

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**PEM ELEKTROLİZÖRLERDE KULLANILAN ANOT GAZ
DİFÜZYON ELEKTROTULARINDA AKIŞ DAVRANIŞININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Süleyman UYSAL**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih KAYA**

Yüksek Lisans Tezi

**Haziran 2022
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**PEM ELEKTROLİZÖRLERDE KULLANILAN ANOT GAZ
DİFÜZYON ELEKTROTLARINDA AKIŞ DAVRANIŞININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Süleyman UYSAL**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih KAYA**

Bu çalışma, 120M234 kodlu Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1001- Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı, 1649B022006356 kodlu TÜBİTAK 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı ve FYL-2020-10547 kodlu Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) projeleri tarafından desteklenmiştir.

**Haziran 2022
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Süleyman UYSAL

YÖNERGEYE UYGUNLUK

“PEM Elektrolizörlerde Kullanılan Anot Gaz Difüzyon Elektrotlarında Akış Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan
Süleyman UYSAL

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih KAYA

Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

TEŞEKKÜR

Bana çalışmalarım süresince her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih KAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı aynı laboratuvarı paylaştığımız çalışma arkadaşlarıma ve özellikle üyesi olduğum Erciyes Üniversitesi H2FC Hidrojen Enerjisi Araştırma Grubu'na teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına katkı sağlayan 120M234 kodlu Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1001- Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı'na, 1649B022006356 kodlu TÜBİTAK 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı'na ve FYL-2020-10547 kodlu proje ile maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Süleyman UYSAL

Haziran 2022, KAYSERİ

PEM ELEKTROLİZÖRLERDE KULLANILAN ANOT GAZ DİFÜZYON ELEKTROTULARINDA AKIŞ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Süleyman UYSAL

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2022
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih KAYA

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edildiği zaman sıfır emisyon ile yeşil hidrojen üretebilen Polimer Elektrolit Membran (PEM) elektrolizörlerin ana bileşenlerinden birisi gaz difüzyon elektrotu (GDE)'dur. Bu tez çalışmasında özgün tasarımı kare, daire, eşkenar üçgen eşkenar dörtgen geometrilili desene sahip GDE'lerin 100 ml/dk, 200 ml/dk ve 300 ml/dk debide akış davranışları sayısal ve deneysel olarak irdelenmiştir. Basınç düşüşü ve akış görselleştirme deneylerinde kare geometrilili desene sahip GDE en iyi performansı sergilemiştir. Deneysel sonuçlar, ANSYS yazılımında çok fazlı akış şartlarında yapılan hesaplamalar ile doğrulanarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak kare GDE 100 ml/dk için akışın %38,96 daha az basınç kaybı ile çıkışa daha hızlı yöneldiği gözlenmiştir. Akış görselleştirme deneylerinde hücre içerisine mürekkep gönderilmiştir. Kare GDE'in 100 ml/dk debide 0,437 sn. ile diğer GDE'lere göre hücreyi en hızlı şekilde doldurduğu tespit edilmiştir. Sayısal çözüm sonuçlarına göre %16 gözenekliliğe sahip filtre kağıdının incelendiği durumda, kare geometrilili GDE'nin sıvı fazı %94,8 oranında başarıyla taşıdığı belirlenmiştir. Bu yüzden kare geometrilili GDE'in deneysel ve sayısal sonuçlarında özellikle 25 cm²'lik bir PEM elektrolizörde, 100 ml/dk debi değerinde düşük basınç kaybı ve homojen akış dağılımı sağlayarak en iyi hücre performansının oluşturabileceği gözlenmiştir. Sonuç olarak anot GDE için kare delikli geometriye sahip bir desen kullanılarak hücre içi su transferinin iyileştirilebileceği, oluşan oksijen gazını ve tüketilemeyecek suyun hücre dışına daha hızlı ulaştırılması sağlanarak PEM elektrolizörlerde performans artışı sağlanabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, Hidrojen Üretimi, Polimer Elektrolit Membran Elektrolizör, Gaz Difüzyon Elektrotu, Sayısal Modelleme, Çok Fazlı Akış Modelleme, Akış Görselleştirme.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW BEHAVIOR IN ANODE GAS DIFFUSION ELECTRODES USED IN PEM ELECTROLYZERS

Süleyman UYSAL

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, June 2022

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet Fatih KAYA

ABSTRACT

The gas diffusion electrodes (GDEs) are one of the main components of Polymer Electrolyte Membrane (PEM) electrolyzers, which can produce green hydrogen with zero emission when integrated with renewable energy sources. In this thesis, the flow behavior of GDEs with uniquely designed square, circle, rhombic rhombus geometric patterns were investigated numerically and experimentally at 100 ml/min, 200 ml/min, and 300 ml/min flow rates. In pressure drop and flow visualization experiments, square geometry patterned GDE showed the best performance. Experimental results were compared with each other by validating them in multi-phase flow conditions with ANSYS software. As a result, it was observed that the flow was directed to the outlet side faster with 38.96% less pressure loss in square GDE geometry at 100 ml/min flow rate. In flow visualization experiments, an ink solution was sent into the cell for different flow rates. At 100 ml/min flow rate of ink solution, square GDE geometry was filled the cell by 0.437 sec. which was determined as fastest geometry compared to other GDEs. According to the numerical solution results, when 16% porosity filter paper was examined, it was concluded that the square geometry GDE was 94.8% rate successfully carried the liquid phase to all geometry. Therefore, in the experimental and numerical results of the square geometry GDE, especially in a 25 cm² PEM water electrolyzer, it was observed that the best cell performance could be achieved by providing low-pressure loss and homogeneous flow distribution at 100 ml/min flow rate. As a result, it was determined that water transfer inside the cell could be improved by using a square patterned geometry for the anode GDE, and the performance of PEM electrolyzers could be increased by providing faster delivery of the formed oxygen gas and excess water to the outside of the cell.

Keywords: Hydrogen, Hydrogen Generation, Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer, Gas Diffusion Electrode, Numerical Modeling, Multi-Phase Flow Modeling, Flow Visualization.

İÇİNDEKİLER

PEM ELEKTROLİZÖRLERDE KULLANILAN ANOT GAZ DİFÜZYON ELEKTROTLARINDA AKIŞ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL ve ONAY SAYFASI.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
KISALTMALAR.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Enerji.....	3
1.1.1. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları.....	4
1.1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	5
1.1.3. Türkiye'nin Enerji Durumu	6
1.2. Hidrojen Enerjisi	7
1.2.1. Hidrojen Elementinin Özellikleri.....	8
1.2.2. Hidrojenin Kullanım Alanları.....	9
1.2.3. Hidrojen Üretim Yöntemleri	10
1.3. Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi	13
1.4. Literatür çalışması	16

1.5. Araştırmanın Amacı ve Önemi.....	20
---------------------------------------	----

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Basınç ve Mürekkep Deneylerinin Deneysel Hazırlığı	22
2.2. Mürekkep ve Filtre Kağıdının Sayısal Modelleme İçin Karakterizasyon İşlemleri.....	29
2.3. Sayısal Modelin Deneysel Sisteme Uygun Olarak Hazırlanması.....	31
2.4. Sayısal Çözüm Parametreleri ve Akış Sınır Şartları	39

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. DeneySEL Sonuçlar	43
3.1.1. Basınç Deneyi Sonuçlarının İncelenmesi	43
3.1.2. Akış Görselleştirme Deney Sonuçları	45
3.2. Sayısal Sonuçlar	55
3.2.1. Çözümlerin Meshten Bağımsız Hale Getirilmesi.....	55
3.2.2. Steady (Sürekli) Çözüm Basınç Değişimi Sonuçları ve DeneySEL Bulgularla Karşılaştırma	56
3.2.3. Çok Fazlı Akış Koşullarında Zamana Bağlı Akış Dağılımının Sayısal Sonuçları.	61
3.2.4. Filtre Kağıdının FE-SEM Analizi ve Görüntü İşleme Çıktıları.....	69
3.2.5. Filtre Kağıdı için Gözenekli Bölgenin Aktif Edildiği Çok Fazlı Zamana Bağlı Sayısal Çözüm Sonuçları	72

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma.....	81
4.2. Sonuç ve Öneriler	84
KAYNAKÇA	86

ÖZGEÇMİŞ.....	95
---------------	----



KISALTMALAR

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
A_1	GDE içindeki bir geometrinin alanını	cm^2
A_{daya}	GDE dolu aktif yüzey alanı	cm^2
A_t	GDE içindeki toplam geometri sayısını	cm^2
CCS	Karbon yakalama ve depolama	--
CO	Karbon monoksit	--
CO ₂	Karbon dioksit	--
CV	Döngüsel voltametri	--
EÜ	Eklemeli üretim	--
F1	Filtre kağıdı FE-SEM görüntüsü 1	--
F10	Filtre kağıdı FE-SEM görüntüsü 10	--
F2	Filtre kağıdı FE-SEM görüntüsü 2	--
F3	Filtre kağıdı FE-SEM görüntüsü 3	--
F4	Filtre kağıdı FE-SEM görüntüsü 4	--
F5	Filtre kağıdı FE-SEM görüntüsü 5	--
F6	Filtre kağıdı FE-SEM görüntüsü 6	--
F7	Filtre kağıdı FE-SEM görüntüsü 7	--
F8	Filtre kağıdı FE-SEM görüntüsü 8	--
F9	Filtre kağıdı FE-SEM görüntüsü 9	--
FE-SEM	Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu	--
g	Yerçekimi ivmesi	m/s^2
GDE	Gaz difüzyon elektrotu	--
İHA	İnsansız hava aracı	--
LIF	Laser-induced fluorescence	--
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı	--
MW	Megawatt	--
PEM	Polimer elektrolit membran	--
PLA	Polilaktik Asit	--

ppm	Milyonda parça (parts per million)	--
Ro^2	Tepe noktasında eğrilik yarıçapı	mm
sn	Saniye	--
VOF	Sıvıların hacmi metodu (Volume of Fluid)	--
β	Şekil faktörü	--
γ	Yüzey gerilimi (surface tension)	N/m
ΔH	Reaksiyon ısısı	kJ/mol
Δp	Akışkanlar arasındaki yoğunluk farkı	--
ΔP	Basınç değişimi	kPa



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1 Metan, Benzin ve Hidrojen Özellikleri [25].	8
Tablo 1.2 Hidrojen üretim yöntemlerinin renklerle ifade edilmesi.	11
Tablo 1.3 Elektrolizörlerin avantaj ve dezavantajları [43].	13
Tablo 2.1 ANSYS modelinin geometrik parametreleri.	36
Tablo 2.2 ANSYS mesh özellikleri.	39
Tablo 2.3 ANSYS çözüm parametreleri.	39
Tablo 2.4 ANSYS Steady (Sürekli) çözüm için akış ve sınır şartları.	41
Tablo 2.5 ANSYS zamana bağlı mürekkep çözümü için akış ve sınır şartları.	42
Tablo 3.1 Dört farklı GDE için basınç deneyi sonuçları.	43
Tablo 3.2 ImageJ programında görüntü işleme sonuçları.	72

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi (2010-2020) [18].	6
Şekil 1.2 PEM Elektrolizör bileşenleri.	15
Şekil 2.1 a) Serpantin akış kanalının 3D görüntüsü, b) Serpantin akış kanalı ölçülendirme detayları.....	23
Şekil 2.2 GDE tasarımları: a) Eşkenar dörtgen GDE, b) Daire GDE, c) Eşkenar üçgen GDE, d) Kare GDE.	24
Şekil 2.3 GDE geometrilerinin ölçü detayları: a) Eşkenar dörtgen GDE, b) Kare GDE, c) Eşkenar üçgen GDE, d) Daire GDE.....	25
Şekil 2.4 GDE ve akış kanalı üretim aşaması: (a) Ultimaker ²⁺ 3D yazıcı, (b) GDE'in 3D'de basım süreci, (c) basımı tamamlanmış serpantin akış kanalı.	26
Şekil 2.5 a) Şeffaf(transparent) test hücresi tasarımının montajı, b) Şeffaf test hücresinin CNC işleme c) üretimi tamamlanmış şeffaf test hücresi.	27
Şekil 2.6 (a) Basınç ve mürekkep deneyleri için test düzeneğinin şematik gösterimi, (b) Mürekkep deneyleri için test hücresi içini şematik gösterimi, (c) Basınç ve mürekkep deney düzeneği.....	28
Şekil 2.7 a) Pelikan 4001 marka mürekkep yüzey gerilimi ölçüm anı. b) Yüzey gerilimi ölçümü esnasında alınmış mürekkebe ait askıda damla (pendant drop) şekli.	30
Şekil 2.8 ANSYS model görünümü: (a) sayısal modelin patlatılmış görüntüsü, (b) sayısal modelin montaj görüntüsü.	36
Şekil 2.9 ANSYS yazılımından elde edilmiş mesh görüntüleri: a) tüm modelin mesh görüntüsü, b) akış kanalı, GDE ve filtre kâğıdı bölgelerinin mesh yapıları, c) GDE ve filtre kâğıdının mesh yapıları.	38
Şekil 3.1 Dört farklı GDE için basınç değişiminin grafiksel karşılaştırması.	45
Şekil 3.2 100 ml/dk debi için GDE geometrilerinin mürekkep deneylerinin karşılaştırılması: (a) Eşkenar Dörtgen, (b) Kare, (c) Eşkenar Üçgen, (d) Daire.	47
Şekil 3.3 Farklı GDE geometrileri için 100 ml/dk debide tüm yüzeyin tamamen dolma süreleri.....	48
Şekil 3.4 200 ml/dk debi için GDE geometrilerinin mürekkep deneylerinin karşılaştırılması: (a) Eşkenar Dörtgen, (b) Kare, (c) Eşkenar Üçgen, (d) Daire.	50
Şekil 3.5 Farklı GDE geometrileri için 200ml/dk debide tüm yüzeyin tamamen dolma süreleri.....	51

Şekil 3.6 300 ml/dk debi için GDE geometrilerinin mürekkep deneylerinin karşılaştırılması: (a) Eşkenar Dörtgen, (b) Kare, (c) Eşkenar Üçgen, (d) Daire.	53
Şekil 3.7 Farklı GDE geometrileri için 300ml/dk debide tüm yüzeyin tamamen dolma süreleri.....	54
Şekil 3.8 Kare GDE'in Steady (Sürekli) çözüm ile meshten bağımsız hale getirilmesi.	55
Şekil 3.9 Kare GDE için Steady (Sürekli) akış sonuçlarının basınç dağılımları a) 100 ml/dk, b) 150 ml/dk, c) 200 ml/dk, d) 250 ml/dk ve e) 300 ml/dk debi.	59
Şekil 3.10 Kare GDE'in deneysel ve sayısal olarak elde edilen ΔP sonuçların karşılaştırılması.	60
Şekil 3.11 (a) Zamana bağlı sayısal çözüm öncesi modelin hava fazı dağılımının izometrik görüntüsü. (b) Modelin zamana bağlı sayısal çözüm öncesi hava fazı dağılımı XY düzlemi önden görüntüsü.	61
Şekil 3.12 100 ml/dk debi için yapılan (a) Deneysel akış dağılımı, (b) Sayısal olarak filtre kağıdı üzerindeki akış dağılımı (c) Sayısal olarak serpantin akış kanalı üzerindeki akış dağılımı sonuçları.....	63
Şekil 3.13 200 ml/dk debi için yapılan (a) Deneysel akış dağılımı, (b) Sayısal olarak filtre kağıdı üzerindeki akış dağılımı (c) Sayısal olarak serpantin akış kanalı üzerindeki akış dağılımı sonuçları.....	65
Şekil 3.14 300 ml/dk debi için yapılan (a) Deneysel akış dağılımı, (b) Sayısal olarak filtre kağıdı üzerindeki akış dağılımı (c) Sayısal olarak serpantin akış kanalı üzerindeki akış dağılımı sonuçları.....	67
Şekil 3.15 Sayısal ve deneysel akış görselleştirme mürekkep sonuçlarına göre hücre içinin ilk dolduğu süreler.....	68
Şekil 3.16 Filtre kağıdına ait (a) FE-SEM görüntüleri, (b) ImageJ programı ile görüntü işlenmesi (colour mapping), (c) işlenmiş görüntünün gözeneklilik oranının belirlenmesi için analiz.	71
Şekil 3.17 100 ml/dk debi değerinde %16 gözeneklilik oranına sahip filtre kağıdı ile zamana bağlı çok fazlı kare GDE için 5. saniye mürekkep faz dağılımı: (a) 3 boyutlu model, (b) serpantin akış kanalı önden kesit görünümü, (c) kare GDE önden kesit görünümü, (d) filtre kağıdı önden görünümü.....	74
Şekil 3.18 100 ml/dk debi için yapılan zamana bağlı çok fazlı akış dağılımı sonuçları: (a) aktive edilmemiş gözenekli bölge ile filtre kağıdı mürekkep dağılımı, (b) aktif gözenekli	

bölge (%16 gözenekli) ile filtre kağıdı mürekkep dağılımı c) aktif gözenekli bölge ile GDE üzerinde mürekkep dağılımı.	76
Şekil 3.19 Sayısal model kesit görüntüleri (a) Kesit görüntülerin detayları (b) Kesitlerin model üzerindeki konumları.	77
Şekil 3.20 Model kesit görüntülerinin zamana bağlı mürekkep dağılımı (a) aktive edilmemiş gözenekli bölge sayısal çözüm, (b) aktive edilmiş gözenekli bölge (%16 gözenekli filtre kağıdı) sayısal çözümü.....	79



GİRİŞ

Artan enerji talebinin fosil yakıtlardan karşılanması beraberinde çevre kirliliği ve iklim değişikliğini de getirmektedir. Bu durum, temiz enerji kavramını doğurmuş ve yenilenebilir enerjiye olan ihtiyacı arttırmıştır. Hidrojenin sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olması kullanım ve üretim alanlarının önemini de arttırmaktadır. Hidrojenin gübre, petrokimya, ilaç sektörü, roket yakıtı olarak kullanılmasının yanı sıra yakıt hücrelerinde yüksek verimde elektrokimyasal dönüşüm ile direk elektrik enerjisine dönüştürülmesi en önemli uygulamalarındandır. Doğada hidrokarbonlar, su ve biyolojik yapılarda bileşik halinde bulunan hidrojenin saf halde üretilmesi gerekmektedir. Dünya da hidrojen ihtiyacının büyük bir bölümü metanın buharla reformundan elde edilmektedir [1]. Metan bir hidrokarbon olduğu için bu yöntem sırasında çevreye zararlı gazlarda çıkmaktadır. Suyun elektrolizi ile hidrojen üreten PEM elektrolizör ile hidrojen üretimi temiz, çevreci ve kolay uygulanabilir olması açısından yerli ve milli kaynakların kullanılmasının önünü açmaktadır. PEM elektrolizörlerin yüksek akım yoğunluğuna sahip bir değerde çalışması, özellikle rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte entegre edilen sistemlerde daha düşük bir işletim maliyeti ile çalıştırılabilmesine de olanak sağlamaktadır. Ana bileşenlerinden olan gaz difüzyon elektrotu (GDE) ve akış kanalları maliyetin yaklaşık yarısını oluşturmaktadır [2]. GDE, ayırıcı plakadan gelen suyu dağıtarak katalizör tabakaya ulaştırır bu görevinden dolayı PEM elektrolizörlerin verimi üzerinde büyük etkisi bulunmaktadır. GDE'lerin geometrik yapısının gelen suyu iyi şekilde dağıtması ve oluşan oksijeni ve hidrojeni hızlı şekilde hücre dışına çıkaracak yapıda olması gerekmektedir. Bundan dolayı, GDE'lerin akış dağılımının PEM elektrolizör üzerinde etkisinin yapılacak çalışmalar ile ortaya konulması gerekmektedir.

Bu çalışmada kare, daire, eşkenar üçgen, eşkenar dörtgen geometrilere sahip GDE'lerin akış davranışları sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Öncelikle dört farklı GDE deneysel bulguları elde etmek için deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneğinde yer alan manometreler ile basınç düşüşü gözlemlenmiş ve kamera yardımı ile mürekkebin faz dağılım görüntüleri alınmıştır. En az basınç düşüşü ve en iyi akış dağılımı sergileyen GDE geometrisi belirlenerek sayısal çözümler yapılmıştır. GDE modelleri için ANSYS Fluent yazılımında çok fazlı (multi-phase) akış analizi yapılmıştır. ANSYS Sürekli (Steady) çözüm yöntemi ile giriş ve çıkış arasındaki basınç düşüşü sonuçları elde edilmiştir. ANSYS zamana bağlı çok fazlı sayısal çözüm ile akış dağılım sonuçları alınmış ve deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal çözüm sonucunda belirlenen GDE yapısının PEM elektrolizörlerde geometri olarak kullanılabileceği ve yüksek performans sergileyebileceği sonucuna varılmıştır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Enerji

Enerji, yunanca "ev" ve "ergon" kelimelerinin birleşiminden türetilmiş bir terimdir. Enerji iş yapabilme yeteneğidir. Doğada bulunan tüm canlıların enerji ihtiyacı vardır. Ayrıca dünyada gerçekleşen tüm olayların temelinde enerji bulunmaktadır. Enerji asla yok edilemez veya yoktan var edilemez. Sadece bir formdan başka bir forma geçiş yapabilir. Bu durum termodinamiğin I. kanunu ile açıklanmıştır. Enerji doğada ışık, ses, kimyasal, mekanik, elektrik, termal, kimyasal ve biyoenerji gibi çeşitlerde bulunmaktadır [3].

İnsanoğlu yaşamını devam ettirebilmek için sürekli üretmek veya besin tüketerek enerji almak zorundadır. İlk çağlarda insanlar ısı taleplerini kendi güçleri ile karşılamaya çalışmışlardır. Sanayi devrimi öncesi ısı ihtiyacı büyük zorluklarla karşılanmıştır. Küreselleşen dünya beraberinden enerji kavramının önemini de artırmıştır. Enerjiye duyulan talep sanayi devrimiyle artırmıştır. Modern çağda da insanların yaşamlarını sürdürebilmeleri için temel gereksinimlerden biri olmasından dolayı enerji ülkelerin ekonomilerinin yanı sıra sosyal ve siyasal yapılarını bile etkileyebilen bir hal almıştır [4]. Ülkeler güvenli ve kesintisiz bir şekilde enerjiye ulaşmak istemektedirler. Bu durum enerji arz talep dengesi ile sağlanmaktadır. Enerji talebi ise ülkenin ekonomik büyüme, teknolojik ilerleme ve gelişmişlik düzeyi gibi ekonomi ile doğru orantılı olarak oluşmaktadır. Enerji arzı; enerji kaynaklarının rezerv miktarlarına, enerji üretimine, sahip olunan teknolojiye ve devletler arası politikalara göre belirlenmektedir [5, 6].

Tarihte buhar makinelerinin icadı kömür, petrol ve doğalgaz kullanımını ortaya çıkarmış ve fosil tabanlı enerji kaynakların kullanımı günümüze kadar hızla artmıştır. [7]. Sınır rezerve sahip fosil enerji kaynaklarının tükenme ihtimali ülkeleri yeni enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Dünyada enerji kaynakları doğada var olan veya dolaylı yolla

elde edilebilen enerji kaynakları olmak üzere iki gruba ayrılır. Doğada kendiliğinden oluşan ve tükenme tehdidi altında olan kaynaklara ise “yenilenemeyen enerji kaynakları” denir. Tükenme tehdidi bulunmayan, tüketildikten sonra kendiliğinden yeniden meydana gelen kaynaklara “yenilenebilir enerji kaynakları” denir [8].

1.1.1. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları

Yeniden oluşturulamayan, tüketim ihtiyacını karşılayabilecek ölçekte üretim veya yeniden kullanım imkânı sunmayan doğal kaynaklardan elde edilen enerji kaynaklarına “yenilenemeyen enerji kaynakları” denilmektedir. Yenilenemeyen enerji kaynakları fosil temelli ve çekirdek temelli olarak ikiye ayrılmaktadır. Fosil temelli olan yenilenemeyen enerji kaynakları genelde içeriklerinde karbon bulunduran ve bu karbonun oksijenle birleşerek yakılması sonucu enerji elde edilen yakıtlardır. Fosil kaynaklı yakıtlar, çürümüş bitki ve hayvan kalıntıları ile milyonlarca yılda meydana gelmektedir. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının oluşum süreçlerinin bu şekilde milyonlarca yılı bulmasından dolayı kısa zamanda yerine konulamamaktadır. Genellikle fosil yakıtlar kömür, doğalgaz ve petrol olarak üç ana başlık altında toplanabilirler. Petrol plastik sanayinin hammaddelerinden birisiyken rafinerilerde işlenerek asfalt, LPG, mazot, gaz yağı, benzin, katran ve parafin gibi türevlerine ayrıştırılarak farklı kullanım alanlarında tüketilmektedir. Çekirdek temelli olan yenilenemeyen enerji kaynakları ise uranyum ve toryum olarak karşımıza çıkmaktadır. Çekirdek kaynaklı yakıtlar ise, doğada hazır bulunmaz ancak çeşitli elementlerin birleşimi sonucu ortaya çıkarlar. Yenilenemeyen enerji kaynakları genellikle yapısında bulunan karbon atomundan dolayı kullanımı sırasında çevreye zararlı CO ve CO₂ gazı salgırlar. Bu gazların atmosfere salınımı sera gazı etkisini artırarak çevre kirliliğine ve devamında küresel ısınmaya sebebiyet vermektedir. Küresel olarak 2018 yılında 33.891 milyon ton karbondioksit eşdeğeri olan enerji kaynaklı sera gazını en fazla Çin (%27,8), ABD (%15,2), Avrupa (%12,53) ve Hindistan (%7,3) oluşturmaktadır [9]. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının kullanımı havada birim hacimde bulunan CO₂ miktarını sürekli arttırmıştır. 1960 yılında 300 ppm olan miktar 2010 yılında 390 ppm’e, 2018 yılında 410 ppm’e ulaşmıştır. Atmosferde birim hacimdeki güvenilir CO₂ yoğunluğu 350 ppm olup, bu değer 1988 yılında aşılmıştır [10]. Çevre kirliliği bu denli ciddi bir durum almışken dünya, geleceği için temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına bir an önce geçiş yapmalıdır.

1.1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

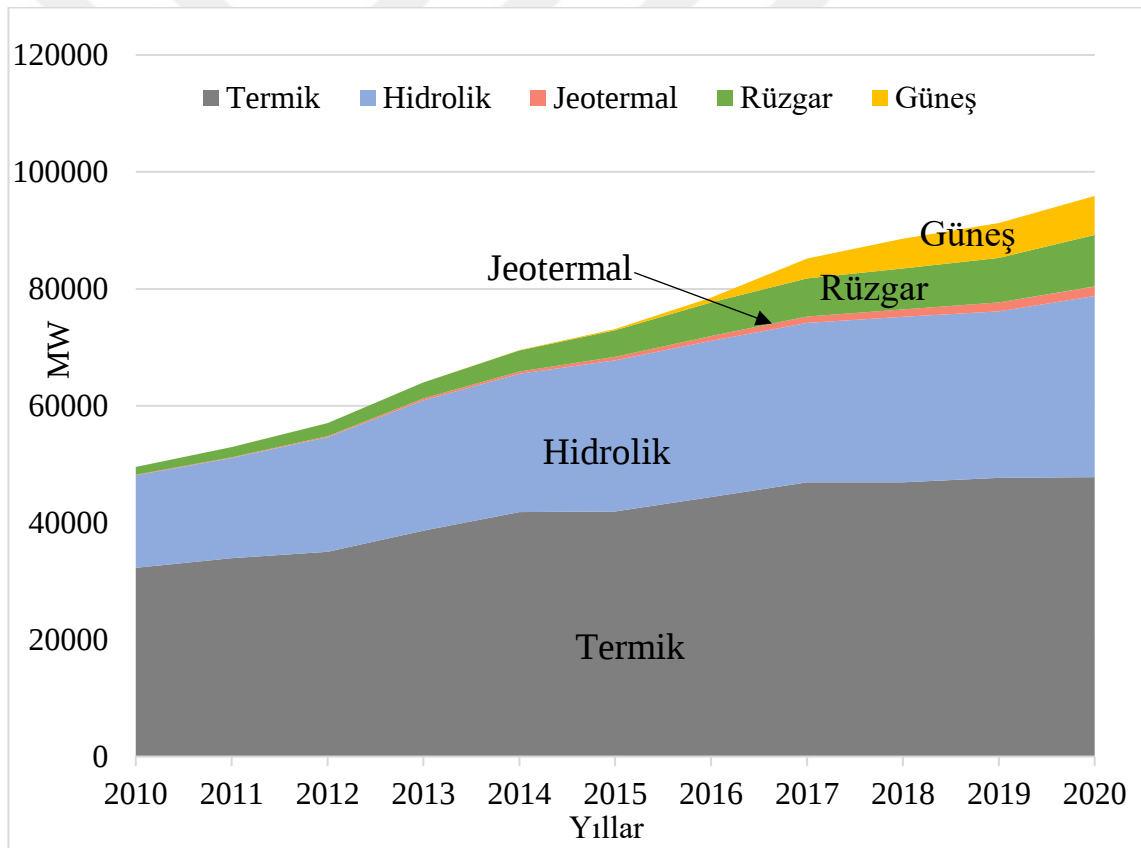
Dünya nüfusunun artışı ve teknolojinin ilerlemesi enerjiye duyulan ihtiyacı arttırmaktadır. Artan enerji talebini karşılamak için kullanılan fosil kökenli kaynakların doğada sınırlı olması, oluşumun uzun yıllar alması ve kullanımı sırasında çevre kirliliği yaratması insanlığı farklı enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Daha temiz ve sürdürülebilir dünya için, rüzgâr, güneş, hidrolik, biyokütle, dalga, biyogaz, jeotermal, akıntı enerjisi, gel-git ve hidrojen gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı önem kazanmıştır. Temelde dünyada ilk kullanılan enerji kaynakları yenilenebilir enerji kaynakları olmuştur. Kömürün ve petrolün enerji kaynağı olarak kullanımına dek güneş, su ve rüzgar gücü çeşitli amaçlarla kullanılmıştır. Bu nedenle de bu enerji kaynaklarının, fosil enerji kaynaklarına göre daha geleneksel olduğunu söylenebilir. Fakat kömür, petrol, doğalgaz ve nükleer enerji son birkaç yüzyıldır o kadar fazla kullanılmıştır ki yeni enerji kaynaklarına olan ihtiyaç gündeme gelene kadar yenilenebilir enerji kaynakları göz ardı edilmiştir [11]. Yenilebilir enerji, doğada çoğunlukla üretim prosesine ihtiyaç duyulmadan ve sürekli doğada kendini yenileyebilen enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerjiler çevreyi fosil kaynaklara göre daha az kirletmektedir [12].

Gelecekte yenilebilir enerji kaynakları fosil kökenli enerji kaynaklarının yerini alacağı öngörülmektedir. Tükenmeyen enerji kaynakları olarak da adlandırılan yenilenebilir enerji kaynakları, sürekli olarak kullanılabilen enerji kaynaklarıdır. Bu enerji kaynakları güneşten hem doğrudan hem de dolaylı olarak yararlanabilir [13]. Ayrıca fosil kökenli enerji kaynakları için ülkelerin kendi yer altı zenginliklerine sahip olması gerekirken, yenilebilir enerji kaynakları ülkelerin enerjide dışa bağımlılığın azalmasında önemli bir rol oynamaktadır [14].

İklim değişikliğinin önüne geçebilmek için küresel ısınmanın neden olduğu zararları ortadan kaldırabilmek adına hazırlanmış uluslararası bir anlaşma olan Kyoto Protokolü dünya genelinde uygulamaya alınmıştır. Bu anlaşma göre ülkeler en fazla %5 oranında sera gazı kullanımı sağlayabilecektir. Buradaki temel amaç ülkelerin ekonomik açıdan zarar görmeden emisyon salınımını dünya genelinde dengelemektir. Türkiye’de bu protokolü imzalayan paydaşlar arasında yer almaktadır. Kyoto Protokolü’nün gereksinimlerinin yerine getirilmesi için tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’nin de yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırması gerekmektedir [15].

1.1.3. Türkiye'nin Enerji Durumu

Türkiye, özellikle son yıllarda sanayi gelişimi ile dünyanın önemli enerji tüketicileri arasında yer almaya başlamıştır. Ülkemizde birincil enerji tüketimi oranı son on yılda ortalama olarak yıllık %3,6 ve son yirmi yıllık dönemde ise %3,8 oranında artış göstermiştir [16]. 2015 yılı Enerji ve Tabii Kaynaklar bakanlığının sektör raporuna göre Türkiye enerji ihtiyacının %25 yerli üretim ile karşılayabilmektedir. Bir başka değiş ile 2015 yılında enerjide %75 oranında dışa bağımlı bir ülke konumundadır [17]. Enerjide dışa bağımlılık oranının 1990'lı yıllar ile kullanımı yaygınlaşan doğal gaz tüketimi ile artmış ve 2000'li yıllarda bu oranın %70 seviyelerinde seyrettiği belirtilmiştir. Şekil 1.1'de Türkiye'nin MW cinsinden 2010-2020 arasında kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı görülmektedir.



Şekil 1.1 Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi (2010-2020) [18].

Şekil 1.1'de görüldüğü üzere 2010 yılında Türkiye kurulu gücünün büyük çoğunluğunu Termik santraller oluştururken 2015 yılından sonra termik santral kurulumu nispeten yavaşlamıştır. 2015 yılından sonra enerjide dışa bağımlılığı azaltmak için başta

hidroelektrik santraller olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim olmuştur. Burada rüzgar ve güneş enerjisinin kurulu güce oranı her ne kadar az görünse de son yıllarda bu oran daha da artarak gelecek için umut verici hale gelmiştir. Gerek enerji de dışa bağımlılığı azaltmak gerekse Kyoto Protokolünün gereksinimi olan sera gazı emisyonun azaltmak için rüzgâr, güneş, hidrolik, biyokütle ve hidrojen gibi yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımı daha da yaygınlaşmalıdır.

1.2. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen, Yunanca su anlamına gelen “hydro” ve oluşturan anlamına gelen “genes” sözcüklerinden meydana gelmiştir. Hidrojen, Dünyanın %60’ını kaplayan suyun temel bileşenidir. Hayvanlarda, insanlarda, bitkilerde, fosil yakıtlarda ve diğer kimyasal bileşiklerde farklı biçimlerde hidrojen görülmektedir [19]. Güneş’te gerçekleşen füzyon tepkimelerinin ana yakıtı hidrojendir ve güneşin %70’ini hidrojen oluşturmaktadır.

Petrol ve türevlerine göre %33 daha verimlidir. Isı gerektiren her alanda kullanımı temiz ve kolay olan hidrojenin enerji dönüşüm sistemlerinde yakıt olarak kullanılması durumunda atmosfere atılan ürün sadece su ve/veya su buharıdır [20]. Hidrojenin yakıt olarak kullanımı fikri oldukça eskidir. Bu fikir 1766 yılında Henry Cavendish tarafından hidrojenin ayrıştırılması işlemine ve 1839 yılında William Robert Grove tarafından yakıt hücrelerinin geliştirilmesine dayanmaktadır [21].

Hidrojen, gizli kimyasal enerjisinin tamamını gelecekte kullanılmak üzere taşıyan ikincil bir 'enerji taşıyıcısı' olarak adlandırılır [22]. Hidrojen hem hidro, rüzgar, dalga, güneş, biyokütle ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından hem de kömür, doğal gaz ve nükleer gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarından elde edilebilmektedir. Yakıt olarak depolanabilir ve yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlar veya türbinler kullanılarak taşıma ve dağıtılmış ısı ve enerji üretim sistemlerinde kullanılabilir [23]. Yenilebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen hidrojen, üretimi sırasında zararlı gaz salınımı olmayacağı için temiz bir enerji taşıyıcısı olarak kullanılabilir. Böylece ülkeler enerji talepleri için başka ülkelere bağlı kalmayacaklar ve çevre kirliliğinin önüne geçebileceklerdir. Depolanan ve güvenle taşınabilen hidrojen, yakıt hücrelerinde kullanılarak istenilen güçlerde elektrik enerjisi elde edilebilir. Hidrojen, diğer yakıtlara oranla daha verimli olmasına karşın üç kat daha maliyetlidir. Bu yüksek maliyet genel olarak hidrojenin doğada saf halde bulunmayışı ve bazı bileşiklerden ayrıştırılarak elde edilmesi gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Araştırmacıların bu alandaki temel hedefi,

hidrojenin, üretim, depolama ve taşıma maliyetlerini olabildiğince düşürmek ve ticari olarak daha da yaygınlaşabilir hale gelmesini sağlamaktır [24].

1.2.1. Hidrojen Elementinin Özellikleri

Hidrojen elementi, periyodik cetvelin 1 numaralı tek ametal elementtir. Doğadaki en basit atom yapısına sahiptir. Bu yapı, atomun merkezindeki pozitif yüklü proton ve yüksüz nötrondan oluşmaktadır. Negatif yüklü tek elektronu ise çekirdeğin etrafında dönmektedir. Dünya’da saf halde bulunmayıp bileşikler halinde (su ve hidrokarbonlar) bulunmaktadır. Saf hale dönüştürülen hidrojen fiziksel olarak kokusuz, tatsız, zehirsizdir ve havadan 14,4 kat daha hafiftir. Gaz haldeki hidrojen ancak -253°C sıcaklıkta sıvı faza dönüştürülebilir. 1 kg hidrojen gazı, 2,1 kg doğal gaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye eşittir. Tablo 1.1’de metan, benzin ve hidrojenin özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.1 Metan, Benzin ve Hidrojen Özellikleri [25].

Özellikler	Metan	Benzin	Hidrojen
Yoğunluk, (kg/m^3)	0,65	4,4	0,084
Sabit basınçta özgül ısısı, (J.g/K)	2,22	1,2	14,89
Havada ateşlenme enerjisi (mJ)	0,29	0,24	0,02
Havada ateşlenme sınırı (% hacim)	5,3-15	17,6	4-75
Havada alev sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	1875	2197	2045
Ateşlenme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	540	228-471	585
Alev yayılması (emissivitesi) (%)	25-33	34,42	17-25

Tablo 1.1’de görüldüğü üzere hidrojenin yoğunluğu metan ve benzine göre çok azdır. Aynı zamanda özgül ısı değeri benzini 12,4 katı, metanın 6,7 katıdır. Bu değerlerin anlamı hidrojen taşınabilir sistemlerde veya yanma reaksiyonlarında kullanıldığı takdirde daha hafif ve daha fazla özgül ısı verebildiği görülebilmektedir. Ayrıca sıvı haldeki yoğunluğu (-253°C) 858 kg/m^3 ’tür ve patlama enerjisi 0,17 g TNT kJ’dür. Tablo 1.1’de belirtilen

üstün özellikleri sayesinde fosil kökenli enerji kaynaklarından üstündür. Hidrojenin, özellikle yakıt hücreleriyle elektrik üretiminde kullanılması ile alternatif ve temiz bir enerji dönüşümü sağlanması oldukça ilgi çekicidir.

1.2.2. Hidrojenin Kullanım Alanları

Karbonsuz bir endüstri için hidrojen önemli yapı taşıdır, ancak endüstriye katkı sağlayabilecek teknolojilerin çoğu hala yeni ve geliştirilmesi gerekmektedir. Karbonsuz çelik üretmeye yönelik dünyanın ilk pilot projesi bu yıl İsveç'te faaliyete geçmiştir. İspanya'da amonyak üretimi için yenilenebilir enerji ile üretilen hidrojen kullanım projesi faaliyete geçmiştir. Çimento, seramik, suni gübre veya cam üretimi gibi endüstriyel uygulamalarda hidrojen kullanımı bulunmaktadır [26]. Önümüzdeki iki ila üç yıl içinde onlarca kiloton hidrojen ölçeğinde birkaç projenin faaliyete geçmesi beklenmektedir. Çimento, seramik veya cam üretimi gibi endüstriyel uygulamalarda hidrojen kullanımına yönelik tanıtım projeleri de geliştirilme aşamasındadır.

Hidrojenin, ilaç sanayisinden kimya sektörüne kadar çok yerde kullanılan yanında yakıt hücrelerinde yüksek verimde elektrokimyasal dönüşüm ile direk elektrik enerjisine dönüştürülmesi en önemli uygulamasıdır [27]. Yakıt hücreleri saf hidrojen ve oksijeni kullanarak elektrik üretirken atık olarak saf su vermektedir ve ölçeklendirebilir olmaları sebebi ile istenilen enerji ihtiyacını daha temiz olarak elde etme imkanı sağlar. 6 KW yakıt hücresi kullanılarak elektrikle çalışan ilk tekne Duffy Boats firması tarafından üretilmiştir [28]. Horizon firmasına ait MiniPak taşınabilir PEM tipi yakıt hücresi 2 Watt gücünde kullanıcılara sunulmuştur. Las Vegas'ta düzenlenen 2010 tüketici elektroniği fuarı'nda tanıtımları yapılan cihaz büyük ilgi görmüştür. Toshiba, 2 ml metanol ile 20 saat boyunca dijital müzik çalara güç sağlayabilen çok küçük bir yakıt hücresini kullanıcılarına sunmuştur [29]. Hyundai firması kamyonlarına elektrikli-yakıt hücresi hibrit sistemlerini entegre ederek ticari ürünler geliştirilmiştir. Örneğin, XCIENT Fuel Cell adını verdikleri bu kamyon 350 bar tank basıncında 32 kg hidrojen depolayabilmektedir. Kamyonun tahrik gücü toplam 350 kW olup bunun 190 kW'lık kısmı iki tane 95 kW yakıt hücresinden sağlanırken gerisi batarya paketi sisteminden sağlanmaktadır [30]. Fuel cell Boat BV firması tarafından 2008-2011 yılları arasında NemoH2 projesi ile yakıt hücrelerinin yolcu gemilerine entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. 70 kW yakıt hücresinin yanı sıra 55kW kurşun asit akü paketi ile gemi tahrik edilmektedir [31]. Askeri alandaki yakıt hücresi uygulamaları çok çeşitli uygulamalarla devam

etmektedir. Örneğin, son yıllarda taşınabilir yakıt hücresi hücrelerinin askeri alanlarda uygulanmasına yönelik araştırma ve geliştirme yapan birçok yeni organizasyon ve şirket bu sektöre girmiştir. Idatech, Jadoo Power, Mesoscopic Devices, Millennium Cell, NanoDynamic, BostonDynamic, Neah Power bunlardan bazılarıdır [32]. İnsansız hava araçları (İHA) fotoğraf çekme, arama-kurtarma ve operasyonel görevlerde kullanılmaktadır. Yakıt hücreleri de İHA uygulamalarında farklı amaçlarla kullanılmak üzere geliştirilebilmekte ve bataryalı sistemlere göre menzilleri dört kata kadar arttırabilmektedirler [33]. Millennium Cell, Proton Energy Systems ve UltraCell firmaları İHA'ların enerji ihtiyaçlarını karşılayacak yakıt hücreleri üzerinde detaylı gelişmeler elde etmişlerdir [34].

Yakıt hücreleri çalışması için gerekli hidrojen PEM elektrolizörler sayesinde yerli imkanlarla üretilmektedir. Yüksek saflıkta hidrojen ve oksijen üretebilen PEM elektrolizörler, yakıt pilleri ile entegre denizaltı sistemlerinde kullanıldığında enerji ihtiyacı karşılanırken aynı zamanda çalışan personelin oksijen ihtiyacını karşılayarak su altında görev süresini uzatabilmektedir.

1.2.3. Hidrojen Üretim Yöntemleri

Hidrojen yaygın olarak termal, elektrolitik ve fotolitik yöntemlerle üretilmektedir. Termal yöntem hidrojenin metandan buhar reformasyonu ile, kısmi oksidasyon ve oto termal reformasyonla üretiminde kullanılmaktadır. Petrol ya da kömür türevleri kullanıldığında ise gazlaştırma yöntemi kullanılmaktadır.

Yılda 500 milyar m³ olan hidrojen üretiminin yaklaşık %96'sı fosil kökenli yakıtlardan elde edilmektedir [1, 35]. Ancak fosil kökenli hidrokarbonlardan hidrojen elde edilmesi düşük saflık ile CO ve CO₂ gibi zararlı atıkları ortaya çıkmasını da beraberinde getirmektedir. Bu sorunu çözüme kavuşturacak olan yöntem suyun elektrolizinde yatmaktadır. Suyun elektrolizi ile yüksek saflıkta (%99,99) hidrojen elde edilmesi ile yan ürün olarak saf oksijen de açığa çıkmaktadır [36-38].

Hidrojen üretim yöntemleri, hidrojen üretimi sırasında açığa çıkan zararlı gazlara ve çevreye verdiği zarara göre renk sınıflarına ayrılabilir. Tablo 1.2'de hidrojen üretim yöntemlerini renklerle ifade edilmiş hali görülmektedir.

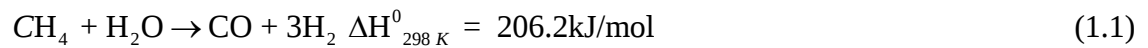
Tablo 1.2 Hidrojen üretim yöntemlerinin renklerle ifade edilmesi.

	Gri Hidrojen	Mavi Hidrojen	Turkuaz Hidrojen	Yeşil Hidrojen
Proses	Buhar-Metan Reformasyonu, Kömürün Gazlaştırılması ve Kısmi Oksidasyon (SMR yöntemi)	Buhar-Metan Reformasyonu, Kömürün Gazlaştırılması ve Kısmi Oksidasyon (CCS yöntemi)	Piroliz	Elektroliz
Kaynak	Metan ve Kömür	Metan ve kömür	Metan	Yenilenebilir Enerji

Tablo 1.2’de görüldüğü üzere Buhar-Metan reformasyonu ve Kömürü gazlaştırma işlemi sırasında CO ve CO₂ emisyonu gerçekleştiği için gri ve mavi kategoride yer almaktadır. Gri kategori, açığa çıkan zararlı gazlar, gaz yakalama prosesleri ile daha az salınım sağlamasıyla mavi hidrojen kategorisi oluşmuştur. Turkuaz hidrojen üretim prosesi olan piroliz süreci boyunca, metan içindeki karbon katı karbona dönüşür. Katı karbon, satışıyla gelir elde edilebilecek bir pazar olup gaz halindeki CO₂’den daha kolay depolanabilmektedir. Tüm bu kategorilerde az da olsa hidrojen üretimi sırasında çevreye zarar verilmektedir. Ancak yeşil hidrojen üretim yöntemi, sıfır emisyon ile çevreye zarar vermeyen en temiz hidrojen üretim yöntemidir.

1.2.3.1 Buhar-Metan Reformasyonu

Buhar-Metan reformasyon yöntemi hidrokarbon kaynak kullanılarak hidrojen ve karbon monoksit gazı üretimi için en sık tercih edilen yöntemdir. Bu yöntemin temel hammadde doğalgaz olup. Metan-buhar reformasyon işleminde kullanılan iki temel reaksiyonlar Eş. 1.1 ve Eş. 1.2 de verilmiştir [39];



Buhar-Metan reformasyonu ile üretilen hidrojen, atık CO₂ atmosfere salındığında gri hidrojen üretimi olarak nitelendirilir. Ancak karbon yakalama metotları bu yöntemle

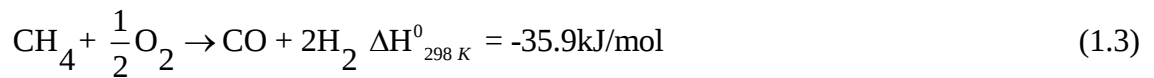
entegre edilirse CO₂ yakalanıp jeolojik olarak depolandığında mavi hidrojen üretimi olarak adlandırılabilir. Buhar metan reformasyonu işleminde toplam enerji verimi %65-75 arasındadır. Yukarıdaki reaksiyonlarda görüldüğü gibi işlem sonucunda çıkan CO₂ çevre kirliliğine neden olmakta ve 700-850°C sıcaklıklarda gerçekleşiyor olması bu prosesi zorlaştırmaktadır [39].

1.2.3.2 Kömürün Gazlaştırılması

Gazlaştırma, katı bir hammaddenin yüksek sıcaklıkta tam yanma işlemi gerçekleştirilmeden, başlıca hidrojen ve karbon içeren gaz ürünlere dönüştürme işlemidir. Ülkemizde bulunan kömür madenleri sayesinde kömürün gazlaştırılması prosesleri son yıllarda öncelikli alanlar arasında yer almıştır. Kömür, 450 psi ve 800–900 °C'de buharla reaksiyona girdiğinde, gaz halindeki ürünler CO, CO₂ ve hidrojendir. Az miktarda metan üretilir. Basınç 1000 psi'ye yükseltildiğinde metan ana ürün haline gelir. Gazlaştırma işlemlerinin temel amacı, kullanılan hammaddenin külsüz içeriğinin yanma ısını mümkün olduğunca koruyan gaz ürünlere dönüştürülmesidir [40].

1.2.3.3 Kısmi Oksidasyon

Kısmi oksidasyon, doğal gazın veya bir ağır hidrokarbon yatkının hava ile genellikle oksijen ile oksitlendiği ekzotermik bir reaksiyondur. Eş. 1.3'te kısmi oksidasyon genel reaksiyonun verilmiştir [41].



Eş. 1.4'te görülen oksitleyici görevi göre oksijen yerine hava da kullanılabilir. Yanma sıcaklığını düşürmek ve kurum oluşumunu azaltmak için su eklenebilir. Bazı yakıtların tamamen yanarak karbondioksit ve suya dönüşmesi nedeniyle verimler stokiyometrik değerinin altındadır. Ayrıca CO salınımından dolayı gri hidrojen üretim kategorisindedir ancak karbon yakalama yöntemi olan karbon yakalama ve depolama (CCS) ile üretilirse mavi renk hidrojen üretiminde değerlendirilebilir [42].

1.2.3.4 Ototermal Reformasyon

Ototermal reformasyonu sentez gazı oluşturmak için metan ile reaksiyonda oksijen ve karbon dioksit veya buhar kullanır. Reaksiyon, metanın kısmen oksitlendiği tek bir odada gerçekleşir. Reaksiyon oksidasyon nedeniyle ekzotermiktir. Gerçekleşen ana reaksiyon Eş. 1.4'te verilmiştir.



Sentez gazının çıkış sıcaklığı 950–1100°C arasındadır ve çıkış basıncı 100 bar'a kadar çıkabilir. Buhar-metan reformasyonunda ısı kaynağı olarak yalnızca yanma için hava kullanılırken ototermal reformasyonda ise saf oksijen kullanılmaktadır.

1.3. Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi

Suyun elektrolizi çalışma koşullarına ve iyonik geçirgenliğine (OH^- , O^{2-} , H^+) göre farklılık göstermektedir. Dört çeşit elektroliz yöntemi mevcuttur; alkali su elektrolizör, katı oksit elektrolizör, mikrobiyal elektrolizör ve PEM elektrolizör [43]. Alkali su elektrolizör KOH veya NaOH alkali çözeltisi kullanarak OH^- geçirgenliğine sahiptir ve 30-80°C gibi düşük sıcaklıkta çalışırlar. Sınırlı akım yoğunluğu (400 mA/cm^2) ile birlikte düşük çalışma basıncı ve düşük enerji verimliliği dezavantajlarını oluşturmaktadır [44]. Katı oksit elektrolizör elektrolit tabakasından O^{2-} iyonun geçişine izin verir. Saf hidrojen elde etmesi ile ilgi görmüştür. Çalışma sıcaklığının 500-850°C arası olmasından dolayı suyu buhar şeklinde kullanır bu sıcaklık değerleri termik ve nükleer santrallerdeki atık ısıyı kullanma şansı tanır. Ticarileşmesine istikrarsız davranış sergilemesi engel olmuştur [45, 46]. Mikrobiyal elektroliz hücresi biyokütle ve atık sular da dahil olmak üzere organik maddeleri kullanarak hidrojen üretebilmektedir. Düşük saflıkta hidrojen ve düşük hidrojen üretim oranı olmasına rağmen gelişim göstermektedir [47]. Tüm bu elektrolizörlerin yanında PEM elektrolizör 2 A/cm^2 (1,8 volt'da) ile yüksek akım yoğunluğu, hızlı devreye alma, yüksek verimlilik ve 20-80°C arası çalışma sıcaklığı gibi birçok avantaja sahiptir [37, 43, 48, 49]. Alkali elektrolizörler, PEM elektrolizörler ve Katı oksit elektrolizörlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 1.3'te karşılaştırılmıştır.

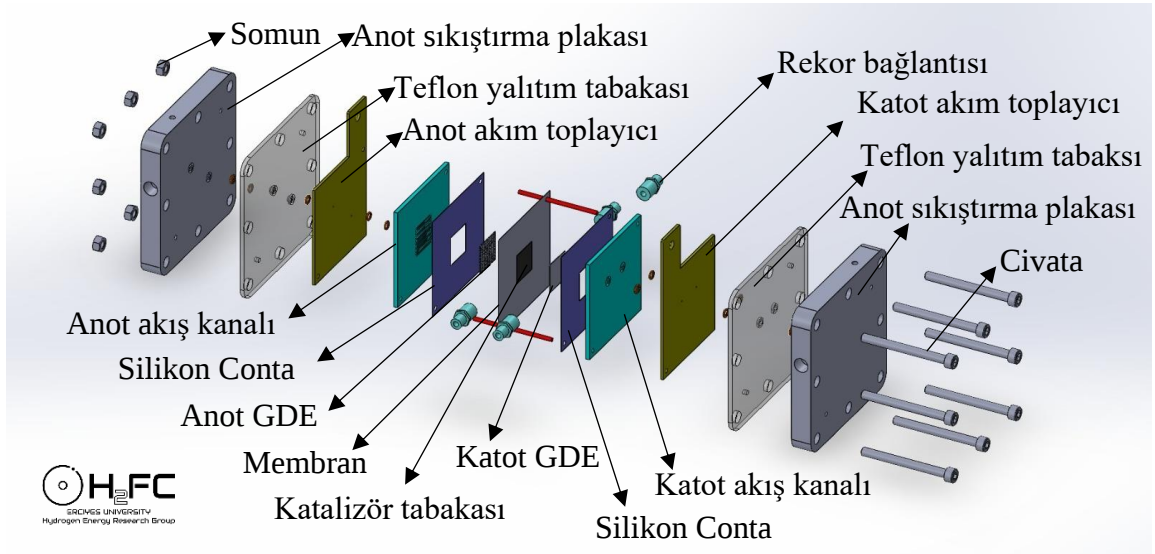
Tablo 1.3 Elektrolizörlerin avantaj ve dezavantajları [43].

	Alkali Elektrolizörler	PEM Elektrolizörler	Katı Oksit Elektrolizörler
Avantajlar	-Gelişmiş teknoloji -Soy olmayan katalizör kullanımı -Uzun süre dayanıklılık	-Yüksek akım yoğunluğu -Yüksek voltaj verimi -Hızlı tepki verme	-Yüksek basınçta çalışabilme -Soy olmayan katalizör kullanımı

	-Düşük maliyet	-Yüksek saflıkta hidrojen üretimi	
Dezavantajlar	-Düşük akım yoğunluğu -Düşük çalışma basıncı -Elektrolitin korozyona uğraması	-Yüksek komponent maliyeti -Hızlı korozyona uğraması -Düşük stabilite -Soy metal kullanımı	-Büyük sistem tasarım sorunları -Kırılgan seramikler yüzünden stabilite sorunu

Tablo 1.3'te görüldüğü üzere PEM elektrolizörler çok yüksek saflıkta hidrojen üretmesi ve ölçeklendirebilir olması talepleri karşılamak adına istenen özelliklerdir. Alkali elektrolizörler ise uzun süre dayanım avantajına sahiptir, ancak düşük akım yoğunluğunda çalışmalarından dolayı kullanımı sınırlıdır. Katı oksit elektrolizörler ise yüksek basınçta çalışma ve soy olmayan katalizör ihtiyacı ile öne çıkmalarına rağmen tasarım sorunları ve kırılgan yapıları yüzünden ticarileştirilmeleri yaygın değildir.

Membran, akım toplayıcı GDE, akış kanalları ve katalizör tabakalar PEM elektrolizörün ana bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu ana bileşenlerin yanında contalar, rekorlar, cıvata, somun ve yalıtım malzemeleri de yardımcı bileşen olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de PEM elektrolizör bileşenlerinin görüldüğü ve Erciyes Üniversitesi H2FC araştırma grubu tarafından tasarlanmış bir tek hücreye ait tasarım verilmiştir.



Şekil 1.2 PEM Elektrolizör bileşenleri.

Şekil 1.2’de görülen sıkıştırma plakası, akım toplayıcı, akış kanalı, GDE ile katalizör tabakasından, anot ve katot olmak üzere ikişer adet yer almaktadır. Bir PEM elektrolizörlerde anot ve katot parçalarının görevleri farklıdır. Hücreyi bir arada tutmak ve yeterli dayanımı sağlayabilmek için kullanılan eleman sıkıştırma plakasıdır. Anot akım toplayıcı hücrelerin seri bağlanmasını ve homojen bir akım dağılımı sağlayarak kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesine yardımcı olur. Membran, H^+ iyonlarının geçişine izin veren polimerik bir yapıya sahiptir. Oksijen oluşum reaksiyonları için anot katalizör tabakada kullanılan IrO_2/RuO_2 gibi katalizör ile hidrojen oluşum reaksiyonları için katot tabakada kullanılan Pt / Pd gibi soy metaller elektrolizörün yüksek maliyetinin %25’lik bölümünü oluşturmaktadır. Katalizörler üzerine yapılan maliyet düşürme çalışmaları devam etmektedir [50-54]. GDE ve akış plakaları PEM elektrolizör maliyetinin yaklaşık yarısını oluşturmaktadır [2]. Toplam 10.30 \$/kg ile yüksek maliyeti ticarileşmesinde en büyük engel teşkil etmektedir [36]. PEM elektrolizörlerin maliyetini düşürmek ve kolay erişilebilir malzemelerle üretmek çalışmaları hız kazanmıştır. Bu çalışmaların PEM elektrolizörün performansını olumsuz etkilemeden yürütülmesi dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisidir.

PEM elektrolizörlerde suyun hidrojen ve oksijene ayrışma olayı anot ve katot katalizör bölgesinde gerçekleşir. Eş. 1.5, Eş. 1.6 ve Eş. 1.7’de gerçekleşen reaksiyonlar sırasıyla şu şekilde verilmiştir:

Anot reaksiyonu:



Katot reaksiyonu:



Toplam reaksiyon:



Anot kısmında katalizör ile buluşan su, oksijen, elektron ve H^+ iyonuna dönüşür. Açığa çıkan elektronlar hücreyi tamamlayıp, seçici geçirgen zardan katot tarafına geçen hidrojen iyonları ile birleşerek, katot tarafında hidrojen gazını oluşturmaktadırlar.

1.4. Literatür çalışması

PEM elektrolizörlerde anot GDE, akış kanallarından gelen suyu dağıtarak katalizör tabakaya ulaştırır. Anot kısmında oluşan oksijen anot GDE ve akış kanalları ile hücre dışına alınırken H^+ iyonları elektronlarla buluşmak üzere membran üzerinden katot kısmına yol alır. Katot kısmında elektron ile birleşen H^+ iyonları hidrojen molekülünü oluşturur. Katot GDE ve akış kanalı ile hücre dışına çıkışı sağlanır. Tüm bu nedenlerden dolayı GDE'ler PEM elektrolizörlerin verimliliği ve dayanımı üzerine önemli bir görevi üstlenirler. GDE'lerin bu görevlerini yerine getirebilmeleri için hücre içi su ve oksijen taşıma kapasitelerinin iyi, korozyon dirençlerinin yüksek, elektrik iletkenliğinin iyi, hafif ve kolay üretilabilir özellikte olması gerekmektedir [55-57]. Lettenmeier ve arkadaşları [55, 58] GDE maliyetini düşürmek için yaptıkları çalışmada paslanmaz çeliği farklı yöntemler ile Pt, Nb ve Ti kaplamamışlardır. Kaplama yaptıkları paslanmaz çeliği piyasada sıkça kullanılan titanyum, keçe ve karbon GDE'ler ile karşılaştırmışlardır.

Gago ve arkadaşları da [59] maliyeti düşürmek için paslanmaz çelik üzerine termal püskürtme yöntemi ile Au ve Ti kapamışlardır. Korozyon testleri sonucunda paslanmaz çelik kaplamanın uygun olduğunu belirtmişlerdir. Bu malzemelerden yapılmış GDE'ler istenilen özellikleri sağlayabilmektedir. Ayrıca GDE'lerin birim zamanda daha çok suyu katalizör ile buluşturmak ve ardından oluşan gazları hücre dışına almak için belirli bir gözenekli yapıya sahip olması gerekmektedir.

Grigoriev ve arkadaşları [60] gözenek yapısı üzerine hem deneysel hem de modelleme yöntemi ile yaptıkları çalışmada GDE'lerin kalınlığının 0.8-2 mm, elektriksel direncinin 5-10 m Ω .cm ve gözenek oranının %30-50 arası ideal olduğunu belirtmişlerdir. Büyük gözenekli GDE kullanıldığında oluşan gazların çıkışına yardımcı olacaktır ancak içeri giren suyu düzgün yayamayacaktır. Tersine küçük gözenekli yapıda ise gaz çıkışını engelleyecek ve içerine giren suyun hızı yani transferini engelleyici direnç yaratacaktır. PEM elektrolizörlerin hem GDE'ler hem de akış kanalları içerisindeki akış dağılımını, basınç düşüşünü, faz dağılımları gözlemlemek ve optimize etmek için sayısal ve deneysel birçok çalışma yürütülmüştür [61-65].

Lafmejani ve arkadaşları [66] PEM elektrolizörleri içerisindeki gaz-sıvı akış dağılımını gözlemleye bilmek için mikro gözenekli GDE ile deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Gaz-sıvı karışımını test hücrelerinin içerisine gönderdiklerinde kabarcıklı akış, Taylor akış ve dairesel akış rejimleri gözlemlemişlerdir. Suyun stokiyometrisini artırarak büyük kabarcıkları parçaladıklarını ancak suyun girişi ve çıkışı arasında büyük basınç kayıpları olduğunu belirtmişlerdir.

Barreras ve arkadaşları [67] ticari olarak kullanılan bir yakıt hücresinin akış dağılımını incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında akışı görselleştirmek ve hızını ölçebilmek için "laser-induced fluorescence (LIF)" yöntemini kullanmışlardır. Paralel kenarlı plakanın deneysel sonuçlarını sayısal modelleme ile teyit etmişlerdir. Plakanın homojen dağılım gereksinimlerini karşılamadığını ve akışın genellikle yanal kanallar boyunca hareket ettiğini gözlemlemişlerdir. Sonuçlar GDE ve akış kanallarının geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Medina ve arkadaşları [68] PEM elektrolizörlerin yüksek basınç altında su transferlerini incelemişlerdir. Deney düzeneklerinde akım yoğunluğunu, yığın sıcaklığını, katot basıncını değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. Basıncın diğer tüm parametrelerden daha etkin olduğunu belirtmişler ve katot basıncının su iletimi üzerinde etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang ve arkadaşları [69] dokuma örgülü ve genişletilmiş örgülü ağ paslanmaz çeliklerin GDE olarak kullanımı karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma yaptıkları paslanmaz çelik GDE'leri mikrobiyal elektrolizör üzerine kullanımı için Döngüsel voltametri CV testlerine tabi tutmuşlardır. 1.11 volt üstü yüksek voltajlarda anot performansının ve

üretim hızının sınırlandığını 0.9 volt gibi düşük voltajlarda katalitik aktivenin azaldığını gözlemlemişlerdir. Uyguladıkları optimum voltajın 0.9 volt olduğunu ve bu değerinde dokuma örgülü ağ yapısının genişletirmiş örgülü ağ yapısından daha iyi hidrojen oluşumu sağladığını saptamışlardır. Paslanmaz çelik GDE'lerin elektrolizörlerde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Manso ve arkadaşları [70] genellikle kullanılan tekli serpantin, çoklu serpantin, pin tipi, paralel tipi, u tipi paralel, seri oralar paralel ve birbirine kenetlenmiş tip akış alanlarının yakıt hücresi performansı üzerine etkilerini irdelemişlerdir. Düşük basınçlı çalışma ortamında akış dağılımlarının daha düşük performans sergilediklerini belirtmişlerdir. Serpantin tip ile birbirine kenetlenmiş tip akış alanlarının ile harika akış dağılımları sağladıklarını ortaya koymuşlardır. Akış dağılımının yakıt hücreleri için önemini ortaya koymuşlardır.

Han ve arkadaşları [71] PEM elektrolizörleri içerisindeki gaz-sıvı çift faz akışların performansa etkisini incelemek için matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri matematiksel model sayesinde çift fazlı akış şartlarında akım yoğunluğu, temas açısı, gözeneklilik ve kalınlığın etkilerini ortaya koymuşlardır.

Aubras ve arkadaşları [72] anot kısmında oluşan çift faz akışın kütle transferini incelemişlerdir. Çalışmalarını iki boyutlu matematik modeli üzerinden yürütmüşlerdir. Matematiksel model çalışmaları ile çift fazlı akışın kütle transferinin hücre performansı üzerine etkilerini ortaya koymuşlardır. Li ve arkadaşları [73] bir PEM elektrolizöründe oluşan oksijen kabarcıklarının su içerisindeki hareketlerini incelemek için şeffaf bir hücre hazırlamışlardır. Şeffaf hücre içerisindeki çift faz akışları gözlemleyebilmek için yüksek hızlı kamera kullanmışlardır. Değişken parametre olarak sıcaklık ve akım yoğunluğunu seçmişlerdir. Bu değişken parametrelerde oluşan oksijen hareketlerini saptamışlardır.

GDE veya akış kanalları üzerine yapılan deneysel çalışmaları hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile bilgisayar ortamında simülasyonunu doğru yapabilmek için çift fazlı akış çözümlemesine ihtiyaç duyulur. Çift fazlı akış modellemesi ile gerçek ortamda bulunan gaz-sıvı arasındaki süreklilik, momentum, yüzey gerilimlerini ve akış rejimlerini bilgisayar ortamına aktarılabilir. Mikro kanallar içerisinde gaz-sıvı arasında kabarcıklı, Taylor, dairesel, kayık akış rejimleri etkilidir [74-76]. Bu akış rejimleri arasında PEM elektrolizörler için en uygun akış Taylor tipi akıştır ve bu rejimi bilgisayar ortamında modellemek için “sıvıların hacmi metodu (Volume of Fluid, VOF)” metodu

kullanılmaktadır [77]. VOF yöntemi Süreklilik, momentum, hacim fraksiyonu ve kütle korunum denklemlerini aynı anda çözüme kavuştururken çift faz arasındaki yüzey gerilimi kuvveti ile gaz-sıvı davranışını doğru tayin edebilmektedir [78]. Böylece deneysel çalışmalardan önce bilgisayar ortamında sayısal çözümler ile gerçek ortam simülasyonu yapılabilmektedir.

Barreras ve Lozano [79, 80] akış kanalları için genellikle kullanılan serpantin tip, kademeli tip ve paralel diyagonal tip kanal yapılarını sayısal simülasyonu ile deneysel olarak hız, basınç, akış alanlarını incelemiştir. Sayısal çözümlerinde VOF metodunu ve deneysel çalışmalarında LIF izleme tekniğini kullanmışlardır. Sonuçları teyit etmek için kıyaslamışlardır. Böylece ayırıcı plakaların hız haritasını çıkarmışlardır.

Selamet ve arkadaşları [81] PEM elektrolizörü içindeki çift faz akışını gözlemlemek için nötron radyografisi ve optik görüntüleme kullanmışlardır. Özellikle suyun giriş hızı, akım yoğunluğu ve sıcaklık parametreleri üzerinde yoğunlaşmışlardır. Sıcaklık artışının suyun hacmini dolayısı ile hücre verimini etkilediğini belirtmişlerdir. GDE üzerindeki gözeneklilik fraksiyonunu belirlemede nötron radyografisi etkili olmuştur.

Lafmejani ve arkadaşları [82] genişletilmiş metallerin GDE olarak kullanılması için akış analizini yapmışlardır. Oluşturdukları test hücresinin içerisine genişletilmiş metali yerleştirmişlerdir ve akışı görselleştirmek için mürekkep kullanmışlardır. Test hücresinin giriş çıkışına yerleştirdikleri basınç ölçerler ile farklı hızlarda oluşan basınç kayıplarını ölçmüşlerdir. Bu deneysel çalışmayı hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile bilgisayar ortamında simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

Nie ve arkadaşları [83, 84] akış kanallarının çift faz akış analizini basınç, sıcaklık ve hız dağılımı konuları çerçevesinde irdelemişlerdir. Oluşturdukları test düzeneğinin giriş ve çıkışına basınç ölçer yerleştirmişlerdir. Bu sayede test hücresi içine farklı hızlarda gönderdikleri suyun basınç düşüşünü ölçebilmişlerdir. Deneyde kullandıkları ayırıcı plakayı matematiksel modelleme ile hesaplamalı akışkan dinamiği programına aktarmışlardır. Bilgisayar ortamında VOF metoduyla çözümledikleri çift fazlı akış analizi sonuçlarını deneysel sonuçlar ile kıyaslamışlardır. Deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının doğruluğunu teyit etmişlerdir.

2022 yılında ise Kıstı ve arkadaşları [85] yaptıkları çalışmada PEM elektrolizörler için gaz difüzyon elektrotu olarak daha ucuz bir alternatif yaratmak adına paslanmaz çelik ağ

elektrotlar tercih etmişlerdir. Dört farklı gözenekli yapıya sahip paslanmaz çelik ağ yapılarını önce basınç değişim deneylerine tabi tutmuşlardır. Test hücresi içerisinde en az basınç değişimi gösteren paslanmaz çelik ağ yapısını elektrodpozisyon yöntemi ile Pt kaplamışlardır. 1,9 volt sabit voltajda yapılan kaplamanın kaplanmamış elektrota göre akım yoğunluğunda %300 artış tespit etmişlerdir. Yük transfer katsayısının (charge transfer coefficient) literatürde ortalama 0,5 iken bu çalışmada 0,827 olarak hesaplandığını belirtmişlerdir.

1.5. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Literatür özetinden de görüldüğü üzere dünyada hidrojen ihtiyacının büyük bir bölümü metan-buhar reformasyonu ile elde edilmektedir. Metan içeriğinde hidrokarbon bulundurduğu için bu yöntem sırasında çevreye zararlı gazlarda çıkmaktadır. Ancak suyu elektrik enerjisi kullanılarak suyun oksijen ve hidrojene ayrıştıran PEM elektrolizörler, yüksek verimlilikte hidrojeni temiz yollarla üretebilmektedir. Bu özellikleri ile gelecek vaat eden PEM elektrolizörlerin yüksek maliyetleri ticarileşmesi önündeki en büyük engeldir. Tez çalışması kapsamında ise, PEM elektrolizörlerin ana bileşeni olan GDE'in özgün tasarımı geometriler ile akış davranışı incelenmesi deneysel ve sayısal olarak yapılacaktır. GDE'ler PEM elektrolizör içerisine gönderilen suyu homojen şekilde dağıtarak katalizör tabakaya ulaştırılmasını sağlar bu yüzden akış davranışının incelenmesi PEM elektrolizör performansı için büyük önem arz etmektedir. Literatür taramasında PEM elektrolizör GDE'nin geometrik yapısı üzerine yapılmış çalışmaların eksikliğine rastlanmıştır. Bu eksikliği gidermek adına kare, daire, eşkenar üçgen ve eşkenar dörtgen geometrili desene sahip özgün tasarımı GDE'lerin akış davranışları önce deneysel olarak irdelenmiş ardından en iyi geometrinin sayısal çözümlemelerle doğruluğu karşılaştırılmıştır. En iyi akış davranışı sergileyen desen geometrisine sahip GDE'nin PEM elektrolizörün performansını artırması için kullanımı hedeflenmektedir. İlgili çalışma 120M234 kodlu TÜBİTAK 1001, "PEM Elektrolizörler için Yenilikçi Anot Gaz Difüzyon Tabakaları Geliştirilmesi" başlıklı projenin ilk iş paketidir. Bu anlamda, tez çalışmasının önemi ve literatüre yapacağı katkılar şu şekilde sıralanabilir:

- a) Yapılan literatür taramalarında hem yakıt hücreleri hem de PEM elektrolizörlerin genellikle akış kanallarının deneysel veya sayısal çalışması yürütülmüştür. Farklı GDE geometrilerinin akış dağılımını inceleyen çalışmaların ise oldukça kısıtlı

olduğu görülmüştür, bu yüzden bu çalışma kapsamında deneysel ve sayısal çalışmalar yapılarak literatüre özgün katkılar sağlanması amaçlanmıştır.

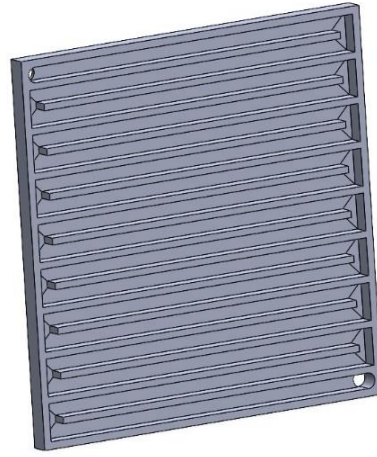
- b) PEM elektrolizöre gönderilen su, içeride engel ile karşılaşmakta ve iyi bir akış dağılımı sergilemez ise giriş ve çıkış arasındaki basınç farkı artmaktadır [86]. Bu yüzden hücre içinde daha yüksek performans elde etmek için basınç düşüş değerinin küçük olması beklenmektedir. Hem deneysel basınç ölçümü, hem de sayısal basınç farkı sonuçları ile en düşük basınç değişimi sergileyen GDE belirlenecektir.
- c) Belirlenen GDE'in düşük basınç farkının yanında en iyi akış dağılımı performansı sergilemesi de beklenmektedir. Farklı GDE geometrilerinin mürekkep ile hücre içi akış dağılımları deneysel ve çok fazlı sayısal akış dağılımı ile incelenecektir. Çok fazlı sayısal akış çözüm sonuçları gelecekte PEM elektrolizörler üzerinde yapılacak sayısal çözüm modellemesinde yol gösterici olması beklenmektedir.
- d) Belirlenen geometriye sahip GDE kullanılarak hazırlanacak bir PEM elektrolizör hücresinde, akış dağılımında daha az basınç düşüşünün elde edilmesi, daha fazla reaktant ve ürünün taşınımını sağlayarak ve hücre içi performansında iyileşmeler meydana getirmesi ön görülmektedir.

2. BÖLÜM

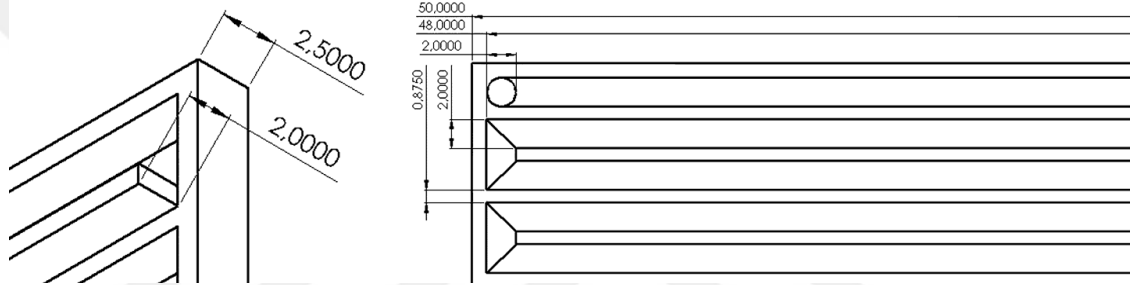
YÖNTEM ve MATERYAL

2.1. Basınç ve Mürekkep Deneylerinin Deneysel Hazırlığı

Öncelikle PEM elektrolizörlerde çok yaygın olarak kullanılan serpantin tipi akış kanalı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bir akış alanının geometrisi, akış ve su yönetimi özelliklerine bağlı olarak PEM elektrolizör hücresinin performansını etkilemektedir. Akış kanalı uygun bir akış alanı tasarımı ile reaktantların taşınması ve suyun yönetimi ile PEM elektrolizör verimliliğini iyileştirilebilmektedir [87]. Serpantin kanal tasarımı su çıkışını ve kabul edilebilir bir basınç düşüşünü dengeleyebilecek bir akış alanına sahiptir [88, 89]. Bu özelliklerinden dolayı deneylerde kullanmak üzere serpantin tipi akış kanalı tercih edilmiştir. Bu özelliklerde tasarlanmış olan serpantin akış kanallı detayları Şekil 2.1’de görülmektedir.



(a)

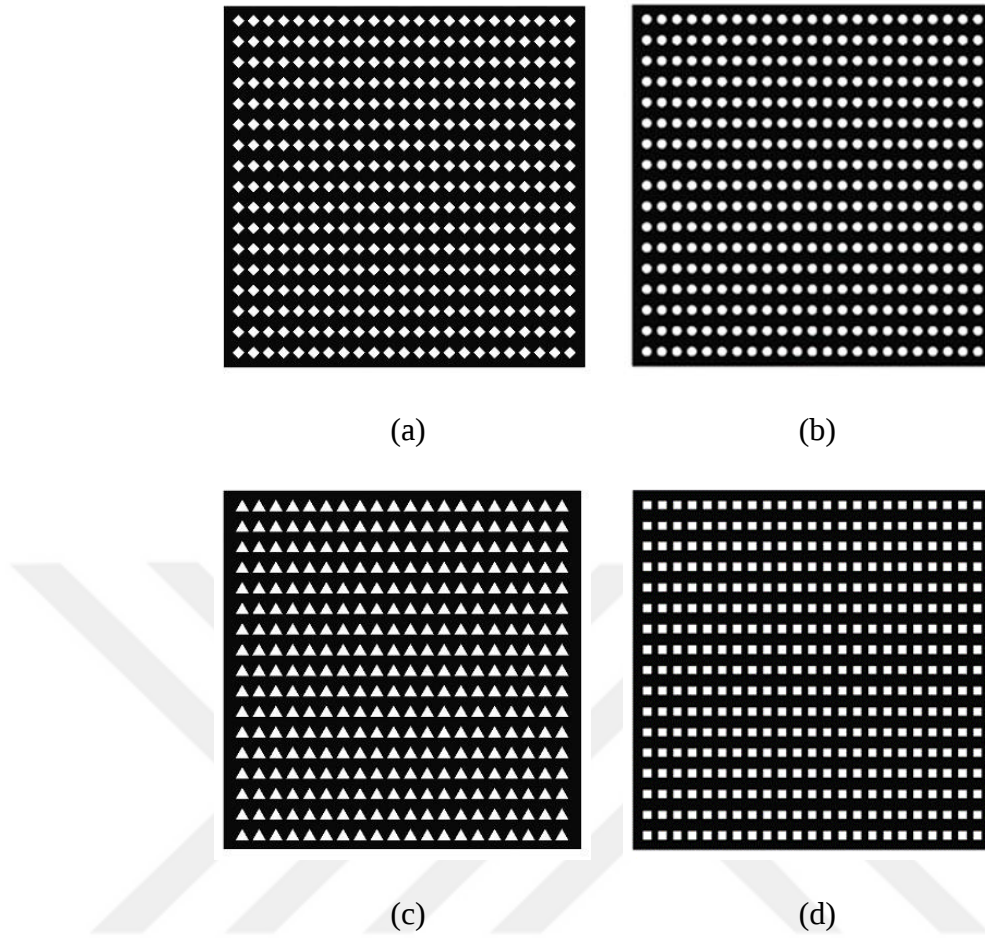


(b)

Şekil 2.1 a) Serpantin akış kanalının 3D görüntüsü, b) Serpantin akış kanalı ölçülendirme detayları.

50 mm en, 50 mm boy ve 2.5 mm kalınlık ölçülerine sahip serpantin tip akış kanalında, her kanal arası açıklık ve kanal derinliği 2 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Akış görselleştirme deneylerinin tümünde aynı serpentine tip akış kanalı kullanılmıştır. Farklı geometrik desenlere sahip GDE'ler bu akış kanalı kullanılarak incelenmiştir.

Basınç düşüşü ve akış dağılımı gözlemlenecek GDE'lerin aktif yüzey alanları 25 cm^2 ($5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$) ve kalınlıkları 1 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Eşkenar dörtgen, daire, eşkenar üçgen ve kare delikli desene sahip olacak şekilde 4 farklı GDE tasarımı yapılmıştır. Şekil 2.2'de farklı geometriler ile tasarlanmış GDE'ler görülmektedir.

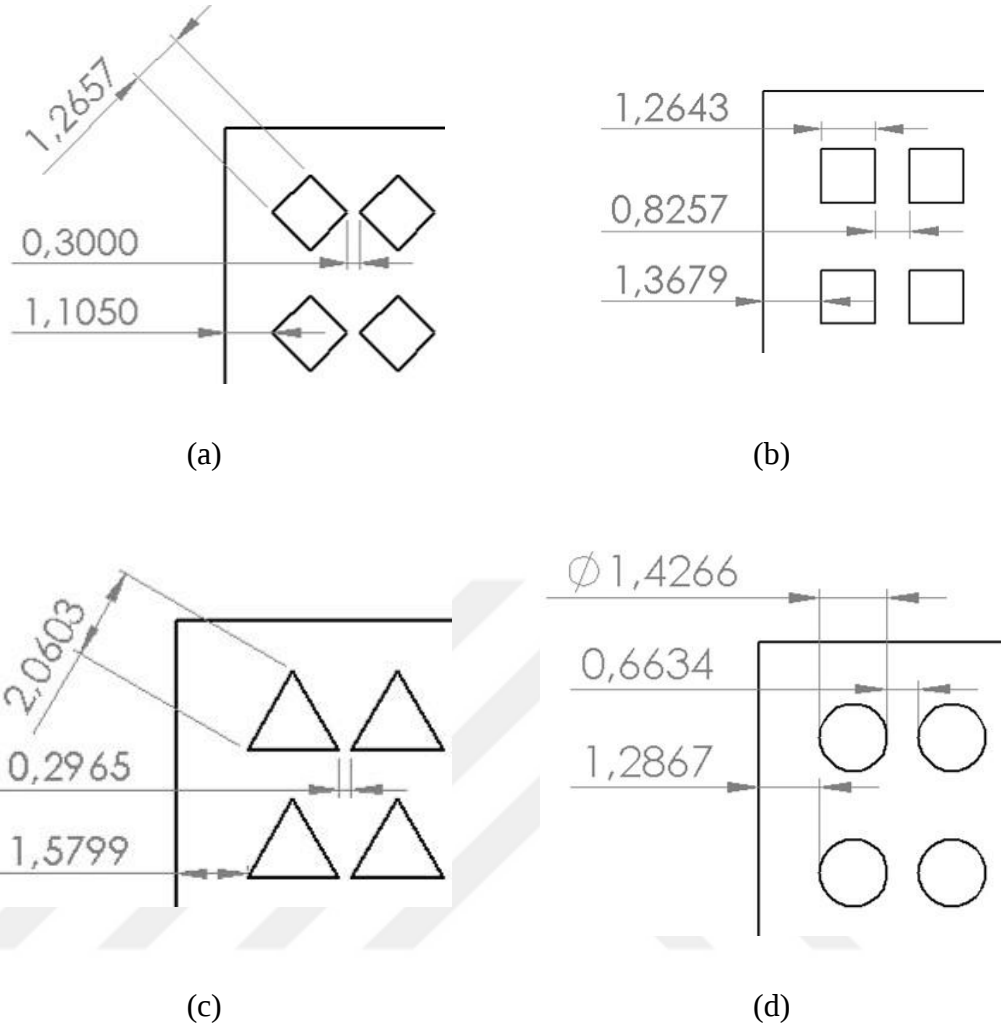


Şekil 2.2 GDE tasarımları: a) Eşkenar dörtgen GDE, b) Daire GDE, c) Eşkenar üçgen GDE, d) Kare GDE.

Farklı geometrik desenlere sahip GDE'lerin hepsi %25 gözeneklilik oranı ile tasarlanmıştır. Bu gözeneklilik oranı aşağıdaki Eş. 2.1 ile hesaplanmıştır:

$$\text{porosity}(\%) = \frac{(A_1 \times A_t)}{A_{\text{daya}}} \times 100 \quad (2.1)$$

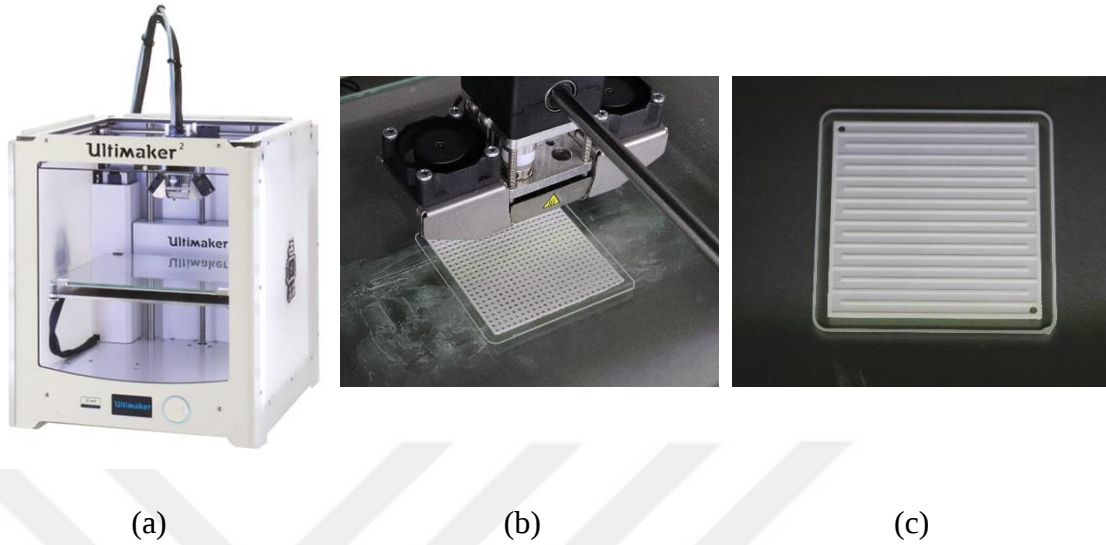
Burada A_1 bir geometrinin alanını (cm^2), A_t toplam geometri sayısını ve A_{daya} ise GDE dolu aktif yüzey alanı (cm^2) ifade etmektedir. Bu oran hesaplanırken toplam boşluk oranı toplam doluluk oranına yüzde olarak oranlanarak hesaplamalar yapılmıştır. Böylece tüm GDE'lerin eşit gözeneklilikte test edilmiş olacaktır. Her bir GDE'in geometrik yapısını detaylı incelemek için Şekil 2.3'te GDE geometrilerin ölçü detayları verilmiştir.



Şekil 2.3 GDE geometrilerinin ölçü detayları: a) Eşkenar dörtgen GDE, b) Kare GDE, c) Eşkenar üçgen GDE, d) Daire GDE.

Üretim için de farklı arayışlar sonucunda eklemeli üretim (EÜ) yönteminin tercih etmenin ham daha az maliyetli, hem de laboratuvarımızda yer alan 3D yazıcılarımızla hemen ulaşılabilir bir yöntem olarak görülmesi üzerine denemeler yapılarak bu geometrilerin 3D yazıcı hassasiyet sınırları arasında üretilebileceği belirlenmiştir. Bilindiği gibi küçük ve karmaşık yapıların üretimi için (EÜ) yöntemi farklı uygulamalarda da kullanılmaktadır. Hızlı üretim yöntemleri arasında yer alan (EÜ) günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Aynı zaman da EM yöntemi ile oluşturmak istenilen nesnelerin tasarım ve üretimlerinde sınır yoktur. Aynı zamanda kalıp teknikleri ile üretilemeyen karmaşık tasarımlar bile bu yöntemle üretilebilmektedirler. Bu yüzden ilgili tasarımlar 3D yazıcı ile standart Polilaktik Asit (PLA) polimerik filamentleri ile üretilmiştir. (EÜ) yöntemini kullanarak, Ultimaker²⁺ 3D yazıcı yardımı ile tasarlanmış serpantin tip akış kanalı ve

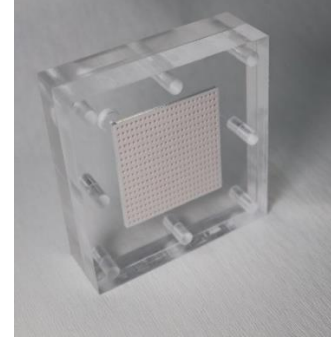
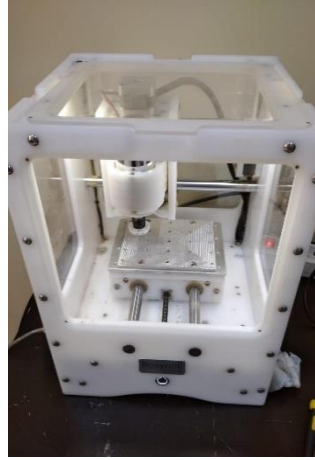
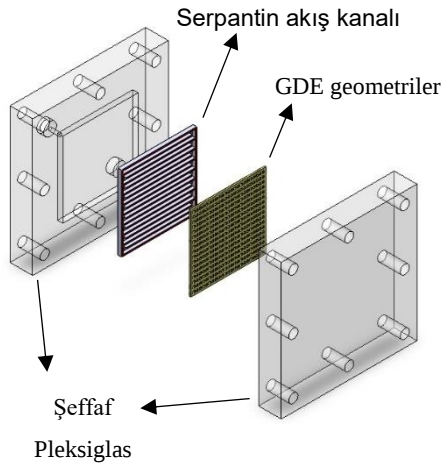
GDE'lerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4'te akış kanalı ve GDE'lerin üretim aşaması görülmektedir.



Şekil 2.4 GDE ve akış kanalı üretim aşaması: (a) Ultimaker²⁺ 3D yazıcı, (b) GDE'in 3D'de basım süreci, (c) basımı tamamlanmış serpantin akış kanalı.

0.25 mm gibi çok hassas nozzle kullanılması ve 3D yazıcının teknik özellikleri sayesinde küçük gözeneklere sahip GDE'ler ve serpantin tip akış kanalı kolaylıkla üretilmiştir. Yazdırma hızı olarak 50 mm/s, katman kalınlığı 0.2 mm, doluluk oranı %100 olarak belirlenmiştir. Test hücresi içerisinde sadece akış görselleştirme yapılacağı ve GDE'lerin elektrokimyasal reaksiyona tabi tutulmayacağından dolayı iletkenlik ihtiyacı bulunmaması sebebiyle PLA malzemenin GDE ve serpantin kanal için yeterli olacağı kanaatine varılmıştır.

Serpantin tip akış kanalı ve farklı geometrik desene sahip GDE'ler üretildikten sonra akış görselleştirmesi için şeffaf test hücresi hazırlanmıştır. Serpantin akış kanalı sabit ancak, farklı geometrik desene sahip GDE'lerin değişken olacağı bir test hücresi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu test hücresi serpantin tip akış kanalının ve GDE'in gireceği bir yuvaya sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca test hücresinin giriş ve çıkış kısmına rekor takılacak şekilde dişli tasarımı eklenmiştir. Akış görselleştirme sırasında su ve mürekkep dağılımını gözlemleyebilmek için test hücresi mini CNC freze yardımıyla şeffaf pleksiglas malzemeden üretilmiştir. Şekil 2.5'te şeffaf test hücresinin tasarımı ve nihai olarak üretilmiş görselleri görülmektedir.



(a)

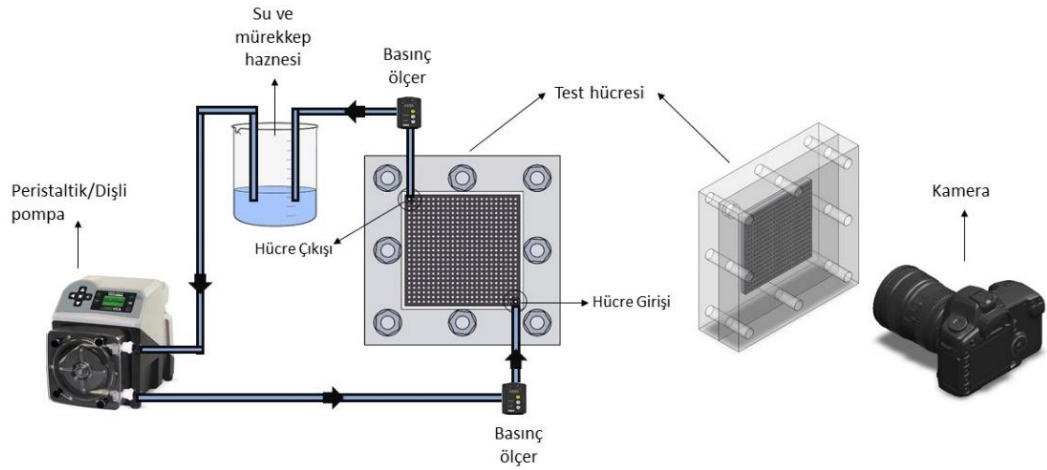
(b)

(c)

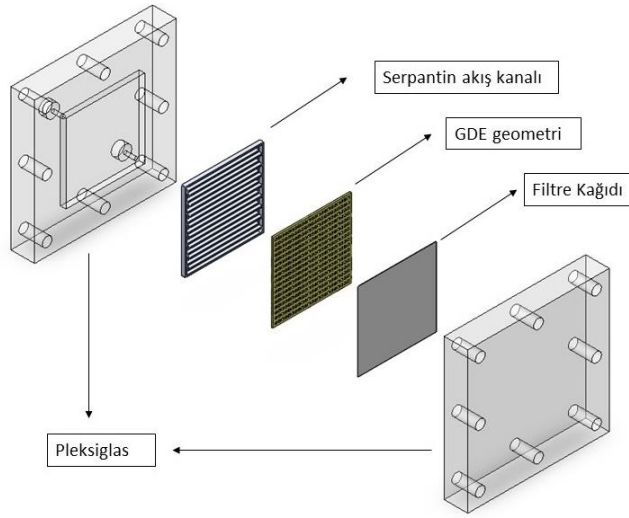
Şekil 2.5 a) Şeffaf(transparent) test hücresi tasarımının montajı, b) Şeffaf test hücresinin CNC işleme c) üretimi tamamlanmış şeffaf test hücresi.

Şeffaf test hücresinin aktif yüzey alanı 25 cm^2 , dış boyutu $90 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ olacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Sızdırmazlık elde edebilmek için şeffaf silikon conta kullanılmıştır, bu sayede saf su ve mürekkebin aktif alanın dışarı taşmaları engellenmiştir. Serpantin akış kanalı, GDE ve test hücresini düzgün kontak kurması için 8 noktadan 6 mm civata kullanılarak 4 N.m tork uygulanarak eşit şekilde sıkma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sıkma işlemi CEDAR marka DIW-75 modele sahip torkmetre kullanılarak yapılmıştır.

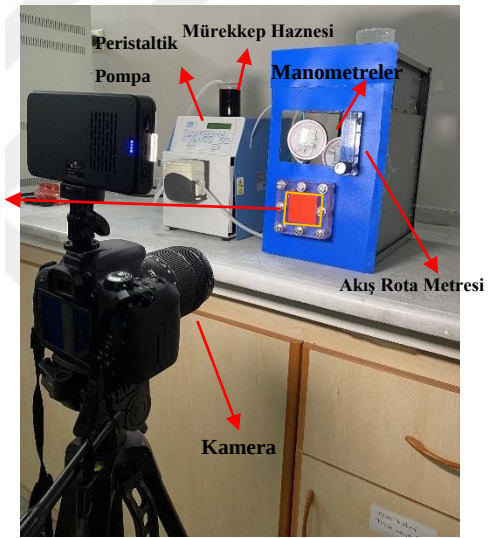
Test hücresinden sonra basınç ve görselleştirme deneyleri için deney düzeneğinin hazırlanmasına geçilmiştir. Bu test hücresinin giriş ve çıkış kısmına dijital manometre yerleştirilmiştir [83, 84]. Dijital manometreler sayesinde şeffaf test hücresi içerisi giriş basıncı ve serpentine tip akış ve test edilen GDE içerisinden geçen akışkanın çıkış basıncı ölçülmüştür. Burada dişli pompa ile su gönderilerek basınç dalgalanmalarının önüne geçilmiştir. Bu sayede basınç düşüşü hesabı yapılabilmektedir. Oluşturulan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2.6'da görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

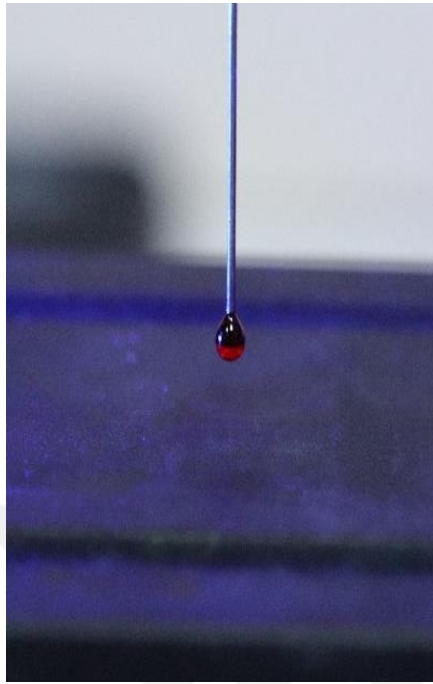
Şekil 2.6 (a) Basınç ve mürekkep deneyleri için test düzeneğinin şematik gösterimi, (b) Mürekkep deneyleri için test hücresi içini şematik gösterimi, (c) Basınç ve mürekkep deney düzeneği.

Şekil 2.6.c’da görüldüğü üzere bir sn’de çekebildiği görüntü sayısı (FPS) 6 olan ve 20 megapiksel çözünürlüğe sahip Canon EOS 800D fotoğraf makinesi şeffaf test hücre içerisini görüntülemek için test hücresinin karşısına yerleştirilmiştir. Selecta/PR-2003 marka (maks: 1500 l/min) peristaltic pompa kullanılarak test hücresi içerisine istenilen debide su ve mürekkep gönderilmiştir. Verth marka 0-700 kPa ölçüm aralığına sahip dijital manometreler test hücresinin giriş ve çıkışına konumlandırılmıştır. Böylece hücre içerisine giren ve çıkan suyun basıncı ölçülerek basınç farkı hesaplanmıştır. Farklı

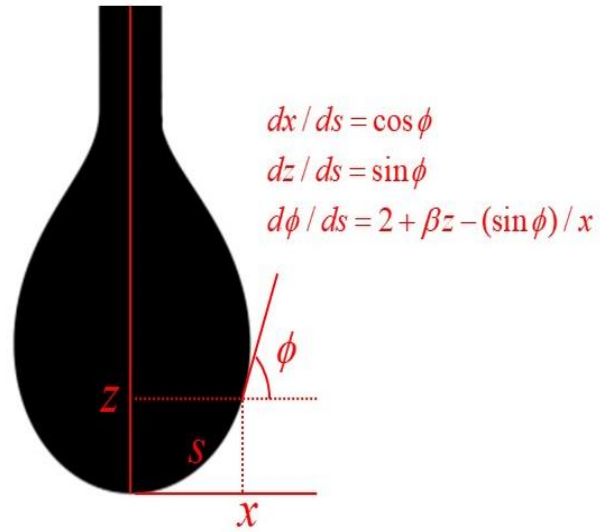
geometrik desene sahip GDE'lerin, farklı debilerde basınç ölçümleri bu deney düzeneği sayesinde alınmış ve basınç değişimleri hesaplanmıştır. Literatürdeki farklı çalışmalara göre belirlenen 100 ml/dk, 200 ml/dk ve 300 ml/dk debiye sahip su peristaltik pompa kullanılarak test hücresine gönderilmiştir [84]. Bu üç farklı debi değeri, üretilen dört farklı GDE için uygulanmıştır. Her bir debi ve GDE için, suyun hücreye giriş ve hücreden çıkış basıncı ölçülmüştür. Giriş ve çıkış basıncına göre basınç değişimi (ΔP) ile düşüş miktarı oransal olarak hesaplanmıştır. Dört farklı geometrik desene sahip GDE'lerin akış görselleştirmesi için şeffaf test hücresi içerisine mürekkep (Pelikan, 4001) gönderilmiştir. Basınç ölçüm sistemine ek olarak mürekkep haznesi peristaltik pompa (JP Selecta, PR-2003) ve şeffaf test hücresi içerisine filtre kağıdı (S&H labware 125mm çap) yerleştirilmiştir. Filtre kağıdı sayesinde test hücresi içerisine giren mürekkebin farklı GDE'lerde nasıl akış davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Şekil 2.6.c'de mürekkep deneyleri için kullanılan deneysel sistemin fotoğrafı görülmektedir. Şeffaf test hücresi içerisinde akış dağılımını gözlemleyebilmek için filtre kâğıdı hücrenin kameraya bakan tarafına yerleştirilmiştir. Akış görselleştirme deneyleri belirlenen üç farklı debide tekrarlanmıştır. Her bir GDE ve her bir debi için deneyler üçer kez tekrarlanarak sonuç çıktıları teyit edilmiştir. Akış görselleştirme deneylerinde amaç filtre kağıdının tamamen renklenmesi ve mürekkebin çıkışa doğru yöneldiğinin gözlenmesidir. Şekil 2.6.b ve 2.6.c'de görüldüğü üzere filtre kağıdı gerçek PEM elektrolizör sistemindeki katalizör tabakayı temsilen yerleştirilmiştir. Mürekkep serpantine akış kanalı ve GDE tabakada dağıldıktan sonra filtre kağıdına ulaşmaktadır. Böylece katalizör tabakasını temsilen filtre kağıdı üzerinde akışın nasıl dağıldı gözlemlenebilmiştir.

2.2. Mürekkep ve Filtre Kağıdının Sayısal Modelleme İçin Karakterizasyon İşlemleri

Kullanılan mürekkebin yoğunluk, kinematik viskozite ve yüzey gerilimi (surface tension) değerlerinin, basınç deneylerinde kullanılan su ile karşılaştırılması için ölçümler alınmıştır. Bilindiği gibi akış deneylerinde ve sayısal çözümlerde Navier-Stokes denklemleri için kritik sınır şartlardan birisi olan yoğunluk, kinematik viskozite ve yüzey gerilimi değerinin su ile karşılaştırmalar açısından belirlenmesi gerekmektedir [90]. Yoğunluk ölçümü (Kruss DS7800) cihazı ile belirlenmiştir. Diğer bir önemli parametre olan kinematik viskozite, viskozite banyosunda (TV2000-AKV) cihazında ölçülmüştür. Şekil 2.7'de yüzey gerilimi ölçümlerine ait görüntüler görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.7 a) Pelikan 4001 marka mürekkep yüzey gerilimi ölçüm anı. b) Yüzey gerilimi ölçümü esnasında alınmış mürekkebe ait askıda damla (pendant drop) şekli.

Yüzey gerilim ölçümü (Attension, Theta Lite) cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.7.b’de görülen askıda damla şekli Young-Laplace denkleminde şekil faktörü olan β ’nin belirlenmesi için cihaz tarafından ölçülmektedir. Yüzey gerilimi belirlemek için cihaz Eş. 2.2’de belirtilen Young-Laplace denklemine göre hesaplama yapmaktadır [91].

$$\gamma = \Delta \rho g \frac{Ro^2}{\beta} \quad (2.2)$$

Eş.2.2’de belirtilen γ yüzey gerilimi değerini temsil etmektedir. $\Delta \rho$ ise akışkanlar arasındaki yoğunluk farkını, g yerçekimi ivmesi, Ro^2 tepe noktasında eğrilik yarıçapı, β şekil faktörünü temsil etmektedir. Şekil faktörü olan β Şekil 3b’de verildiği gibi üç boyutsuz birinci dereceden denklemlerle ifade edilen Young-Laplace (Eş. 2.2) ile tanımlanabilir [92, 93]. Şekil 3b’de belirtilen denklemler sayesinde Şekil faktörü olan β belirlenebilir ve yoğunlukları bilinen temas halindeki herhangi iki akışkan için, yüzey

gerilimi, Young-Laplace (Eş. 2.2) denklemi ile hesaplanabilir. Bu yöntem, çok küçük hacimlerde sıvı kullanabilme avantajına sahiptir ve çok düşük yüzey gerilimi değerlerinin ölçülmesi mümkündür [93]. Deneyde kullanılan mürekkebin (Pelikan, 4001) yoğunluk, kinematik viskozite ve yüzey gerilimi değerleri sayısal modelleme sırasında sınır şartı değeri olarak kullanılmıştır. Ayrıca katalizör tabakasını temsilen filtre kağıdını 10 farklı noktadaki yüzey morfolojik özellikleri, 0,5- 30 kV hızlanma voltajı, $5 \times \sim 300.000 \times$ büyütme ve 5 eksenli bir numune ile bir alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) Zeiss Gemini 500 cihazı ile yüzey ölçümleri alınmıştır. 10 farklı noktadan alınan FE-SEM görüntüleri ImageJ programında görüntü işlemeye tabi tutulmuştur. ImageJ programı içerisinde Treshold yöntemi ile görüntü işleme yapılmıştır ve filtre kağıdının gözenekli yapısının yüzey alanı program içinde hesaplanmıştır [94, 95]. Böylece filtre kağıdının gözeneklilik oranı belirlenmiştir. Bu oran sayısal modelin zamana bağlı çözümleri sırasında filtre kağıdı modelinin gözeneklilik (porosity) değeri olarak ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır.

2.3. Sayısal Modelin Deneysel Sisteme Uygun Olarak Hazırlanması

Yapılan deneysel çalışmaların ardından elde edilecek sonuçların daha detaylı incelenebilmesi için çok fazlı akış şartlarında ANSYS Fluent kullanılarak sayısal modelleme çalışması yapılmıştır. Kare, daire, eşkenar üçgen ve eşkenar dörtgen geometrili desene sahip GDE'lerin sayısal modelleri çıkarılmıştır. Sayısal modeller ANSYS Fluent yazılımına aktarılmıştır. ANSYS Fluent yazılımı enerji, momentum, kütle ve yük korunumu denklemlerini sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak çözebilen bir programdır. Mikro kanallar içerisinde gaz-sıvı arasında kabarcıklı, Taylor, dairesel, kayık akış rejimleri etkilidir [74-76]. Bu akış rejimleri arasında PEM elektrolizörler için en uygun akış Taylor tipi akıştır ve bu rejimi bilgisayar ortamında modellemek için VOF metodu kullanılmaktadır [77]. Literatürde çok fazlı akış için kullanılan VOF metodu sayısal modelleme çalışmasında kullanılmıştır [77, 78]. VOF yöntemi, tüm fazlar için süreklilik, momentum ve hacim fraksiyonu denklemleri aynı anda çözümlenmektedir. Bu denklemler birlikte akışkan akış alanını simüle eder ve yüzey gerilim kuvvetleri ile gaz-sıvı ara yüzeyini yakalayabilmektedir.

Sürekli Akış Koşullarının Matematiksel Olarak Modellenmesi:

Sıvı-gaz karışımı için süreklilik denklemi Eş. 2.3'te verilmiştir [96].

$$\nabla(\rho_k \vec{v}_k) = S_k \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte $\vec{v}_k$ kütle ortalama hızını ifade etmektedir ve Eş. 2.4'te detaylı olarak verilmiştir.

$$\vec{v}_k = \frac{1}{\rho_k} \sum_h a_h \rho_h \vec{v}_h \quad (2.4)$$

$\vec{v}_h$ hava fazının hızını, a_h hacim oranını, ρ_h , faz yoğunluğunu temsil etmektedir. Eş. 2.3'te belirtilen ρ_k ise karışım yoğunluğunu temsil etmektedir ve Eş. 2.5'te açıklanmıştır.

$$\rho_k = \sum_h \alpha_h \rho_h \quad (2.5)$$

Karışım için momentum denklemleri, Eş. 2.6'da verildiği gibi, birincil ve ikincil fazlar için momentum denklemlerinin toplanmasıyla elde edilir [96].

$$\nabla(\rho_k \vec{v}_k \vec{v}_k) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_k (\nabla \vec{v}_k + \vec{v}_k^T)) + \nabla \cdot (\sum_h \alpha_h \rho_h \vec{v}_{dr,h} \vec{v}_{dr,h}) + S_{mom} \quad (2.6)$$

Bir momentum kaynağı terimi olan S_{mom} , gözenekli alanları hesaba katmak için dahil edilmiştir. S_{mom} terimi, poroz ortamdan dolayı oluşan viskoz kayıp terimi (örneğin: Darcy yasası gibi) ve atalet kaybı ile ilgili terimleri içermektedir [96]. Bu yüzden ANSYS yazılımı içerisinde gözenekli alanın aktif edilmediği durumlarda S_{mom} ifadesi ihmal edilmiştir. Ancak filtre kağıdının gözeneklilik oranını belirlenerek yapılan sayısal çözümlerle S_{mom} ifadesi ANSYS yazılımı içerisinde momentum denkleminde tanımlanarak poroz ortam simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Böylece gözenekli alanın momentum ifadesi de Navier-Stokes denkleminde dahil edilerek daha hassas çözümleme yapılabilmiştir. S_{mom} Eş. 2.7'deki gibi ifade edilebilir:

$$S_{mom} = -\frac{\mu}{k} \vec{v} \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.6'da bulunan μ_k ifadesi karışımın kütle ortalama viskozitesidir:

$$\mu_k = \sum_h \alpha_h \mu_h \quad (2.8)$$

Sürüklenme hızı olan $\vec{v}_{dr,h}$ ise kayma hızı olan $\vec{v}_{hs}$ ile ilişkili olup ikinci faz olan su fazının hava fazına göre hızıdır. Sürüklenme hızı şu şekilde ifade edilir:

$$\vec{v}_{dr,h} = \vec{v}_{hs} \sum_h x_h \vec{v}_{hs} \quad (2.9)$$

Eş. 2.7’de verilen x_h hava fazının kütle kesridir ve Manninen ve diğerlerinin [97] kayma hızı formülasyonu olarak ifade edilir. Kayma hızı olan $\vec{v}_{hs}$ Eş. 2.10’da ifade edilmiştir.

$$\vec{v}_{hs} = \frac{\tau_p}{f_{\text{sürüklenme}} \rho_s} \frac{(\rho_s - \rho_k)}{\rho_s} \vec{a} \quad (2.10)$$

$f_{\text{sürüklenme}}$ Schiller ve Naumann [98] tarafından açıklanan sürüklenme fonksiyonudur ve şu şekilde formüle edilir:

$$f_{\text{sürüklenme}} = 1 + 0.15 \text{Re}^{0.687} \quad (2.11)$$

Eş. 2.8’de yer alan $\vec{a}$ ivmeyi ifade eder ve şu şekilde açıklanabilir:

$$\vec{a} = -(\vec{v}_k \cdot \nabla) \vec{v}_k \quad (2.12)$$

Bu ifade de $\vec{v}_k$ yine kütle ortalama hızını ifade etmektedir.

Hacim fraksiyonu denklemi Eş. 2.13’te belirtmiştir [96].

$$\nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_k) = -\nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_{dr,s}) + \dot{m}_{ls} - \dot{m}_{sl} \quad (2.13)$$

İkinci fazın hacim oranı α_s ile ifade edilmiştir. Hacim oranı denklemi, gaz fazının bireysel taşınımının yanı sıra karışımın toplu taşınımından dolayı ikincil fazın taşınmasını da açıklar. $\dot{m}_{ls}$ ve $\dot{m}_{sl}$ terimleri sırasıyla sıvı fazdan gaz fazına ve gaz fazından sıvıya (hacimsel) kütle transferini ifade etmektedir. Sadece iki fazlı bir çözümde ikinci fazın hacim oranı Eş. 2.14 ile bulunabilir.

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_s \quad (2.14)$$

Sadece iki fazlı bir modellemede fazların hacim oranı toplamı 1'e eşit olacağı için ilk fazın hacim oranı hesaplandığında ikinci fazın hacim oranı tanımlanabilir. Eşitlik 2.3 ile Eşitlik 2.14 arasında verilen tüm denklemler ANSYS yazılımında Steady (Sürekli) çözümlerin matematiksel modellemesini ifade etmektedir.

Zamana Bağlı Koşullar İçin Matematiksel Modelleme:

ANSYS yazılımı içerisinde hava-mürekkep arasında zamana bağlı çözümlemeler için ilgili denklemlerin zamana bağlı ifade edilmesi gerekmektedir. Şekil 2.8'de verilen 3 boyutlu eksen göz önüne alındığında hıza ait sınır şartı Eş. 2.15'te verildiği gibi ifade edilebilir.

$t = 0$ için;

$$\vec{v}_x = 0, \vec{v}_y = 0, \vec{v}_z = -\vec{v} \quad (2.15)$$

Eşitlik 2.15 başlangıç şartı zamana bağlı çözümlenen süreklilik, momentum ve faz değişimi için geçerlidir. Zamana bağlı çözümlerde Eş. 2.16'da verilen süreklilik denklemi kullanılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k) + \nabla(\rho_k \vec{v}_k) = 0 \quad (2.16)$$

Burada verilen $\vec{v}_k$ kütle ortalama hızını ifade etmekte olup Eş. 2.4'te verildiği şekilde kullanılmıştır. ρ_k ise karışım yoğunluğunu temsil etmekte olup sürekli koşulların modellendiği matematiksel model kısmında Eş. 2.5'te verilmiştir. Momentumun korunumunu modellemek amacıyla Eş. 2.17'de verilen zamana bağlı momentum denklemi kullanılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \vec{v}_k) + \nabla(\rho_k \vec{v}_k \vec{v}_k) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_k (\nabla \vec{v}_k + \vec{v}_k^T)) + \nabla \cdot (\sum_h \alpha_h \rho_h \vec{v}_{dr,h} \vec{v}_{dr,h}) + S_{mom} \quad (2.17)$$

Burada verilen μ_k ifadesi karışımın kütsel olarak ortalama viskozite değerini ifade etmektedir. Sürüklenme hızı olan $\vec{v}_{dr,h}$ ise kayma hızı olan $\vec{v}_{hm}$ ile ilişkili olup zamana

bağlı çözümlerde ikinci faz olan mürekkep fazının, birinci faz olan hava fazına göre bağlı hızıdır. $\vec{v}_{dr,h}$ zamana bağlı çözüm için Eş. 2.18’de verildiği gibi ifade edilmiştir;

$$\vec{v}_{dr,h} = \vec{v}_{hm} \sum_h x_h \vec{v}_{hm} \quad (2.18)$$

Kayma hızı olan $\vec{v}_{hm}$ denklemi Eş. 2.19 verilmiştir.

$$\vec{v}_{hm} = \frac{\tau_p}{f_{\text{sürüklenme}}} \frac{(\rho_m - \rho_k)}{\rho_m} \vec{a} \quad (2.19)$$

$f_{\text{sürüklenme}}$ ve $\vec{a}$ Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.12 de ifade edildiği gibi kullanılmaktadır. Zamana bağlı çok fazlı çözümlerde hacimsel oranlar oluşacağından hacim fraksiyonun belirlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden hacimsel fraksiyon zamana bağlı olarak Eş. 2.20’de verilen denklemle ifade edilmiştir.

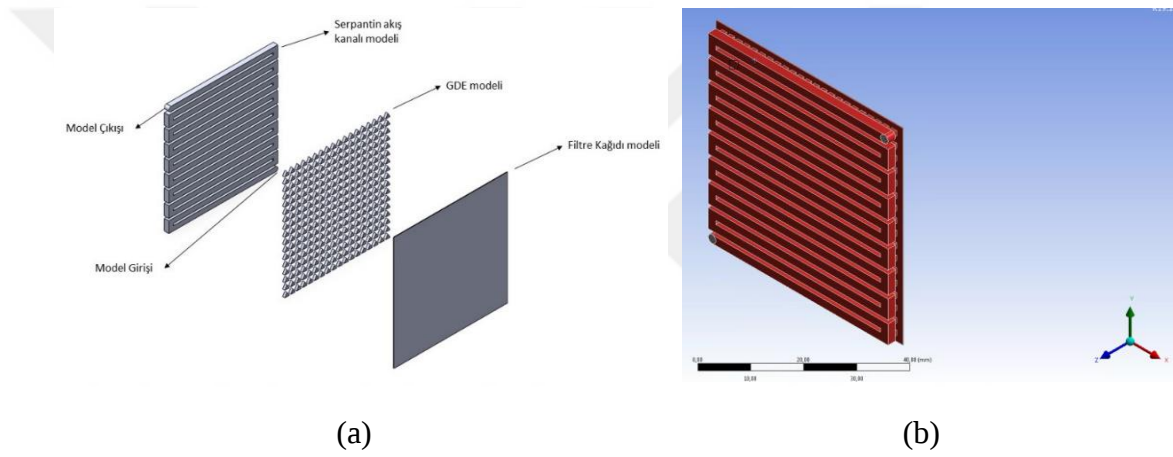
$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_m \rho_m) + \nabla \cdot (\alpha_m \rho_m \vec{v}_k) = -\nabla \cdot (\alpha_m \rho_m \vec{v}_{dr,h}) + \dot{m}_{lm} - \dot{m}_{ml} \quad (2.20)$$

İkinci faz olan mürekkebin hacim oranı α_m ile ifade edilmiştir. Suyun veya mürekkebin hava içindeki dağılımları reaksiyona girmeyen faz olarak modellenmiş olup türlerin ayrışma denklemleri hesaplamalarda kullanılmamıştır. Bu yüzden konsantrasyon gradyanından kaynaklanan difüzyon ve dispersiyon gibi etkiler sayısal çözümlemede dikkate alınmamıştır [82]. Kullanılan eşitliklerin gerçek ortam şartlarını tanımlamak amacıyla bazı kabuller yapılmalıdır. Bu kabuller şu şekildedir;

- Hidrodinamik olarak kararlı ve sürekli rejimde kabul edilmiştir.
- İçeri giren akışkan aktif alan yüzeyi boyunca eşit olarak dağılım sağlamaktadır.
- Tek denklemler VOF modeli kullanıldığı için gözenekli ortamdaki kılcal basınç ihmal edilir.
- Sıvı fazın hal değişimi ihmal edilmiştir ve türlerin reaksiyona girmediği kabul edilmiştir.
- Sıvı faz içindeki havanın çözünürlüğü ihmal edilmiştir.

- Hücre sıcaklığı sabittir ve fiziki parametrelerin sıcaklık ile değişmeyeceği kabul edilmiştir.

Bu kabuller doğrultusunda     mlenecek süreklilik, hacim fraksiyonu ve momentum korunumu denklemleri sayesinde deneysel ortamın simüle edilerek basınç dağılımları ve akış dağılım özellikleri gözlemlenmiştir. Bu kabuller doğrultusunda     mlenecek süreklilik, hacim fraksiyonu ve momentum korunumu denklemleri sayesinde deneysel ortamın simüle edilerek basınç dağılımları ve akış dağılım özellikleri gözlemlenmiştir. ANSYS’de yapılan modelleme çalışmasına ait görüntüler şekil 2.8’de verilmiştir.



şekil 2.8 ANSYS model görünümü: (a) sayısal modelin patlatılmış görüntüsü, (b) sayısal modelin montaj görüntüsü.

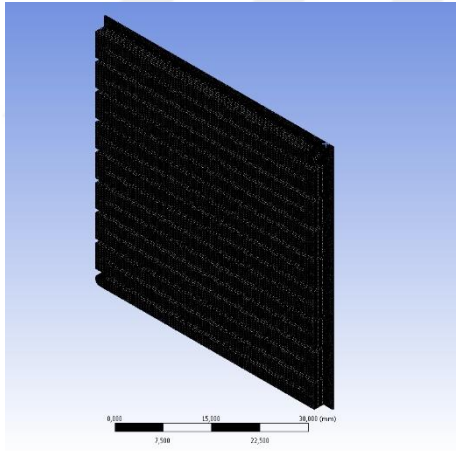
şekil 2.8’de görüldüğü üzere serpantin akış kanalı, kare GDE yapısı ve filtre kağının ANSYS de sayısal     m  için model yapısı oluşturulmuştur. Daha sonrasına model giriş, çıkış ölçüleri deneysel ile aynı olacak şekilde yarıçapı 2 mm olarak girişmiştir. Ardından akışı sınırlayacak olan duvar yapısı belirlenmiştir. Tablo 2.1’de ANSYS’te oluşturulan modelin geometrik parametreleri görülmektedir.

Tablo 2.1 ANSYS modelinin geometrik parametreleri.

Model aktif yüzey alanı	25 cm ²
Serpantine akış kanalı genişliği	2 mm
Serpantine akış kanalı derinliği	2 mm

Serpentine akış kanalı giriş ve çıkış yarıçapı	2 mm
GDE kalınlığı	1 mm
GDE gözenekliliği	%25
Filtre kağıdı kalınlığı	0.2 mm

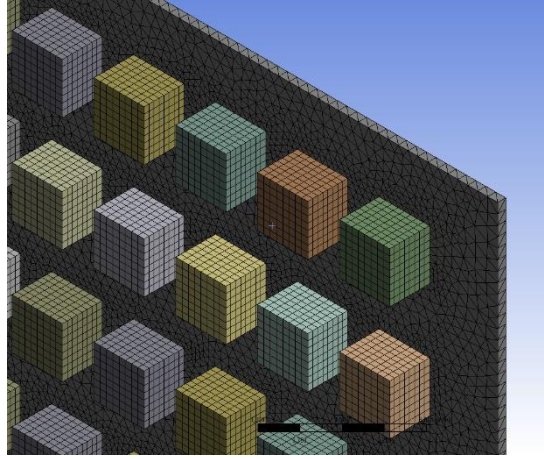
Geometri kısmı tamamlanan modelin mesh yapısına geçilmiştir. Modellerin mesh yapısı için ANSYS Fluent programında Süpürme (sweep), Çoklu bölge (multizone) ve Parça uyumlu (Patch Conforming) mesh teknikleri uygulanarak akışın çok daha deneysel sonuçlara yakın bir şekilde hesaplanması sağlanmıştır. Şekil 2.9'da mesh görüntüleri görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.9 ANSYS yazılımından elde edilmiş mesh görüntüleri: a) tüm modelin mesh görüntüsü, b) akış kanalı, GDE ve filtre kâğıdı bölgelerinin mesh yapıları, c) GDE ve filtre kâğıdının mesh yapıları.

Şekil 2.9.a'da görüldüğü üzere kanal geometrisinde Çoklu bölge (multizone) mesh tekniği, haritalanmış (mapped) mesh ve altıgen (hexa) eleman olarak tercih edilmiştir. GDE yapısında ise Süpürme (sweep) mesh tekniği, filtre kâğıdı tarafında ise Parça uyumlu (Patch Conforming) mesh tekniği, otomatik yapıda kullanılmıştır. Böylece GDE yapısının kanal ve filtre kâğıdı ile ağ örgülerinin bağ kurması sağlanmıştır. Giriş, çıkış ve tüm geometrideki köşe çizgilerine kenar boyutlandırma (edge sizing) uygulanarak bu bölgelerin eleman (element) sayıları artırılmıştır. Her ne kadar aynı yöntem kullanılsa da mesh katsayılarının değişmesi ile düğüm (nodes) sayısı da değişmektedir. Sayısal çalışmalarda model geometrisi ve sınır şartları aynı olmasına rağmen mesh yapısındaki eleman ve düğüm sayısının değişimi çözüm sonucunu da doğrudan etkileyebilmektedir. Ne kadar çok eleman ve düğüm sayısı olursa çözüm hassasiyeti o kadar artar, ancak bu sayıdaki artış belli bir noktadan sonra çözüm hassasiyetinde sabitleneceğinden çözüm de meshten bağımsız hale getirilmiş olacaktır. Bu yüzden sayısal çözüm öncesi aynı mesh yöntemi kullanılsa da mesh kalitesi iyileştirilerek çözümün meshten bağımsız hale geldiği değer belirlenmiştir. Sayısal çözümü meshten bağımsız hale getirmek için 7 farklı eleman ve düğüm sayısı irdelenmiştir. Kullanılan eleman ve düğüm sayıları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 ANSYS mesh özellikleri.

Mesh Numarası	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
Mesh-1	670035	436684
Mesh-2	945500	584392
Mesh-3	1301127	787349
Mesh-4	1816164	1330427
Mesh-5	1922452	1468022
Mesh-6	2115723	1710467
Mesh-7	2270588	1883854

Tablo 2.2’de verilen mesh özellikleri öncelikle ANSYS içerisinde Steady (Sürekli) şartlarda çözüme tabi tutulmuş ve çıkan sonuçlar mesh yapısına göre karşılaştırılmıştır. Sayısal çözüm sonuçların önemli derecede değişmediği noktadaki mesh belirlenmiştir. Diğer tüm sayısal çözümlerde bu mesh özellikleri kullanılmıştır.

2.4. Sayısal Çözüm Parametreleri ve Akış Sınır Şartları

Matematiksel ve tasarımsal olarak hazırlanan sayısal modelin mesh yapısı tamamlandıktan sonra çözüm parametreleri ve akış sınır şartları belirlenmiştir. Sayısal modelleme çalışmalarında kullanılan çözüm parametreleri Tablo 2.3’te verilmiştir.

Tablo 2.3 ANSYS çözüm parametreleri.

Parametre Adı	Değeri
Model türü (Model type)	Basınca dayalı (Pressure-based)
Zaman (Time)	Zamana bağlı ve Sürekli (Transient and Steady)
Yerçekimi (Gravity)	$y = -9,81 \text{ m/s}^2$

Formülasyon (Formulation)	Örtülü (Implicit)
Hacim kesme oranı (Volume fraction cutoff)	1E-6
Gövde kuvveti formülasyonu (Body force formulation)	Aktif
Yüzey gerilimi modeli	Steady (Sürekli) yüzey kuvveti (continuum surface force)
Çözüm metodu (Solution Method)	SIMPLE (Basit)
Gradyan (Gradient)	En küçük kare hücre tabanlı (least squares cell based)
Basınç yöntemi (Pressure method)	PRESTO (Hızlı) yöntemi
Momentum	İkinci derece akışa karşı (second order upwind)
Hacim Kesri (Volume Fraction)	Baskılı (compressive)
Geçici Formülasyon (Transient Formulation)	Birinci derece örtük (first order implicit)

Tablo 2.3'te verilen parametreler Steady (Sürekli) çözüm ve Zaman bağlı çözüm sayısal çözümlerinde kullanılmıştır. Basınca dayalı bir model türü tercih edilmiştir. Çoklu faz modeli literatür taramasında bahsedildiği üzere VOF yöntemi seçilmiştir. Literatür taramasında benzer kanal yapılarının sayısal çözümlemesinden yola çıkarak Çözüm metodu SIMPLE (Basit) tercih edilmiş ve Basınç yöntemi PRESTO (Hızlı) yöntem olarak aktif edilmiştir. Birinci Derece Örtük olarak işaretlenen Geçici Formülasyon ile çözüm parametreleri tamamlanmıştır. Faz sayısı iki olacak şekilde seçilmiş olup hava fazı birinci faz olarak sabittir. Ancak ikinci faz Steady (Sürekli) akış çözümünde su, Zamana bağlı sayısal çözümde mürekkep olarak seçilmiştir. Bu iki çözüm yönteminde kendilerine özgü

akış ve sınır şartları değişmektedir. ANSYS basınç sayısal çözümleri yapılırken kullanılan akışkan sınır şartları Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4 ANSYS Steady (Sürekli) çözüm için akış ve sınır şartları.

AKIŞ VE SINIR ŞARTLARI	
Sınır	Değer
Multifaz kanalındaki yüzey gerilimi katsayısı	0,072 N/m [78]
Havanın yoğunluğu	1,225 kg/m ³
Suyun yoğunluğu	998,2 kg/m ³
Havanın vizkozitesi	1,7894 x 10 ⁻⁵ kg/m.s
Suyun vizkozitesi	1,003 x 10 ⁻³ kg/m.s
Çıkış sınır parametresi	Basınç çıkışı
Giriş sınır parametresi	Kütle debisi
Giriş basıncı	101325 Pa
Çıkış basıncı	101325 Pa

Tablo 2.4'te verilen akış ve sınır şartları altında debiden bağımsız olarak kare GDE'e ait model Steady (Sürekli) çözüm tabi tutulmuş ve farklı eleman ve düğüm sayısı sayılarında ΔP değerinin değişimi gözlemlenmiştir. Çözüm sonuçları eleman sayısından bağımsız hale getirilmiştir. Böylece deneysel sonuçları verilen farklı debilerde basınç sonuçları sayısal olarak irdelenmek için yine Steady (Sürekli) çözüme bırakılmıştır.

ANSYS içerisinde deneyde kullanılan mürekkebi tanımlamak ve sınır şartı oluşturmak için hesaplanan yüzey gerilimi, yoğunluk ve viskozite değerleri kullanılmıştır. Böylece deneysel çalışmada hücre içerisine gönderilen mürekkep ANSYS içerisine yeni akışkan olarak tanımlanmıştır ve deneyde alınan süreler uygun olması için zamana bağlı çözüme tabi tutulmuştur. ANSYS zamana bağlı mürekkep çözümleri yapılırken kullanılan akışkan sınır şartları Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5 ANSYS zamana bağılı mürekkep çözümü için akış ve sınır şartları.

AKIŞ VE SINIR ŞARTLARI	
Sınır	Değer
Mürekkep yüzey gerilimi katsayısı	0,053 N/m
Havanın yoğunluğu	1,225 kg/m ³
Mürekkep yoğunluğu	1011,1 kg/m ³
Havanın vizkozitesi	1,7894 x 10 ⁻⁵ kg/m.s
Mürekkep vizkozitesi	0,001421768 kg/m.s
Çıkış sınır parametresi	Basınç çıkışı
Giriş sınır parametresi	Kütle debisi
Giriş basıncı	101325 Pa
Çıkış basıncı	101325 Pa

Tablo 2.5'te görüldüğü üzere mürekkep vizkozitesi 0.001421768 kg/m.s, yoğunluğu 1011.1 kg/m³, yüzey gerilimi 0,053 N/m olarak girilmiştir. Bu parametrelerin ANSYS içerisinde tanımlamasıyla mürekkebin (Pelikan 4001) akış olarak yer alması sağlamıştır. Böylece deneysel çalışmada kullanılan mürekkep sayısal çözüm sırasında da model içerine gönderilmiştir. Yapılan sayısal çözümlerde 6 çekirdekli XEON CPU E5-1650 (3,6 Ghz) İşlemciye, NVIDIA Quadro 4000 M ekran kartına, 16 GB RAM ve Windows 7 işletim sistemi ne sahip bir iş istasyonu bilgisayarını kullanılmıştır.

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Deneyisel Sonuçlar

3.1.1. Basınç Deneyi Sonuçlarının İncelenmesi

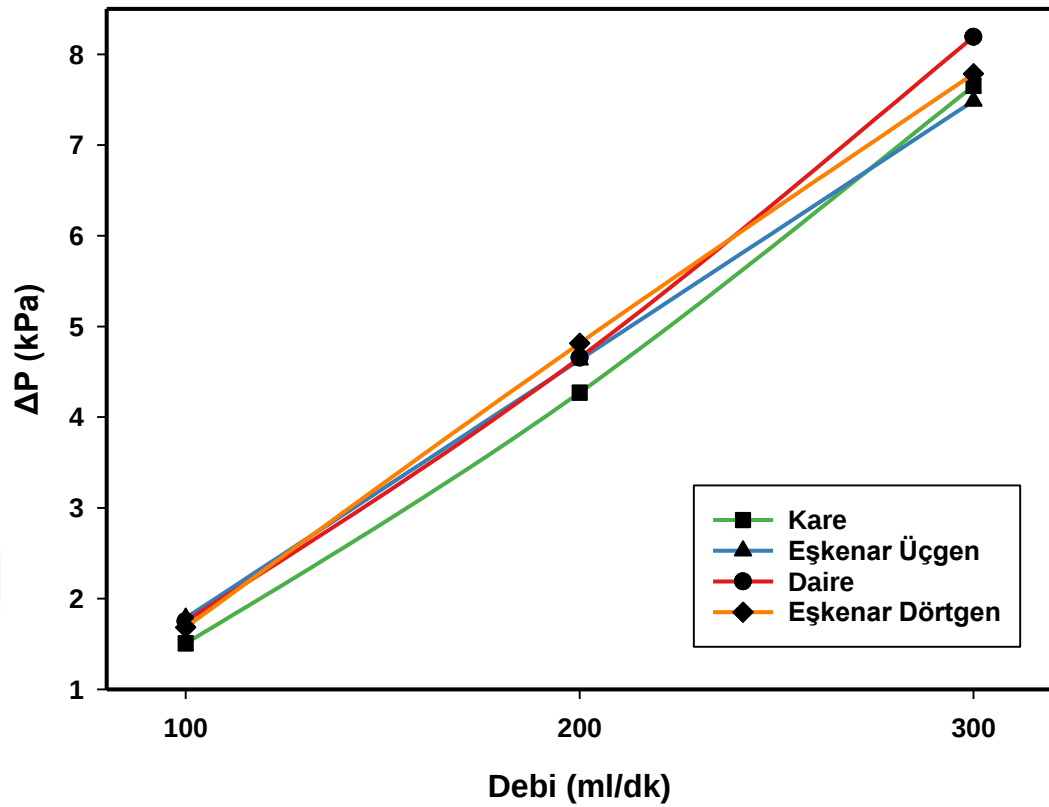
Şekil 2.6’da görülen deney düzeneğine 100 ml/dk, 200 ml/dk ve 300 ml/dk debi ile su gönderilmiştir. Böylece dört farklı geometri GDE geometrisi için test hücresi giriş ve çıkış basınç ölçümleri alınmıştır. Debi miktarlarına göre oluşan ΔP değerleri belirlenecek şekilde bir tablo halinde Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Dört farklı GDE için basınç deneyi sonuçları.

GDE	Debi (ml/dk)	Giriş Basıncı (kPa)	Çıkış Basıncı (kPa)	ΔP (kPa)	% Basınç Değişimi
Eşkenar Dörtgen	100	4,01	2,326	1,683	41,978
	200	7,106	2,29	4,816	67,776
	300	10,946	3,16	7,786	71,132
Kare	100	3,866	2,36	1,506	38,965
	200	6,946	2,676	4,27	61,468
	300	10,72	3,066	7,653	71,393

Eşkenar Üçgen	100	4,0766	2,29	1,786	43,826
	200	7,156	2,523	4,633	64,741
	300	10,593	3,106	7,486	70,673
Daire	100	4,076	2,326	1,75	42,927
	200	7,456	2,8	4,656	62,449
	300	11,443	3,25	8,193	71,599

Tablo 3.1’de listelendiği gibi dört farklı GDE için basınç deneyi sonuçları irdelendiğinde, su debisinin artması ile çıkış basıncının değişiminin, giriş basıncının değişimine göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. 100 ml/dk debi için Kare GDE 1,506 kPa ile en az basınç düşüşüne sahip iken, eşkenar üçgen GDE 1,786 kPa ile en yüksek basınç düşüşüne sahip olduğu görülmüştür. 200 ml/dk için kare GDE 4,27 kPa basınç düşüşü ile yine en az düşüşe sahip iken, Eşkenar dörtgen GDE 4,816 kPa ile bu debide de en yüksek basınç düşüşünü sergilemiştir. 300 ml/dk için ise en az basınç düşüşünü 7,486 kPa ile eşkenar üçgen GDE sergilemiştir. Bu basınç değişimlerinin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 3.1’de görülmektedir.



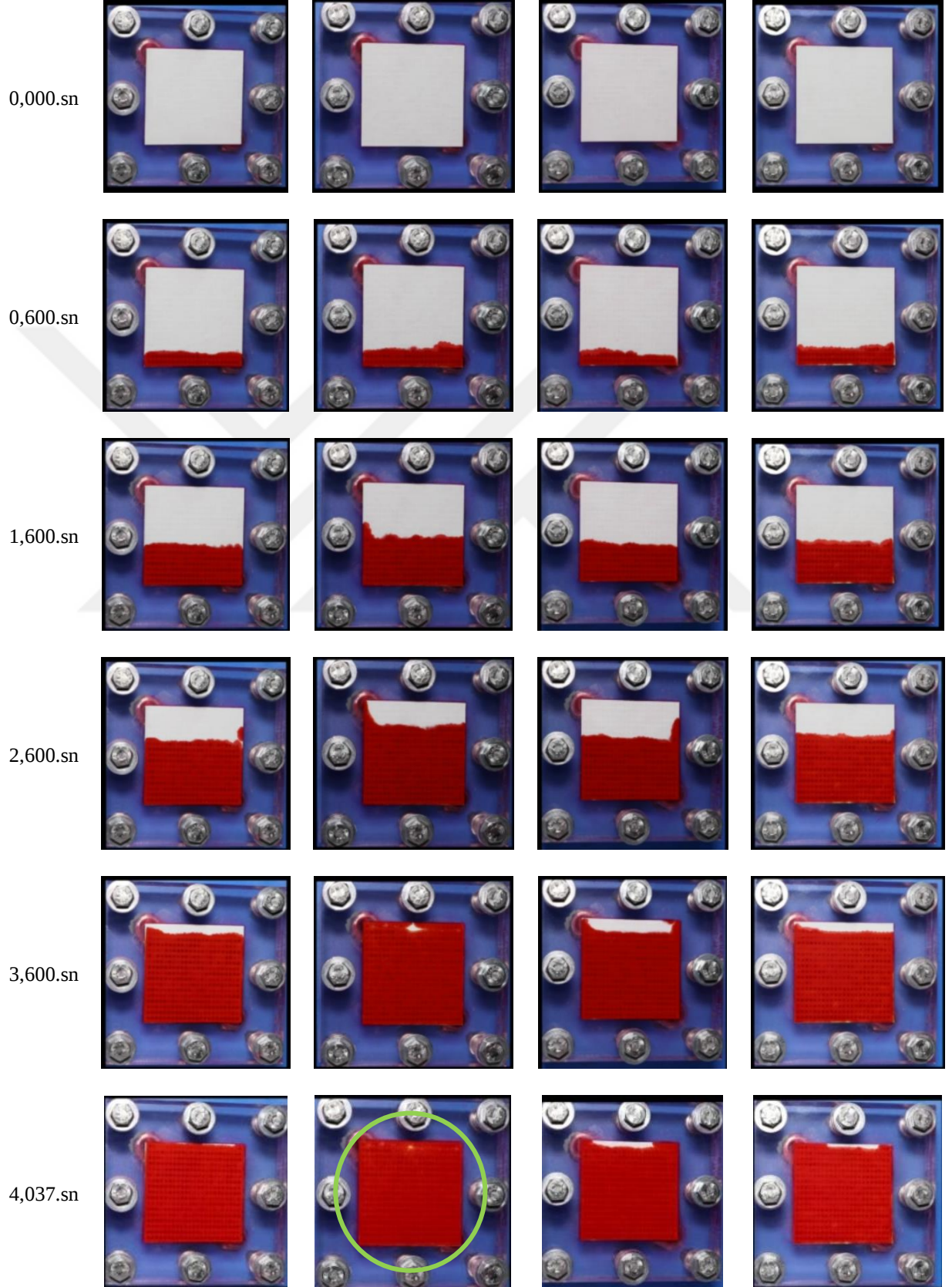
Şekil 3.1 Dört farklı GDE için basınç değişiminin grafiksel karşılaştırması.

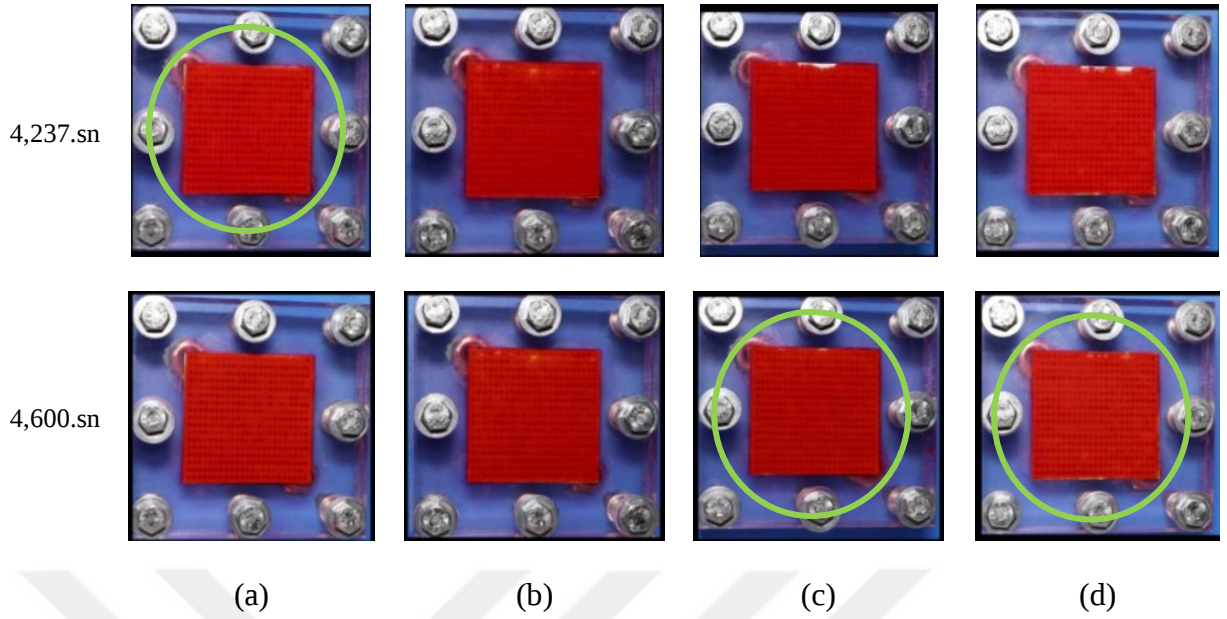
PEM elektrolizöre gönderilen su, içeride engel ile karşılaşmakta ve iyi bir akış dağılımı sergilemez ise giriş ve çıkış arasındaki basınç farkı artmaktadır [86]. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere 100 ml/dk debi için kare GDE 1,506 kPa ΔP ile en az basınç değişimini göstermiştir. 200 ml/dk debide 4,27 kPa ΔP ile kare GDE bir kez daha en iyi performansı sergilemiştir. Ancak 300 ml/dk gelindiğinde 7,486 kPa basınç değişimi ile eşkenar üçgen GDE performansı öne çıkmaktadır. Yapılan basınç deneylerinde dört farklı geometrik yapıdaki GDE’ler için kare delikli yapıya sahip geometri 100 ml/dk ve 200 ml/dk’da sırasıyla %38,96 ve %61,46 basınç değişimi ile en iyi performansı sergilemiştir.

3.1.2. Akış Görselleştirme Deney Sonuçları

Şekil 2.6’da görülen deney düzeneğine mürekkep gönderilerek akış görselleştirilmesi sağlanmıştır. Bu yüzden sırayla 100 ml/dk, 200 ml/dk ve 300 ml/dk debilerde bahsi geçen mürekkep, tasarlanan şeffaf akış görselleştirme hücresi içerisine gönderilmiş ve filtre kağıdı üzerindeki dağılımı kamara ile görüntülenmiştir. İlk olarak, 100 ml/dk debi ile mürekkep hücre içerisine gönderilmiştir. Şekil 3.2’de Dört farklı GDE’in yerleştirildiği

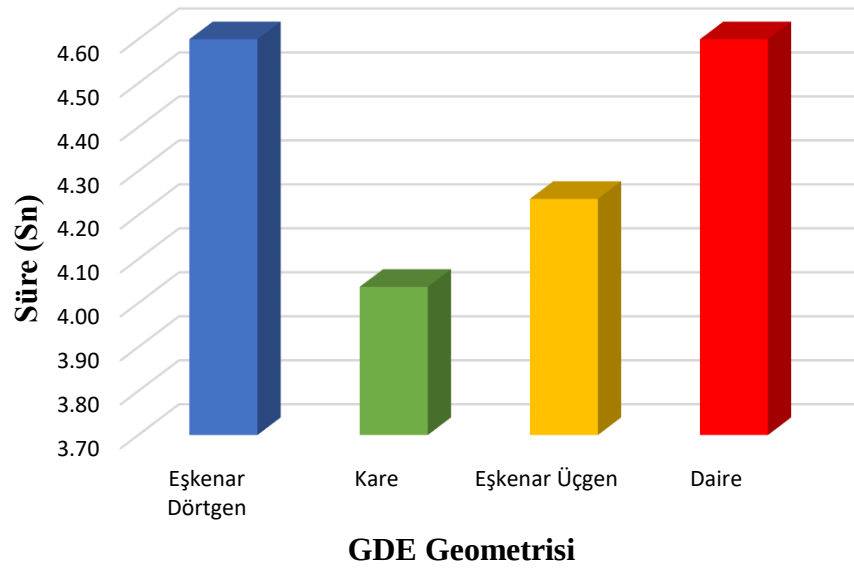
hücre içi mürekkep dağılımı görülmektedir. Aynı saniye içerisinde ilk dolan deneysel sistem yeşil daire ile gösterilmiştir.





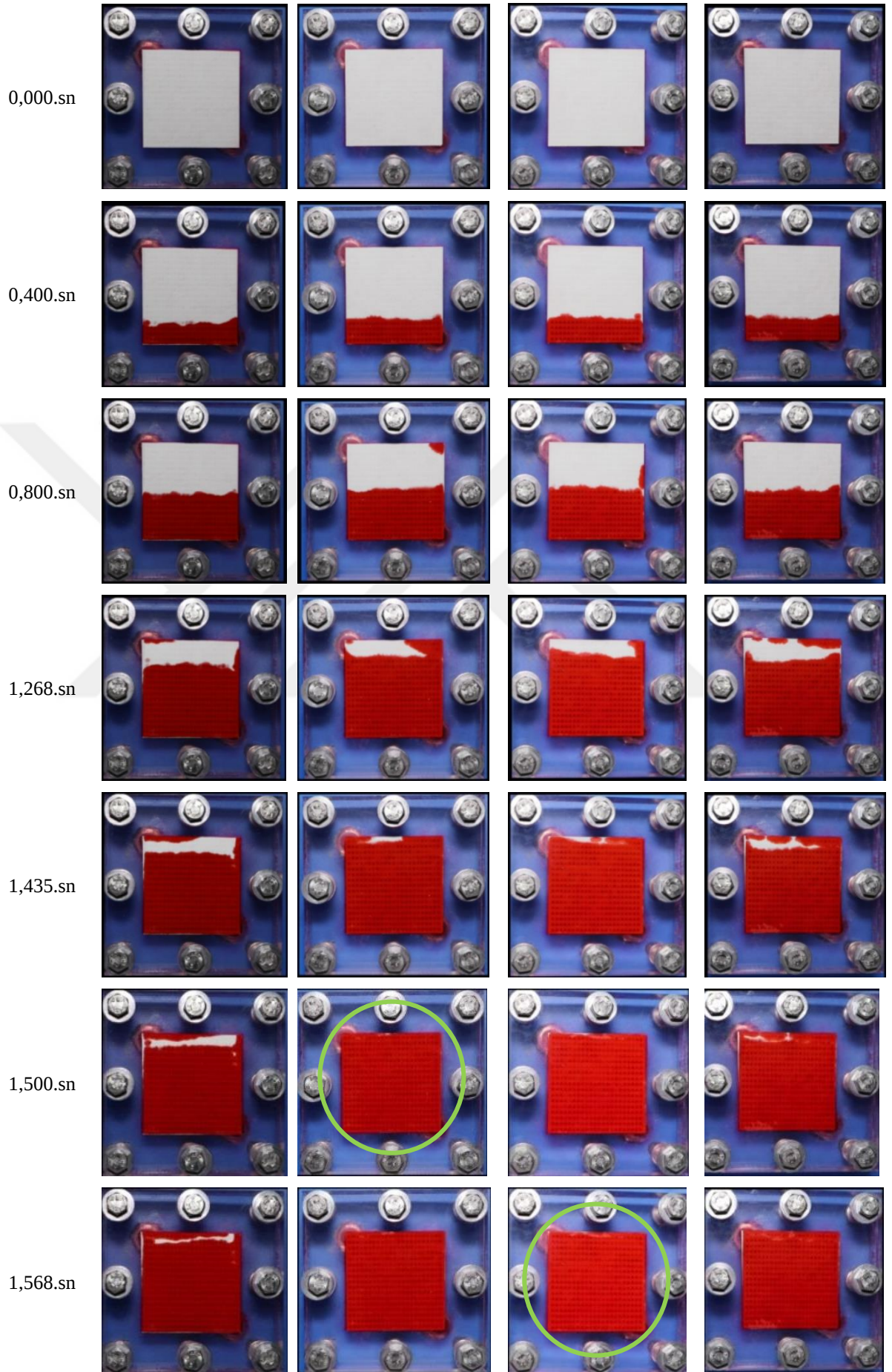
Şekil 3.2 100 ml/dk debi için GDE geometrilerinin mürekkep deneylerinin karşılaştırılması: (a) Eşkenar Dörtgen, (b) Kare, (c) Eşkenar Üçgen, (d) Daire.

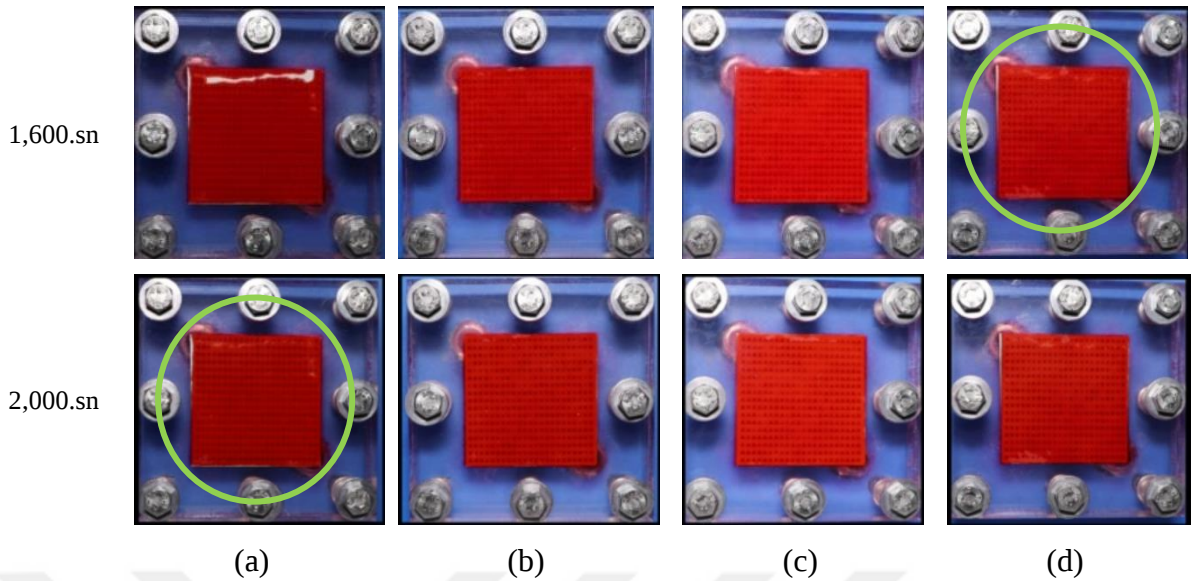
Sıvı mürekkep, test hücresine sağ alt bölümdeki 2 mm çapında bir delikten giriş yaparken, sol üst kısımdaki 2 mm çapındaki delikten çıkış yapmaktadır. Kameradan alınan video görüntüler bu doğrultuda 0. sn'de tüm debi değerlerinde herhangi bir akış yokken, 0.6. sn'de kare ve daire geometrilerin 1/3'lük bir kısımlarının neredeyse doldukları görülmektedir. Bunun yanı sıra 1,6 ve 2,6. sn'ler incelendiğinde kare geometride akışın direkt olarak çıkış bölgesine doğru yönlendiği gözlemlenmektedir. Tekrarlanan deneylerde bu davranışın hiç değişmediği eşit torkla sıkılmış olan tüm GDE geometrilerinde 100 ml/dk'da benzer davranışların gözlemlendiği görülmüştür. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi 3,6. sn'ye ulaşıldığında kare GDE filtre kağıdının neredeyse tamamı mürekkep ile dolmuş ve hızlı bir şekilde akışın tüm aktif bölgeye dağıtılabildiği gözlemlenmiştir. Diğer GDE'ler kare GDE kadar hızlı ve eşit mürekkep dağılımı sergileyememişlerdir. Özellikle eşkenar üçgen ve daire geometriler için tüm aktif alanın dolması 4,6 sn gibi bir sürede gerçekleşerek 0,6 sn daha yavaş bir akışkan dağılımı gözlemlenmiştir. Bu yüzden 100 ml/dk debi için kare GDE, mürekkebi en hızlı çıkışa yönlendiren ve 25 cm² aktif yüzey alanına sahip filtre kağıdını tamamen dolduran ilk GDE olduğu görülmüştür. Şekil 3.3'te tüm yüzeyin mürekkeple dolduğu anlar göz önüne alınarak oluşturulan bir sütun grafiği görülmektedir.



Şekil 3.3 Farklı GDE geometrileri için 100 ml/dk debide tüm yüzeyin tamamen dolma süreleri.

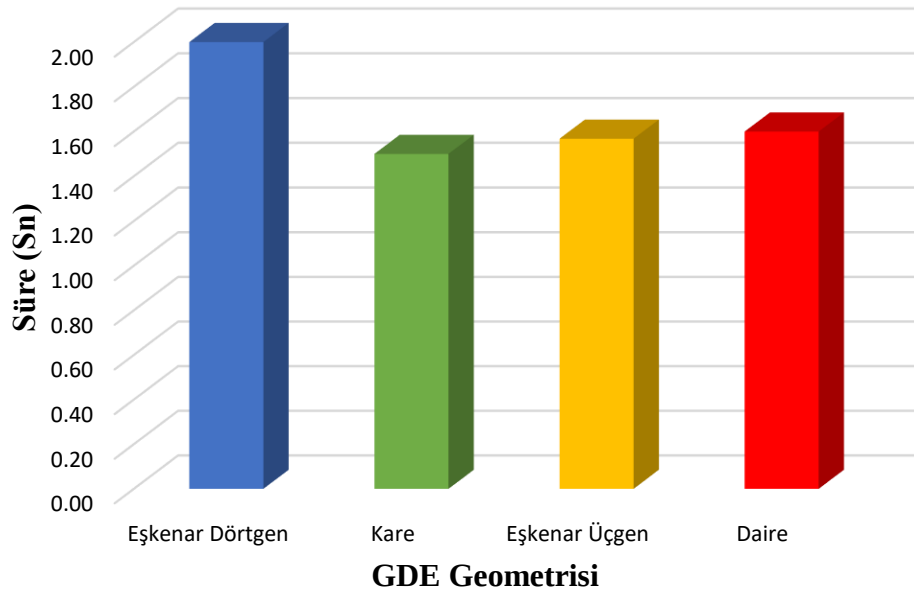
Şekil 3.3'ten de akış görselleştirme çalışmalarında elde edilen sonuçlarda gözlemlendiği üzere kare geometrinin diğer GDE geometrilere göre çok daha yüksek bir performans ile 4,037 sn'de akışı tamamen dağıtabildiği görülebilmektedir. Süre olarak kare geometriye en yakın seyreden GDE numunesinin de 4,27 sn ile eşkenar üçgen geometrisi olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.4'te aynı deney düzeneğinde 200 ml/dk debi de farklı GDE'ler için yapılmış mürekkeple akış görselleştirme çalışmaları görülmektedir.





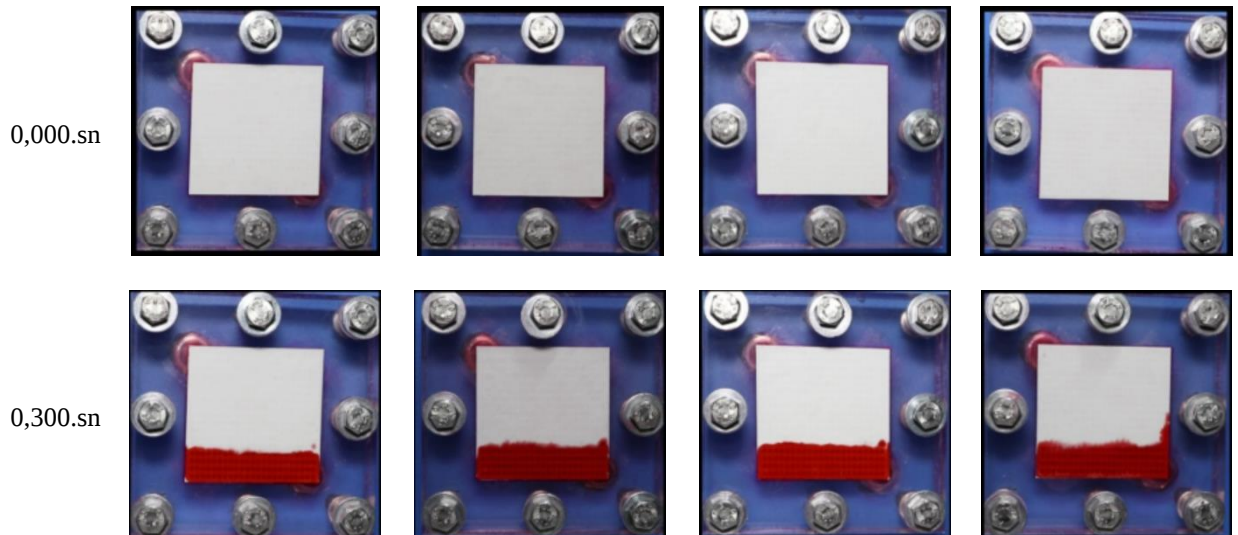
Şekil 3.4 200 ml/dk debi için GDE geometrilerinin mürekkep deneylerinin karşılaştırılması: (a) Eşkenar Dörtgen, (b) Kare, (c) Eşkenar Üçgen, (d) Daire.

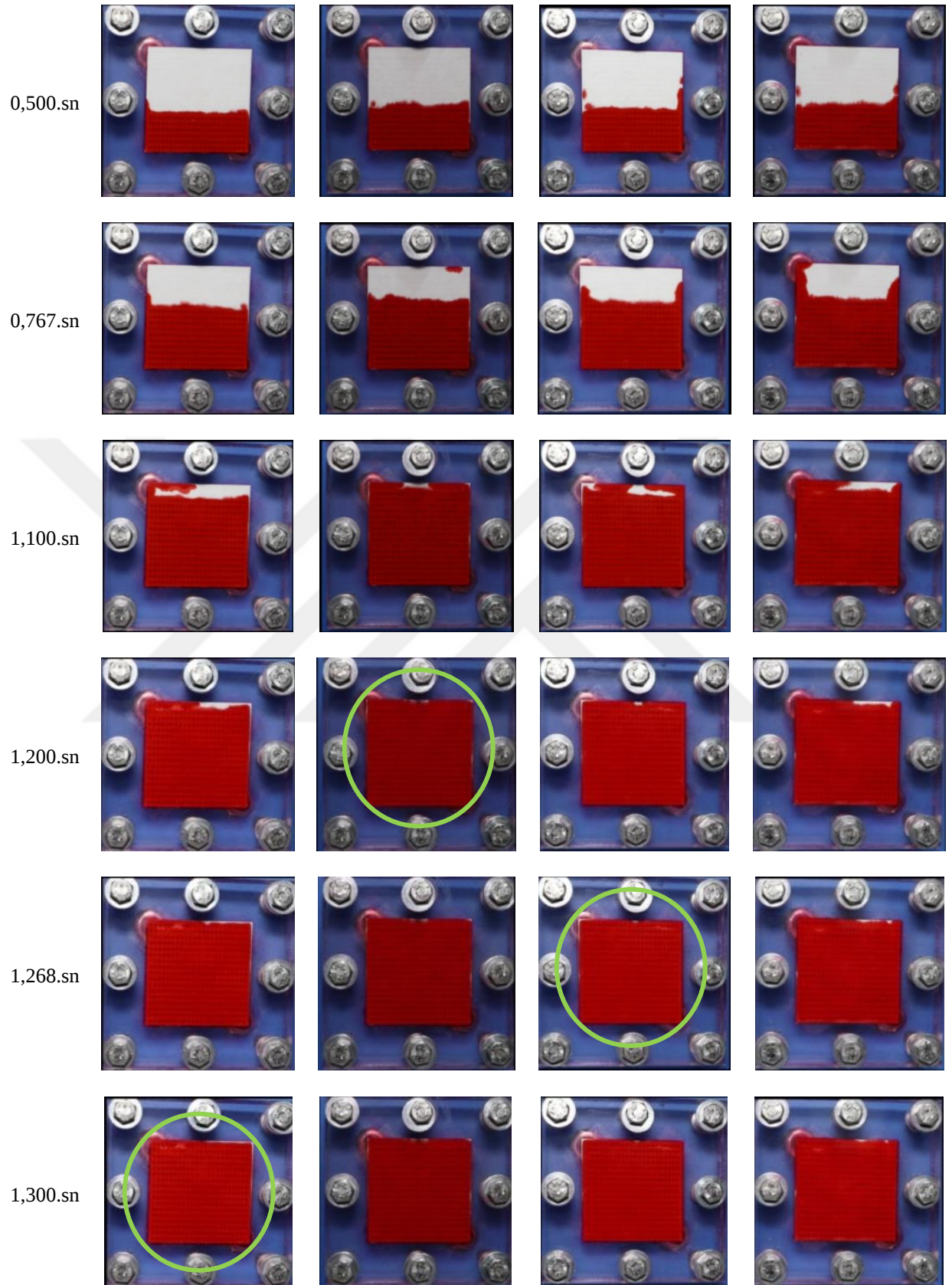
Şekil 3.4 incelendiğinde 0,4 sn'ye kadar eşit mürekkep dağılımı görülürken 0,8 sn'de kare GDE takılı deneyde, debi artışından kaynaklı olarak sağ üst kısımda mürekkep gözlemlenmiştir. Bunun sebebi GDE'lerin akışı dağıtma görevlerinde merdiven şeklinde akış geçişine müsaade etmeleri ve ani bir şekilde reaktantların hücre dışına ulaşmalarını da sağlamalarıdır. Bu durum kare GDE'de 100 ml/dk'den daha yüksek bir debi olan 200ml/dk değerinde çok net bir şekilde gözlemlenmektedir. 1,268. sn'ye gelindiğinde ise tüm GDE'ler mürekkebi çıkışa yönlendirirken kare GDE'in filtre kağıdında dağılan mürekkep miktarı çok daha fazladır. 1,435. sn'de ise önce kare GDE'in, ardından eşkenar üçgen GDE'in filtre kağıtları tamamen mürekkep ile dolmuştur. 100 ml/dk'lik debide olduğu gibi 200 ml/dk debi için de kare GDE'nin mürekkep dağılımında en iyi performans gösterdiği görülmüştür. 100ml/dk ve 200 ml/dk debilerinde de en az basınç düşüşü sergileyen kare GDE'nin akış görselleştirme deneyleri ile bu performansı teyit edilmiştir. Şekil 3.5'te 200 ml/dk'lık debi değeri için tüm yüzeyin mürekkeple dolduğu anlar göz önüne alınarak oluşturulan sütun grafiği görülmektedir.

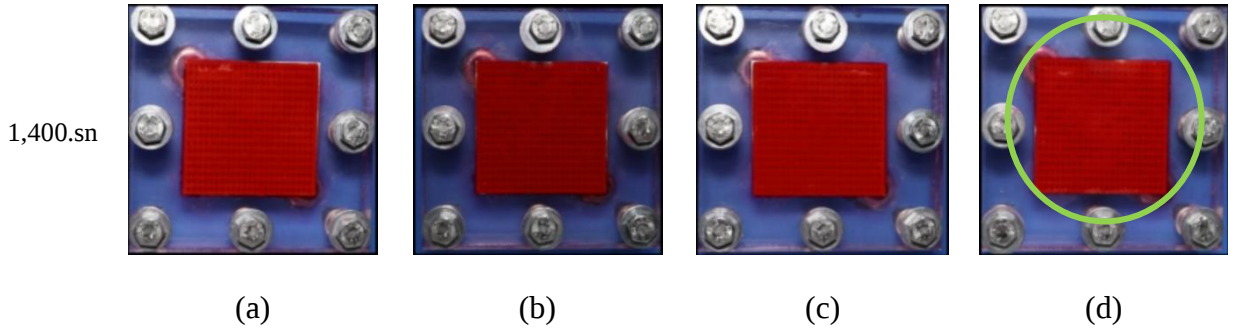


Şekil 3.5 Farklı GDE geometrileri için 200ml/dk debide tüm yüzeyin tamamen dolma süreleri.

Şekil 3.5'teki sütun grafiği incelendiğinde kare geometrinin ve eşkenar üçgen geometrilerin hücrenin tamamına mürekkebi yayma süreleri oldukça yakın olmakla beraber, eşkenar dörtgenin kare geometrili GDE'ye göre %33 daha yavaş bir şekilde hücre içerisinde yayıldığı görülmektedir. Son olarak 300 ml/dk için tüm deney düzeneği aynı kalacak şekilde mürekkep akış görselleştirmelerine devam edilmiştir. Daha önce yapılan debiye bağlı mürekkep karşılaştırmalarında olduğu gibi çekilen videolardan görüntüler zamana bağlı olarak Şekil 3.6'daki gibi verilmiştir.

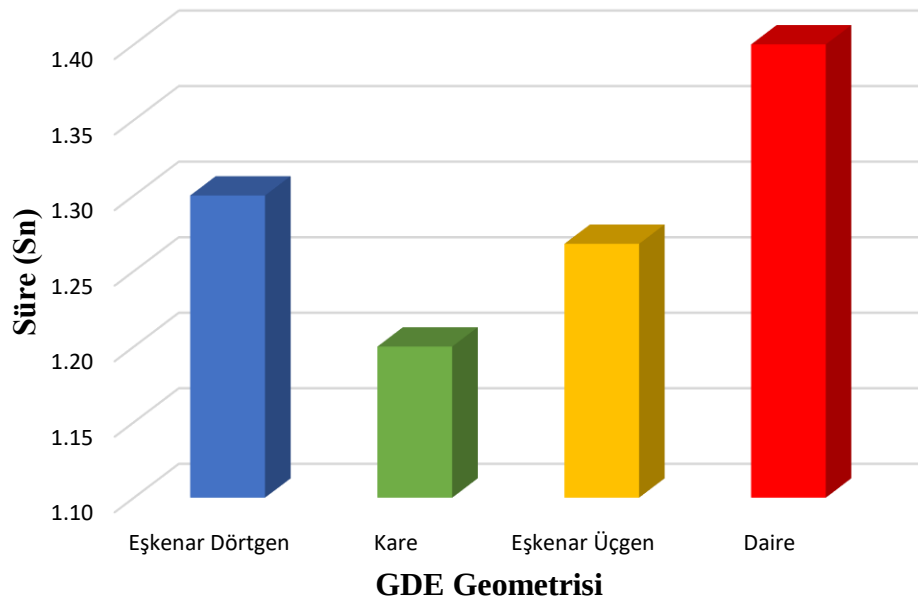






Şekil 3.6 300 ml/dk debi için GDE geometrilerinin mürekkep deneylerinin karşılaştırılması: (a) Eşkenar Dörtgen, (b) Kare, (c) Eşkenar Üçgen, (d) Daire.

Şekil 3.6’da görüldüğü üzere 0,3 sn’nin sonuna kadar GDE’ler arasında belirgin bir fark görülmezken 0,767. sn’de daire GDE’de mürekkep akışı çıkış kısmına belirgin bir şekilde yönelmiştir. 0,767. sn’de daire GDE dışındaki GDE’ler filtre kağıdının yaklaşık %60-65’lik bir kısmı mürekkep ile dolmuştur. 1,1 sn’de alınan görüntülerde ise kare GDE’ye ait filtre kağıdının tamamı mürekkep ile dolmak üzeredir. Diğer GDE’ler 1,1. sn’nin sonunda kare GDE kadar filtre kağıdını dolduramamıştır. 300 ml/dk debide basınç düşüşü en az olan eşkenar üçgen GDE olurken, mürekkep deneylerinde filtre kağıdını en hızlı dolduran diğer debi değerlerinde olduğu gibi yine kare GDE olmuştur. Yapılan deneylerde 300 ml/dk’lık debi değerinin, 25 cm² aktif yüzey alanı için oldukça yüksek bir debi değeri olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bu debi değerinde reaktantların katalizör tabaka ile temasları için gereken zamanı da azaltabileceği ve performansa pozitif yönde çok fazla etki yaratmayacağı düşünülmektedir. Bu debi değerinde akış içerisinde girdap (vortices) oluşumu görülmesi mümkündür ve bu durum fazın kütle transferini artırabilen bir etkiye sahiptir [99, 100]. Girdaplar hem serpentine akış kanalının hem de GDE yapısındaki köşelerden kaynaklı olarak oluşabilir ve debi yükseldikçe girdap etkilerini daha belirgin şekilde gözlemlemek de mümkün olmaktadır. Bu durum sayısal modelleme çalışmalarında irdelenecektir. Şekil 3.7’de tüm GDE geometrileri için mürekkebin hücre aktif alanını tamamını doldurduğu sürelerle ilgili karşılaştırmalar görülmektedir.



Şekil 3.7 Farklı GDE geometrileri için 300ml/dk debide tüm yüzeyin tamamen dolma süreleri.

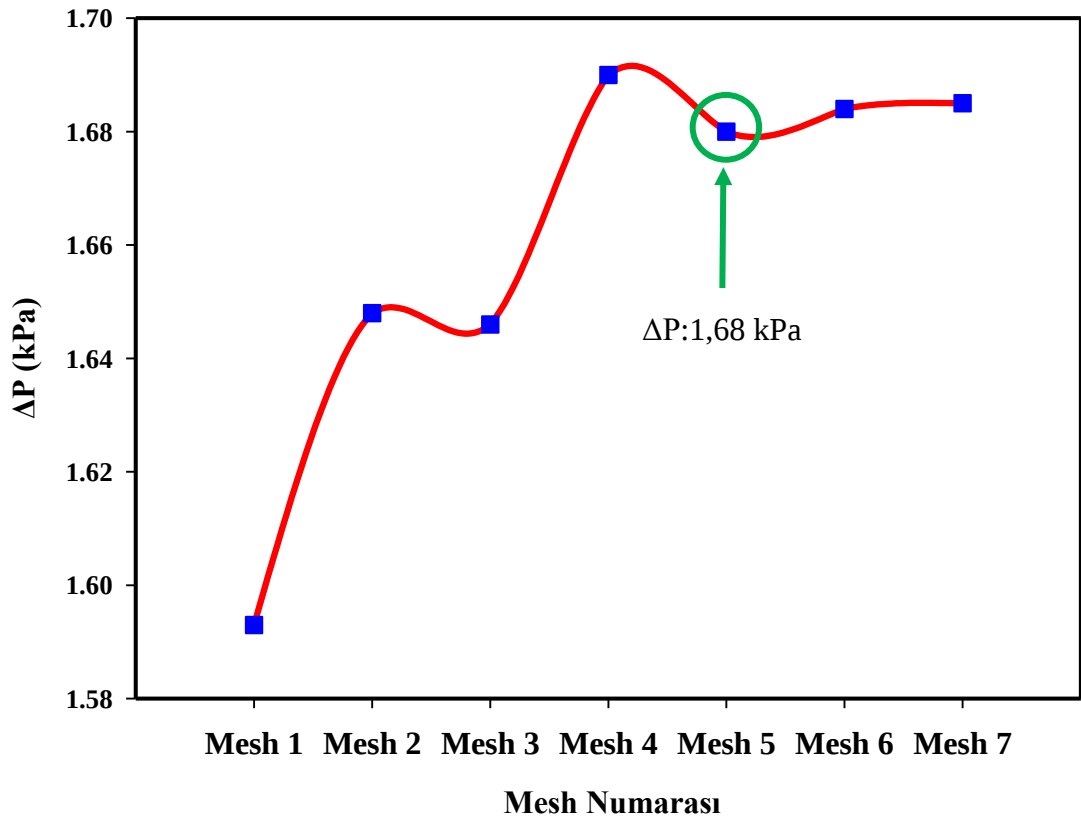
Şekil 3.7’de görüldüğü gibi kare geometri 300 ml/dk’lık debi değerinde daire geometriden yaklaşık %17 daha hızlı bir şekilde tüm yüzeyin dolmasını sağlamıştır. Bu sonuçların da daha düşük debiler olan 100 ml/dk ve 200 ml/dk değerleri ile uyduğu görülmektedir.

Tüm mürekkep deneyleri karşılaştırıldığında 100 ml/dk, 200 ml/dk ve 300 ml/dk için dört farklı GDE içerisinde tamamen dolma süreleri maksimum geçen zaman göz önüne alınarak sırasıyla 4,6, 2 ve 1,4 sn olduğu belirlenmiştir. Bu durum yüksek debi girişinin hücre içerisinde akış bozulmalarına sebep olduğunu akışın laminar bölgeden de uzaklaştığını göstermektedir. 100 ml/dk ve 200 ml/dk için kare GDE hem basınç düşüşünde hem de mürekkep dağılımında en iyi performansı sergilemiştir. Ancak 300 ml/dk’lık debi değerlerinde basınç deneylerinden de görüldüğü gibi eşkenar üçgenli geometri iyi bir performans sağlamasına rağmen, mürekkep ile yapılan deneylerde yine kare geometrinin çok daha hızlı hücre içinde transfer gerçekleştirdiği görülebilmektedir. En iyi basınç düşüş performansı ve mürekkep dağılımı sergileyen kare GDE’in deneysel sonuçlarının karşılaştırılması için sayısal çözümler ANSYS programı kullanılarak incelenmiş ve sonuçlar bölüm 3.2’de detaylıca verilmiştir.

3.2. Sayısal Sonuçlar

3.2.1. Çözümlerin Meshten Bağımsız Hale Getirilmesi

Sayısal çözümün ilk aşaması olarak Şekil 2.8 ve Tablo 2.1’de verilene kare GDE’e ait modelin Şekil 2.9’da görülen mesh yöntemleri ile mesh yapısı oluşturulmuştur. Ancak mesh kalitesinin çözüm sonuç hassasiyetini etkilediği için öncelikle sayısal çözüm meshten bağımsız hale getirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda Tablo 2.2’de verilen 7 farklı mesh eleman ve düğüm sayısı ile kare GDE’in basınç değişimini gözlemlemek için Steady (Sürekli) akış çözümü yapılmıştır. ANSYS çözüm parametreleri Tablo 2.3. ve Tablo 2.4’te görülmektedir. Sayısal model çözümünde tek değişken parametre Tablo 2.2’de verilen eleman ve düğüm sayılarıdır. Şekil 3.8’de 100 ml/dk debi ile gerçekleşen sayısal çözüm basınç değişim değerleri görülmektedir.



Şekil 3.8 Kare GDE’in Steady (Sürekli) çözüm ile meshten bağımsız hale getirilmesi.

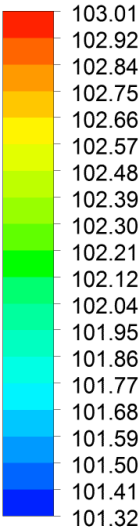
Şekil 3.8’de ANSYS programında 7 farklı mesh kalitesi ile alınan çözümlerin basınç değişim sonuçları görülmektedir. Kötü mesh kalitesine sahip Mesh 1, Mesh 2 ve Mesh 3 tüm çözüm parametreleri aynı olmasına rağmen eleman ve düğüm sayılarının farklılıkları ΔP değerine yansıdığı görülmektedir. İlk üç mesh yapısına göre nispeten daha iyi eleman

ve düğüm sayısına sahip olan Mesh 4 çözümü sonucunda ΔP değerinin pik yaptığı görülmüştür. Ancak 1922452 eleman sayısı ve 1468022 düğüm sayısına sahip Mesh 5 çözümü sonucu ΔP değeri 1,68 kPa olduğu görülmektedir. Bu noktadan sonra eleman ve düğüm sayısı ne kadar arttırılsa da basınç değişiminde yüzdelik farklar görülmektedir. Bunun anlamı ise Mesh 5'e ait eleman ve düğüm sayısı ne kadar arttırılsa da çözüm sonucunu büyük ölçüde etkilemeyeceği belirlenmiştir. Sonuç olarak çözümler meshten bağımsız hale getirilmiş ve tüm sayısal çözümlerde Mesh 5'e ait 1922452 eleman sayısı ve 1468022 düğüm sayısı kullanılmıştır.

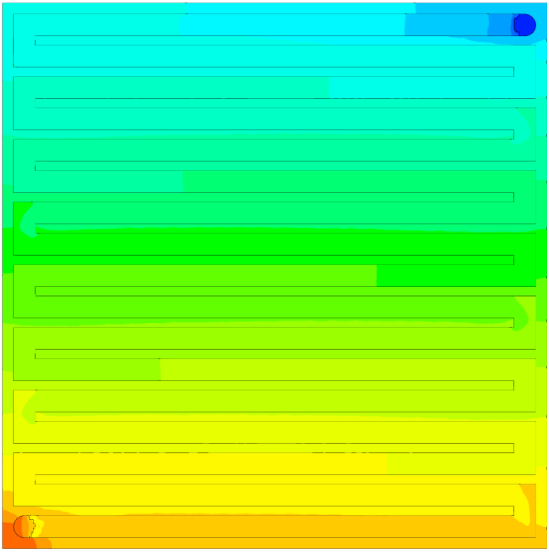
3.2.2. Steady (Sürekli) Çözüm Basınç Değişimi Sonuçları ve Deneysel Bulgularla Karşılaştırma

Meshten bağımsız hale getirilen sayısal modelin basınç değişimlerinin deneysel ile karşılaştırılması için ANSYS programında çok fazlı Steady (Sürekli) çözüme tabi tutulmaması gerekmektedir. Sayısal modelde hacimsel yapının içinin ilk durumda hava dolu olduğu kabul edilmiş bu durumda ilk faz hava fazı olarak tanımlanmıştır. Model içerisine ikincil faz akışkanı olarak su gönderilmiştir. Bu çoklu faz koşullarında Steady (Sürekli) çözümler yapılmıştır. Steady (Sürekli) çözüm yönteminin seçilmesi deneyler sırasında basınç ölçerlerden değer okunurken akışın sürekli hale geldiği an baz alınmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen basınç sonuçlarını bu çalışma nezdinde sayısal çözümlerle karşılaştırmak için ANSYS yazılımı içerisinde akışın sürekli oluşu Steady (Sürekli) çözüm yöntemi tercih edilmiştir. Bu doğrultuda kare GDE'e ait sayısal model 100 ml/dk, 150 ml/dk, 200 ml/dk, 250 ml/dk, 300 ml/dk olmak üzere tek değişkenini debi olduğu Steady (Sürekli) çözüme tabi tutulmuştur. ANSYS parametreleri Tablo 2.3, Steady (Sürekli) akış ve sınır şartları Tablo 2.4'te görülmektedir. Basınç değişiminin akışın sürekli olduğun anda model üzerindeki dağılımı kPa cinsinden Şekil 3.9'da görülmektedir.

Pressure
Contour 1



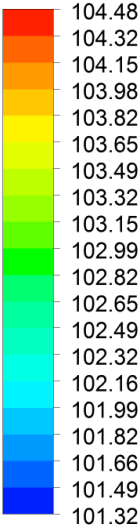
[kPa]



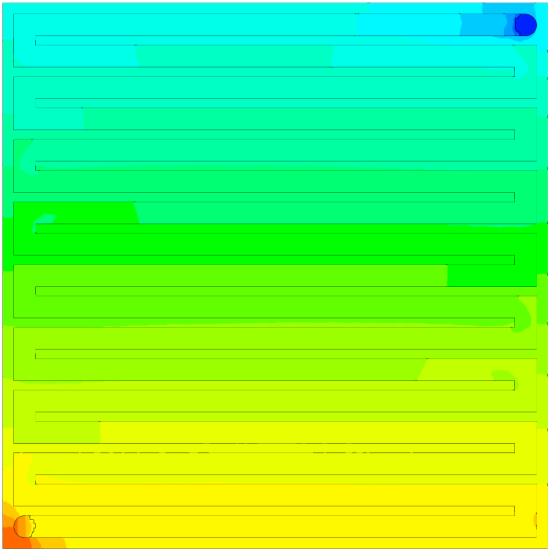
(a)

ANSYS
R19.2

Pressure
Contour 1



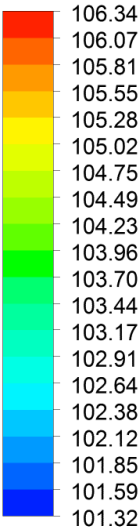
[kPa]



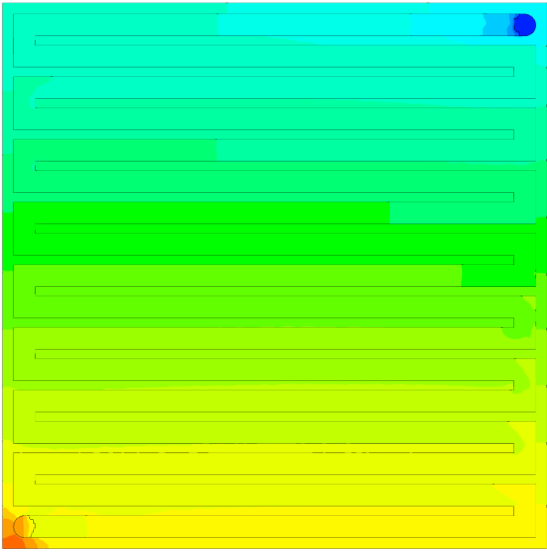
(b)

ANSYS
R19.2

Pressure
Contour 1



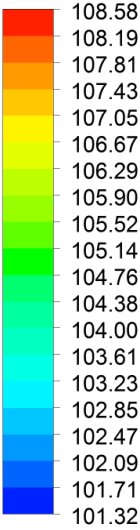
[kPa]



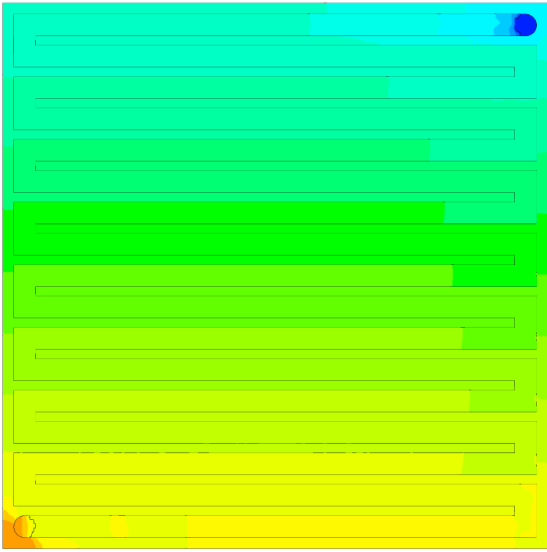
(c)

ANSYS
R19.2

Pressure
Contour 1

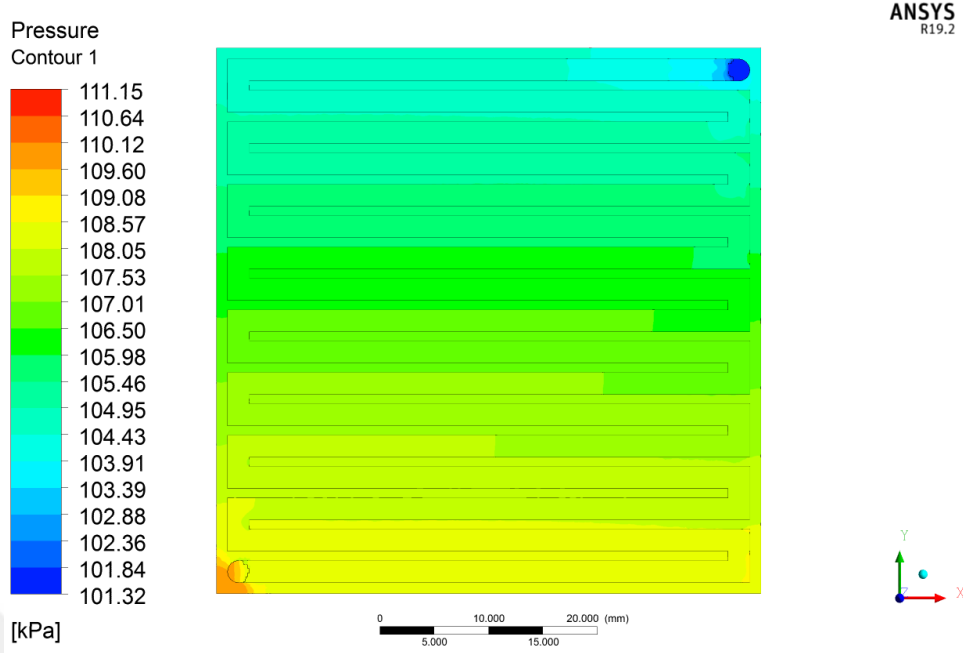


[kPa]



(d)

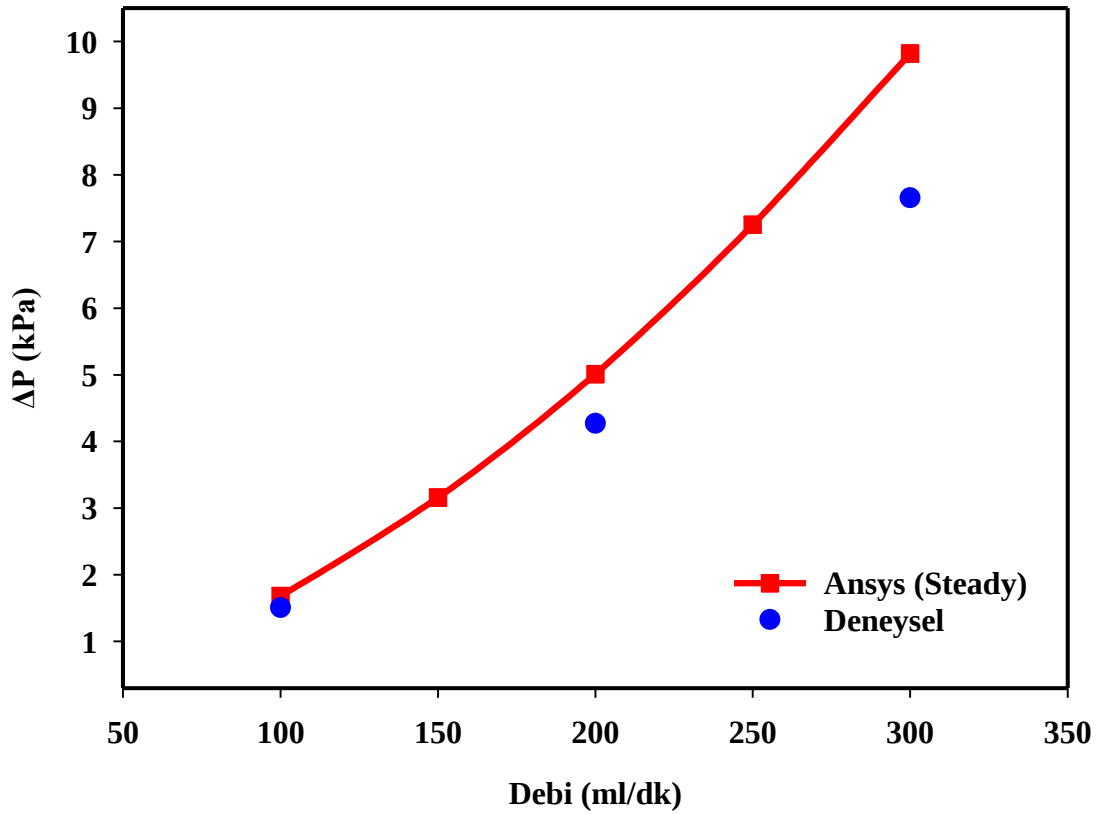
ANSYS
R19.2



(e)

Şekil 3.9 Kare GDE için Steady (Sürekli) akış sonuçlarının basınç dağılımları a) 100 ml/dk, b) 150 ml/dk, c) 200 ml/dk, d) 250 ml/dk ve e) 300 ml/dk debi.

Şekil 3.9’da görüldüğü üzere 100 ml/dk debi için elde edilen giriş basıncı 103,01 kPa olup, çıkış basıncı sınır şartıyla kalarak 101,32 kPa olarak belirlenmiştir. 200 ml/dk debide ise giriş basıncı 106,34 kPa değerine yükselirken, çıkış basıncı yine sınır şartı değeri olan 101,32 kPa olarak aynı kalmıştır. Debinin iki kat arttırılması ile giriş basıncının 3,33 kPa kadar arttığı gözlemlenmiştir. 300 ml/dk’lık debi incelendiğinde ise giriş basıncının 111,15 kPa değerine yükseldiği görülmüştür. Sayısal sonuçlar doğrultusunda giriş ve çıkış basınçları arasındaki fark, deneysel basınç değişimleriyle karşılaştırılmıştır. Kare GDE geometrisi ile yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 100 ml/dk, 200 ml/dk ve 300 ml/dk debi değerleri için sırasıyla 1,5 kPa, 4,27 kPa ve 7,65 kPa basınç değişimi gözlemlenmiştir. ANSYS kullanılarak yapılan sayısal modelleme çalışmalarında ise aynı debi değerleri için sırasıyla 1,68 kPa, 5,01 kPa ve 9,82 kPa basınç düşüşü değerlerine ulaşılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda elde edilen ΔP karşılaştırma sonuçları Şekil 3.10’da verilmiştir.

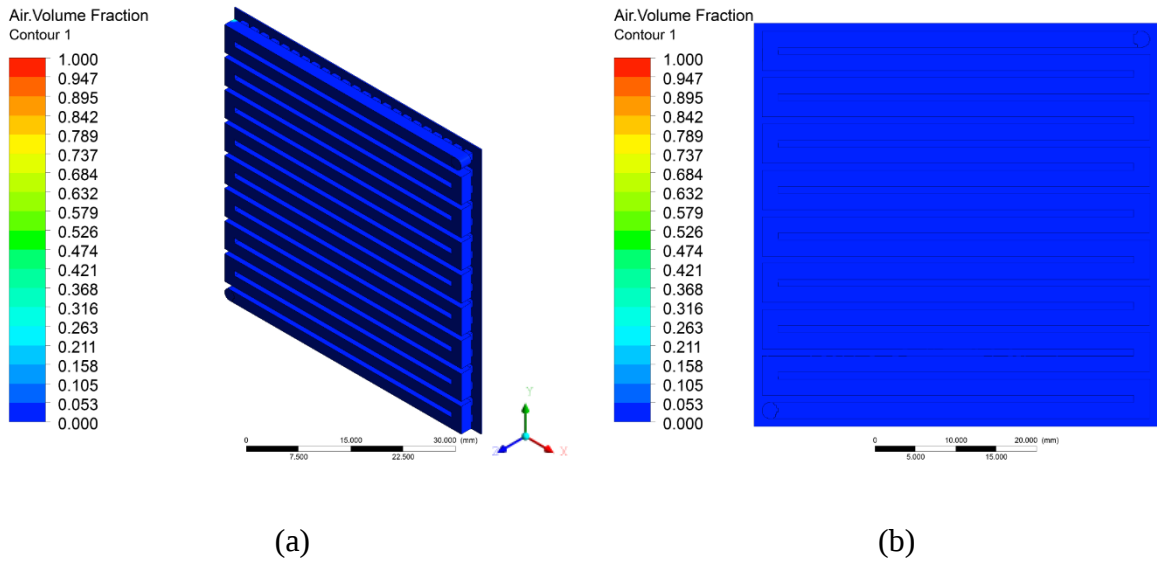


Şekil 3.10 Kare GDE'in deneysel ve sayısal olarak elde edilen ΔP sonuçların karşılaştırılması.

Şekil 3.10'da görüldüğü üzere kare GDE için yapılmış çözümlerde özellikle 100 ml/dk ve 200 ml/dk'da deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki hata oranı 0,18 kPa ve 0,74 kPa gibi küçük bir oran iken bu fark 300 ml/dk değerinde 2,17 kPa değerlerine çıkmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmalarla elde edilen basınç değişim sonuçları arasındaki farkın en yüksek olduğu debi değeri 300 ml/dk'dır. 300 ml/dk debi değerinde deneysel sonuçlarda hücre içi giriş ve çıkış basınç farkı %6,83 iken Steady (Sürekli) çözüm sonucu sayısal bulgularda bu basınç farkı %8,84'lik bir ΔP değerine yükselmiştir. Böylece kare GDE'e ait basınç düşüş değerinde %20'den daha az basınç kaybı elde edildiği görülmüştür. Deneysel sonuçlarda debi yükseldikçe girdap oluşumu daha fazla görülebilir ve hücre içerisindeki fazın kütle transferini hızlandırabilir. Ancak sayısal modelleme kabullerinde de belirtildiği üzere, akışın hidrodinamik olarak kararlı oluşu girdap ve akış ayrılmalarının da tanımlanamayacağını göstermektedir. Bu durum deneysel ve sayısal sonuçlarda yüksek debilerde oluşan ΔP farkını açıklamaktadır. Bu karşılaştırma grafiği sayesinde kare GDE'e ait deneysel basınç sonuçları sayısal olarak da düşük hata oranı ile belirlenmiştir.

3.2.3. Çok Fazlı Akış Koşullarında Zamana Bağlı Akış Dağılımının Sayısal Sonuçları

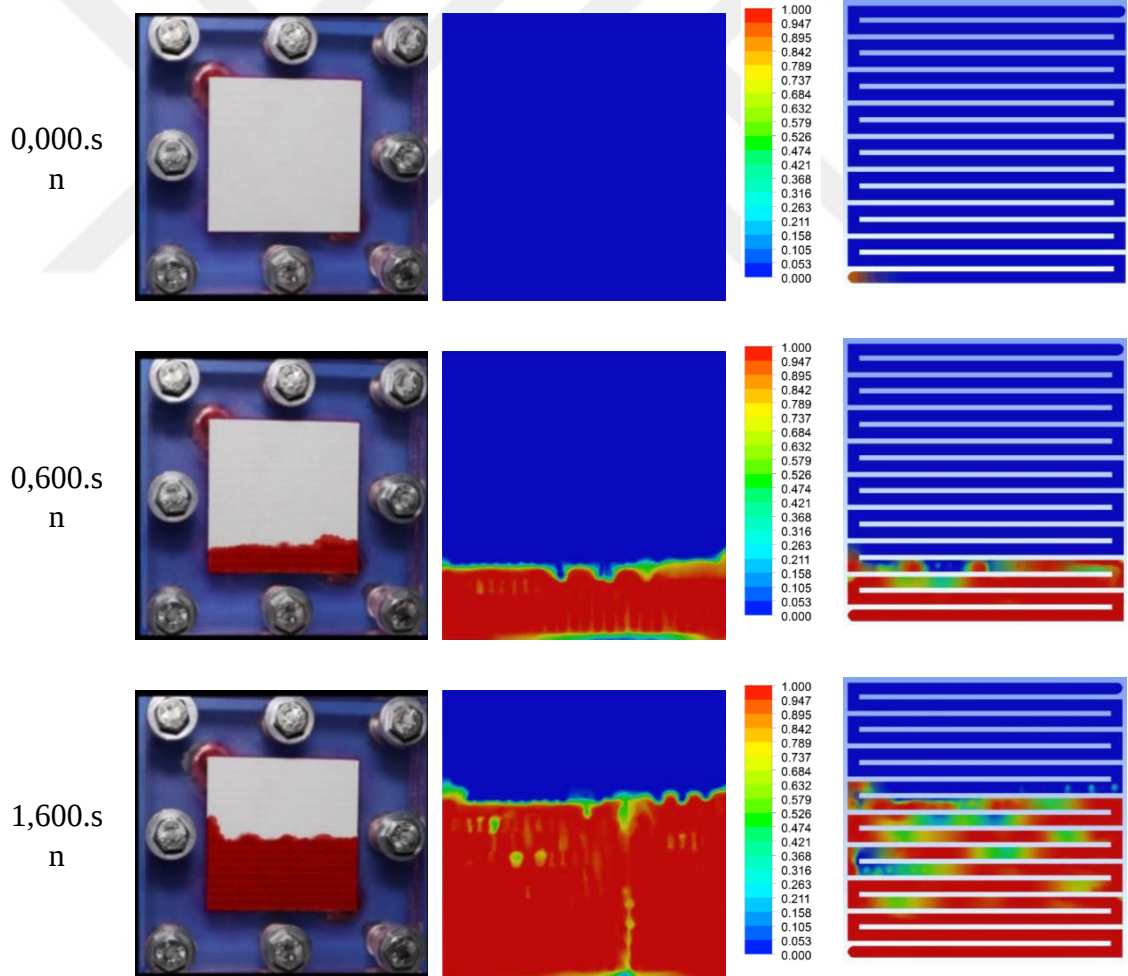
DeneySEL sonuçlarda mürekkep dağılımının sonuçları verilmişti aralarında en iyi akış dağılımı sergileyen kare GDE'in sayısal olarak doğrulanması için aynı kare GDE modeli zamana bağlı çözüme tabi tutulmuştur. Zamana bağlı çözüm başlatmadan önce deneyde kullanılan mürekkebin karakterizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. 25°C mürekkep yoğunluğu 1011 kg/m³ olarak ölçülmüştür. Mürekkebin dinamik viskozitesi ise 0,001421768 kg/m.s olarak hesaplanmıştır. Eş. 2.2 verilen Young-Laplace deklemini kullanarak mürekkebin yüzey gerilimi değeri 0,0053 N/m ölçülmüştür. Mürekkep için ölçülen yoğunluk, viskozite ve değerleri sayısal doğrulama kısmında sınır şartı olarak kullanılmıştır. Böylece deneyde akış görselleştirmesi için kullanılan mürekkep ANSYS içerisine yeni bir akışkan olarak tanımlanmıştır. Kare GDE için hazırlanan sayısal model zamana bağlı çok fazlı mürekkep akış ve sınır şartı değerleri Tablo 2.5'te verildiği gibi kullanılmıştır. Çözüm öncesi Kare GDE model hava ile doludur ve model içerisine mürekkep gönderilmiştir. Zamana bağlı sayısal çözüm öncesi model içerinin görünümü Şekil 3.11'de görülmektedir.

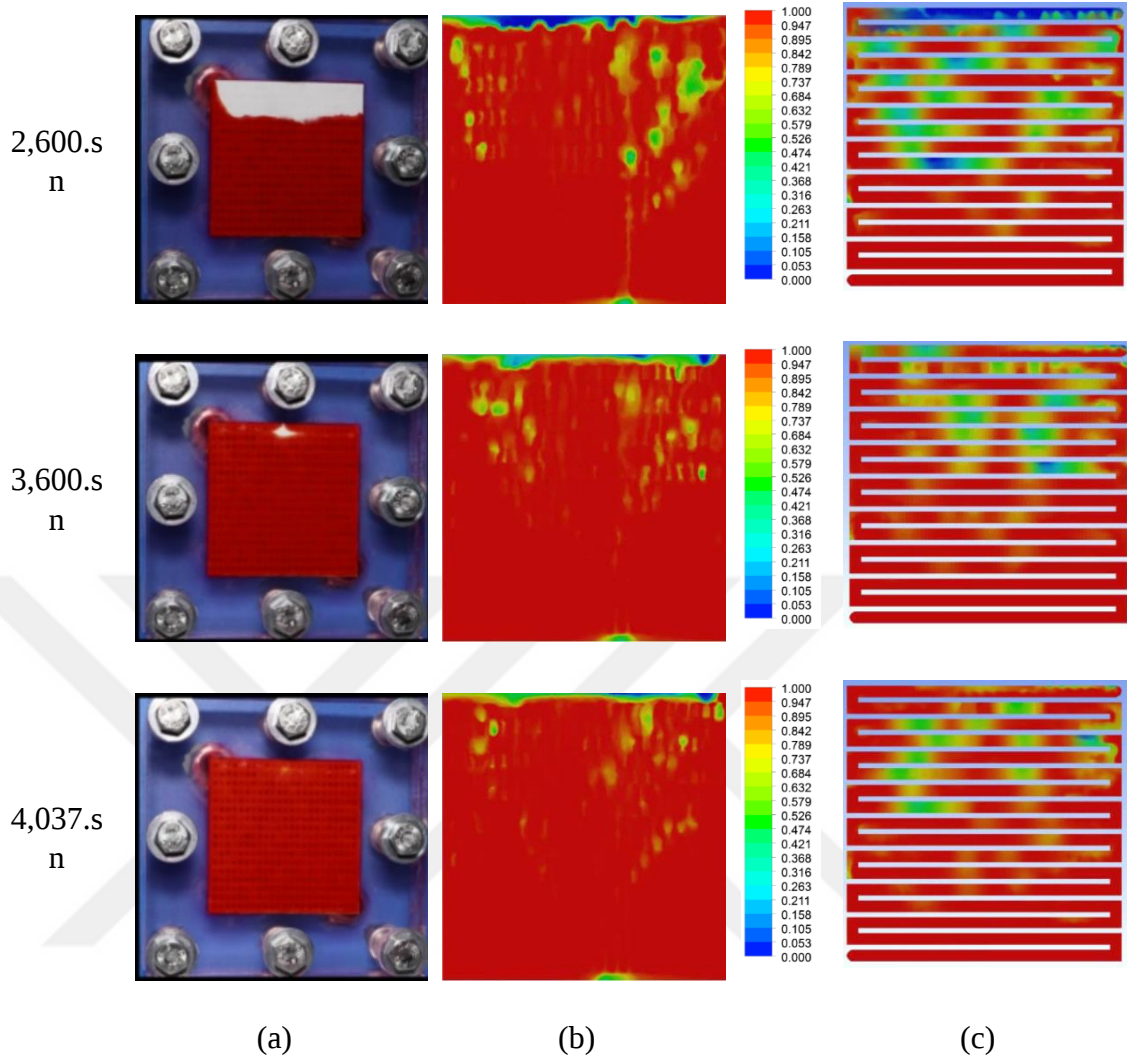


Şekil 3.11 (a) Zamana bağlı sayısal çözüm öncesi modelin hava fazı dağılımının izometrik görüntüsü. (b) Modelin zamana bağlı sayısal çözüm öncesi hava fazı dağılımı XY düzlemi önden görüntüsü.

Şekil 3.11’de görülen çözüm öncesi hava fazı dağılımında çözüm sonrası model içerisinde mükrekkep fazı ile dolması beklenmektedir. Burada mavi renkler hava fazını, kırmızı renk ise mükrekkep fazını temsil etmektedir.

Kare GDE zamana bağlı sayısal sonuçları kesit görüntüleri ve mükrekkep deneylerinden alınan kesit görüntüleri zamana bağlı değişimi Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’te verilmiştir. Sayısal çözüm sonucunda modelin filtre kağıdındaki mükrekkep dağılımı zamana bağlı şekilde irdelenmiştir. Zaman Adım Boyutu (Time Step Size) 0,005, Zaman Adımlarının Sayısı (Number of Time Steps) 1000 olacak şekilde 5 saniyelik sürelerde 100 ml/dk, 200 ml/dk ve 300 ml/dk debiler kullanılmıştır. Şekil 3.12’de 100 ml/dk için zamana bağlı sayısal çözümden elde edilen mükrekkep faz dağılımı ve mükrekkep deneyinin hücre içerisindeki dağılım görüntüleri karşılaştırılmıştır.

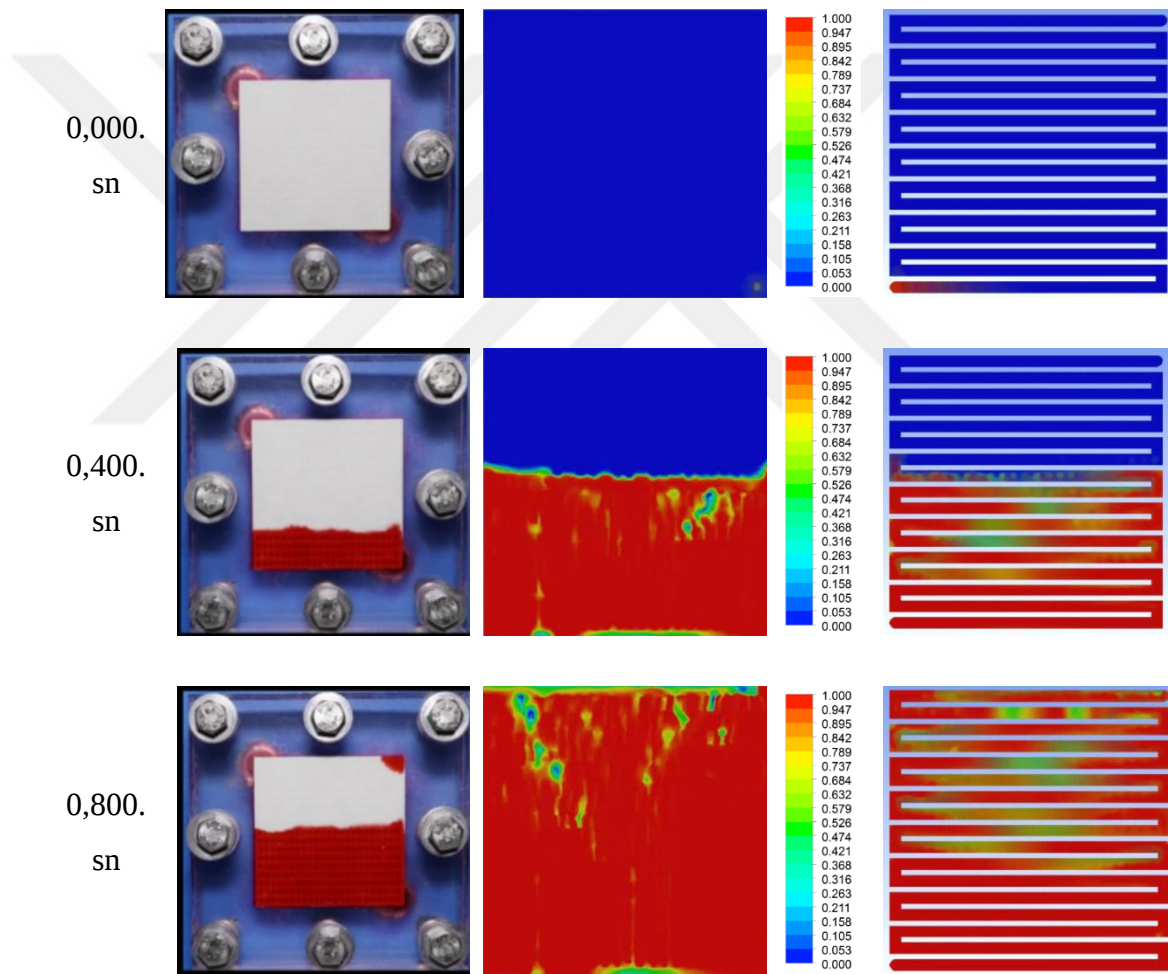


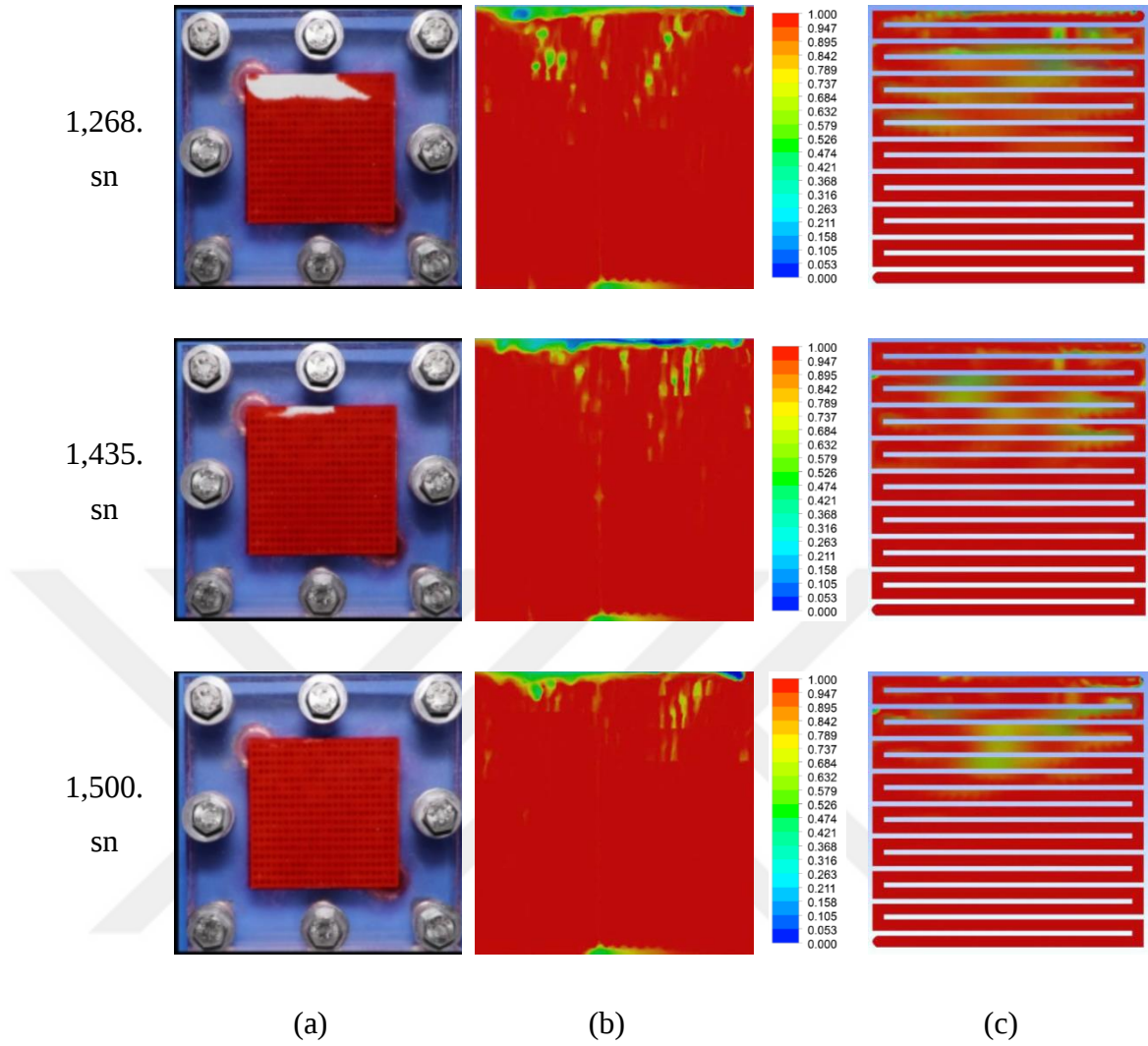


Şekil 3.12 100 ml/dk debi için yapılan (a) Deneysel akış dağılımı, (b) Sayısal olarak filtre kağıdı üzerindeki akış dağılımı (c) Sayısal olarak serpantin akış kanalı üzerindeki akış dağılımı sonuçları.

Şekil 3.12’de görüldüğü üzere deneysel ve sayısal çalışmaların tüm süre değerleri birbirleriyle neredeyse tamamen benzeşim göstermektedir. Örneğin, 1,6. sn’de mürekkep deneyinde ve sayısal çözüm sonucunda hücre içerisinde yarıya kadar dolduğu görülmektedir. 2,6. sn’ye gelindiğinde ise hücre içerisinde %90’nın dolduğu görülmektedir. Deneysel çalışmada mürekkebin çıkışa yöneldiği açıkça görülürken sayısal faz dağılımında bu yönelim kısmen gözlemlenmiştir. Bunun sebebi deneysel şartlarda filtre kağıdının sıvı emilimi de yapması ve emilen sıvıyı boşluk kısmına yönlendirmesidir. Sayısal modelleme çalışmasında filtre kağıdının modellenmesi çok zor olan emilim özelliği göz ardı edilerek sadece fiziki boyutları modellenmiştir. Deneysel mürekkep dağılımında ise 3,6. sn’ye gelindiğinde hücre içerisinde tamamen dolmak üzere olduğu görülmektedir. Aynı saniye için sayısal faz dağılımında da hücre içerisinde dolmak

üzere olduğu görülmekte bu da deneysel ve sayısal sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Akış kanalı içerisinde ise, 3,6. sn'de faz dağılımında büyük bir hava kabarcığının çıkışa doğru yöneldiği görülmektedir. Bu hava kabarcığını 4,037. sn'de yok olduğu onun yerine küçük az sayıda hava kabarcığı görülmektedir. 4,037. sn'de deneysel mürekkep dağılımı ve sayısal filtre kâğıdı faz dağılımına bakıldığında hücre içerisinde eş zamanlı olarak dolduğu görülmektedir. Çözüm parametreleri ve sınır şartı aynı kalacak şekilde sadece debi değeri 200 ml/dk olarak değiştirilmiş ve sayısal çözümler yapılmıştır. Şekil 3.13'te kare GDE için mürekkep deneyi ve sayısal mürekkep-hava faz dağılımları zamana bağlı olarak verilmiştir.

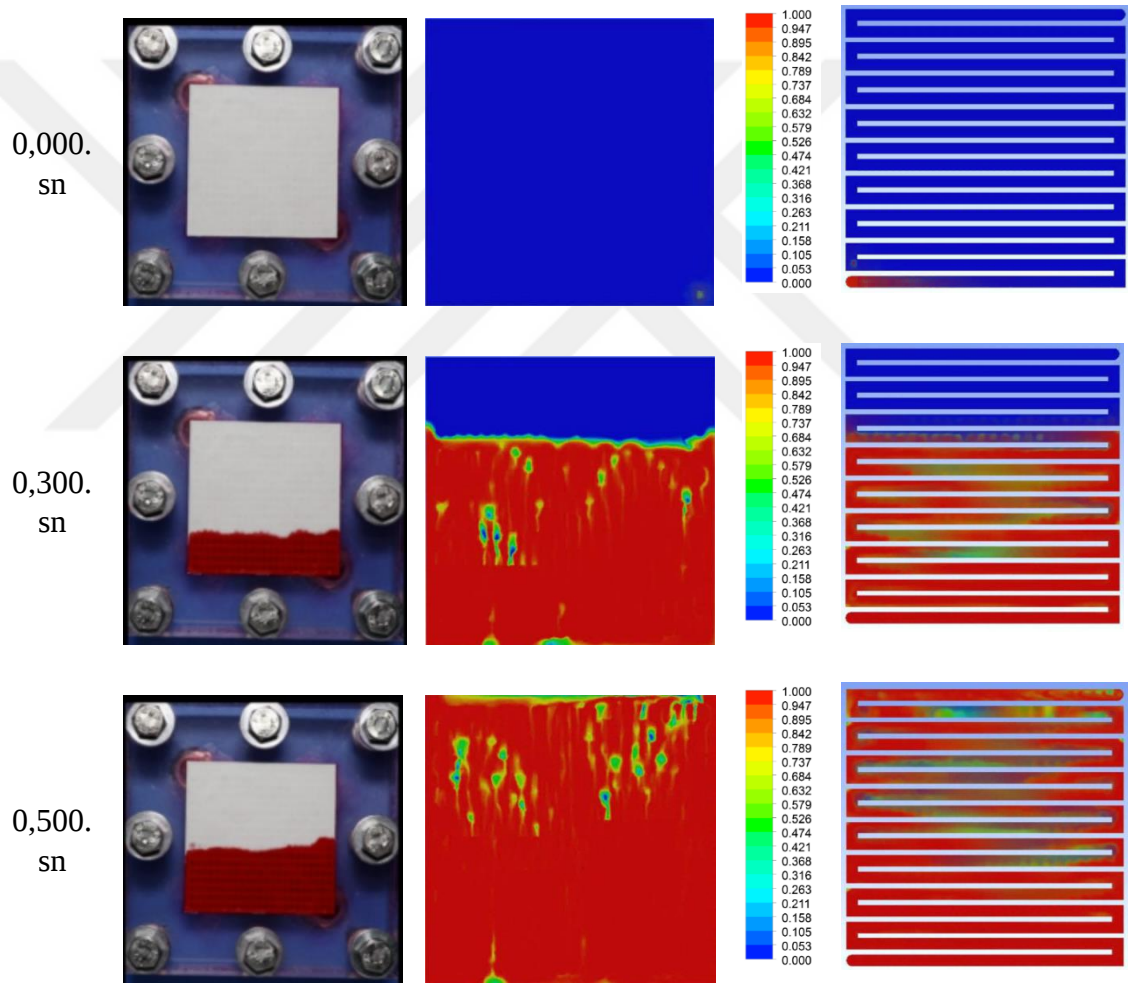


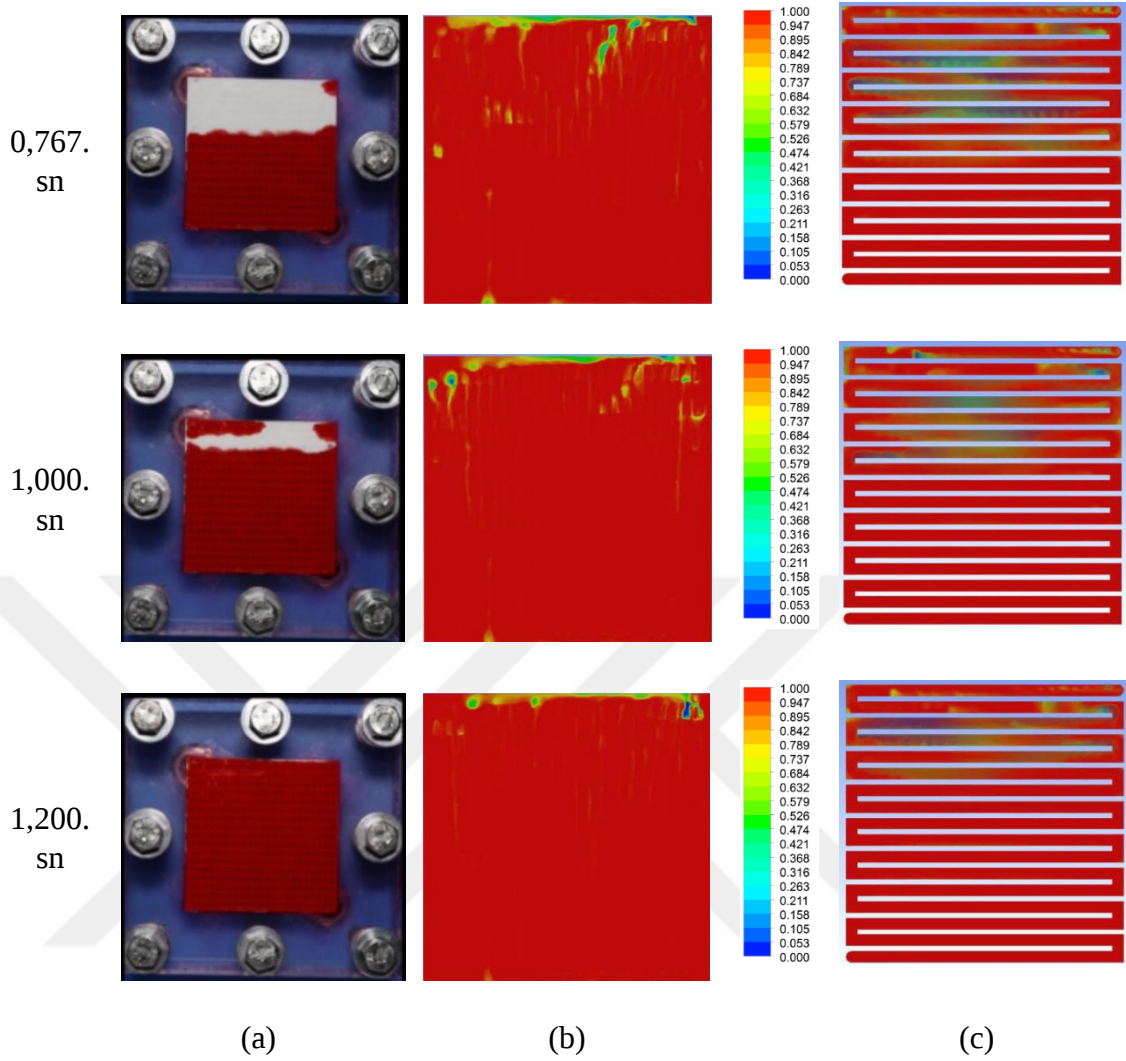


Şekil 3.13 200 ml/dk debi için yapılan (a) Deneysel akış dağılımı, (b) Sayısal olarak filtre kağıdı üzerindeki akış dağılımı (c) Sayısal olarak serpantin akış kanalı üzerindeki akış dağılımı sonuçları.

Şekil 3.13'te görüldüğü üzere 200 ml/dk'da deneysel ve sayısal çözümlerin kanala yönelim davranışları oldukça benzeşmektedir. Özellikle, 0,4. sn'ye kadar deneysel ölçümlerde ve sayısal hesaplama sonuçlarında hücre içerisinde hemen hemen aynı oranda olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra, 0,8. sn'ye gelindiğinde sayısal çözümde filtre kağıdının ve serpantin akış kanalının dolmak üzere olduğunun sadece çıkışa yakın yerlerde küçük hava kabarcıklarının kaldığı görülmektedir. Aynı saniye için deneysel mürekkep görüntülerinde ise hücre içerisinde dolmadığı sadece serpantin akış kanalından geçen mürekkebin sağ üst kısımdan filtre kağıdına çıktığı görülmektedir. Filtre kağıdının diğer yarısı dolmadan, sağ üst bölgede mürekkep görülmüştür. Aynı sn'de sayısal çözümde ise debi artışı ile filtre kağıdının tam olarak ıslanmadan sıvının kanal yardımıyla

çıkış bölgesine doğru yönelebileceğini göstermektedir. Hücre içerisine giren debi yükseldikçe sıvı akışı filtre kağıdında homojen dağılmadan, akış kanalı içerisinde hızla ilerlemektedir. 200 ml/dk için 1,5. sn'de deneysel çalışmada mürekkebin filtre kağıdını tamamen doldurduğu sayısal çözümde ise hava kabarcıklarının azaldığı gözlemlenmiştir. Sayısal çözüm parametreleri aynı kalmak koşu ile son debi miktarı olan 300 ml/dk için çok fazlı akış analizi yapılmıştır ve daha önceki debilerde olduğu gibi deneysel mürekkep dağılımı ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.14'te ise 300 ml/dk'da yapılan sayısal ve deneysel sonuçlara ait çok fazlı akış görselleştirme ve hesaplamalara ait görüntüler görülmektedir.

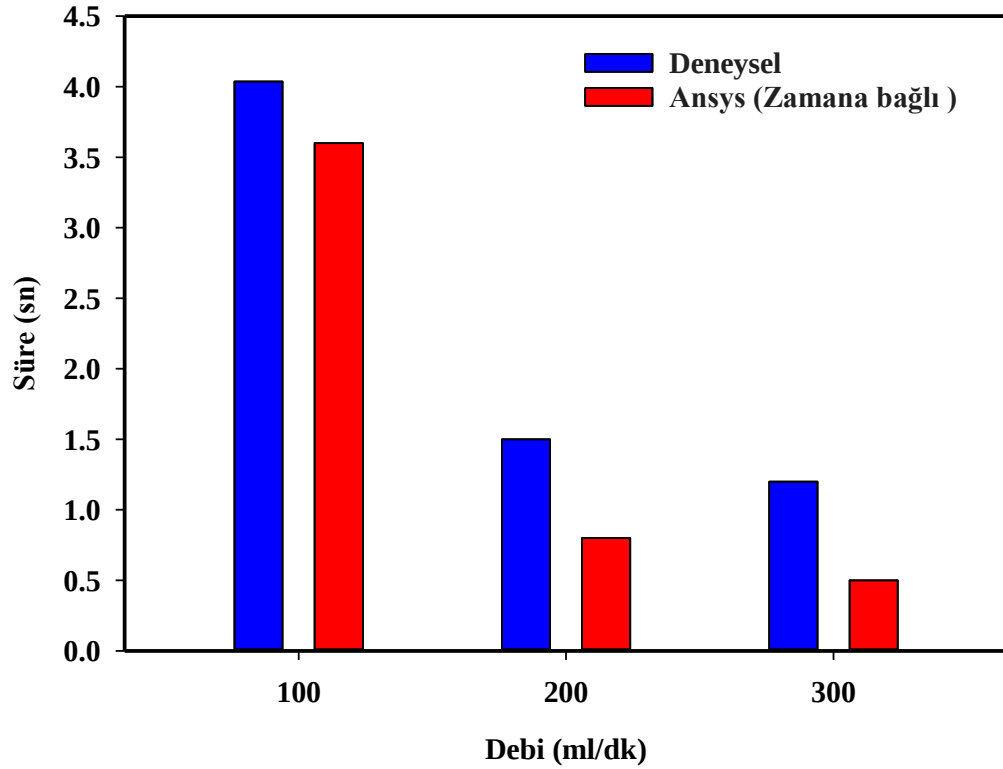




Şekil 3.14 300 ml/dk debi için yapılan (a) Deneysel akış dağılımı, (b) Sayısal olarak filtre kağıdı üzerindeki akış dağılımı (c) Sayısal olarak serpantin akış kanalı üzerindeki akış dağılımı sonuçları.

Şekil 3.14'te görüldüğü gibi 0,3. sn'ye kadar deneysel akış dağılımı ve sayısal faz dağılımı benzerlik göstermektedir. 0,5. sn'ye gelindiğinde sayısal çözümde filtre kağıdı içerisinde dolduğu ancak deneysel görüntüde filtre kağıdının henüz yarısının mürekkep ile dolduğu görülmektedir. 200 ml/dk çözümlerinde 0.8. sn'de karşılan durum 300 ml/dk debide 0,5. sn'de görülmüştür. Yani, hücre içerisine gönderilen sıvı debisinin yükselmesiyle serpantin akış kanalı hızla mürekkep dolmuştur. Aynı durum deneysel çalışmada da gözlemlenmiştir ve filtre kağıdı mürekkep ile ıslanmadan akış kanalı dolmuştur. Bu yüzden 0,767. sn'de deneysel görselde sağ üstte mürekkep izi görülmüştür. 1. sn'ye kadar sayısal çalışmada hava kabarcıkları görülse de 1,2. sn'de hava kabarcıkları azalmıştır. Aynı saniye içerisinde deneysel çalışmada filtre kâğıdı mürekkep ile dolmuştur. 3 farklı debi için hem sayısal hem de deneysel sonuçlarda hücre içerisindeki

filtre kağıdı bölümünün tamamen mürekkep ile dolduğu zamanlar Şekil 3.15’de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 3.15 Sayısal ve deneysel akış görselleştirme mürekkep sonuçlarına göre hücre için ilk dolduğu süreler.

Şekil 3.15’te görüldüğü üzere hücre içindeki filtre kağıdının tamamen mürekkep ile dolduğu ilk an alınan süreler karşılaştırılmıştır. 100 ml/dk için hücre içerisi deneysel sonuçta 4,037 sn. dolduğu gözlemlenirken sayısal sonuçta bu süre 3,6 sn. olarak ölçülmüştür. Aradaki fark 0,437 saniyedir. Bu az fark 100 ml/dk debi için deneysel ve sayısal sonuçların benzerlik gösterdiğinin göstergesidir. 200 ml/dk ve 300 ml/dk debi için hücre içerisinin tamamen mürekkep ile dolduğu anın sayısal ve deneysel süreleri arasındaki fark eşittir ve bu fark 0.7 sn. dir. Yüksek debi değerlerinde hücre içi akış dağılımı sayısal sonuçlarda deneysel olarak gözlemlenen sonuçlara göre çok daha hızlı gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Sayısal çözüm karşılaştırılmalarında görüldüğü üzere debinin artması ile hücre içerisindeki akış dağılımı homojenliğini yitirmektedir. Hücre içerisine gönderilen debi arttıkça çıkış bölgesine doğru basınç artışı yaşanmakta ve debi artışı akışın hücre içinde sürekli rejimde devam edememesine yol açmaktadır [84]. Buna dayanarak aynı aktif yüzey alanına sahip hücre için giriş debisi artışı sayısal

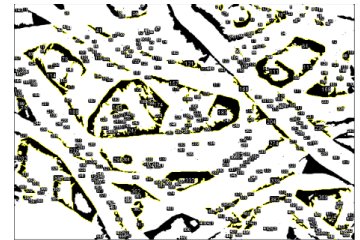
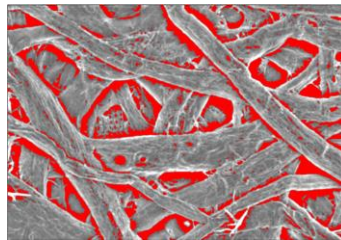
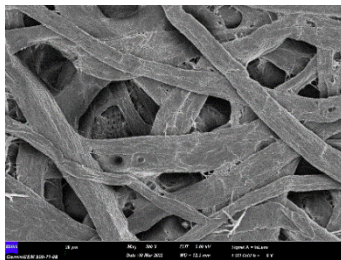
çözömlmelerde kabul edilen akışın hidrodinamik kararlılığını ve sürekli rejimde oluşunu olumsuz etkilemektedir [78, 101]. Bu durumun yansıması deneysel ve sayısal çözümler karşılaştırmasında hücre içinin dolduğu ilk anlardaki sürelerin farkının artışıyla görölmüştür.

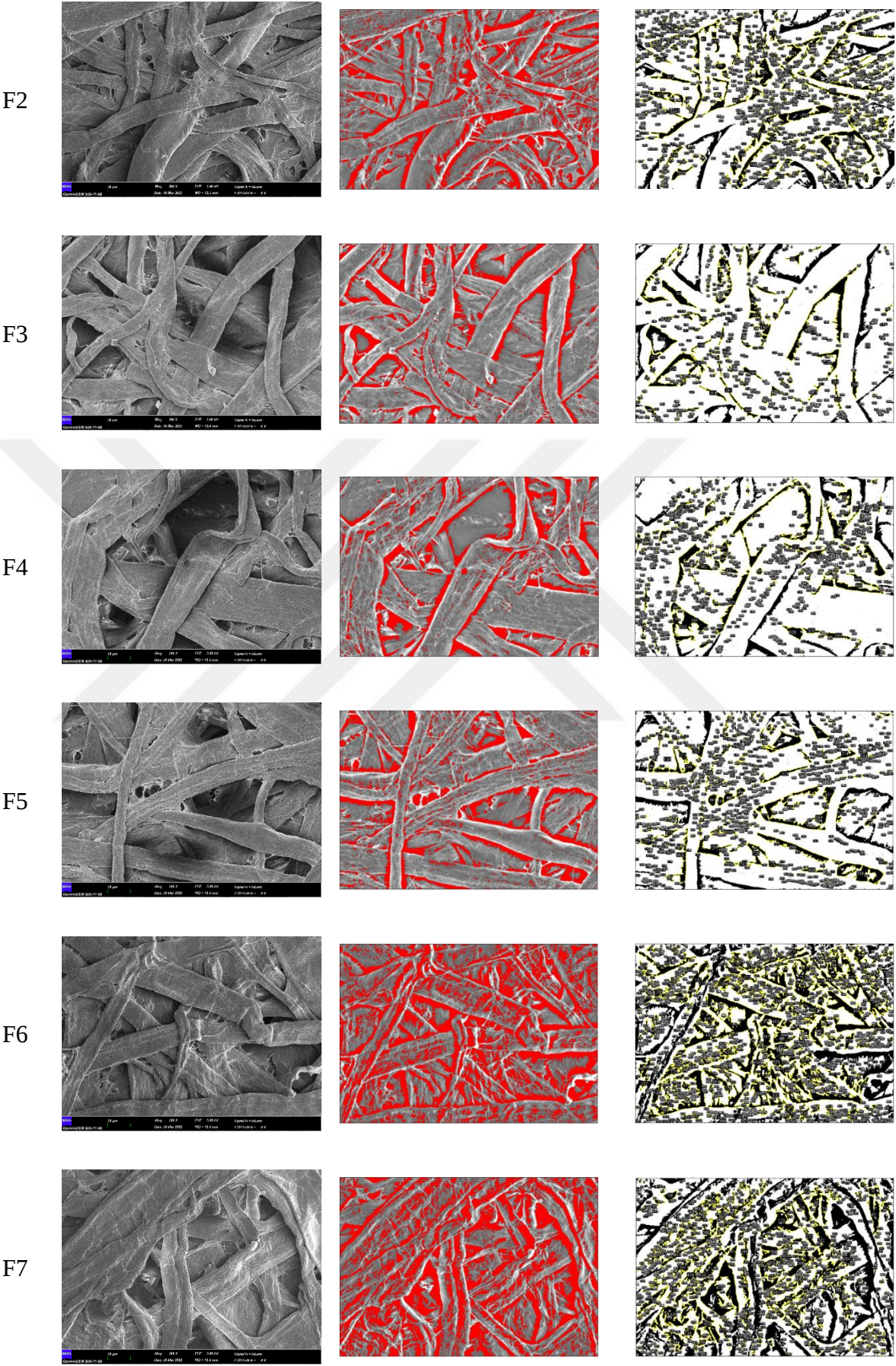
Üç farklı debi içinde yapılan zamana bağı çok fazlı akış deneyinde Şekil 2.8.a da görölen sayısal model görüntüsü tamamı ile akış alanı olarak tanımlanmıştır. İkinci faz olarak gönderilen akışkan, model girişinden çıkışına rahatlıkla yol alabileceği akış alanı ile karşılaşmaktadır. Ancak gerçek deneylerde kullanılan filtre kağıdı akışın rahatlıkla geçiş yapabileceği boş bir yapı değildir. Aksine malzemesinden kaynaklı gözenekli bir yapıya sahiptir. 100 ml/dk debide ortaya çıkan 0,437 saniyelik farkı detaylı incelemek için filtre kağıdının karakterizasyonu yapılarak gözeneklilik oranı belirlenmiş ve fiziki olarak sayısal model içerisinde tanımlanmıştır. Böylece deneysel çözümlerde filtre kağıdı ile karşılaşan mürekkep aynı gözenekli yapı ile bu sefer sayısal model içerisinde karşılaşacaktır.

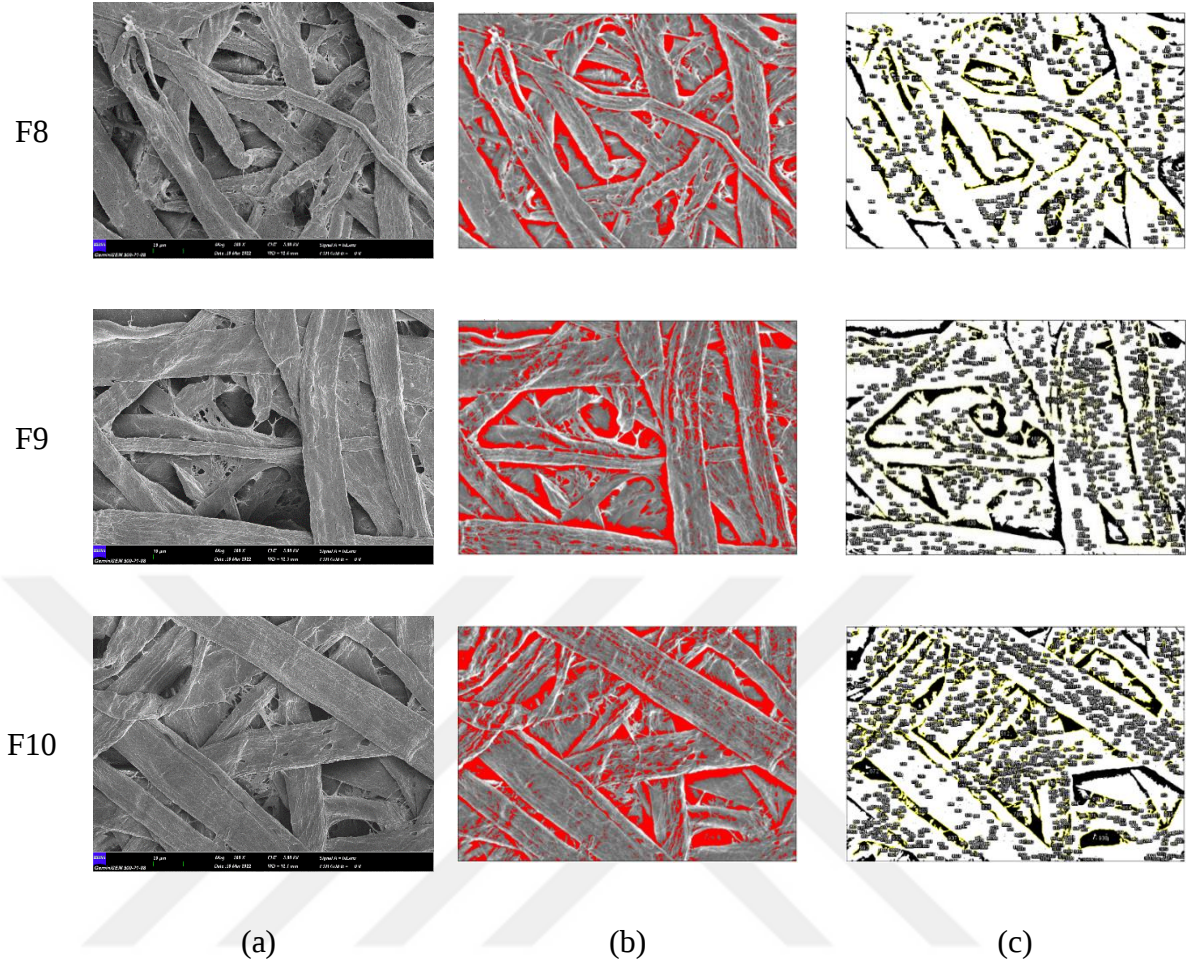
3.2.4. Filtre Kağıdının FE-SEM Analizi ve Görüntü İşleme Çıktıları

Deneylerde kullanılan fitre kağıdının gözeneklilik karakterizasyon için öncelikle 10 farklı noktadan FE-SEM görüntüleri alınmıştır. FE-SEM görüntülerinde göröldüğü üzere filtre kağıdının ipliksi bir yapıya sahip olduğı belirlenmiştir. Bu ipliksi yapı arasında bunun boşlukları tahin etmek için ImageJ programında renk haritalaması (colour mapping) yöntemi ile boşluk yapısı renklendirilmiştir ve görüntü işlemeye tabi tutulmuştur. Renklendiren boşluk yapısının her biri bir düzensiz geometri olarak tanımlanmıştır. Görüntü işleme sırasında yakalanan küçük ve büyük boyutlara sahip olan her bir geometri maske (görüntü maskeleme) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.16'da bir filtre kağıdının 10 farklı noktasından alınan FE-SEM görüntüleri ile ImageJ programında boşluk renklendirme işlemi ve görüntü işleme sırasında numaralandırılmış maske görselleri verilmiştir.

F1







Şekil 3.16 Filtre kağıdına ait (a) FE-SEM görüntüleri, (b) ImageJ programı ile görüntü işlenmesi (colour mapping), (c) işlenmiş görüntünün gözeneklilik oranının belirlenmesi için analiz.

Şekil 3.16’da F1 ile F10 arasındaki görüntüler filtre kağıdından alınan 10 farklı noktanın tanımlaması olarak verilmiştir. Şekil 3.16.a’da görüldüğü üzere FE-SEM görüntüleri 500X yakınlıkla, 20 μm ölçekle alınmıştır. Şekil 3.16.b’de ise ImageJ programında en küçük yapının 3 piksel ve eşik değerinin 100 olacak şekilde renklendirilmiş görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.16.c incelendiğinde renklendirme ile yakalana boşluk yapılarının görüntü işleme analizi sonucu yakalanan maske sayıları ve konumları görsel üzerinde verilmiştir. Görüntü işleme sonucu elde edilen 10 farklı noktaya ait maske sayısı ve boşluk alanının toplamı ImageJ programı kullanılarak belirlenmiştir. Tablo 3.2’de 10 farklı FE-SEM görüntüsünün işlenmesi sonucu oluşan maske sayıları, boşluk alanının toplamı ve her bir görüntünün gözeneklilik oranı verilmiştir.

Tablo 3.2 ImageJ programında görüntü işleme sonuçları.

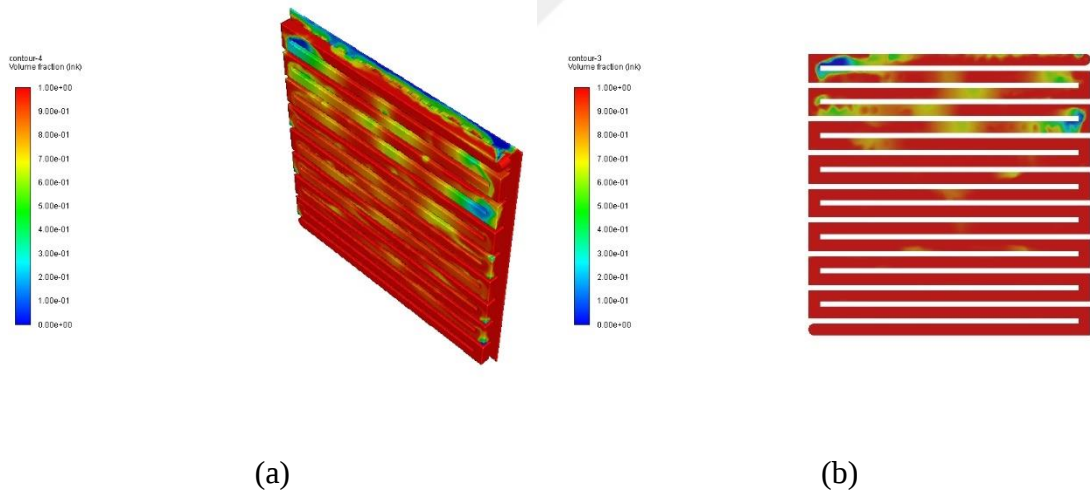
FE-SEM görüntüsü adı	İşlenen maske (mask) sayısı	Görüntünün dolu alanı (μm^2)	İşlenen görüntü boşluk alanı toplamı (μm^2)	Gözeneklilik oranı
F1	445	578,531	74,291	0,13
F2	978	578,531	95,732	0,17
F3	501	578,531	57,944	0,10
F4	707	578,531	66,694	0,12
F5	887	578,531	69,979	0,12
F6	1055	578,531	164,416	0,28
F7	874	578,531	127,131	0,22
F8	541	578,531	72,402	0,13
F9	949	578,531	93,501	0,16
F10	1044	578,531	99,224	0,17

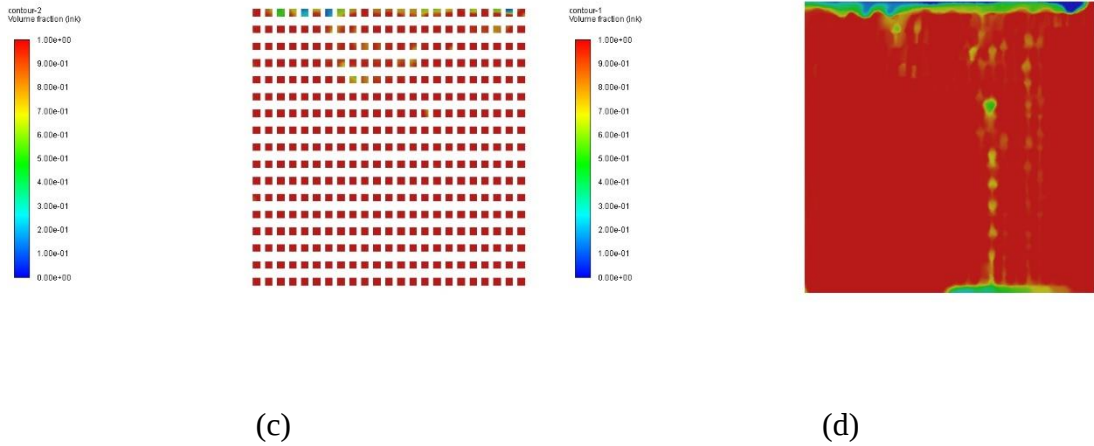
Tablo 3.2’de görüldüğü üzere görüntü işleme sonucunda F6 ve F10 görüntülerinde sırasıyla 1055 ve 1044 maske sayısı yakalanmıştır. Bu iki değer diğer görüntülerden daha fazladır ancak maske sayısının fazla olması o görüntünün daha fazla gözeneklilik oranı olduğu anlamına gelmemektedir. Çünkü görüntü işlemede bazen yüzey alanı çok küçük fazla sayıda maske yakalanabilir. Burada gözeneklilik oranının doğru hesaplanabilmesi için yakalanan maskelerin boşluk alanı toplamına bakılması gerekmektedir. F6 görüntüsünde 164,416 μm^2 boşluk tespit edilmiştir. Fakat, şekil 3.16’da verilen F4 görüntüsünde ise 66,694 μm^2 ile en az boşluk alanı tespit edilmiştir. Görüntü işlemede kullanılabilecek görsel toplam alanının 578,531 μm^2 olduğu bilindiği için her bir görüntünün gözeneklilik oranı hesaplanmıştır. Filtre kağıdının 10 farklı noktasından alınan görüntülerin gözeneklilik oranı belirlendikten sonra ortalaması alınmış ve filtre kağıdının gözeneklilik oranı %16 olarak belirlenmiştir. Böylece çok farklı noktalardan görüntüler işlenerek filtre kağıdının gözeneklilik değeri hesaplanmaya çalışılmıştır.

3.2.5. Filtre Kağıdı için Gözenekli Bölgenin Aktif Edildiği Çok Fazlı Zamana Bağlı Sayısal Çözüm Sonuçları

Akış görselleştirme deneylerinde kullanılan filtre kağıdının iplikli yapısından kaynaklı bir gözeneklilik oranına sahiptir. Şimdiye kadar yapılan zamana bağlı çok fazlı akış

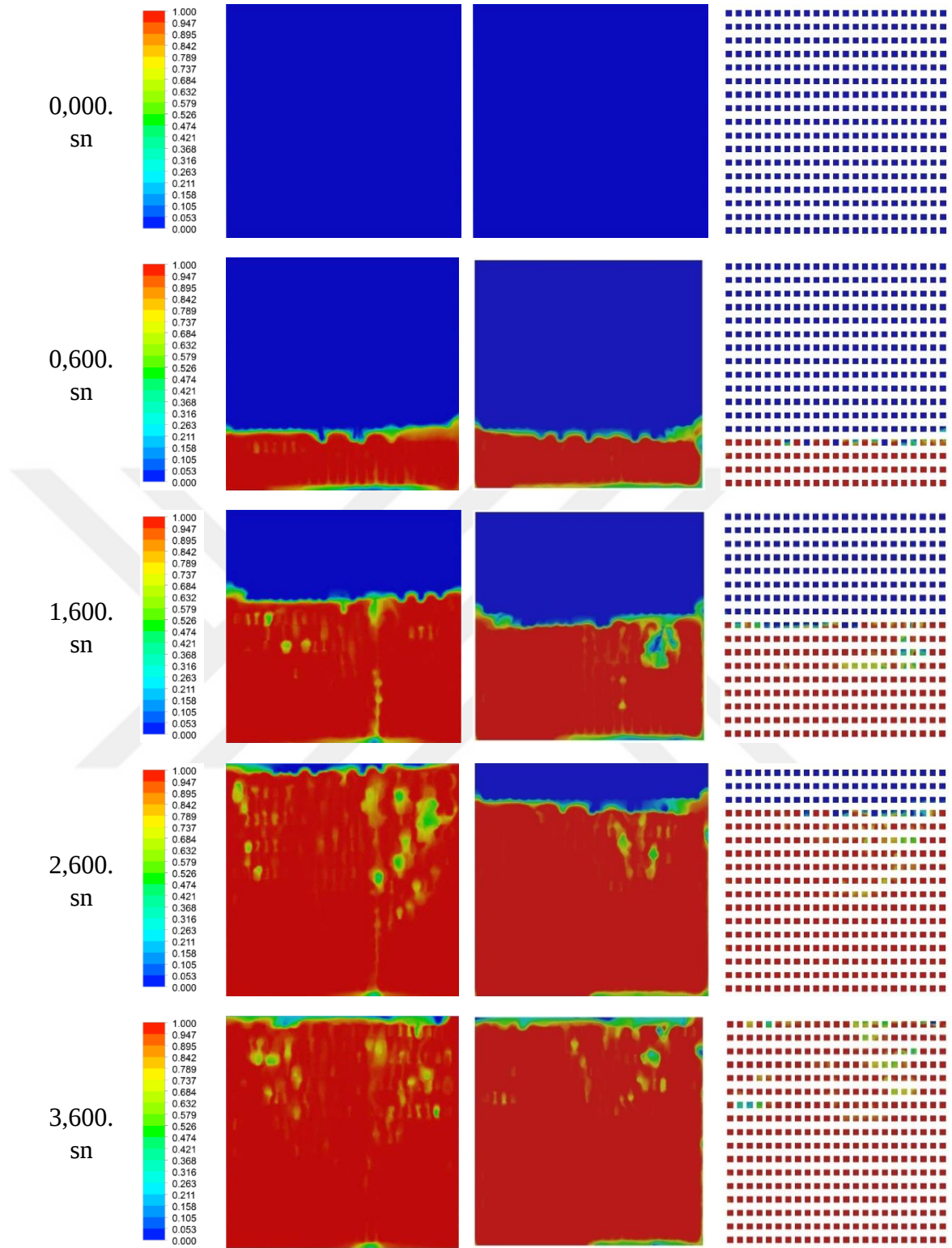
analizlerinde filtre kağıdının kapladığı alan sadece boş bir akış alanı olarak tanımlanmıştır. Ancak gerçekte filtre kağıdının sahip olduğu gözeneklilik oranı sayısal model içerisinde tanımlanmalıdır. Bu sayede akışın model içerisinde gözenekli bir katmanla karşılaştığında nasıl davranış sergilediği gözlemlenebilir. PEM elektrolizörlerde anot GDE tabakasından sonra anot katalizör tabakası yer almaktadır. Katalizör tabakasına ulaşan akış, kendine özgü yüzey morfolojisi bulunan katman ile karşılaşmaktadır. Böyle bir katman ile karşılaşan akışın nasıl dağılım gösterdiğini incelemek için deneylerde kullandığımız filtre kağıdının karakterizasyon ve görüntü işleme yapılmıştır. Şekil 2.8.a’da verilen model görüntüsünde görülen sadece filtre kağıdı bölgesi için ANSYS içerisinde gözenekli bölge seçeneği aktif edilmiştir ve %16 gözeneklilik oranı tanımlanmıştır. Diğer tüm geometrik özellikler aynı kalacak şekilde aynı çözüm parametreleri ile Tablo 2.5’te verilen zamana bağlı akış ve sınır şartları altında kare GDE model 100 ml/dk debi girişiyle 5 saniyelik çok fazlı sayısal çözüme tabi tutulmuştur. Şekil 3.17’de 5. saniye sonunda mürekkebin faz dağılımlarına ait model görselleri verilmiştir.

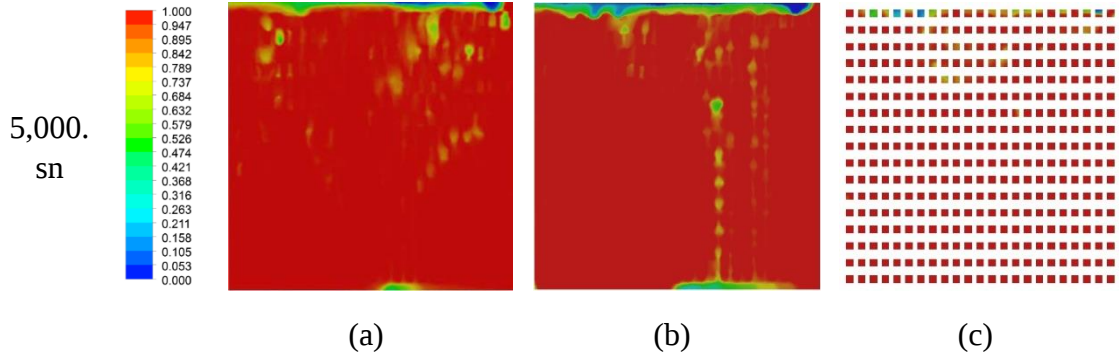




Şekil 3.17 100 ml/dk debi değerinde %16 gözeneklilik oranına sahip filtre kağıdı ile zamana bağlı çok fazlı kare GDE için 5. saniye mürekkep faz dağılımı: (a) 3 boyutlu model, (b) serpantin akış kanalı önden kesit görünümü, (c) kare GDE önden kesit görünümü, (d) filtre kağıdı önden görünümü.

Çözüm sonuçlarında mavi renkler hücre içerisindeki havayı temsil ederken kırmızı renkli bölgeler ise mürekkep fazını göstermektedir. Şekil 3.17’de model ve serpantine akış kanalı üzerine bakıldığında 5. Saniye sonunda hava kabarcıkları görülmektedir. Ancak kare GDE kesit görünümü incelendiğinde 391 adet kareden oluşan GDE de sadece 20 adet karede hava fazı görülmektedir ve hemen hemen hepsi modelin çıkışına yakın noktada yer almaktadır. GDE, serpantin akış kanalından gelen akışkanı %94,8 oranında fitre kağıdı tarafına geçirmiştir. Bu denli yüksek oranda mürekkep dolan kare GDE görevini başarıyla gerçekleştirmiş ve akış dağılımını yapmıştır. Filtre kağıdına bakıldığında GDE’ye göre daha fazla hava fazı görülmektedir ve bu hava kabarcıkları modelin giriş, orta ve son kısmına yayılmış durumdadır. Kare GDE %94,8 oranında akışı dağıtmasına rağmen, filtre kağıdında daha fazla hava kabarcıklarının görülmesi %16 gözeneklilikten dolayı akışın çıkışa yönelmesi önünde direnç oluşturmaktadır. GDE ve fitre kağıdı arasındaki bu akış dağılım farkının detaylı incelemek için zaman içinde faz dağılımları Şekil 3.18’de incelenmiştir.





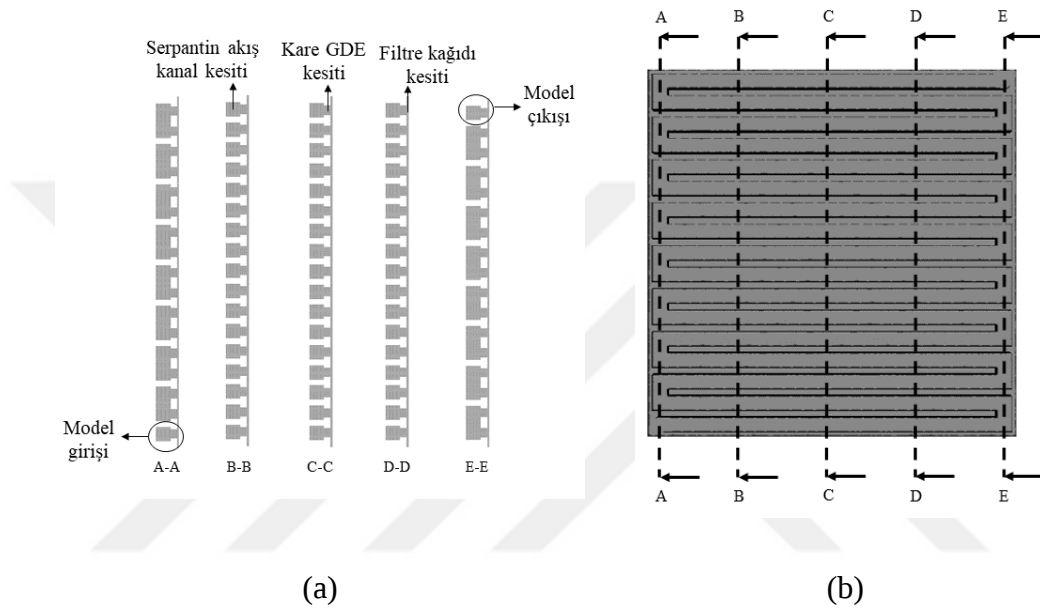
Şekil 3.18 100 ml/dk debi için yapılan zamana bağlı çok fazlı akış dağılımı sonuçları:

(a) aktive edilmemiş gözenekli bölge ile filtre kağıdı mürekkep dağılımı, (b) aktif gözenekli bölge (%16 gözenekli) ile filtre kağıdı mürekkep dağılımı c) aktif gözenekli bölge ile GDE üzerinde mürekkep dağılımı.

Şekil 3.18.a'da 100 ml/dk için zamana bağlı çok fazlı akış dağılımında gözenekli bölgenin pasif olduğu filtre kağıdı görüntülerine yer verilirken Şekil 3.18.b ve Şekil 3.18.c'de gözenekli bölgenin aktif edilerek sadece filtre kağıdı için %16 gözeneklilik ile zamana bağlı çok fazlı akış analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. 0,6. sn karşılaştırıldığında gözenekli bölgenin aktif ya da pasif olması filtre kağıdı üzerinde çok fazla etki etmediği her iki filtre kağıdında da aynı derecede mürekkep dağılımı sergilediği gözlemlenmektedir. 1,6. sn gelindiğinde ise gözenekli bölgenin pasif olduğu filtre kağıdında daha fazla mürekkep dağılımı görülmektedir. Aynı zaman diliminde gözenekli bölgenin aktif olduğu filtre kağıdında daha az bölgede mürekkep dağıldığı ve filtre kağıdının sağ orta kısmında büyük bir hava kabarcığının kaldığı görülmektedir. 1,6. sn gözenekli bölgenin aktif olduğu GDE üzerinde de bu hava kabarcığının etkisi açıkça görülmekte ve bazı kare geometrilerde hava fazına rastlanmaktadır. 2,6. sn gelindiğinde gözenekli bölge pasif ya da aktif olması arasındaki mürekkep faz dağılımı daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 3.18.a filtre kağıdı 2,6. sn neredeyse dolmak üzereyken Şekil 3.18.b'deki filtre kağıdının yaklaşık %85'i mürekkep ile dolmuştur. Bu fark gözenekli bölgenin aktif olması ve filtre kağıdının %16 gözeneklilikle akış geçişine direnç göstermesidir. 2,6.sn'de GDE faz dağılımına bakıldığında mürekkep ile dolmuş kısımlarında çok az sayıda hava kabarcıkları mevcuttur. Bunun anlamı GDE serpantin akış kanalı üzerinden gelmiş akışkanı başarı ile dağıtmış ve filtre kağıdı bölgesine taşımıştır. 3,6. sn ise filtre kağıtları arasındaki mürekkep dağılım farkı azalmış ve her ikisi de akışkanı çıkışa yönlendirebilmiştir. 5. sn gelindiğinde gözenekli bölgenin aktif olduğu filtre kağıdında daha fazla hava kabarcıkları görülmektedir. Buna karşın aynı zaman

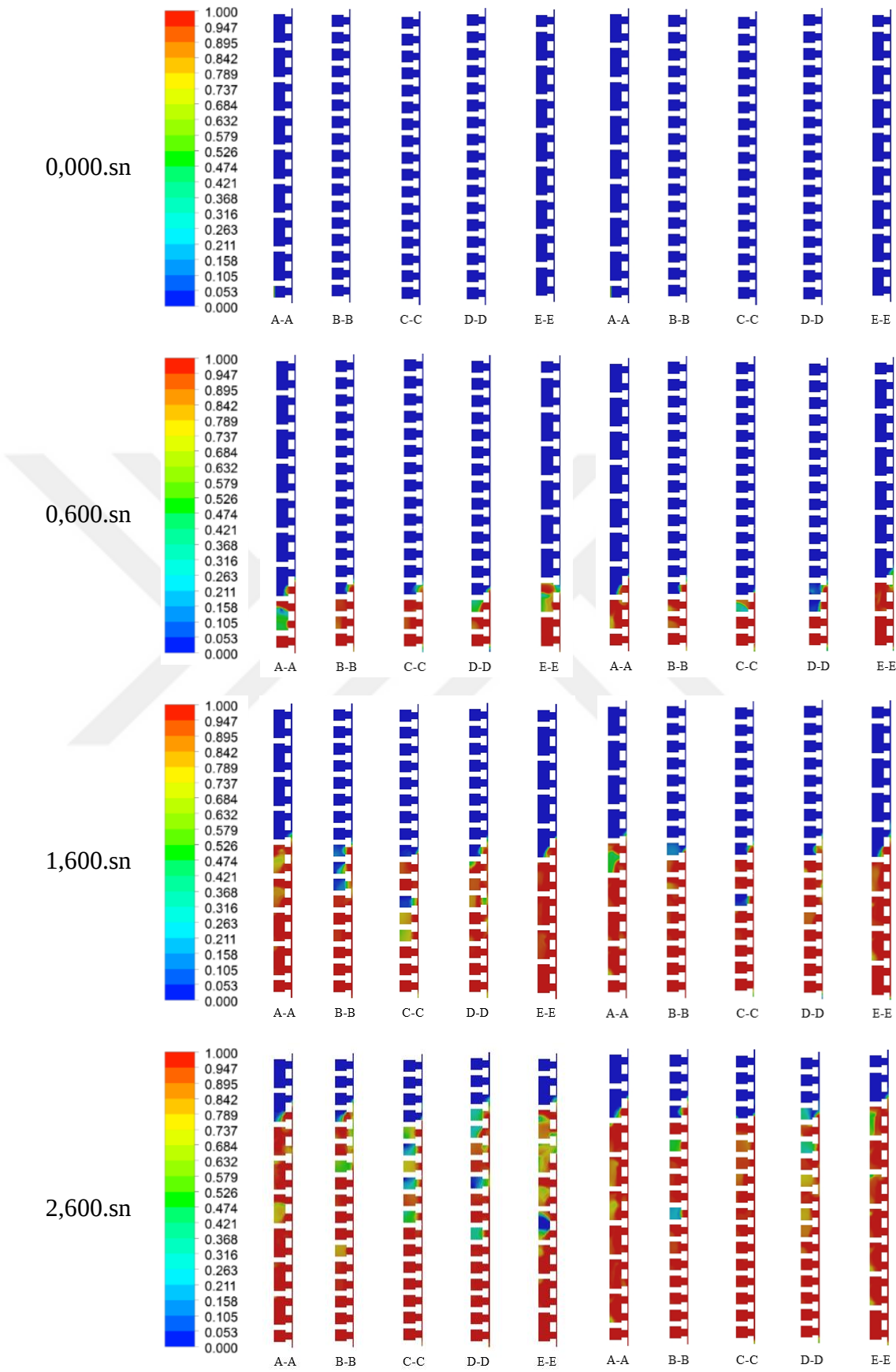
diliminde kare GDE içerisindeki akış alanı incelendiğinde %94,8 oranında mürekkep ile dolduğu belirlenmiştir.

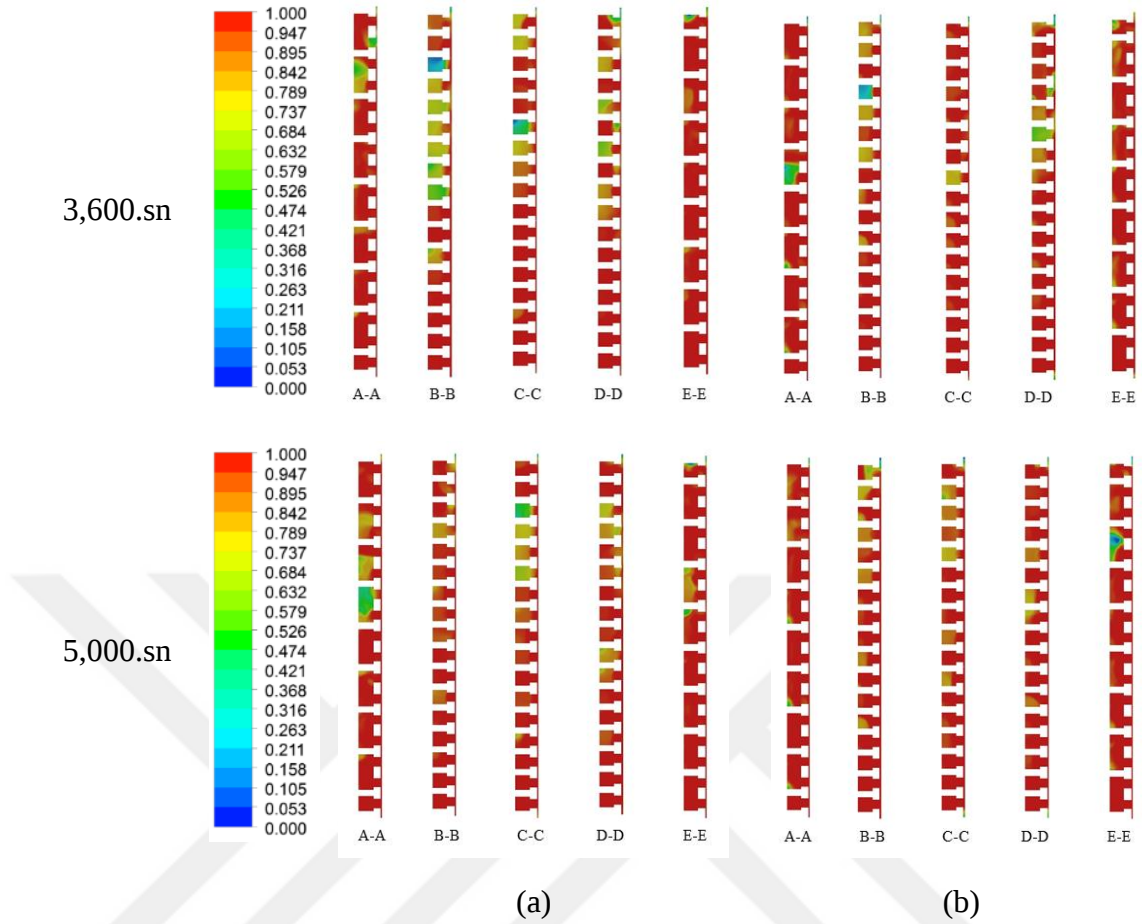
Serpantin akış kanalı, kare GDE ve filtre kağıdında oluşan bu karmaşık geometri içerisinde mürekkep dağılımı daha detaylı incelemek için model üzerinden beş farklı bölgeden kesitler alınmıştır. Şekil 3.19’da Model üzerinde alanın kesit konumları ve bu kesitlere ait görüntülere yer verilmiştir.



Şekil 3.19 Sayısal model kesit görüntüleri (a) Kesit görüntülerin detayları (b) Kesitlerin model üzerindeki konumları.

Şekil 3.19.b’de görüldüğü üzere XY düzlemine dik bakıldığında model üzerinde beş farklı bölgeden dik kesitler alınmıştır. Şekil 3.19.a’da görüldüğü üzere her kesit görüntüsü içerisinde serpantin akış kanalı, kare GDE ve filtre kağıdı görülmektedir. Özellikle A-A ve E-E kesiti model giriş ve çıkış bölgelerini de görmek için tercih edilmiştir. Bu beş farklı kesit içerisinde mürekkebin zamana bağlı faz dağılımı detaylı incelemiştir. Şekil 3.20’de filtre kağıdının gözenekliliğinin aktif olmadığı ve %16 gözenekli olduğu durumda mürekkep fazının zamana bağlı değişimi karşılaştırılmıştır.





Şekil 3.20 Model kesit görüntülerinin zamana bağlı mürekkep dağılımı (a) aktive edilmemiş gözenekli bölge sayısal çözüm, (b) aktive edilmiş gözenekli bölge (%16 gözenekli filtre kağıdı) sayısal çözümü.

Şekil 3.20 ‘de görüldüğü üzere filtre kağıdının gözenekliliğinin aktif edilmediği ve aktif edildiği model durumunda mürekkebin kesit görüntülerinde zamanla dağılımı görülmektedir. 0,6.sn incelendiğinde her iki çözüm içinde modelin yaklaşık beşte bir kısmının mürekkep ile dolduğu görülmektedir. Serpantin akış kanalı içerisinde hava fazına ait kabarcıkların başlangıcına rastlanmıştır. 1,6.sn gelindiğinde her iki çözüm içinde D-D kesitinin serpantin akış kanalı üzerinde belirgin bir mavi hava kabarcığının olduğu görülmektedir. Buna karşın kare GDE, akış kanalından gelen mürekkebi filtre kağıdı tarafına başarıyla taşıdığı görülmektedir. 1,6.sn içerisinde daha çok tek bir kabarcık şeklinde görülen hava fazının 2,6.sn içerisinde model içerisine dağılarak sayısının arttığı gözlemlenmektedir. 2,6.sn daha çok mavi renkte hava fazı yerine mürekkep ile karışarak sarı veya yeşil renkte hava-mürekkep kabarcıkları ile karşılaşmaktadır. Bu durumun VOF çözüm yöntemini getirisi olan Taylor akış tipi ile açıklanabilir. Literatürde gaz-sıvı olarak yapılan çok fazlı veya çift fazlı sayısal akış

analizlerinde Taylor tipi akış ile karşılaşıldığı görülmektedir [78]. Bu akış tipinde birinci faz olan hava fazının önce büyük tek bir kabarcık olarak görüldüğü daha sonrasında akışın devamı ile ikinci faz olan mürekkep ile temasıyla hava-mürekkep karışımı olarak daha küçük ve dağılmış şekillerde gözlemlendiği yapılan sayısal çalışmalarda belirtirmiştir [77, 102]. 3,6.sn gelindiğinde modelin mürekkep ile dolduğu ve mürekkebin model çıkışına yöneldiği görülmektedir. Yine en fazla hava-mürekkep karışımının serpentine akış kanalı kesitinde görülmektedir. E-E kesit görüntüsün en üst kısmı model çıkış noktasıdır. Bu nokta üzerinde daha yüksekte kalan filtre kayığının en üst bölgesinde hava-mürekkep kabarcıkları yer almaktadır. Filtre kağıdının en üst bölgesinde hava-mürekkep kabarcıkların 5.sn sonunda da devam ettiği görülmektedir. Bu durum kabarcıkların mikro kanal yapılarında duvar yüzeyine tutunma isteğinin geometrik etkisi olarak açıklanabilir. Ayrıca bu hava-mürekkep kabarcıklarının model çıkış noktasının üstünde görülme nedeni mürekkebin çıkışa doğru hızının artması ve filtre kağıdının üst bölgelerine ulaşmadan model dışına çıkma isteği ile açıklanabilir [75, 78]. Tüm kesit görüntüleri incelendiğinde hava kabarcıkların genellikle serpantin akış kanalı içerisinde oluştuğu ve burada oluşan hava kabarcıkları kare GDE ve filtre kağıdına yönelerek model çıkışına gitmektedir. Bu durum serpentine akış kanalının keskin dönüşlere sahip geometrik yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mevcut imkanlarla deneysel çalışmalarda gözlemlenemeyen kesit görüntülerindeki faz dağılımları sayısal çözümlemenin bir avantajı olarak model üzerinde istenilen bölge ve kesit görüntüsünde incelenebilmiştir. Böylece deneysel sonuçlarda akış kanalı, GDE, filtre kağıdı kesitlerinde nasıl bir faz dağılımı sergilendiği sayısal çözümler yardımıyla görülebilmektedir. Model kesit görüntüleri incelendiğinde gözenekli bölgenin aktif edilerek sadece filtre kağıdının %16 gözenekliliğe sahip olduğu sayısal çözümün deneysel akış görselleştirme deneylerine daha da yakınlığı görülmüştür. Bu sayede sayısal modelleme araçlarının deneysel çalışmalara büyük katkı sağladığı ortaya konulmuştur.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma

Yapılan deneysel ve sayısal analizler sonucunda, PEM elektrolizörlerin anot tarafında kullanılan GDE'in nasıl bir akış dağılımına sahip olduğu incelenmiştir. Önce deneysel basınç değişimi ve akış görselleştirmesi daha sonra sayısal çözümlemelerle basınç dağılımı ve çok fazlı zamana bağlı akış dağılım sonuçları alınmıştır. PEM elektrolizörlerde hücre içerisine giren suyun mümkün oldukça en az basınç kaybı ile hücre çıkışına ulaşması beklenmektedir. Bu yüzden kare, daire, eşkenar üçgen ve eşkenar dörtgen geometrilili GDE yapıları şeffaf test hücresi içerisinde 100 ml/dk, 200 ml/dk ve 300 ml/dk debilerde basınç değişimleri belirlenmiştir. Daha sonrasında akış görselleştirme deneylerinden aynı debi altında farklı GDE yapılarının hücre içi mürekkep dağılımları görüntülenmiştir. Kare delikli GDE yapısı en iyi akış dağılımı ve düşük debilerde en düşük basınç farkına sahip olduğu belirlenmiştir. Deneysel bulguların sayısal çözümlemeler ile doğrulanması için kare GDE ait model çalışması yürütülmüştür. Sayısal çözümlemelerde çok fazlı sayısal akış tercih edilmiştir. Böylece PEM elektrolizörlerde ilk başta hava ile dolu olan hücrenin, akış gönderildiği zaman hava ile gönderilen akışkanın aynı zaman içerisinde fiziksel etkileşimi çok fazlı sayısal akış analizi ile simüle edilmiştir. Deneysel basınç değişim sonuçlarının sayısal çözümlerle karşılaştırılabilmesi için ANSYS yazılımında akışın sürekli olduğu Steady (Sürekli) akış çözüm yöntemi tercih edilmiştir. Deneysellerde basınç değerlerinin ölçüldüğü an akışın sürekli olduğu andır. Steady (Sürekli) çözüm yöntemi tıpkı deneyde olduğu gibi akışkanın sürekli olduğu hali matematiksel olarak hesaplamaktadır. Steady (Sürekli) akış çözüm yöntemi ile akışın sürekli hale ulaştığı an kare GDE'in üzerindeki basınç dağılım sonuçları farklı debilerde alınmış ve deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalardan sonra akış

dağılımının sayısal olarak irdelenmesi için zamana bağlı çok fazlı sayısal çözümler 100 ml/dk, 200 ml/dk ve 300 ml/dk debi çözümlenmiştir. Hem deneysel hem de sayısal mürekkep akış dağılımı zamana bağlı olarak karşılaştırılmıştır.

Bu doğrultuda yapılan GDE'ler için deneysel ve sayısal analizler sonuçlarına göre PEM elektrolizörler için akış dağılımının önemi görülmüştür ve şu sonuçlar elde edilmiştir:

- i. Deneysel basınç değişim sonuçlarında kare, daire, eşkenar üçgen ve eşkenar dörtgen GDE yapıları arasından kare geometriye sahip GDE'in 100 ml/dk debi de 1,506 ΔP ile en az basınç değişimini gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca 200 ml/dk debide 4,27 ΔP yine kare GDE en iyi performansı sergilemesine rağmen 300 ml/dk'da 7,486 ΔP ile eşkenar üçgen GDE diğer geometrilere göre daha az basınç düşüşü gözlemlenmiştir. Kare delikli yapıya sahip geometri 100 ml/dk ve 200 ml/dk'da sırasıyla %38,96 ve %61,46 basınç değişimi ile en iyi performansı sergilemiştir.
- ii. Akış görselleştirme deneylerinde kullanılan mürekkebin hücre içi dağılımı zamana bağlı olarak video görüntüleri ile alınmıştır ve hücre içini en hızlı dolduran GDE geometrisi tespit edilmiştir. 100 ml/dk için kare geometrinin diğer GDE geometrilere göre çok daha yüksek bir performans ile 4,037 saniyede akışı hücre içerisine tamamen dağıtabildiği görülmüştür. 200 ml/dk debi ise kare geometrinin ve eşkenar üçgen geometrilerin hücrenin tamamına mürekkebi yayma süreleri oldukça yakın olmakla beraber, kare GDE eşkenar üçgen geometrilili GDE'ye göre %33 daha hızlı bir şekilde hücre içerisinde mürekkep yayıldığı görülmektedir. Kare geometri GDE 300 ml/dk'luk debi değerinde daire geometriden yaklaşık %17 daha hızlı bir şekilde tüm hücreyi 1,2 saniyede mürekkep ile doldurmuştur.
- iii. Yapılan deneysel sonuç çıktıları incelendiğinde kare GDE' in en iyi performansı sergilediği için sayısal çalışmalar ile doğrulaması yapılmıştır. Çok fazlı Steady (Sürekli) çözüm sonuçları ile elde edilen basınç değişimleri deneysel bulgular ile karşılaştırıldığında, 100 ml/dk ve 200 ml/dk'da hata oranı 0,18 kPa ve 0,74 kPa gibi küçük bir orana sahip olmasına rağmen bu fark 300 ml/dk değerinde 2,17 kPa değerlerine çıkmıştır. Basınç değişimi farkının en yüksek olduğu 300 ml/dk debi deneysel bulgularda ΔP 6.83 % iken, sayısal çözümlerde ΔP 8.84 % değerine çıkmaktadır.

- iv. Deneysel akış görselleştirme deneylerinin sayısal olarak karşılaştırılabilmesi için zamana bağlı çok fazlı akış analizleri alınmıştır. Mürekkebin 25 cm^2 'lik hücre içerisini zamanla nasıl doldurduğu karşılaştırılmıştır. 100 ml/dk debi için hücre içi deneysel sonuçlarında 4,037 saniyede dolduğu gözlemlenirken sayısal sonuçta bu süre 3,6 saniye olarak ölçülmüştür. Deneysel ve sayısal çözüm arasındaki 0,437 saniyelik fark 100 ml/dk debi için sonuçların benzerlik gösterdiğinin bir ölçütü olarak değerlendirilebilir. Hücre içerisine giren debi yükseldikçe sıvı akışı filtre kağıdında homojen dağılmadan, akış kanalı içerisinde hızla ilerlemektedir. 200 ml/dk için deneysel çalışmada 1,5 saniyede mürekkebin filtre kağıdını tamamen doldurduğu, sayısal çözümde ise hava kabarcıklarının olduğu gözlemlenmiştir. Aynı durum 300 ml/dk debi içinde geçerli olmuştur ve 1,2 saniyede dolan hücre içerisinde hava kabarcıklarının olduğu gözlemlenmiştir.
- v. Katalizör katmanını temsile kullanılan filtre kağıdının, FE-SEM görüntüleri alınmıştır ve ImageJ programında görüntü işleme sonucunda %16 gözeneklilik oranına sahip belirlenmiştir. Gözenekli yapıya sahip filtre kağıdı ile kare GDE'in nasıl bir akış dağılımı sergileyeceğini irdelemek için filtre kağıdının gözenekli bölgesinin aktif edildiği çok fazlı zamana bağlı sayısal çözüm yapılmıştır. 100 ml/dk debi için 5. saniye sonunda model ve serpentine akış kanalı üzerinde hava kabarcıkları görülmüştür. Ancak kare GDE kesit görünümü incelendiğinde 391 adet kareden oluşan kare GDE'de sadece 20 adet karede hava fazı görülmektedir ve hemen hemen hepsi modelin çıkışına yakın noktada yer almaktadır. Kare GDE, serpantin akış kanalından gelen akışkanı %94,8 oranında filtre kağıdı tarafına geçirmiştir.

Deneysel basınç sonuçlarında kare delikli yapıya sahip GDE için 100 ml/dk ve 200 ml/dk'da sırasıyla %38,96 ve %61,46 basınç değişimi görülmüştü. Debiyi arttıkça basınç değişim farkı da artmaktadır. Yüksek debi değerleri ile 25 cm^2 yüzey alanına sahip hücre için olması gerekenden fazla akış girişine neden olmaktadır ve bu durumda debinin artışı basınç düşüş farkını doğrudan etkilemektedir. Akış görselleştirme deneylerinde kare GDE, tüm debi değerlerinde diğer geometrilere göre en hızlı sürede hücre içerisini tamamen doldurmuştur. Böylece deneysel basınç ve akış görselleştirme sonuçlarına göre kare GDE sahip PEM elektrolizörlerde akış diğer GDE'lere nazaran birim zamanda daha hızlı şekilde katalizör tabakası ile buluşabilecektir. Ancak deneysel bulgular, sayısal

sonuçlar ile doğrulanmalıdır. Deneysel basınç değişim sonuçları, çok fazlı Steady (Süreklî) çözüm sonuçları ile karşılaştırıldığında kare GDE'e ait basınç düşüş değerinde %20'den daha az basınç kaybı olduğu görülmüştür. Bu sonuç, deneysel basınç bulguları ile sayısal çözüm çıktılarıyla mukayese edildiğinde düşük hata oranıyla benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Zamana bağlı çok fazlı sayısal çözümlerde mürekkep dağılım sonuçları deneysel akış görselleştirme videoları ile kıyaslanmıştır. Test hücresinin içerisindeki ilk saniyeler incelendiğinde 100 ml/dk debi için deneysel ve sayısal çözüm arasında saniye farkı 0,437 saniye olarak bulunmuştur. Ancak, debi miktarı arttıkça hücre içerisindeki dolurma süreleri arasındaki fark artmaktadır ve sayısal çözüm sonuçlarında hava kabarcıklarına rastlanmaktadır. 25 cm² hücre için 100 ml/dk debi en uygun debi değerini olduğu basınç düşüş karşılaştırmasında belirlenmiştir. Mürekkep akış dağılım sürelerinde bir kez daha görülmektedir ki 25 cm² hücre için 100 ml/dk debi de deneysel ve sayısal çözümlerin oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

%16 gözeneklilik oranı hesaplanan filtre kağıdını, sayısal çalışmada simüle etmek için gözeneklilik alanı ANSYS içerisinde aktif edilmiş ve kare GDE model 5 saniyelik çözüme tabi tutulmuştur. Serpentine akış kanalına gelen mürekkep, kare GDE üzerinden dağılım sergilemiş ancak filtre kağıdına ulaştığında %16 gözenekli yapı ile karşılaşmıştır ve akışın rahatlıkla filtre kağıdı üzerinden çıkışa yönelmesine zorluk çıkarmıştır. Kare GDE %94,8 oranında akışı dağıtmasına rağmen filtre kağıdı üzerinde daha fazla hava kabarcıkları kaldığı gözlemlenmiştir. Anot tarafından giren akışkan, akış kanalının ve GDE'in boşluklu yapısından geçerek katalizör tabakasına ulaşır. Ayrıca PEM elektrolizör katalizör tabakasının kendine özgü bir yüzey morfolojisi bulunmaktadır. Bu yüzden PEM elektrolizörler için sayısal akış çözümlemesi çalışmaları yapılacaksa katalizör tabakasının fiziksel özellikleri sayısal model içerisinde tanımlanmalıdır. Bu durum akışı davranışını doğrudan etkileyecektir.

4.2. Sonuç ve Öneriler

Yapılan tez çalışması sonucunda PEM elektrolizör hücresi için kare delikli yapıya sahip GDE'in daha iyi su transferi gerçekleştireceği belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda kare GDE yapısı en düşük basınç düşüş farkını sağlamıştır. Farklı debilerde gerçekleştirilen deneysel ve sayısal akış görselleştirme sonuçlarında 100 ml/dk debini 25 cm² hücre için diğer debilere göre daha iyi akış dağılımı sergilediği görülmüştür. Deneysel akış dağılıma en yakın sayısal çözümleme için filtre kağıdının %16 gözeneklilik oranının sayısal modele tanımlanarak yapılan zamana bağlı çok fazlı akış analizinde kare

GDE'in akışı %94,8 oranında homojen dağıttığı sonucuna varılmıştır. Hücre içerisinde gönderilen suyun iyi transferi, birim zamanda daha çok suyun katalizör tabaka ile homojen buluşacağı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla birim zamanda daha fazla katalizör tabakası ile buluşan su, PEM elektrolizör performansını arttıracaktır. Aynı zamanda anot kısmında oluşan oksijen molekülleri tepkimeye girmeyen su ile daha hızlı hücre dışına aktarılabilir. Oksijen gazı hücre içerisinde korozyona sebep olduğundan dolayı hücre içinden hızla uzaklaştırılması PEM elektrolizör çalışma süresini uzatabilecektir. Kare geometrili desene sahip GDE'in en iyi akış dağılımını sergilemesi sebebiyle tasarlanacak PEM elektrolizörlerde performans artışı sağlanarak daha düşük kütle transferi kaybı ve uzun ömürlü GDE'ler ile sistem ömürleri de uzatılabilir.



KAYNAKÇA

1. Boyano, A., Blanco-Marigorta, A., Morosuk, T., Tsatsaronis, G., 2011. Exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming process for hydrogen production. **Energy**, **36**: (4): 2202-2214.
2. Ayers, K. E., Anderson, E. B., Capuano, C., Carter, B., Dalton, L., Hanlon, G., Manco, J., Niedzwiecki, M., 2010. Research advances towards low cost, high efficiency PEM electrolysis. **ECS transactions**, **33**: (1): 3.
3. Demirel, Y., 2012. Energy: production, conversion, storage, conservation, and coupling. **Springer Science & Business Media**,
4. Gültekin, E., 2019. OECD ülkelerinde yenilenebilir enerji tüketiminin makro ekonomik belirleyicileri ve Türkiye için politika önerisi.
5. Savrul, B., 2016. Enerji ekonomisi: Türkiye'nin enerji sektörü ve alternatif enerji kaynakları. **Çanakkale: Dora Yayınevi**,
6. Sorrell, S., 2015. Reducing energy demand: A review of issues, challenges and approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **47**: 74-82.
7. Zou, C., Zhao, Q., Zhang, G., Xiong, B., 2016. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. **Natural Gas Industry B**, **3**: (1): 1-11.
8. Johansson, T. B., Kelly, H., Reddy, A. K., Williams, R. H., 1993. **Renewable energy: sources for fuels and electricity**.
9. Dudley, B., 2018. BP statistical review of world energy. **BP statistical review, London, UK, accessed Aug, 6**: (2018): 00116.
10. Verheeecke-Vaessen, C., Diez-Gutierrez, L., Renaud, J., Sumarah, M., Medina, A., Magan, N., 2019. Interacting climate change environmental factors effects on *Fusarium langsethiae* growth, expression of TRI genes and T-2/HT-2 mycotoxin production on oat-based media and in stored oats. **Fungal biology**, **123**: (8): 618-624.
11. Çitak, E., Pala, P. B. K., 2016. Yenilenebilir Enerjinin Enerji Güvenliğine Etkisi. **Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi**, (25): 79-102.

12. Dincer, I., 2000. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. **Renewable and sustainable energy reviews**, **4**: (2): 157-175.
13. Karagöl, E. T., Kavaz, İ., 2017. Dünyada ve Türkiye’de yenilenebilir enerji. **Analiz. Seta**, **197**: 18-28.
14. Gençoğlu, M. T., 2002. Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye açısından önemi. **Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, **14**: (2): 57-64.
15. Alkan, A., 2016. Yenilenebilir hibrit enerji kaynakları ile beslenen konutlarda akıllı enerji depolama ve yönetim sistemi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
16. Aksoy, E., Ömürbek, N., KARAATLI, M., 2015. AHP Temelli MULTIMOORA ve COPRAS yöntemi ile Türkiye Kömür İşletmeleri’nin performans değerlendirmesi. **Hacettepe üniversitesi iktisadi ve idari bilimler fakültesi dergisi**, **33**: (4): 1-28.
17. ETKB, T., 2014. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.(2018). **Genel Enerji Denge Tabloları-Mavi Kitap**,
18. TEİAŞ, 2022. TEİAŞ, 20.05.2022, <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>. (Erişim tarihi: 20.05.2022)
19. Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., Rosen, M. A., 2005. On hydrogen and hydrogen energy strategies: I: current status and needs. **Renewable and sustainable energy reviews**, **9**: (3): 255-271.
20. Kaya, M. F., Anot destekli silindirik katı oksit yakıt hücresinin sayısal modellenmesi ve performansının analizi. Fen Bilimleri Enstitüsü,
21. Penner, S., 2006. Steps toward the hydrogen economy. **Energy**, **31**: (1): 33-43.
22. Jacobson, M. Z., Colella, W., Golden, D., 2005. Cleaning the air and improving health with hydrogen fuel-cell vehicles. **Science**, **308**: (5730): 1901-1905.
23. Solomon, B. D., Banerjee, A., 2006. A global survey of hydrogen energy research, development and policy. **Energy policy**, **34**: (7): 781-792.
24. Mata, I., Alkorta, I., Molins, E., Espinosa, E., 2010. Universal Features of the Electron Density Distribution in Hydrogen-Bonding Regions: A Comprehensive Study Involving H... X (X= H, C, N, O, F, S, Cl, π) Interactions. **Chemistry–A European Journal**, **16**: (8): 2442-2452.
25. Bedding, T. R., Mosser, B., Huber, D., Montalbán, J., Beck, P., Christensen-Dalsgaard, J., Elsworth, Y. P., García, R. A., Miglio, A., Stello, D., 2011. Gravity modes as a way to distinguish between hydrogen-and helium-burning red giant stars. **Nature**, **471**: (7340): 608-611.

26. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 21.05.2022, <https://enerji.gov.tr/>. (Erişim tarihi: 21.05.2022)
27. Sharma, S., Ghoshal, S. K., 2015. Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. **Renewable and sustainable energy reviews**, **43**: 1151-1158.
28. KORKMAZ, S. A., CERİT, A. G., 2016. Applications of Fuel Cell Technologies in Ships and A System Dynamics Approach. **PROCEEDINGS BOOK**, 42.
29. Kallender, P., 2004. Hitachi, Toshiba, show portable fuel cells. **PC World, October**, **6**:
30. Hyundai XCIENT Fuel Cell Trucks, Hyundai XCIENT Fuel Cell Trucks, 06.01.2021, <http://trucknbus.hyundai.com/global/en/products/truck/xcient-fuel-cell>. (Erişim tarihi: 06.01.2021)
31. Bensaid, S., Specchia, S., Federici, F., Saracco, G., Specchia, V., 2009. MCFC-based marine APU: Comparison between conventional ATR and cracking coupled with SR integrated inside the stack pressurized vessel. **International journal of hydrogen energy**, **34**: (4): 2026-2042.
32. Crawley, G., 2006. Fuel cell today. **Johnson Metthey Plc**, 4241894:
33. Baker, A., Jollie, D., Adamson, K.-A., 2005. Fuel cell today market survey: portable applications. **Fuel Cell Today**,
34. Geiger, S., Jollie, D., 2004. Fuel cell market survey: Military Applications. **Fuel Cell Today**, **1**:
35. Acar, C., Dincer, I., 2014. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. **International journal of hydrogen energy**, **39**: (1): 1-12.
36. Kumar, S. S., Himabindu, V., 2019. Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review. **Materials Science for Energy Technologies**, **2**: (3): 442-454.
37. Grigoriev, S., Porembsky, V., Fateev, V., 2006. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. **International Journal of Hydrogen Energy**, **31**: (2): 171-175.
38. Ni, M., Leung, M. K., Sumathy, K., Leung, D. Y., 2006. Potential of renewable hydrogen production for energy supply in Hong Kong. **International Journal of Hydrogen Energy**, **31**: (10): 1401-1412.

39. Barelli, L., Bidini, G., Gallorini, F., Servili, S., 2008. Hydrogen production through sorption-enhanced steam methane reforming and membrane technology: a review. **Energy**, **33**: (4): 554-570.
40. Kothari, R., Buddhi, D., Sawhney, R., 2008. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **12**: (2): 553-563.
41. Zhu, J., Zhang, D., King, K., 2001. Reforming of CH₄ by partial oxidation: thermodynamic and kinetic analyses. **Fuel**, **80**: (7): 899-905.
42. Freni, S., Calogero, G., Cavallaro, S., 2000. Hydrogen production from methane through catalytic partial oxidation reactions. **Journal of Power Sources**, **87**: (1-2): 28-38.
43. Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., Stolten, D., 2013. A comprehensive review on PEM water electrolysis. **International journal of hydrogen energy**, **38**: (12): 4901-4934.
44. Marini, S., Salvi, P., Nelli, P., Pesenti, R., Villa, M., Berrettoni, M., Zangari, G., Kiros, Y., 2012. Advanced alkaline water electrolysis. **Electrochimica Acta**, **82**: 384-391.
45. Brisse, A., Schefold, J., Zahid, M., 2008. High temperature water electrolysis in solid oxide cells. **International journal of hydrogen energy**, **33**: (20): 5375-5382.
46. Kaya, M. F., 2021. Modelling of a solid oxide water electrolyzer and investigation of the cell performance on different working conditions. **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, **36**: (4): 2109-2119.
47. Kadier, A., Simayi, Y., Abdeslahian, P., Azman, N. F., Chandrasekhar, K., Kalil, M. S., 2016. A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production. **Alexandria Engineering Journal**, **55**: (1): 427-443.
48. Nikolaidis, P., Poullikkas, A., 2017. A comparative overview of hydrogen production processes. **Renewable and sustainable energy reviews**, **67**: 597-611.
49. Bessarabov, D., Wang, H., Li, H., Zhao, N., 2016. PEM electrolysis for hydrogen production: principles and applications. CRC press,
50. Terezo, A., Pereira, E., 1999. Preparation and characterization of Ti/RuO₂-Nb₂O₅ electrodes obtained by polymeric precursor method. **Electrochimica Acta**, **44**: (25): 4507-4513.

51. Kötzt, R., Stucki, S., 1986. Stabilization of RuO₂ by IrO₂ for anodic oxygen evolution in acid media. **Electrochimica acta**, **31**: (10): 1311-1316.
52. Cheng, J., Zhang, H., Chen, G., Zhang, Y., 2009. Study of Ir_xRu_{1-x}O₂ oxides as anodic electrocatalysts for solid polymer electrolyte water electrolysis. **Electrochimica Acta**, **54**: (26): 6250-6256.
53. Kaya, M. F., Demir, N., Rees, N. V., El-Kharouf, A., 2020. Improving PEM water electrolyser's performance by magnetic field application. **Applied Energy**, **264**: 114721.
54. Hüner, B., Demir, N., Kaya, M. F., 2022. Electrodeposition of NiCu bimetal on 3D printed electrodes for hydrogen evolution reactions in alkaline media. **International Journal of Hydrogen Energy**, **47**: (24): 12136-12146.
55. Lettenmeier, P., Wang, R., Abouatallah, R., Saruhan, B., Freitag, O., Gazdzicki, P., Morawietz, T., Hiesgen, R., Gago, A., Friedrich, K., 2017. Low-cost and durable bipolar plates for proton exchange membrane electrolyzers. **Scientific reports**, **7**: (1): 1-12.
56. Barbir, F., Braun, J., Neutzler, J., 1999. Properties of molded graphite bi-polar plates for PEM fuel cells. **Journal of New Materials for Electrochemical Systems**, **2**: (2): 197-200.
57. Millet, P., Grigoriev, S., Porembskiy, V., 2013. Development and characterisation of a pressurized PEM bi-stack electrolyser. **International journal of energy research**, **37**: (5): 449-456.
58. Lettenmeier, P., Wang, R., Abouatallah, R., Burggraf, F., Gago, A., Friedrich, K., 2016. Coated stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane electrolyzers. **Journal of The Electrochemical Society**, **163**: (11): F3119-F3124.
59. Gago, A. S., Ansar, A. S., Gazdzicki, P., Wagner, N., Arnold, J., Friedrich, K. A., 2014. Low cost bipolar plates for large scale PEM electrolyzers. **ECS Transactions**, **64**: (3): 1039-1048.
60. Grigoriev, S., Millet, P., Volobuev, S., Fateev, V., 2009. Optimization of porous current collectors for PEM water electrolyzers. **International journal of hydrogen energy**, **34**: (11): 4968-4973.
61. Hossain, M. S., Shabani, B., Cheung, C. P., 2017. Enhanced gas flow uniformity across parallel channel cathode flow field of Proton Exchange Membrane fuel cells. **International Journal of Hydrogen Energy**, **42**: (8): 5272-5283.

62. Maharudrayya, S., Jayanti, S., Deshpande, A., 2006. Pressure drop and flow distribution in multiple parallel-channel configurations used in proton-exchange membrane fuel cell stacks. **Journal of power sources**, **157**: (1): 358-367.
63. Lobato, J., Cañizares, P., Rodrigo, M. A., Pinar, F. J., Mena, E., Úbeda, D., 2010. Three-dimensional model of a 50 cm² high temperature PEM fuel cell. Study of the flow channel geometry influence. **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**: (11): 5510-5520.
64. García-Valverde, R., Espinosa, N., Urbina, A., 2012. Simple PEM water electrolyser model and experimental validation. **international journal of hydrogen energy**, **37**: (2): 1927-1938.
65. Kaya, M., Demir, N., 2017. Numerical investigation of PEM water electrolysis performance for different oxygen evolution electrocatalysts. **Fuel Cells**, **17**: (1): 37-47.
66. Lafmejani, S. S., Olesen, A. C., Al Shakhshir, S., Kær, S. K., 2017. Analysing gas-liquid flow in PEM electrolyser micro-channels using a micro-porous ceramic as gas permeable wall. **ECS Transactions**, **80**: (8): 1107-1115.
67. Barreras, F., Lozano, A., Valino, L., Marin, C., Pascau, A., 2005. Flow distribution in a bipolar plate of a proton exchange membrane fuel cell: experiments and numerical simulation studies. **Journal of Power sources**, **144**: (1): 54-66.
68. Medina, P., Santarelli, M., 2010. Analysis of water transport in a high pressure PEM electrolyzer. **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**: (11): 5173-5186.
69. Zhang, Y., Merrill, M. D., Logan, B. E., 2010. The use and optimization of stainless steel mesh cathodes in microbial electrolysis cells. **international journal of hydrogen energy**, **35**: (21): 12020-12028.
70. Manso, A., Marzo, F., Barranco, J., Garikano, X., Mujika, M. G., 2012. Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review. **International journal of hydrogen energy**, **37**: (20): 15256-15287.
71. Han, B., Mo, J., Kang, Z., Yang, G., Barnhill, W., Zhang, F.-Y., 2017. Modeling of two-phase transport in proton exchange membrane electrolyzer cells for hydrogen energy. **International Journal of Hydrogen Energy**, **42**: (7): 4478-4489.
72. Aubras, F., Deseure, J., Kadjo, J.-J., Dedigama, I., Majasan, J., Grondin-Perez, B., Chabriat, J.-P., Brett, D., 2017. Two-dimensional model of low-pressure PEM electrolyser: Two-phase flow regime, electrochemical modelling and

- experimental validation. **International journal of hydrogen energy**, **42**: (42): 26203-26216.
73. Li, Y., Kang, Z., Mo, J., Yang, G., Yu, S., Talley, D. A., Han, B., Zhang, F.-Y., 2018. In-situ investigation of bubble dynamics and two-phase flow in proton exchange membrane electrolyzer cells. **International Journal of Hydrogen Energy**, **43**: (24): 11223-11233.
 74. Shao, N., Gavriilidis, A., Angeli, P., 2009. Flow regimes for adiabatic gas–liquid flow in microchannels. **Chemical Engineering Science**, **64**: (11): 2749-2761.
 75. Cubaud, T., Ulmanella, U., Ho, C.-M., 2006. Two-phase flow in microchannels with surface modifications. **Fluid Dynamics Research**, **38**: (11): 772.
 76. Pohorecki, R., Sobieszuk, P., Kula, K., Moniuk, W., Zieliński, M., Cygański, P., Gawiński, P., 2008. Hydrodynamic regimes of gas–liquid flow in a microreactor channel. **Chemical Engineering Journal**, **135**: S185-S190.
 77. Gupta, R., Fletcher, D. F., Haynes, B. S., 2009. On the CFD modelling of Taylor flow in microchannels. **Chemical Engineering Science**, **64**: (12): 2941-2950.
 78. Lafmejani, S. S., Olesen, A. C., Kær, S. K., 2017. VOF modelling of gas–liquid flow in PEM water electrolysis cell micro-channels. **International journal of hydrogen energy**, **42**: (26): 16333-16344.
 79. Barreras, F., Lozano, A., Valiño, L., Mustata, R., Marín, C., 2008. Fluid dynamics performance of different bipolar plates: Part I. Velocity and pressure fields. **Journal of Power Sources**, **175**: (2): 841-850.
 80. Lozano, A., Valiño, L., Barreras, F., Mustata, R., 2008. Fluid dynamics performance of different bipolar plates: Part II. Flow through the diffusion layer. **Journal of Power Sources**, **179**: (2): 711-722.
 81. Selamet, O., Pasaogullari, U., Spornjak, D., Hussey, D., Jacobson, D., Mat, M., 2013. Two-phase flow in a proton exchange membrane electrolyzer visualized in situ by simultaneous neutron radiography and optical imaging. **international journal of hydrogen energy**, **38**: (14): 5823-5835.
 82. Lafmejani, S. S., Müller, M., Olesen, A. C., Kær, S. K., 2018. Experimental and numerical study of flow in expanded metal plate for water electrolysis applications. **Journal of Power Sources**, **397**: 334-342.
 83. Nie, J., Chen, Y., Cohen, S., Carter, B. D., Boehm, R. F., 2009. Numerical and experimental study of three-dimensional fluid flow in the bipolar plate of a PEM

- electrolysis cell. **International journal of thermal sciences**, **48**: (10): 1914-1922.
84. Nie, J., Chen, Y., 2010. Numerical modeling of three-dimensional two-phase gas–liquid flow in the flow field plate of a PEM electrolysis cell. **international journal of hydrogen energy**, **35**: (8): 3183-3197.
 85. K1st1, M., Uysal, S., Kaya, M. F., 2022. Development of Pt coated SS316 mesh gas diffusion electrodes for a PEM water electrolyzer anode. **Fuel**, **324**: 124775.
 86. Park, S., Popov, B. N., 2009. Effect of cathode GDL characteristics on mass transport in PEM fuel cells. **Fuel**, **88**: (11): 2068-2073.
 87. Kumar, A., Reddy, R. G., 2003. Effect of channel dimensions and shape in the flow-field distributor on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells. **Journal of power sources**, **113**: (1): 11-18.
 88. Liu, H., Li, P., Juarez-Robles, D., Wang, K., Hernandez-Guerrero, A., 2014. Experimental study and comparison of various designs of gas flow fields to PEM fuel cells and cell stack performance. **Frontiers in Energy Research**, **2**: 2.
 89. Li, X., Sabir, I., Park, J., 2007. A flow channel design procedure for PEM fuel cells with effective water removal. **Journal of Power Sources**, **163**: (2): 933-942.
 90. Tartakovsky, A., Meakin, P., 2005. Modeling of surface tension and contact angles with smoothed particle hydrodynamics. **Physical Review E**, **72**: (2): 026301.
 91. Vafaei, S., Wen, D., 2015. Modification of the Young–Laplace equation and prediction of bubble interface in the presence of nanoparticles. **Advances in colloid and interface science**, **225**: 1-15.
 92. Stalder, A. F., Melchior, T., Müller, M., Sage, D., Blu, T., Unser, M., 2010. Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, **364**: (1-3): 72-81.
 93. Hansen, F., Rødsrud, G., 1991. Surface tension by pendant drop: I. A fast standard instrument using computer image analysis. **Journal of colloid and interface science**, **141**: (1): 1-9.
 94. Saladra, D., Kopernik, M., 2016. Qualitative and quantitative interpretation of SEM image using digital image processing. **Journal of microscopy**, **264**: (1): 102-124.
 95. Mazzoli, A., Favoni, O., 2012. Particle size, size distribution and morphological evaluation of airborne dust particles of diverse woods by Scanning Electron Microscopy and image processing program. **Powder Technology**, **225**: 65-71.

96. Ma, Z., Witteman, L., Wrubel, J. A., Bender, G., 2021. A comprehensive modeling method for proton exchange membrane electrolyzer development. **International Journal of Hydrogen Energy**, **46**: (34): 17627-17643.
97. Manninen, M., Taivassalo, V., Kallio, S., 1996. On the mixture model for multiphase flow.
98. Horwitz, J., Mani, A., 2018. Correction scheme for point-particle models applied to a nonlinear drag law in simulations of particle-fluid interaction. **International Journal of Multiphase Flow**, **101**: 74-84.
99. Wei, L., Liao, Z., Dafalla, A. M., Jiang, F., 2022. Performance investigation of proton-exchange membrane fuel cell with dean flow channels. **Energy Technology**, **10**: (3): 2100851.
100. Shen, J., Zeng, L., Liu, Z., Liu, W., 2019. Performance investigation of PEMFC with rectangle blockages in Gas Channel based on field synergy principle. **Heat and Mass Transfer**, **55**: (3): 811-822.
101. Kalinnikov, A., Grigoriev, S., Bessarabov, D., Bouzek, K., 2021. Two-phase mass transfer in porous transport layers of the electrolysis cell based on a polymer electrolyte membrane: Analysis of the limitations. **Electrochimica Acta**, **387**: 138541.
102. Asadolahi, A. N., Gupta, R., Leung, S. S., Fletcher, D. F., Haynes, B. S., 2012. Validation of a CFD model of Taylor flow hydrodynamics and heat transfer. **Chemical Engineering Science**, **69**: (1): 541-552.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Süleyman UYSAL
Uyruğu: Türkiye (T.C.)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Enerji Sistemleri Müh.	
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Enerji Sistemleri Müh.	2019
Lise	Kocahasanlı Anadolu Lisesi, Mersin	2014

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2020-Halen	BATARYASAN Enerji ve Sanayi Ticaret Limited Şirketi	Kurucu Ortak-ARGE Müdürü
2019-Halen	Erciyes Üniversitesi H2FC Hidrojen Enerjisi Araştırma Grubu	120M234 kodlu TÜBİTAK BİDEB-1001 Projesi, Araştırmacı Bursiyer

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Uysal, S., Kaya, M. F., Demir, N., Hüner, B., Özcan, R. U., Erdem, Ö. N., Yılmaz, M., 2021. Investigation of hydrogen production potential from different natural water sources in Turkey. **International Journal of Hydrogen Energy**, **46**: (61): 31097-31107.
2. Kıstı M., Uysal S., Kaya M. F., 2022. Development of Pt Coated SS316 Mesh Gas Diffusion Electrodes for PEM Water Electrolyzers' Anode. **Fuel**, **324**: 124775.
3. Özoğan E., Hüner, B., Süzen, O., Y., Eşiyok, T., Uzgören, İ. N., Kıstı, M., Uysal, S., Selçuklu, S., B., Demir, N., Kaya, M. F., 2022. Effects of Tank Heating on Hydrogen Release from Metal Hydride System in VoltaFCEV Fuel Cell Electric Vehicle. **International Journal of Hydrogen Energy**, (Accepted)
4. Hüner, B., Kıstı, M., Uysal, S., Kaya, M. F., Demir, N., Uzgören, İ. N., Özdoğan, E., Süzen, Y. O., 2022. An Overview of Various Additive Manufacturing Technologies and Materials for Electrochemical Energy Conversion Applications. **Journal of Power Sources**, (Under review)
5. Uysal, S., Kaya, M. F., Experimental and Numerical Investigation of Flow Behavior in Anode Gas Diffusion Electrodes for PEM Water Electrolyzers. **(Will be submitted)**
6. Uysal S., Kaya M. F., 2020. A Cheaper Hydrogen Production Study: Acceleration of The Hydrolysis of NaBH₄ by Different ZnCl₂ Addition. *International Conference on Energy, Environment and Storage of Energy (ICEESEN 2020)* Kayseri, Türkiye, 19- 21 Kasım 2020, ss.1-16.
7. Kıstı M., Uysal S., Kaya M. F., 2021. Development of Cost Effective Anode Gas Diffusion Layers for PEM Water Electrolyzers, *5 th International Conference on alternative Fuels, Energy and Environment (ICAFEE-2021)*. 15–18 October 2021, Kayseri, Turkey
8. Özoğan E., Hüner, B., Süzen, O., Y., Eşiyok, T., Uzgören, İ. N., Kıstı, M., Uysal, S., Selçuklu, S., B., Demir, N., Kaya, M. F., 2021. A Unique Heat Exchanger Design for Most Efficient Hydrogen Release from Metal Hydride Hydrogen Storage Tank for VoltaCARH₂ Hydrogen Electric Vehicle. *5 th International Conference on*

alternative Fuels, Energy and Environment (ICAFEE-2021), 15–18 October 2021, Kayseri, Turkey.

9.Özoğan E., Tuncay E., Uzgören, İ. N., Kıstı M., Uysal S. Hüner B., Kayataş Demir N., Kaya M. F., 2021. Automatic PEM Water Electrolyzer Control Systems (PEMECS) Design for Cell Testing. *5 th International Hydrogen Technologies Congress*, 26–28 May 2021, Niğde, Turkey.

10.Kıstı M., Uysal S. Özoğan E., Kaya M. F., 2022. Development of Pt-Cr Coated SS316L Electrodes for PEM Electrolyzers by Selective Laser Melting Method. *23rd World Hydrogen Energy Conference (WHEC-2022)*, 29–30 June 2022, İstanbul, Turkey.