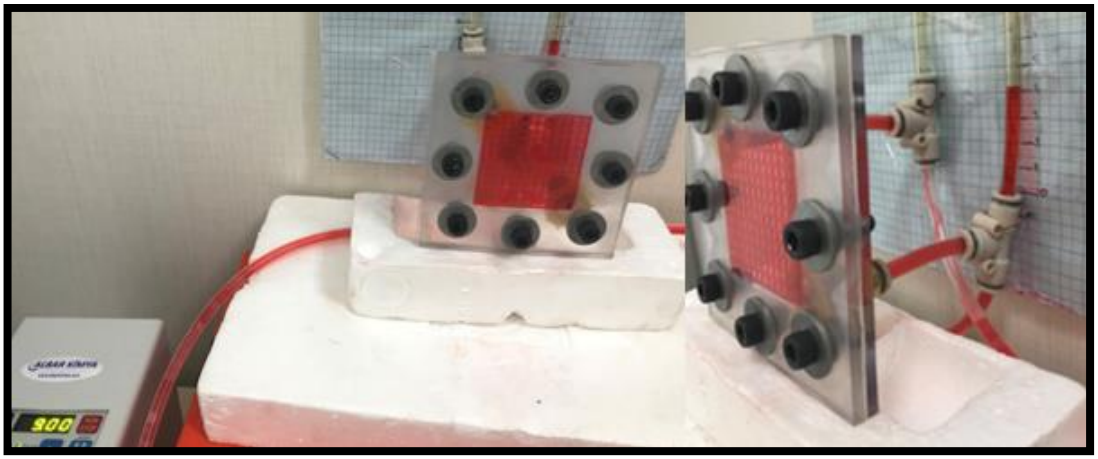
3x3x1 PİN		
DEBİ (ml/dk)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (cmH_2O)	BASINÇ DÜŞÜMÜ (Pa)
3	3,4	333,42
6	3,8	372,64
9	4,2	411,87
12	4,5	441,29
15	5	490,32



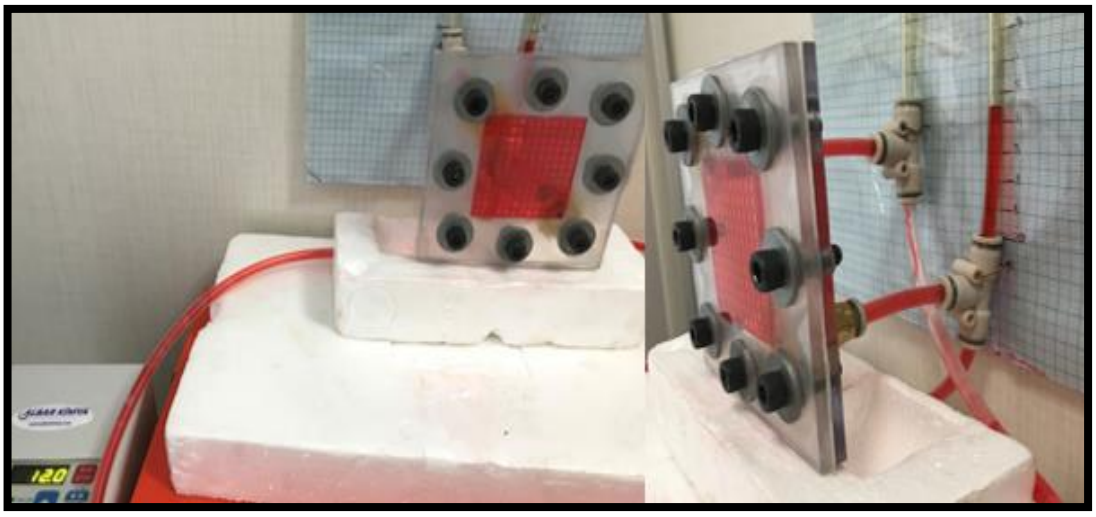
Şekil 5.43. Debi 3 ml/dk iken 3x3x1 pin akış kanalı



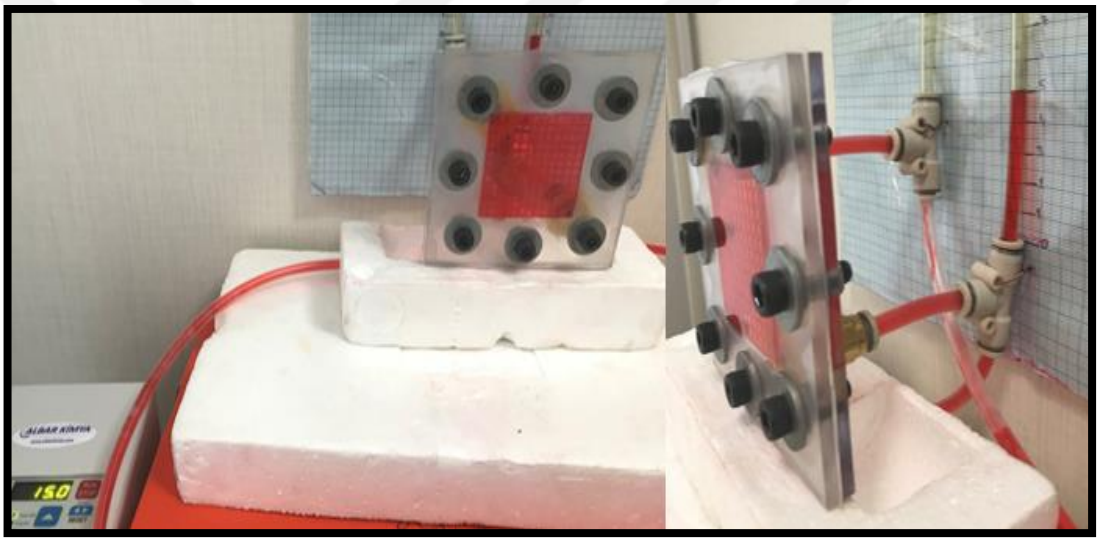
Şekil 5.44. Debi 6 ml/dk iken 3x3x1 pin akış kanalı



Şekil 5.45. Debi 9 ml/dk iken 3x3x1 pin akış kanalı



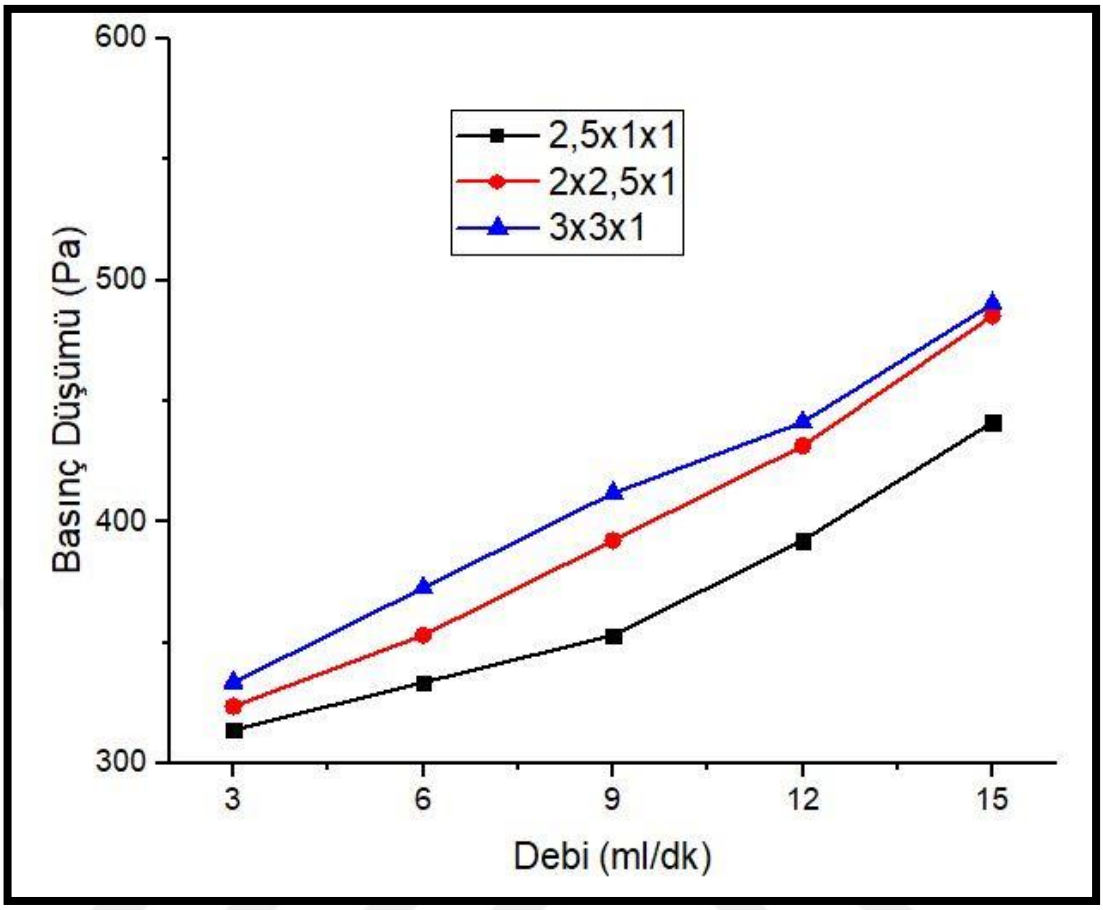
Şekil 5.46. Debi 12 ml/dk iken 3x3x1 pin akış kanalı



Şekil 5.47. Debi 15 ml/dk iken 3x3x1 pin akış kanalı

Pin akış kanalının her 3 geometrisi için farklı debilerde (3 ml/dk, 6 ml/dk, 9 ml/dk, 12 ml/dk, 15 ml/dk) elde dilen basınç düşümü sonuçları Şekil 5.48'de verilmiştir.

Şekil 5.48.'deki grafikten de görüldüğü gibi pin akış kanallarının 3 geometrisi için de artan debi ile basınç düşümü artmıştır. Bununla birlikte %66,4'lük bir oranla içlerinden en yüksek akış alanı oranına sahip 2,5x1x1 akış kanalı geometrisinde basınç düşümü en düşük iken, % 48.16'lık bir oranla içlerinden en düşük akış alanı oranına sahip 3x3x1 akış kanalı geometrisinde basınç düşümü en fazla görülmüştür. Bu veriler ışığında, pin akış kanallarında akış alanı oranı arttıkça basınç düşümünün azaldığı görülmüştür.

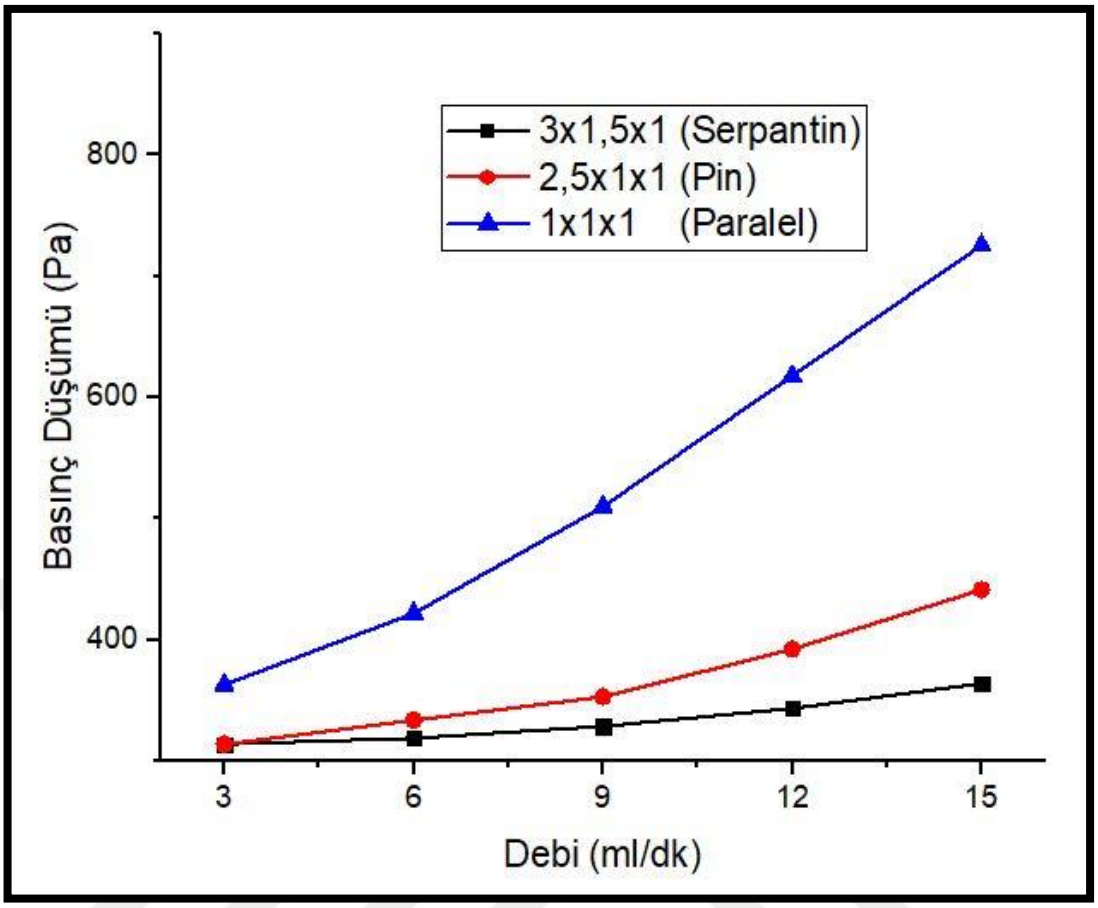


Şekil 5.48. Değişen yakıt debisine bağlı pin akış kanalları basınç düşümü grafiği

5.4. Akış Alanı Oranlarına Göre Kanal Tiplerinin Basınç Düşümü Değerlerinin Karşılaştırılması

Deneysel çalışmada ölçümleri yapılan paralel, serpantin ve pin tip akış kanallarından basınç düşümü değeri en düşük olan 1x1x1 paralel, 3x1,5x1 serpantin ve 2,5x1x1 pin tip akış kanalları, akış alanı oranlarına göre karşılaştırıldı. Bu 3 akış kanalı geometrisi için basınç düşümü değerleri Şekil 5.49'da verilmiştir.

Şekil 5.49'daki grafikten de görüldüğü gibi akış alanı oranı arttıkça basınç düşümü azalmıştır. En yüksek basınç düşümü değerini %51,6 akış alanı oranına sahip 1x1x1 paralel akış kanalı göstermiş olup, en düşük basınç düşümünü %68,04 akış alanı oranına sahip 3x1,5x1 serpantin akış kanalı göstermiştir. Akış alanı oranı %66,4 olan 2,5x1x1 pin akış kanalı, yakıt debisi 3 ml/dk iken 3x1,5x1 serpantin akış kanalı ile basınç düşümü değerleri aynıdır ancak artan debi ile birlikte basınç düşümü de artarak değişmiştir. Akış alanı oranları birbirlerine yakın olan serpantin ve pin akış kanallarında basınç düşümü değerlerinin de birbirine yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 5.49. Farklı kanal tiplerinin basınç düşümü değerleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada doğrudan borhidrürlü yakıt pilleri için farklı geometrilerde akış kanalları oluşturulmuş ve oluşturulan akış kanallarına belirli debilerde yakıt verilerek basınç düşümü davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışmada farklı geometride 3 adet pin, 3 adet serpantin ve 3 adet paralel tip akış kanalı oluşturulmuştur. Oluşturulan kanallar 3 ml/dk, 6 ml/dk, 9 ml/dk, 12 ml/dk ve 15 ml/dk olmak üzere 5 farklı debide sabit oda koşullarında test edilmiştir.

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Paralel tip akış kanallarında artan kanal arası mesafe ile basınç düşümünün arttığı görülmüştür.
- Serpantin tip akış kanallarında kanal genişliği ve kanallar arası mesafenin azalması basınç düşümünü arttırırken, kanal genişliğinin basınç düşümü üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu görülmüştür.
- Pin tip akış kanallarında artan akış alanı oranı ile basınç düşümü miktarının azaldığı görülmüştür.
- Serpantin, paralel ve pin tip akış kanalları karşılaştırıldığında basınç düşümünün akış alanı oranı ile doğrudan bir ilgisi olduğu görülmüştür. Artan akış alanı oranı ile basınç düşümünün bütün tipler için azaldığı görülmüştür. Ayrıca akış alanı oranları birbirine yakın olan akış kanallarındaki basınç düşümü değerlerinin birbirlerine yakın geldiği hatta düşük yakıt debilerinde bu değerlerin aynı gelebileceği görülmüştür.
- Ayrıca bütün akış kanalları için artan yakıt debisi ile basınç düşümünün arttığı tespit edilmiştir.

Akış kanallarında meydana gelen basınç düşümünün her yakıt pili için optimize bir değeri vardır. Kanal geometrisi kullanılan sisteme ve ihtiyaca göre anot ve katotta farklı olabilir. Temel geometri seçimine ilave olarak kanal boyutları ve kanallar arasındaki akış ilişkisi dikkatlice ayarlanmalıdır. Aksi takdirde rastgele seçimler

beklenilen hücre verimi ve performans artışını sağlamak yerine tam tersi etki meydana getirebilmektedir.

Yukarıdaki verilen ifadelerden de anlaşılacağı üzere yakıt pili performansını doğrudan etkileyen basınç düşümü birçok farklı parametreye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yapılan deneysel çalışma sonuçları hem performans hem de maliyet bakımından akış kanalı optimizasyonunun gerekliliğini göstermiş olup, yeni yapılacak deneysel sistemler için akış kanalı geometrisinde dikkat edilecek noktalara ışık tutup, yol gösterici olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Boyacı San F. G., Özdemir S. S., Örs N., Kalafatoğlu E., Bahar T., Hidrojen Yakıt Pilleri: Otomotiv Endüstrisindeki Uygulamalar ve Geleceği, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi. Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, KM 367, 1-3, 2001.

[2] Liu B. H., Li Z. P., Arai K., Suda S., Performance Improvement of A Micro Borohydride Fuel Cell Operating At Ambient Conditions, *Electrochimica Acta*, 2005, **50**, 3719-3725.

[3] Liu B. H., Li Z. P., Suda S., Anodic Oxidation of Alkali Borohydrides Catalyzed by Nickel", *Journal of Electrochemical Society*, 2003, **150**(3), A398-A402.

[4] Çelik S., Akış Kanalı Tasarımının PEM Yakıt Pili Performansına Etkilerinin İncelenmesi, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2018, **7**(1), 407-416.

[5] Yang H., Zhao T. S., Ye Q., Pressure drop behavior in the anode flow field of liquid feed direct methanol fuel cells, *Journal of Power Sources*, 2005, **142**, 117–124.

[6] Hoogers G., Fuel Cell Technology Handbook, 1st Ed., CRC Press LLC, Boca Raton-Florida, 2003

[7] Bıyıkoğlu A., Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Geişimi, Çalışma Prensipleri Ve Bugünkü Durumu, *Gazi University Journal Of Science*, 2003, **16**(3), 523-542.

[8] Toprak M. M., Yakıt Pilleri İçin Akış Kanallarının 3D Modellenmesi ve Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 2017, 483421.

[9] Dincer K., Şahin O., Yayla S., Avcı A., Anot Tarafı Elektrospin Metodu ile YSZ+SDC+NaCaNiBO ile Kaplanmış PEM Yakıt Hücresinin Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Selçuk-Teknik Dergisi*, 2014, **13**(1), 12-24.

[10] Mench M. M., Fuel Cell Engine, 1st Ed., John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2008.

[11] Barbir F., PEM Fuel Cell: Theory And Practice, 2nd Ed., Elsevier, New York, 2005

[12] Çetinkaya M. ve Karaosmanoğlu F., Yakıt Pilleri, *Makina Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 2003, (75), 18-30.

[13] Kahraman E., Tek Hücreli Proton Değişim Zarlı Yakıt Pilinin (PEMFC) ve Tek Hücreli Doğrudan Metanol Yakıt Pilinin (DMFC) Performans Verilerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2009, 237935.

[14] Argyropoulos P., Scott K., Taama W. M., Pressure Drop Modelling for Liquid Feed Direct Methanol Fuel Cells Part II. Model Based Parametric Analysis, *The Chemical Engineering Journal*, 1999, **73**(3), 229-245.

[15] Amphlett J. C., Peppley B. A., Halliop E., Sadiq A., The Effect of Anode Flow Characteristics and Temperature on The Performance of A Direct Methanol Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2001, **96**(1), 204-213.

[16] Padhy B. R., Reddy R. G., Performance of DMFC with SS 316 Bipolar/End Plates, *Journal of Power Sources*, 2006, **153**(1), 125-129.

[17] Jiang R., Rong C., Chu D., Determination of Energy Efficiency for A Direct Methanol Fuel Cell Stack by A Fuel Circulation Method, *Journal of Power Sources*, 2004, **126**(1), 119-124.

[18] Yang H., Zhao T. S., Ye Q., Addition of Non-Reacting Gases to The Anode Flow field of DMFCs Leading to Improved Performance, *Electrochemistry Communications*, 2004, **6**(11), 1098-1103.

[19] Jeon D. H., Greenway S., Shimpalee S., Van Zee J. W., The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell performance, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, **33**(3), 1052-1066.

[20] Sang Y. H., Han-Ik J., Scibioh M. A., Sang-Yeop L., Soo-Kil K., Tai G. L., Heung Y. H., Impact of Cathode Channel Depth on Performance of Direct Methanol Fuel Cells , *Journal of Power Sources*, 2008, **183**(1), 226-231.

[21] Arico A. S., Cretı P., Baglio V., Modica E., Antonucci V., Influence of Flow Field Design on The Performance of A Direct Methanol Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2000, **91**(2), 202–209.

[22] Wong C. W., Zhao T. S., Ye Q., Liu J. G., Experimental Investigations of The Anode Flow Field of A Micro Direct Methanol Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2006, **155**(2), 291–296.

[23] Oliveira V. B., Rangel C. M., Pinto A. M. F. R., Effect of Anode and Cathode Flow Field Design on The Performance of A Direct Methanol Fuel Cell, *Chemical Engineering Journal*, 2010, **157**(1), 174-180.

[24] Wei-Mon Y., Ching-Hung Y., Chyi-Yeou S., Falin C., Sheng-Chin M., Experimental Studies on Optimal Operating Conditions for Different Flow Field Designs of PEM Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2006, **160**(1), 284-292.

[25] Li X., Sabir I., Review of Bipolar Plates in PEM Fuel Cells:Flow-Field Designs, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, **30**(4), 359-371.

[26] Limjeerajarus N., Charoen-amornkitt P., Effect of Different Flow Field Designs and Number of Channels on Performance of A Small PEFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, **40**(22), 7144-7158.

[27] Shimpalee S., Van Zee J.W., Numerical Studies on Rib & Channel Dimension of Flow-Field on PEMFC Performance, *International Journal Of Hydrogen Energy*, 2007, **32**(7), 842-856.

[28] Yoon Y.-G., Lee W.-Y., Park G.-G., Yang T.-H., Kım C.-S., Effects of Channel Configurations of Flow Field Plates on The Performance of A PEMFC, *Electrochimica Acta*, 2004, **50**(2), 709–712.

[29] Manso A. P., Marzo F. F., Barranco J., Garikano X., Garmendia Mujika M., Influence of Geometric Parameters of the Flow Fields on The Performance of A PEM Fuel Cell, A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, **37**(20), 15256–15287.

[30] Wang X.-D., Duan Y. Y., Yan W.-M., Peng X. F., Effects of Flow Channel Geometry on Cell Performance for PEM Fuel Cells with Parallel and Interdigitated Flow Fields, *Electrochimica Acta*, 2008, **53**(16), 5334-5343.

[31] Türkmen A. C., Çelik C., Esen H., The Statistical Relationship Between Flow Channel Geometry and Pressure Drop in A Direct Methanol Fuel Cell with Parallel Channels, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, **44**(34), 18939-18950.

[32] Çelik C., Boyacı San F. G., Saraç H. İ., Effects of Operation Conditions on Direct Borohydride Fuel Cell Performance, *Journal of Power Sources*, 2008, **185**(1), 197-201.

[33] Çelik C., Boyacı San F. G., Saraç H. İ., Influences of Sodium Borohydride Concentration on Direct Borohydride Fuel Cell Performance, *Journal of Power Sources*, 2010, **195**(9), 2599-2603.

[34] Li Z. P., Liu B. H., Arai K., Asaba K., Suda S., Evaluation of Alkaline Borohydride Solution as The Fuel for Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2003, **126**(1-2), 28-33.

[35] Jamard R., Latour A., Salomon J., Capron P., Martinent B., Study of Fuel Efficiency in A Direct Borohydride Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2008, **176**(1), 287-292.

[36] Li Z. P., Liu B. H., Arai K., Suda S., A Fuel Cell Development for Using Borohydrides as the Fuel, *Journal of Electrochemical Society*, 2003, **150**(7), A868-A872.

[37] Liu B. H., Li Z. P., Zhu S. K., Suda S., Influences of Hydrogen Evolution on The Cell and Stack Performances of The Direct Borohydride Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 2008, **183**(1), 151-156.

[38] Kim J. H., Kim H. S., Kang Y. M., Song M. S., Rajendran S., Han S. C., Jung D. H., Lee J. Y., Carbon-Supported and Unsupported Pt Anodes for Direct Borohydride Liquid Fuel Cells, *Journal of Electrochemical Society*, 2004, **151**(7), A1039-A1043.

[39] Feng R. X., Dong H., Wang Y. D., Ai X. P., Cao Y. L., Yang H. X., A Simple and High Efficient Direct Borohydride Fuel Cell with MnO2 - Catalyzed Cathode, *Electrochemistry Communications*, 2005, **7**(4), 449-452.

[40] Santos D. M. F., Sequeira C. A. C., Sodium Borohydride As A Fuel For The Future, *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**(8), 3980-4001.

[41] Lakeman J. B., Rose A., Pointon K. D., Browning D. J., Lovell K. V., Waring S. C., Horsfall J. A., The Direct Borohydride Fuel Cell for UUV Propulsion Power, *Journal of Power Sources*, 2006, **162**(2), 765-772.

[42] Okur O., Doğrudan Sodyum Borhidrürlü Yakıt Pili Anot ve Katot Elektrokatalizörünün Sentezi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012, 321350.

[43] Wee J., A Comparison of Sodium Borohydride as A Fuel for Proton Exchange Membrane Fuel Cells and for Direct Borohydride Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2006, **155**(2), 329-339.

[44] Leon C. P., Walsh F. C., Pletcher D., Browning D. J., Lakeman J. B., Direct Borohydride Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2006, **155**(2), 172-181.

[45] Tsuchiya H., Kobayashi O., Mass Production Cost of PEM Fuel Cell by Learning Curve, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, **29**(10), 985-990.

[46] Mehta V., Cooper J. S., Review and Analysis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing, *Journal of Power Sources*, 2003, **114**(1), 32-53.

[47] Kahraman H., Orhan M.F., Flow Field Bipolar Plates in A Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Analysis & Modeling, *Energy Conversion and Management*, 2017, **133**, 363-384.

[48] Hermann A.M., Chaudhuri T., Spagnol P. D., Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, **30**(12):1297-1302.

[49] Davies D. P., Adcock P. L., Turpin M., Rowen S. J., Stainless Steel as A Bipolar Plate Material for Solid Polymer Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2000, **86**(1-2), 237-242.

[50] Wang H., Turner J. A., Ferritic Stainless Steels as Bipolar Plate Material for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2004, **128**(2), 193-200.

[51] Borup R., Vanderborgh L., Design and testing criteria for bipolar plate materials for PEM fuel cell applications, *MRS Online Proceeding Library Archive*, 1995, **393**, 151-155.

[52] Woodman A., Anderson E., Jayne K., Kimble M., Development of Corrosion-Resistant Coatings for Fuel Cell Bipolar Plates, *American Electroplaters and Surface Finishers Society*, 1999, **6**, 21-24.

[53] Wind J., Spah R., Kaiser W., Böhm G., Metallic Bipolar Plates for PEM Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2002, **105**(2), 256-260.

[54] Lee S-J., Huang C-H., Lai J-J., Chen Y-P., Corrosion-Resistant Component for PEM Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 2004, **131**(1–2), 162-168.

[55] Brandon N., Thompsett D., Fuel Cells Compendium, 1st Ed, Elsevier, London, 2005.

[56] Ay F., Pem Tipi Yakıt Hücreleri için Bipolar Plaka Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 252942.

[57] Erdem S., Yatağan S., Çatıda Kullanılan Polikarbonat Levhaların Analizi, *7. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, İstanbul, 3 - 4 Nisan 2014.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Menteşe G**., İnce E., Özcan B., Gemi İnşa Sanayinde İş Sağlığı ve Güvenliği Bilincinin İncelenmesi, *Mühendis ve Makina*, 2017, **58**(688), 53-78.

ÖZGEÇMİŞ

20 Mayıs 1993 tarihinde Kadıköy/İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Tuzla Atatürk İlköğretim Okulunda, lise öğrenimini Gebze Anibal Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi'nde Makine Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine başladı ve 2016 yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2017 yılında Güneş Plastik Kalıp San. Tic. A.Ş'de Üretim Mühendisi olarak çalışmaya başladı ve buradaki görevine 2019 yılından itibaren Montaj Mühendisi olarak devam etmektedir.