



**YEŞİL HİDROJEN ÜRETİMİ İÇİN MODEL BİR ELEKTROLİZÖRÜN
HAD ANALİZİ**

Baran TAŞĞIN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Baran TAŞĞIN

18/01/2023

YEŞİL HİDROJEN ÜRETİMİ İÇİN MODEL BİR ELEKTROLİZÖRÜN HAD ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Baran TAŞĞIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Sıfır emisyon hedefi koymuş medeniyetimiz için karbon temelli enerji kaynaklarından, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiş günümüzde araştırılan ve uygulanma yolları aranan en büyük konulardan biridir. Hidrojen bu konuda en büyük potansiyel ve en önemli alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Hidrojen elde etmenin yöntemlerinden biri olan PEM elektrolizörlerin verimliliği ise bu konuda büyük bir öneme sahiptir. Elektrolizörden hidrojen üretiminde elektrolizör verimi ne kadar artarsa hidrojenin karbon temelli kaynaklara olan tercih edilebilirliği de o kadar artar. Bu tez çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi ile bir PEM elektrolizör hücresinin belli parametreler aracılığı ile performansı üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Oluşturulan hücre geometrileri COMSOL Multiphysics yazılımı ile farklı parametreleri değiştirilerek sonuçlar grafikler ve yazılı bir biçimde ifade edilmiştir. Oluşturulan PEM elektrolizör geometrisinin sabit bir debi girişinde, kanal sayısı ve kanal uzunluğu değiştirilerek birim hidrojen üretimi değerleri gözlemlenmiştir. Kanal sayısının artırılması hücrenin birim alanda üretilen hidrojen miktarını düşürürken manifolddaki basınç dağılımını daha düzgün hale getirir. Kanal boyundaki kısalma ise hücrenin birim alanda üretilen hidrojen miktarında artışa sebep olur. Yapılan simülasyonlar göstermiştir ki 23 kanallı hücrenin tam boy kanal uzunluğuna sahip modeline bakıldığında, birim hidrojen üretim miktarı $0,13 \text{ g/(m}^2\text{s)}$ iken, kanal boyu yarıya indirildiğinde bu değer %92,31 artarak $0,25 \text{ g/(m}^2\text{s)}$ 'ye, kanal boyu üçte birine indirildiğinde ise bu değer %188,46 artarak $0,375 \text{ g/(m}^2\text{s)}$ 'e yükselmiştir. 23 kanallı hücrenin tam boy kanal uzunluğuna sahip modeline bakıldığında, birim hidrojen üretim miktarı $0,13 \text{ g/(m}^2\text{s)}$ iken, 10 kanallı hücrenin tam boy kanal uzunluğuna sahip modeline bakıldığında, birim hidrojen üretim miktarı %123,8 artarak $0,29 \text{ g/(m}^2\text{s)}$ olmuştur.

Bilim Kodu : 92807

Anahtar Kelimeler : Hidrojen Üretimi, HAD, PEM, elektrolizör, yeşil hidrojen

Sayfa Adedi : 109

Danışman : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

CFD ANALYSIS OF A MODEL ELECTROLYZER FOR GREEN HYDROGEN PRODUCTION

(M. Sc. Thesis)

Baran TAŞĞIN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

The transition from carbon-based energy sources to clean and sustainable energy sources for our civilization, which has set a zero emission target, is one of the biggest consumption researches and applications sought today. Hydrogen is the biggest potential and most important alternative in this regard, with restriction provisions. The efficiency of PEM electrolyzers, which is one of the methods of obtaining hydrogen, has a great importance in this regard. The higher the efficiency of the electrolyzer in the production of hydrogen from the electrolyzer, the more preferable hydrogen to carbon-based sources. In this thesis, research has been carried out on the performance of a PEM electrolyzer cell with the finite element method through certain parameters. The created cell geometries were changed with the COMSOL Multiphysics software, and the results were expressed in graphics and written form. Unit hydrogen production values were observed by changing the channel number and channel length at a constant flow inlet of the created PEM electrolyzer geometry. Increasing the number of channels reduces the amount of hydrogen produced per unit area of the cell and makes the pressure distribution in the manifold more uniform. The shortening of the channel length causes an increase in the amount of hydrogen produced per unit area of the cell. The simulations showed that when the full-length channel length model of the 23-channel cell is considered, the unit hydrogen production amount is $0.13 \text{ g/(m}^2\text{s)}$, when the channel length is halved, this value increases by 92.31% to $0.25 \text{ g/(m}^2\text{s)}$, and when the channel length is reduced to one-third, this value increases to $0.375 \text{ g/(m}^2\text{s)}$ with an increase of 188.46%. Looking at the full-length channel length model of the 23-channel cell, the unit hydrogen production amount was $0.13 \text{ g/(m}^2\text{s)}$, while looking at the full-length channel length model of the 10-channel cell, the unit hydrogen production amount increased by 123.8% and became $0.29 \text{ g/(m}^2\text{s)}$.

Science Code : 92807

Key Words : Hydrogen generation, CFD, PEM, electrolyzer, green hydrogen

Page Number : 109

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tamamlanması sürecinde bilgi, tecrübe ve nezaketi ile çalışmalarına yön veren, hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a en samimi dileklerimi sunuyorum. Ayrıca bu çalışmamda her türlü desteği benden esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Onur Zühtü PEHLİVANLI'ya teşekkürü borç bilirim. Çalışmamda kullandığım yazılım ve kaynaklarını benden esirgemeyen 'Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat VEZİROĞLU Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne teşekkür ederim. Bu günlere gelmemde benden hiçbir desteği ve sevgiyi esirgemeyen babam Halil TAŞĞIN ve annem Saniye TAŞĞIN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. TEORİK BİLGİLER	9
3.1. Hidrojen Nedir ?.....	9
3.2. Hidrojen Elde Etme Yöntemleri.....	11
3.2.1. Elektroliz yöntemi	11
3.2.2. Termoliz yöntemi	12
3.2.3. Kimyasal yöntemler	12
3.2.4. Termokimyasal yöntemler	13
3.3. Renk Kodlarına Göre Hidrojen Çeşitleri.....	17
3.3.1. Gri hidrojen	18
3.3.2. Mavi hidrojen	18
3.3.3. Turkuvaz hidrojen	19
3.3.4. Sarı hidrojen	19
3.3.5. Yeşil hidrojen.....	19
3.4. Türkiye'de ve Dünya'da Yeşil Hidrojen Çalışmaları.....	23
3.5. Elektrolizör Çeşitleri	28
3.5.1. Alkalın elektrolizör	28

	Sayfa
3.5.2. SOEC (Katı oksit elektroliz hücresi) elektrolizör	30
3.5.3. PEM (Proton değişim membran) elektrolizör	30
4. SAYISAL MODELLEME	37
4.1. Süreklilik Denklemi	38
4.2. Momentum Denklemi	38
4.3. Karışım Hızı Denklemi	38
4.4. Kütle Ortalamalı Hız Denklemi	39
4.5. Karışımın Yoğunluk ve Viskozite Denklemi	39
4.6. Dağınık Faz Kütle Oranı Denklemi	39
4.7. Sürüklenme Kuvveti Denklemi	40
4.8. Dağınık Faz Hali İçin Taşıma Denklemi	40
5. MATERYAL VE METOT	41
5.1. PEM Elektrolizör Hücresi Geometrisinin Oluşturulması	42
5.2. PEM Elektrolizör Hücresinin Ağ Yapısının (MESH) Oluşturulması	47
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	51
6.1. 23 Kanallı PEM Elektrolizör Hücresinin Analizi	53
6.1.1.23 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin hız analizi	53
6.1.2.23 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin gaz hacim fraksiyonu analizi...	58
6.1.3.23 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin basınç analizi	61
6.2. 10 Kanallı PEM Elektrolizör Hücresinin Analizi	64
6.2.1.10 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin hız analizi	64
6.2.2.10 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin gaz hacim fraksiyonu analizi...	69
6.2.3.10 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin basınç analizi	722
6.3. 5 Kanallı PEM Elektrolizör Hücresinin Analizi	75
6.3.1. 5 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin hız analizi	75

Sayfa

6.3.2. 5 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin gaz hacim fraksiyonu analizi....	80
6.3.3. 5 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin basınç analizi	833
6.4. 3 Kanallı PEM Elektrolizör Hücresinin Analizi	86
6.4.1. 3 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin hız analizi	86
6.4.2. 3 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin gaz hacim fraksiyonu analizi....	91
6.4.3. 3 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin basınç analizi	94
6.5. Tartışma.....	97
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR.....	105
ÖZGEÇMİŞ.....	109

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1. 1. Türkiye sektörlerine göre fosil CO ₂ emisyonu	4
Çizelge 3. 1. Kullanılan yakıt çeşitleri ve kalori değerleri	10
Çizelge 3. 2. Sıcaklık ile termoliz ayrışma oranı ilişkisi	12
Çizelge 3. 3. Kömürün gazlaştırılmasında temel reaksiyonlar	14
Çizelge 3. 4. Kısmi oksidasyonda elde edilen gaz bileşimleri ve oranları	16
Çizelge 3. 5. Hidrojen üretim metotlarının karşılaştırılması.....	17
Çizelge 3. 6. Planlanmış ve üzerinde çalışılan projeler	25
Çizelge 3. 7. Farklı hidrojen-doğal gaz karışımlarının termofiziksel özellikleri	27
Çizelge 5. 1. Model Parametreleri	42
Çizelge 5. 2. 3 ve 5 kanallı PEM hücrelerinin farklı kanal uzunluklarına göre mesh istatistikleri	48
Çizelge 5. 3. 10 ve 23 kanallı PEM hücrelerinin farklı uzunluklara göre mesh istatistikleri	48
Çizelge 6. 1. Çözülen tüm modellerin çözüm süreleri.....	52
Çizelge 6. 2. Birim alanda üretilen hidrojen (kg/(m ² *s)).....	64
Çizelge 6. 3. Birim alanda tüketilen su (kg/(m ² *s)).....	64
Çizelge 6. 4. Birim alanda üretilen hidrojen (kg/(m ² *s)).....	75
Çizelge 6. 5. Birim alanda tüketilen su (kg/(m ² *s)).....	75
Çizelge 6. 6. Birim alanda üretilen hidrojen (kg/(m ² *s)).....	86
Çizelge 6. 7. Birim alanda tüketilen su (kg/(m ² *s)).....	86
Çizelge 6. 8. Birim alanda üretilen hidrojen (kg/(m ² *s)).....	97
Çizelge 6. 9. Birim alanda tüketilen su (kg/(m ² *s)).....	97

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1. 1. Fosil yakıt yakılmasından ve atmosferik konsantrasyonlardan kaynaklanan dünya karbondioksit (CO ₂) emisyonları CO ₂ (1751-2020).....	2
Şekil 1. 2. Türkiye sektörlerine göre fosil CO ₂ emisyonu	3
Şekil 3. 1. Hidrojen üretim yöntemleri ve verileri	13
Şekil 3. 2. Yeşil hidrojen politikası önceliği	21
Şekil 3. 3. Global olarak Hidrojen maliyeti ve maliyet tahminleri	23
Şekil 3. 4. Laboratuvar Şeması	27
Şekil 3. 5. Bir alkalın elektroliz hücresinin çalışma prensibi	29
Şekil 3. 6. Katı oksit elektroliz hücresi çalışma prensibi	30
Şekil 3. 7. PEM Elektrolizör hücresi çalışma prensibi	31
Şekil 3. 8. PEM Elektrolizörün polarizasyon eğrisi.....	32
Şekil 5. 1. 23 Kanallı PEM elektrolizör hücresinin üç boyutlu genel görünümü	423
Şekil 5. 2. Sırasıyla 23-10-5-3 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin üç boyutlu genel görünümleri	44
Şekil 5. 3. Adım Fonksiyonu	45
Şekil 5. 4. Rampa Fonksiyonu	46
Şekil 5. 5. Mesh Örgüsü.....	48
Şekil 6. 1. Üç boyutlu kesim çizgisinin 3 boyutlu görüntüsü	52
Şekil 6. 2. Üç boyutlu kesim çizgisinin i xy eksenı boyunca görüntüsü	53
Şekil 6. 3. 23 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı	54
Şekil 6. 4. 23 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kayma alan hızı.....	54
Şekil 6. 5. 23 kanallı L _{ch} , L _{ch} /2, L _{ch} _3 kanal boyu elektrolizör hücresi kütle ortalamalı alan hızları	55

Şekil	Sayfa
Şekil 6. 6. 23 kanallı L_ch, L_ch/2, L_ch_3 kanal boylu elektrolizör hücresi kayma alan hızları	56
Şekil 6. 7. 23 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları	57
Şekil 6. 8. 23 kanallı tam kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları.....	59
Şekil 6. 9. 23 kanallı L_ch/2 ve L_ch/3 kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları.....	60
Şekil 6. 10. 23 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları	62
Şekil 6. 11. Simülasyon sonunda hücrede oluşan basınç dağılımı	63
Şekil 6. 12. L_ch/3 kanal uzunluğuna sahip hücrenin 1-1.5 sn arası basınç dağılımı	63
Şekil 6. 13. 10 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı	65
Şekil 6. 14. 10 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı.....	65
Şekil 6. 15. 10 kanallı L_ch, L_ch/2, L_ch_3 kanal boylu elektrolizör hücresi kütle ortalamalı alan hızları.....	66
Şekil 6. 16. 10 kanallı L_ch, L_ch/2, L_ch_3 kanal boylu elektrolizör hücresi kayma alan hızları.....	67
Şekil 6. 17. 10 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları	68
Şekil 6. 18. 10 kanallı tam kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları.....	70
Şekil 6. 19. 10 kanallı L_ch/2 ve L_ch/3 kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları.....	71
Şekil 6. 20. 10 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları	73
Şekil 6. 21. Simülasyon sonunda hücrede oluşan basınç dağılımı	74
Şekil 6. 22. L_ch/3 kanal uzunluğuna sahip hücrenin 1-1.5 sn arası basınç dağılımı	74
Şekil 6. 23. 5 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı	76
Şekil 6. 24. 5 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı	76

Şekil	Sayfa
Şekil 6. 25. 5 kanallı L_ch, L_ch/2, L_ch_3 kanal boylu elektrolizör hücresi kütle ortalamalı alan hızları	77
Şekil 6. 26. 5 kanallı L_ch, L_ch/2, L_ch_3 kanal boylu elektrolizör hücresi kayma alan hızları.....	78
Şekil 6. 27. 5 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları	79
Şekil 6. 28. 5 kanallı tam kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları	81
Şekil 6. 29. 5 kanallı L_ch/2 ve L_ch/3 kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları	82
Şekil 6. 30. 5 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları .	84
Şekil 6. 31. Simülasyon sonunda hücrede oluşan basınç dağılımı	85
Şekil 6. 32. L_ch/3 kanal uzunluğuna sahip hücrenin 1-1.5 sn arası basınç dağılımı	85
Şekil 6. 33. 3 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı.....	87
Şekil 6. 34. 3 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı.....	87
Şekil 6. 35. 3 kanallı L_ch, L_ch/2, L_ch_3 kanal boylu elektrolizör hücresi kütle ortalamalı alan hızları.....	88
Şekil 6. 36. 3 kanallı L_ch, L_ch/2, L_ch_3 kanal boylu elektrolizör hücresi kayma alan hızları	89
Şekil 6. 37. 3 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları	90
Şekil 6. 38. 3 kanallı tam kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları	92
Şekil 6. 39. 3 kanallı L_ch/2 ve L_ch/3 kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları	93
Şekil 6. 40. 5 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları .	95
Şekil 6. 41. Simülasyon sonunda hücrede oluşan basınç dağılımı	96
Şekil 6. 42. L_ch/3 kanal uzunluğuna sahip hücrenin 1-1.5 sn arası basınç dağılımı	96

Şekil	Sayfa
Şekil 7. 1. Tepkime Başlangıcında Hücrelerin İlk-Orta-Son Kanallarındaki Basınç Değerleri	101
Şekil 7. 2. Hücrelerin kanal sayıları ve kanal uzunluklarına göre birim hidrojen üretim değerleri	103
Şekil 7. 3. Hücrelerin kanal sayıları ve kanal uzunluklarına göre birim su tüketim değerleri	103

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
μ	Viskozite
deg	Derece
m	Metre
m/s	Hız
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
mL/dk	Akış Debisi
mm	Milimetre
V	Potansiyel Fark

Kısaltmalar	Açıklamalar
CFD	Computational Fluid Dynamics
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
KOH	Potasyum Hidroksit
NaCl	Sodyum Klorür
NaOH	Sodyum Hidroksit
PEM	Proton Elektroliz Membran
SOEC	Katı Oksit Elektroliz Hücresi

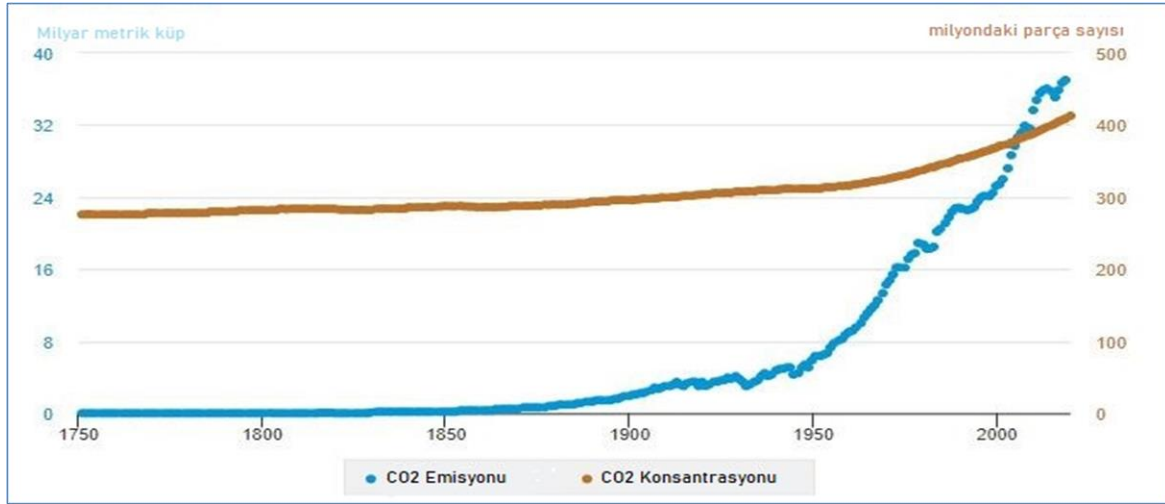
1. GİRİŞ

İnsanlar tarihleri boyunca enerjiyi hayatlarını kolaylaştıracak doğrultusunda kullanmaya çalışmışlardır. Ateşin icadından sanayi devrimine kadar kullanılan enerji kaynağı da uygulama şekli de medeniyetlerinin seviyesi doğrultusunda değişmiş ve gelişmiştir. Sanayi devrimi ve buhar makinesinin keşfedilmesinden bu zamana kadar enerji ve enerji kaynaklı sistemler yaşamımızın temelini oluştururlar. Teknolojik gelişmeler ile enerji tüketimi birbirlerini desteklemiş ve sürekli bir evrime sebep olmuş, enerjiden yoksun her dönemin dayanılmaz bir hal almasına neden olmuştur. Günümüz medeniyetinde hayatımızın merkezinde olan olmazsa olmazımız elektrik enerjisini elde etmede kullandığımız kaynaklar temel olarak benzin, mazot gibi karbon temelli yakıtlardır.

Günümüzde lüks olarak görülmeyen, hayatımızın devamı için ihtiyacımızın olduğu teknolojiye alışmış bir dünya olarak enerji kaynaklarının sağlanması çok önemli bir husustur. Geçen yüzyılın son çeyreğinden itibaren dünyada enerji paylaşımı, enerji kaynaklarının paylaşımı yüzünden birçok çatışma çıkmıştır ve bu çatışmalar devam edecektir.

Medeniyetimizin tarih boyunca odun, kömür, petrol, ve doğalgazdan, karbon içermeyen bir yakıt olan hidrojene doğru yönelen enerji kaynağı arayışının temelinde bir sebep vardır. Bu sebep günümüzde C/H oranının yüksek olduğu yakıtların kullanımının, çevreye ve yaşam alanlarına olan zararların çok yüksek olmasının bilinmesi ve bunun önlenmeye çalışılmasıdır.

Sanayileşme sebebiyle oluşan sera gazı emisyonları 19. yüzyılın ikinci çeyreğinde büyük artış göstermiştir. Bu artış sera gazı emisyonlarının, karbon kaynaklı yakıtların kullanılmasından dolayı oluşan atmosferdeki karbondioksittir (CO₂). Atmosferde bulunan CO₂ miktarı, karbon döngüsü içerisinde birçok doğal etmen tarafından absorbe edilmektedir. Bu doğal etmenler, her yıl salınan CO₂ emisyonlarını absorbe etse de yaklaşık 1950'den itibaren salınan CO₂ emisyonları bu doğal etmenlerin tolere edilme kapasitesini aşmaya başlamıştır. Bu sebeple 1950'den bu yana atmosferdeki sera gazlarının miktarında sürekli bir artışa neden olmuştur.



Şekil 1. 1. Fosil yakıt yakılmasından ve atmosferik konsantrasyonlardan kaynaklanan dünya karbondioksit (CO₂) emisyonları CO₂ (1751-2020) [1]

Sürekli artmakta olan emisyon değerlerine göre dünyamızın bir dönüm noktasına geldiği açıktır. Eğer sera gazlarının atmosferdeki miktarının artışı konusunda kararlı tedbirler alınmaz ise, emisyon oranlarının sebep olacağı çevre felaketleri ile karşılaşmamız kaçınılmazdır. Sera gazlarındaki oran arttıkça Dünya'nın ortalama sıcaklığının artması ve bu durumun büyük bir iklim sorununa sebep olduğu ve olacağı inkar edemeyeceğimiz bir gerçektir. Sıcaklıkların her sene yükselmesi buzulların her geçen yıl artan bir hızla erimesine sebep olmaktadır. Artan buzulların erimesi de öte yandan iklim değişikliğini hızlandırmaktadır. Birbirini destekleyen bu döngüden kurtulabilmenin en önemli yolu ise hemen emisyon değerlerini düşürecek tedbirlerin alınmasıdır. 1880'den günümüze kadar global ortalama sıcaklıklar 10 °C'den fazla yükseldi ve bu yükselişin çoğu son 50 senede gerçekleşmiştir. Bu olumsuz gidişat maalesef doğanın ayak uyduramayacağı yüksek bir hızda meydana gelmektedir. Artmaya devam eden sera gazı sebepli sıcaklıkların neden olduğu hava olayları da şiddetini her geçen yıl artırmaktadır. Bu yüzden daha önce rastlamadığımız şiddette doğa olayları oluşmakta, her geçen sene can ve mal kaybı artmaktadır.

Karbon emisyonlarının ana sebepleri içerisinde kontrolsüz ve tedbirsiz sanayileşme, sürekli artan enerji talepleri, yoğun hayvancılık faaliyetleri, diğer ulaşım faaliyetleri, plansız ve hızla büyüyen şehirleşme, azalan ormanlık alanlar, kontrol edilemeyen sera gazı salınımları sayılabilir. 2021'deki CO₂ emisyonlarına ait son bilgiler, global olarak Covid-19'dan oldukça şiddetli bir şekilde etkilenen 2020'ye göre emisyonlarda tekrardan bir artış olduğu söylenebilir. 2021'deki CO₂ emisyonları 2020'ye göre %5.3 oranında yükselmiştir. 21. yüzyılın ilk çeyreğinden günümüze kadar CO₂ emisyonları, esasen Çin, Hindistan ve diğer

gelişmekte olan ülkelerin fosil yakıt kaynaklı CO₂ emisyonlarındaki artış nedeniyle önceki otuz yıla kıyasla istikrarlı bir şekilde arttı. COVID-19 krizi, 2020'nin ilk yarısında küresel ekonomiyi yavaşlatarak CO₂ emisyonlarındaki küresel büyümede kesintiye neden oldu ve ardından 2021'de bir toparlanma yaşandı. EDGAR (The Emissions Database for Global Atmospheric Research)'ın verileri, küresel antropojenik fosil CO₂ emisyonlarının arttığını gösteriyor. [2]

Türkiye’de ise karbon kaynaklı sera gazı salınımı istatistiklerine bakıldığında, CO₂ eşdeğer paylarının en büyüğü olan %70,2 ile enerji kaynaklı emisyonlar yer almaktadır. Enerjiden sonra en büyük pay %14 ile tarım, %12,7 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı ve %3,1 ile atık sektörü almaktadır. [3]

Türkiye’nin CO₂ emisyon istatistiklerine bakmaya devam edilirse enerji kaynaklı emisyonlar 2021 yılında 1990’a göre %319 artmış, 2005 yılına göre %90 artmış, 2020’ye göre ise %6 artmış. Diğer bir kalem olan endüstriyel tesisler yüzünden kaynaklı CO₂ salınımı ise 2021 yılında 1990’a göre %139, 2005 yılına göre %49, 2020 Yılına göre ise %11 artmıştır. Yapı kaynaklı CO₂ emisyonlar 2021 yılında 1990’a göre %170, 2005 yılına göre %81, 2020 yılına göre ise %15 artmıştır. Ulaştırma kaynaklı CO₂ salınımı 2021 yılında 1990’a göre %178, 2005 yılına göre %109, 2020 yılına göre ise %3 artmıştır. Bunların dışında diğer sektörler kaynaklı karbon salınımında 2021 yılı 1990’a göre %182, 2005’e göre %113, 2020 yılına göre ise %6 artmıştır. [2]

	2021 - 1990	2021 - 2005	2021 - 2020
 Enerji Endüstrisi	↗ +319%	↗ +90%	↗ +6%
 Diğer Endüstriyel Yanma Prosesleri	↗ +139%	↗ +49%	↗ +11%
 Binalar	↗ +170%	↗ +81%	↗ +15%
 Ulaştırma	↗ +178%	↗ +109%	→ +3%
 Diğer Sektörler	↗ +182%	↗ +113%	↗ +6%
 Tüm Sektörler	↗ +199%	↗ +84%	↗ +8%

Şekil 1. 2. Türkiye sektörlerine göre fosil CO₂ emisyonu [2]

Çizelge 1. 1. Türkiye sektörlerine göre fosil CO₂ emisyonu [2]

Yıl	CO ₂ emisyon Mt CO ₂ /yıl	Kişi Başına CO ₂ emisyon Mt CO ₂ /yıl	GSYİH'a göre CO ₂ emisyon Mt CO ₂ /kUSD/yıl	Nüfus (Milyon)
2021	449.725	5321	0.169	84.51
2020	416.514	4968	0.174	83.83
2005	244.745	3604	0.197	67.9
1990	150.428	2790	0.221	53.9

Bütün bu istatistikler bize gösteriyor ki zararlı emisyonların miktarındaki düşüş ve fosil yakıtlara olan mecburiyetin azaltılması için temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçmek dünya için için tartışmaya kapalı bir zaruriyettir. Fosil yakıtların yerine geçebilecek alternatif yakıtlar, daha düşük emisyon üretimleri ve sürdürülebilirlik açısından daha güvenilir olmalıdır. Hidrojen oldukça temiz bir enerji çözümü olmakla birlikte, Dünya'nın ilgisini hızla artırdığı ve bu ilginin akademik alanda da giderek artmakta olduğu bir konudur. Hidrojen üretiminde kullanılan PEM elektrolizörler, alkali elektrolizörlerle birlikte günümüzde kullanılan en gelişmiş ve ticari olarak da en fazla kullanılan elektrolizör çeşitleridir. Alkali elektrolizörlerin kurulum maliyeti çok düşükken PEM elektrolizörler ise çok daha ufak ayak izine sahiplerdir. Bunlarla beraber hidrojen üretim maliyetini düşürmek, hidrojenin diğer yakıtlar ile mücadele edebilmesi için oldukça önemlidir. Bu yüzden literatürde hidrojen üretim yöntemleri ile alakalı birçok çalışma yapılmış olup bu çalışmalar artarak devam etmektedir.

Tezin Amacı

Bu çalışmada karbon temelli enerji kaynaklarına göre üretim ve taşıma maliyeti daha fazla olan hidrojenin üretiminde kullanılan bir PEM elektrolizör hücresinin bilgisayar ortamında modeli oluşturulmuş ve bu modelin COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak incelemesi yapılmıştır. Bu incelemede belli tasarım parametreleri değiştirilerek sabit su debisinde ve sabit hidrojen üretim hızında, hücrenin birim başına hidrojen üretimi, birim başına su tüketimi, manifoldlarda oluşan basınç dağılımları, manifoldlarda ve elektroliz bölgelerinde oluşan kütle ortalama hız grafikleri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda hücrenin kanal sayısı ve kanal uzunluklarının sonucunda oluşan değerler birbirleriyle kıyaslanmış ve PEM hücresi tasarımında bu etmenlerin etkisini literatüre kazandırmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

PEM hücreli elektrolizörler üzerine yapılan çalışmalar, hücrelerin verimliliğiyle beraber elde edilen hidrojenin birim maliyetini düşürmeyi amaçlamaktadır. Böylece hidrojenin diğer yakıtlara göre dezavantaj sayılan birim maliyet makasının kapanması ve daha tercih edilebilir noktaya gelmesinin önü açılmaktadır.

Nie ve Chen, bir PEM elektroliz hücresinin üç boyutlu ve iki fazlı su/oksijen akışı için farklı oksijen üretim hızlarında, sabit bir su debisinde HAD simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Tek fazlı akış durumundan yola çıkılarak, buradan elde ettikleri verilerle, iki fazlı akışın doğrusal olarak tahmin edilemeyeceğini öngörmüşlerdir. Aynı zamanda elektroliz sonucu ortaya çıkan oksijenin kütle akış hızının arttığı yerlerde elektroliz kanalları boyunca tersine akış gözlemlemişlerdir. [4]

Zeng, Barnoon ve diğerleri, bir manifold elektrolizörde oksijen üretimini HAD modeli oluşturarak gözlemlemişlerdir. Farklı oksijen üretim hızlarının artırılması ve sistemdeki basınç düşüşlerinin azaltılmasını farklı kanal sayılarıyla kontrol edilebildiğini göstermişlerdir. [5]

Jiao ve diğerleri, bir PEM elektrolizör hücresinin 3 boyutlu, çok fazlı modelini oluşturup incelemişlerdir. Bu model üç farklı akım değeri ile simüle edilmiş ve deneysel test sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Yüksek akım koşullarında gerçekleştirilen simülasyondaki polarizasyon eğrilerinin deneysel test sonuçlarından sapma yaptığı gözlemlenmiştir. [6]

Tijana ve diğerleri, bilgisayar ortamında oluşturdukları akış plakasını basınç gradyanlarını değerlendirmek amacıyla simüle ettiler. Simülasyon sonuçlarında basınç gradyanlarının keskinlikleri ve düzgünlükleri plakalının tasarımına göre değiştiğini ve hız alanlarının da basınç eğrileriyle pozitif korelasyonda hareket ettiğini gözlemlediler. [7]

Alvares-Gallegos ve diğerleri, ANSYS-FLUENT kullanarak bir laboratuvar elektrolizörünün hız profillerinin simülasyonunu gerçekleştirdiler. Çözümde Navier-Stokes denklemlerini kullanarak, elektrot kenarları 7 bölüme ayrılmış, kanalların derinliği ise 3 düzleme bölünmüştür. Simülasyon sonucunda oluşan akışın kanalın hem girişinde hem de çıkışında manifolddan güçlü bir şekilde etkilendiğini gözlemlemişlerdir. [8]

Lim ve diğerkleri, bir PEM hücreli elektrolizörün üç boyutlu HAD simülasyonunu oluşturarak farklı koşullar altında performans değerkendirilmesini yapmışlardır. Model sonuçları ile kurum içi deney sonuçlarının uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Değişken hücre voltajlarında HAD analizi sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçları arasında bir uyum olduğunu gözlemlemişlerdir. [9]

Deseure ve diğerkleri, düşük basınçta anot tarafında iki fazlı akışın hücrenin verimi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. İçeriğinde yük dengesi hesabı, ısı ve kütle transferi, elektrokimyasal reaksiyon olan bir PEMWE (Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolyser) modeli geliştirmişleridir. Birleştirilen fenomenin kütle transferinin iyileştirilmesi, ohmik dirençte bir azalmaya neden olması ve PEMWE verimliliğinde bir artış gözlemlemişlerdir. [10]

Khouya, farklı bileşenlerden oluşan yenilenebilir sistem tarafından desteklenen bir PEM hücresinin hidrojen üretimini gözlemlemiştir. Çalışmasının sonucunda PEM hücreğine destek olan güneş enerji sistem tesisatı üç kat büyük olduğunda, PEM tarafından üretilen hidrojen performansının optimal olduğunu gözlemlemişlerdir. [11]

Wilberforce ve diğerkleri, OPCF (Open Pore Cellular Foam) malzemesinin üç farklı geometride PEM hücrelerinde kullanılıp kullanılmayacağını araştırmışlardır. FLUENT kullanarak üç boyutlu modeller oluşturulmuş ve HAD analizleri yapılmıştır. Simülasyon sonucunda OPCF kanallı elektrolizörün performansının örgü kanallılara göre %150 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. [12]

Moon, Lim ve diğerkleri, bir PEM hücresinin anot akış alanını, hesaplamalı akışkanlar dinamiğı (HAD) kullanarak tasarım yönünden incelemişlerdir. Araştırmada inlet sayısının artırılması ile basınç düşüşünün azaldığını ve akış profillerinin de gruplanabileceğini göstermişlerdir. [13]

Katrasnik ve diğerkleri, yüksek sıcaklıklı PEM yakıt hücrelerinin performansını incelemiştir. Modelleme sınırlarının FC performansının ve PT bozunmasının modellemelerindeki güvenilirliği doğruladıklarını görmüşlerdir. [14]

Tijani ve diğerkleri, basınç gradyanlarını değerkendirmek için bilgisayar tarafından oluşturulan bir akış plakası simüle edip üzerinde HAD analizi yapmışlardır. Simülasyon

sonuçlarında, basınç gradyanlarının keskinliğinin ve pürüzsüzlüğünün, paslanın tasarımına göre değiştiğini ve hız alanlarının basınç eğrileri ile pozitif korelasyonda hareket ettiğini gözlemlediler. [15]

Toghyani ve diğerleri, bir PEMEC (Proton Exchange Membrane Electrolyzer Cell) hücresinin performansını çeşitli parametrelere göre değişip değişmediğini gözlemlemişlerdir. Analizler sonucunda çalışma sıcaklığının düşmesinin hidrojen konsantrasyonunda bir azalmaya neden olduğu ortaya çıkmıştır. [16]

Rowshanzamir ve diğerleri, PEM yakıt hücresinin performansını, izotermal olmayan bir HAD modeli oluşturmuşlardır. Hücreleri düz ve serpantinli akış alanlarıyla gözlemlemişlerdir. Serpantili akış alanının düz akış alanına göre akım yoğunluğu ve sıcaklık olarak daha düzenli ve iyi bir dağılım oluşturduğunu göstermişlerdir. [17]

3. TEORİK BİLGİLER

3.1. Hidrojen Nedir ?

Evrendeki en basit atomik yapıya sahip, en bol element olmasıyla beraber bilinen tüm yanıcıların içerisinde birim kütle başına en fazla enerji veren yakıttır. Rengi ve kokusu yoktur ve havadan 14.4 kat daha hafif bir gazdır. Evrendeki Güneş gibi yıldızların temelinde süren termonükleer tepkimenin temelinde hidrojen vardır. Bir diğer deyişle güneşimizin yaydığı ekzotermik reaksiyon sonucunda gezegenimize radyasyon ile iletilen ısıнын yanı enerjinin temelinde de hidrojen vardır.

Gökbilimcilerin karanlık madde ve karanlık enerji olarak adlandırdıkları henüz hakkında çok az şeyler bildiğimiz fenomenler dışında, diğer elementlere kıyasla çok daha büyük miktarlarda evrenimizde var olan hidrojen, bugün bile kozmosa hükmetmektedir. Tüm evrendeki ince buğusu, medeniyetimizin son teknolojisi olan uzay teleskoplarında uzayın görüntülenebilir her kısmında karşımıza çıkmaktadır.

Hidrojen bilinen tüm yanıcıların içerisinde birim kütle başına en fazla enerji veren yakıttır. 1 kg hidrojen, yaklaşık olarak 2.6 kg doğal gazın veya 3,1 kg petrolün sahip olduğu enerjiyi sağlar. Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur. En bilinen bileşiği ise yaşamımızın kaynağı sudur.

Evrende en çok bulunan element olmasının yanı sıra önemli bir enerji taşıyıcısı da olması, hidrojeni sera gazı salınımının etkilerini görüp önlem almaya iten medeniyetimiz için önemli bir hedef haline getirmiştir. Çünkü hidrojen; sıfır emisyon ile su kaynaklı elde edilebilme özelliği, bolca bulunabilmesi, enerji dönüşüm kolaylığı, farklı şekillerde ve hallerde depolanabilme özelliği, maddesel özellikleri sayesinde uzun mesafeler boyunca az enerji kaybıyla transferinin sağlanabilmesi, diğer enerji kaynağı yakıtlara nazaran daha çeşitli yöntemlerle ek enerji biçimlerine çevrilebilmesi, fosil yakıtlara göre daha yüksek alt ve üst ısı verimlerine sahip olması, yeşil renk kodu prosesiyle üretimi durumunda her yönüyle çevreye zarar vermemesi özellikleriyle oldukça önemli bir enerji kaynağıdır.

Çizelge 3. 1. Kullanılan yakıt çeşitleri ve kalori değerleri

YAKIT	KALORİ DEĞERİ (kJ/kg)
İnek Gübresi	6000-8000
Odun	17000-22000
Kömür	25000-33000
Petrol	46000
Gazyağı	45000
Dizel	46000
Metan	55000
Doğalgaz	55000
LPG	51000
Biyogaz	35000-40000
Hidrojen	142000

Bir metreküp hidrojen yalnızda 89 gram ağırlığındadır ve aynı miktarda enerjiyi sağlayan benzinden 3000 kat daha fazla yer kaplar. Hidrojeni bu şartlar altında tutmak o kadar zordur ki, yüzyıldan fazla bir süredir hidrojenin enerji potansiyelini ortaya çıkaracak proseslere yeni başlamış bile sayılabilir.

Hidrojen, modern toplumumuzda vazgeçmek istemediğimiz daha doğrusu vazgeçemediğimiz bazı ürün ve uygulamaları, iklimi daha koruyucu hale getirmemize yardım edecek en potansiyelli kaynaklardan biridir. Çok değerli olduğu ve özel durumlarda kullanılmak üzere ayrılması gerektiği için hidrojen “enerji dönüşümünün şampanyası” olarak adlandırılır.

Hidrojenden enerji üretimi ve kullanımı nispeten yeni ve gelişmekten olan bir prosesken hidrojen üretimi ise yeni sayılamaz. Şu anda Dünya’da her yıl saf hidrojen üretimi yılda yaklaşık 75 milyon ton iken, gaz karışımlarının bir parçası olarak yılda yaklaşık 45 milyon ton civarındadır. [18]

İki temel sorun, hidrojenden yararlanmaya yönelik erken girişimleri engelledi diyebiliriz. İlk olarak hidrojenin düşük yoğunluğu sebebiyle işlenmesi, depolanması ve taşınması haylice zorken, bol bulunan fosil yakıtların aksine hidrojeni Dünya’daki diğer elementlerden izole

etmek oldukça zordur. Çünkü hidrojenin sahip olduğu tek elektron diğer elementler tarafından kolayca yakalanır ve böylece su gibi birçok birleşik oluşturur.

3.2. Hidrojen Elde Etme Yöntemleri

3.2.1 Elektroliz yöntemi

Elektroliz; elektrik akımı yardımıyla, bir sıvı içinde çözünmüş kimyasal bileşiklerin ayrıştırılması işlemidir. Bu yöntemde su, hidrojen ve oksijene elektrik kullanılarak dönüştürülür. Bu yöntemle üretilen hidrojen gazı, kullanılan elektrik kaynağına bağlı olarak, neredeyse hiç sera gazı emisyonuna yol açmayabilir. Sera gazı oluşumuna yol açmayan ve geniş çaplı bir üretim için yaygın olarak kullanılması için çabalanan iki yöntem; elektroliz yolu ile elektriğin yenilenebilir kaynaklarını kullanmak ve yüksek sıcaklıkta nükleer elektrolizdir. Günümüzde yaygın olarak doğalgaz reforming ile hidrojen üretimi yapılmaktadır.

Ticari üretim olarak büyük ölçekli alkali elektrolizör üniteleri oldukça gelişmiş bir süredir hidrojen üretiminde kullanılmaktadır. Yakın sayılabilecek bir zaman diliminde ise proton değişimli elektrolizörler ise küçük sayılabilecek kapasitede hidrojen üretiminde kullanılmaktadırlar. Bunlarla birlikte birçok elektroliz teknolojisi yöntemi bulunmaktadır. Bunların başlıcaları Alkali, PEM (Proton Elektrolit Membranlı), SOEC (Katı Oksit Elektroliz Hücreli) ve AEMWE (Anyon Değişim Membranlı Su Elektrolizi) olarak söylenebilir.

Bunlar dışında askeri alanda, özellikle denizaltılarda derin denizlerde görev halinde suyun üstüne çıkmadan oksijen ihtiyaçlarını karşılamak amaçlı nükleer su elektrolizleri de kullanılmaktadır. 1970'lerdeki global enerji krizinde düşülen durum elektroliz çalışmalarına olan merakı arttırmıştır. Artan merakla birlikte yapılan çalışmalar doğrultusunda yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üreten sistemler hızla gelişmeye başlamış, on yıl kadar kısa bir süre içerisinde de alkali elektroliz tesisleri kurulup hidrojen üretilmiş, bu hidrojeni de kullanarak amonyak üretimi yapılmaya başlanmıştır. [19]

3.2.2. Termoliz yöntemi

Termal kaynaklı enerjinin kullanılması ile bir bileşiğin ayrışması işlemine termoliz denir. Nasıl elektrik enerjisi ile suyun hidrojen ve oksijene ayrılmasına hidroliz diyorsak benzer bir biçimde suyun ayrışması işleminde termal kaynaklar kullanılarak yapılan suyun ayrışması işlemine de termoliz denmektedir. Termoliz yöntemi 2500 Kelvin üzerinde sıcaklıklarda gerçekleşir ve oldukça meşakatli bir işlemdir. Bir diğer sorun ise ayrılan hidrojen ve oksijenin hemen reaksiyona girip tekrar su bileşiği oluşturmaktır. Bu durumun karşına geçebilmek için ayırıcı cihazlar, katalizörler ve özel işlem parametreleri sürece dahil edilmeye çalışılır.

Çizelge 3. 2. Sıcaklık ile termoliz ayrışma oranı ilişkisi

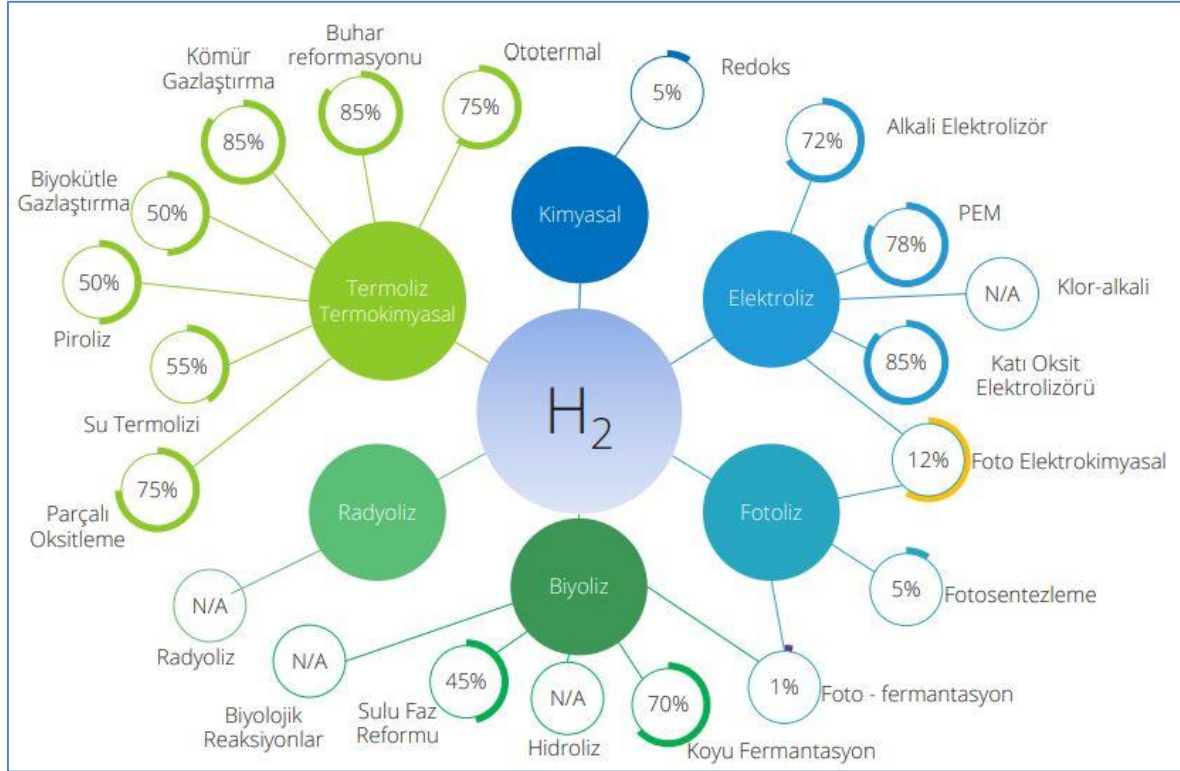
SICAKLIK (K)	AYRIŞMA ORANI (%)
2000	1
2500	8,5
3000	64

Çizelge 2’de görüleceği üzere sıcaklık ile termoliz ayrışma oranının arasında pozitif korelasyon vardır. Yüksek sıcaklık ile beraber ayrışma oranının artması diğer yandan yüksek sıcaklıklara mukavemetli malzemelerin ihtiyacını artırmıştır.

Termoliz yönteminin diğer zorlularından bahsedilecek olursa, 2000 K seviyelerine çıkarılan su birçok farklı element ve bileşiğe ayrılır (H_2O , H_2 , O_2 , O , H ve OH) ve bu yan reaksiyonların oluşmasına, termoliz veriminin düşmesine neden olur. Malzeme, atık ısı geri kazanım sistemleri, ısı kaynakları ve katalizörler verimli bir termoliz işlemi yapabilmek için dikkate alınması gereken unsurlardır.

3.2.3. Kimyasal yöntemler

Bu tür hidrojen üretimi hidratlar (metal, gaz bazlı), su, metal gibi kaynakların kullanılmasıyla yapılır. Bu tür reaksiyonların en temeli, indirgeme ve oksidasyon içeren redoks reaksiyonlarıdır. Ticari olarak kimyasal yöntemler kullanılarak üretilen hidrojen, hidrojen üretim alanında pek gelişmiş sayılmaz.



Şekil 3. 1. Hidrojen üretim yöntemleri ve verileri [20]

3.2.4. Termokimyasal yöntemler

Günümüzde sanayide kullanılan hidrojenin büyük bir kısmı doğal gaz, petrol, kömür gibi fosil yakıtlardan üretilmektedir. Bu yakıtlardan hidrojen üretebilmek için en çok kullanılan yöntemler ise;

- Doğalgazın katalitik buhar ıslahı
- Petrolün oksidasyonu
- Buhar-Demir işlemi
- Kömürün gazlaştırılması

şeklinde. Bunların dışında temel amacı hidrojen üretimi olmakla birlikte başka sanayi ürünlerinin prosesleri sırasında yan ürün olarak da hidrojen elde edilebilir. Klor-alkaliden karşıt klor üretimi, ham petrolün rafineri işleminde hafif gazların üretimi, kok bataryalarında kok gazı üretimi ve doyurulmuş yağ sanayisinde kimyasal hidrojenerasyon bu proseslerden başlıcalarıdır.

Kömürden hidrojen üretimi

Yüksek sıcaklık ve basınç altında kömürün sıkıştırılmasıyla sıvı ve gaz yakıt elde etme yöntemi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kömürün gazlaştırılması ile kömür gazı elde etmede gerçekleşen üç temel reaksiyon Çizelge 3.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 3. Kömürün gazlaştırılmasında temel reaksiyonlar

Reaksiyon	ΔH (1200 K'de) J/gmol	$K_p > 1$ olan sıcaklık	$\frac{d \ln K_p}{d \ln T} = \frac{\Delta H}{RT}$
1. $C + H_2O = CO + H_2$	-135670,26	>957 K	17,2
2. $CO + H_2O = CO_2 + H_2$	+32762,84	>1100 K	-3,7
3. $C + 2H_2 = CH_4$	+91349,72	>819 K	-12,2

Kömürden daha düşük maliyetli olan temiz gaz üretimi elektrik santrali işletmeleri, demir çelik endüstrisinde hala kullanılmaktadır. Ülkemizde İSDEMİR, ERDEMİR gibi büyük çelik üreticileri gazlaştırma ile elde ettikleri gazları yine kendi bünyelerinde gelişmiş boru hatlarıyla ileterek kullanmaktadırlar. Temiz gaz üretim sistemlerinden bahsedilecek olursa Lurgi ve Texaco prosesleri akla ilk gelenlerdir.

Lurgi prosesinde kömürler önce 25,4 mm'lik elekten geçirilerek boyutları ayarlanır. 28 mesh'den daha ufak olan parçalar yine aynı procesten üretilmiş olan katran ile briketlenir ve gazlaştırma ünitesine beslenir. Gazlaştırıcı silindir şeklinde refrakter tuğla ile çevrelenmiş 20 atm kadar basınç altında su ile soğutulan bir kaptır. Buhar ve hava kabın altından girer, 2 metre kalınlığında olan yakıt yatağını geçerler. Yatağın alt kısmındaki karbon hava ile yanar ve yaklaşık 1200 °C sıcaklıkta karbondioksit gazını oluşturur. Aynı anda gerçekleşen endotermik bir reaksiyon ile giren buhar ve karbondan, karbondioksit ve hidrojen gazı ortaya çıkar. Proses süresince beslenen kömür önce kurur, daha sonra da uçucu hale, gaz haline döner. Bu uçucu bileşenlerden hidrojen, metan elde edilir. Gazlar procesten yaklaşık 510 °C sıcaklıkta ayrılırlar. Prosesin gazlaştırma verimi %90-95 arasındadır. Kayıpların bir kısmı yanmamış karbonlar ve ısı kayıplarından oluşur.

Texaco prosesi ise daha gelişmiş bir prosestir. Pülverize edilmiş ham kömürün buhar ve hava ile yüksek basınç altında doğrudan gazlaştırılma ve çıkan gazı saflaştırma işlemidir. Kömürün %70'i 200 mesh ve daha udak olacak şekilde parçalanır ve su eklenerek bir süspansiyon haline getirilir. Bu süspansiyon 15 atm basınç altındaki gazlaştırma ünitesine gönderilir ve daha sonra üretim gazıyla ısı transferi sonucunda buharlaştırılır. Buhar/kömür oranı 2/3 olacak şekilde siklon tarafından ayarlanır. Bu karışım 537 °C'ye kadar ön ısıtma işlemine tabii tutulur. Isıtılan buhar, kömür ve hava refrakter astarlı gazlaştırma ünitesine girer. Burada kömürün %95 kadarı 3 dakika içerisinde gaz haline döner. %5 kısmı ile cüruf içerisinde hapsolur. Yakıt gazı üniteden yaklaşık 1200 °C ayrılır.

Petrol artıklarından hidrojen üretimi

Hidrojen üretilirken kullanılan diğer kaynaklardan birisi de petrol ve petrol ürünleridir. Petrolün katalitik olmayan kısmi oksidasyonu ile konvansiyonel bir proseste hem hidrojen üretimi yapılabilir hem de yakıt olarak direkt kullanımı sonucu karbon salınımının önüne geçilebilir.

Rafinerilere işlenmeye gelen petrol önce distilize işlemine sokularak hafif bileşenleri olan propan, bütan vb gazlar ile benzin, mazot, yağ gibi kalıntı diye anılan yan ürünlerine dönüştürülür. Fuel-oil bileşiği kullanılan am petrolün cinsine göre hacim bakımından farklılık gösterir. Proses sonucunda oluşan bu kalıntılara hidrojen eklenerek, karbon çıkarılarak, kükürt, metaller ve asfalt giderilerek daha iyi ürünler elde edilebilir. Hangi işlemin uygulanacağı ise kalıntının yapısına bağlıdır. Eğer kalıntı yüksek derecede kirli ise tek yön oksidasyondur. Katalitik olmayan oksidasyon prosesi sonucu elde edilen hidrojen son derece temiz bir enerji taşıyıcısıdır.

Metal buhar reformingi, hidrokarbonları ve buharın katalitik dönüşümü ile hidrojen ve CO₂ üretilmesidir. Bu proses sonucunda karbon oluşmaz ve tamamen buharlaşma özelliğine sahip hafif hidrokarbonlarla birlikte genellikle doğal gaz ve nafta kullanılır. Prosese giren gazın önce kükürdü uzaklaştırılır, ardından sentez gazın (H₂ ve CO) üretilir. Ardından CO CO₂ 'ye dönüştürülür ve ardından gazlar saflaştırılır.

Katalitik olmayan kısmi oksidasyon işleminde ise ağır yağlar, petrol kalıntıları kullanılmaz çünkü kaynama noktalarının haylice yüksek olması sebebiyle içeriklerinde kükürt ve metal

kalıntılıları fazladır. Öce beslemenin oksijen ile kısmi oksidasyonu ile sentez gaz üretilir. Ardından CO CO₂ 'ye dönüştürülür ve ardından gazlar saflaştırılır.

Çizelge 3. 4. Kısmi oksidasyonda elde edilen gaz bileşimleri ve oranları

Bileşen	Metan-Buhar reformingi (%)	Kısmi oksidasyon (%)
H ₂	74	46
CO	18	46
CO ₂	6	6
CH ₄	2	1
N ₂ ve Ar	-	1

Piroliz yöntemi

Bu yöntemde organik hammaddeler 500-900 °C aralığında, 0,5 MPa'a kadar bir basınçta, oksijensiz ortamda ısıtılarak gazlaştırma yapma işlemidir. Proses içerisinde su ve hava olmadığı için ürünlerde de CO ve CO₂ bulunmaz. 500 °C den daha düşük sıcaklıkta yapılan piroliz işlemine düşük sıcaklıkta piroliz, 500-800 °C arasında yapılan piroliz işlemine orta, 800 °C'den daha yüksek sıcaklıkta yapılan piroliz işlemlerine ise yüksek sıcaklık pirolizi denir.

Yüksek enerji içerikli hammaddelerin kullanıldığı piroliz işlemi genelde yüksek sıcaklıklı pirolizdir. Son zamanlarda ise yüksek enerjili piroliz hammaddelerine kömür katılarak daha verimli prosesler denenmektedir.

Piroliz işlemi sonucunda %60 oranında maliyeti düşük ve kolay taşınabilir biyoyağ, %20 oranında artık gaz olarak bilinen singaz yanıcı gazı ve %20 oranında biyokömür meydana gelmektedir. Biyokütlenin hızlı / ani pirolizini gerçekleştirmek için çeşitli tipte reaktörler tasarlanmıştır. Bunlar arasında akışkan yataklı reaktörler, sabit yataklı reaktörler, devridaim yapan akışkan yataklı reaktörler, dönen koni piroliz, ablatif piroliz reaktörleri, burgu veya vidalı piroliz ve vakumlu piroliz bulunmaktadır.

Çizelge 3. 5. Hidrojen üretim metotlarının karşılaştırılması [20]

Yöntem	Enerji (kWh/Nm ³)		Teknolojideki Son Durum	Verim (%)	Maliyet DBR Oranı
	Teorik	Pratik			
Doğalgazın Buharlı Reformasyonu (DBR)	0,78	2-2,5	Olgun	70-80	1
Metan/Doğal gaz Piroliz			ArGe	72-54	0,9
H ₂ S Metan Reformasyonu	1,5		ArGe	50	<1
Kuru Gaz Reformasyonu			ArGe	47-58	-1
Kısmi Oksidasyon	0,94	4,9	Olgun	70	1,8
Nafta Reformasyonu			Olgun		
Atık Petrolün Buharlı Reformasyonu			ArGe	75	<1
Kömür Gazlaştırma	1,01	8,6	Olgun	60	1,4-2,6
Kömürün Kısmi Oksidasyonu			Olgun	55	
Buhar-Demir İşlemi			ArGe	46	1,9
Kloralkali Elektrolizi			Olgun		
Suyun Elektrolizi (Elektrik)	3,54	4,9	Olgun	62-82	3-10
Suyun Elektrolizi (Güneş)			ArGe	10	>3
Suyun Yüksek Sıcaklıkta Elektrolizi			ArGe	48	2,2
Termokimyasal Su Ayrışımı			ArGe	35-45	6
Biyokütle Gazlaştırma			Olgun	45-50	2-2,4
Fermantasyon			ArGe	20-60°	
Fotofermantasyon			ArGe	24-46°	
Karanlık+Fotofermantasyon	1,2-3		ArGe	30-48°	
Su Fotolizi			Ön Arge	<10	
Suyun Elektrokimyasal Ayrışımı			Ön Arge	0,5-12	
Suyun Fotokatalitik Ayrışımı			Ön Arge		

3.3. Renk Kodlarına Göre Hidrojen Çeşitleri

Üretim kaynağına diğer bir deyişle üretilirken ortaya çıkan sera gaz miktarına bağlı olarak üretilmiş hidrojenler farklı renk kodlarıyla isimlendirilirler.

3.3.1. Gri hidrojen

Fosil yakıtlardan veya doğal gaz kaynakları kullanılarak üretilen hidrojene denilmektedir. Üretilirken kullandığı yakıtların prosesi sırasında ortaya çıkardığı sera gazları nedeniyle en az yenilenebilir hidrojen formudur. Günümüzde üretilen hidrojenin büyük çoğunluğu maalesef gri hidrojendir. Bulunması çok daha kolay yakıtları kullanılarak elde edilmesi sebebiyle nispeten üretim maliyeti daha ucuzdur.

Fosil yakıtlardan elde edilmesi SMR (Steam Methane Reformation- Buhar Metan Reformasyonu) veya ATR (Autothermal Reformation- Ototermal Reformasyon) yöntemleriyle meydana gelmektedir. Bu yöntemlerle elde edilen hidrojenin saflık seviyesinin düşük kalması sebebiyle hidrojenin kullanımdan önce safsızlığının artması için işlenmesi gerekmektedir. Fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin elektrolizörlere verilmesiyle elde edilen hidrojende ise saflık oranı %100 olduğu için ekstra bir işleme gerek duymadan direkt kullanılabilir.

Üretilen her 1 kg gri hidrojen için yaklaşık 11,1-13,7 kg arası CO₂ gazı proses sonucunda atmosfere karışır. Gri hidrojenin sıfır emisyon hedefine doğru giden yolda bir köprü oluşturan, geçiş bölgesi enerji alternatifi olarak görülmektedir.

3.3.2. Mavi hidrojen

Gri hidrojen yapmak için kullanılan kimyasalları işleme prosesi mavi hidrojen üretimi için kullanılan proses ile aynıdır. Ancak mavi hidrojen üretiminde kullanılan CCS (Carbon Capture and Storage – Karbon Yakalama ve Depolama) sistemi CO₂ yönetiminde gri hidrojene göre büyük avantajdır ama bu yöntem yalnızca düşük emisyonların yakalanmasına yardımcı olan bir sistemdir.

Tüm sistemler CCS ile desteklenmediği sürece yalnızca SMR kullanılarak karbondan arınma mümkün gözükmemektedir. SMR karbonun %60'ına kadarını kolayca yakalayabilmektedir. Bu oranı %80 üzerine çıkarmak mümkündür fakat bu prosesi teknolojik olarak daha maliyetli hale getirmektedir.

Mavi hidrojen günümüzde sıfır salınım hedefine doğru giden yolda gerçekçi alternatiflerimizden biridir. Çünkü gri hidrojene göre önemli derecede düşük CO₂ salınımına sahiptir ve bu onu çok daha dengeli ve sürdürülebilir bir kaynak kılıyor. Diğer taraftan gri hidrojenin yanında çok daha çevre dostu olmasına karşı depolama maliyetleri ve sistem gereksinimleri ile onu mükemmel kılmamaktadır.

3.3.3. Turkuaz hidrojen

Metanın termal parçalanması yani pirolizi ile üretilen hidrojen çeşitidir. Gerçekleşen piroliz işlemi boyunca metan içerisindeki karbon ısı etkiyle beraber şekil değiştirerek katı karbon haline geçer.

Gelecekte, turkuaz hidrojen, termal prosesin yenilenebilir enerji ile çalıştırılmasına ve karbonun kalıcı olarak depolanmasına veya kullanılmasına bağlı olarak düşük emisyonlu bir hidrojen olarak değerlendirilebilir.

3.3.4. Sarı hidrojen

Güneş enerjisinden üretilen elektriğin elektrolizöre verilmesiyle üretilen hidrojen çeşidine verilen isimdir. Güneş enerjisini kaynak olarak kullandığı için bir çeşit yeşil hidrojen şekli de denilebilir.

Sarı hidrojen sistemleri kullandıkları gücü güneş panellerinden elde ederler. Elde edilen enerji daha sonra su moleküllerini parçalamak için tasarlanmış elektrolizör hücrelerine gelir. Hücrelerde hidrojen ve oksijen üretilir. Bu süreç boyunca sera gazı emisyonu salınmadığından sarı hidrojeni yeşil hidrojenin bir alt dalı olarak tanımlayabiliriz.

3.3.5. Yeşil hidrojen

Yeşil hidrojen, suyu elektrolize etmek için kullanılması gereken elektrik enerjisini rüzgar, güneş gibi zararlı sera gazı emisyonları üretmeyen enerji sistemleri kullanılarak üretilen hidrojen türüdür. Yani temiz elektrik kullanılarak sıfır emisyon ile üretilmiş hidrojen türüdür.

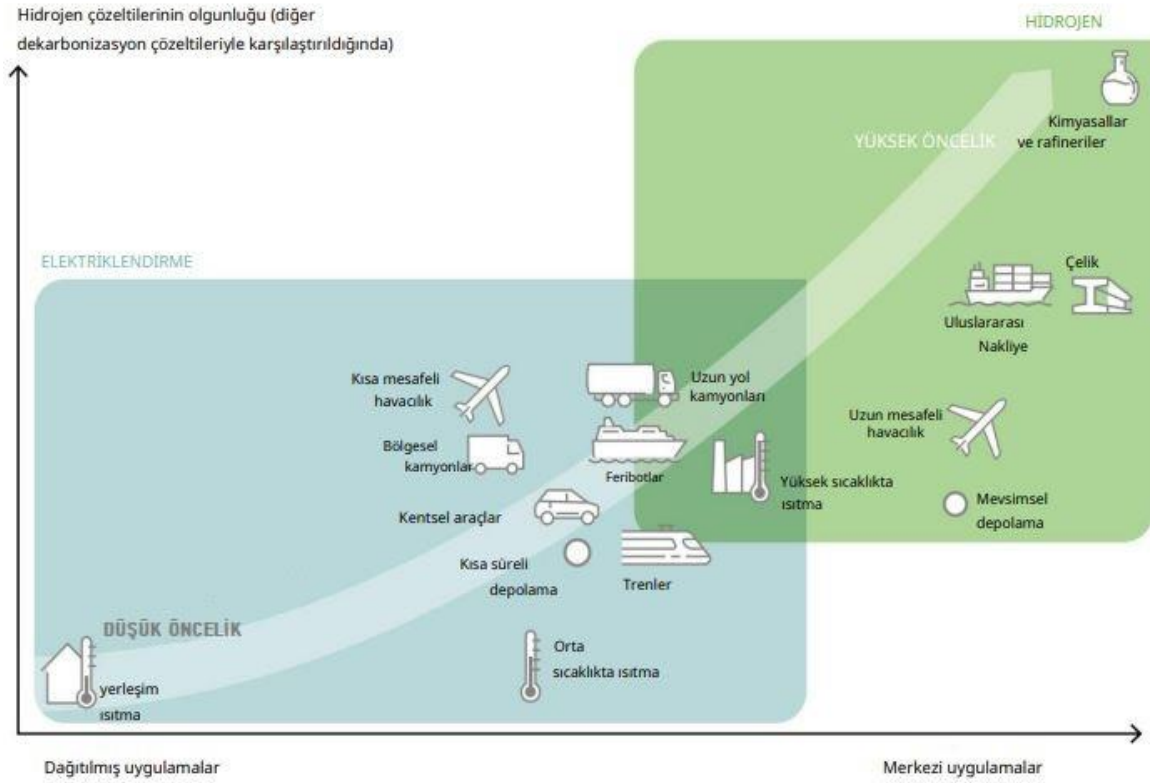
Son yıllarda hidrojen, sıfır emisyon hedefi koymuş dünyamızda yeni ve yaygın bir hedef olarak üzerinde çalışılan bir nokta. Burada enerji taşıyıcısı olarak elimizde bulunan en parlak çözüm olan hidrojenin, emisyon olarak da en temiz olan yeşil hidrojenin çalışmaları geleceğimizi de belirleyecektir.

Hidrojenin böyle bir temiz enerji çözümü potansiyelinin olması, uzun süredir devam eden yeşil hidrojen projelerinin inanılmaz bir ivme kazanmasına neden olmuştur. Yeşil hidrojen üretimi ve kullanımıyla birlikte sürdürülebilir enerjiye ve sıfır emisyon hedefine küresel halde geçişimizin kritik bir kolaylaştırıcı faktörü olabilir.

Yeşil hidrojen, ağır sanayi enerji ihtiyacı, uzun mesafe taşımacılık, nakliye ve havacılığın karbonsuzlaştırılması gibi medeniyetimizin önüne geçmesi gerektiği birçok sorunun çözümünde bir yol olarak BM iklim konferansı COP26'da bir dizi emisyon azaltma taahhüdünde yer aldı. [21]

Yeşil hidrojen maliyetlerini düşürmek için Birleşmiş Milletler tarafından kurulmuş olan "The Green Hydrogen Catapult" yeşil hidrojen üretim hedefini büyüttü. 2021 yılında belirlenmiş 25 gigawatt, 2027'ye yılına kadar 45 gigawatt'a yükseltildi. Yeşil hidrojen dahil olmak üzere birçok yenilenebilir ve düşük karbonlu gazların alımını kolaylaştıran yasal düzenlemeler Avrupa Komisyonu'ndan geçti. [22]

Olan ve daha da gelişecek olan hidrojen ekonomisinin jeopolitik durum üzerinde uzun vadeli sonuçları olacaktır ve uzun vadede olan jeopolitik enerji akışını yeniden şekillendirme potansiyeli oldukça fazladır. Nispeten yeni ortaya çıkan ve büyük bir hızla gelişen yenilenebilir enerji sistemleri, fosil yakıt tüketimine dayanan global enerji dünyasını kademeli olarak yerinden oynatırken, üretim sistemleri daha gelişmemişken bile kendini hissettirmeyi başarmıştır. Sıfır emisyon hedefiyle harekete geçilen bu dönüşüm rüzgarında, uluslararası ittifak ve çatışmaların yükselen Pazar ve enerji potansiyeli ile yeniden şekillenebileceği açıktır. Bu bağlamda hidrojen pazarı oldukça önemli bir potansiyel barındırmaktadır. [23]



Şekil 3. 2. Yeşil hidrojen politikası önceliği [24]

Genel olarak diğer rakiplerine göre yüksek olan hidrojen üretiminde, daha sürekli ve uzun vadeli bir üretim sistemine geçmek ilerleyen seviyede maliyetlerin düşmesine ve kullanımın artmasına neden olacaktır. Hidrojenin endüstriyel kullanımları, yüksek öncelikli son kullanımlara arasına girer. Bunun nedeni yakın zamanda alternatiflerin fazla olmaması ve bunlara yönelik taleplerdir. [24]

Teşviklerin ve hidrojen üretim sektörünün desteklenmesinin yanından yeşil hidrojen üretiminin ve kullanımının kendi içerisinde engelleri de vardır ve bunların çözülmesi zamanla hidrojenin ana rolünü de belirleyecektir. Bunlar hidrojenin yüksek üretim maliyeti, altyapı sorunları ve yüksek seviyelerde olan hidrojen üretimindeki enerji kayıplarıdır.

2021 yılında dünya genelinde hidrojen talebi 94 milyon ton (Mt) civarına çıkmıştır. Bu seviyeler pandemi dönemi öncesinde zirve yapan 90 Mt üzerindedir. Bu miktarda hidrojenin enerji düzeyi global olarak enerji tüketiminin yaklaşık %3'üne denk gelmektedir. Bu artışların nedenine bakılacak olursa rafineri ve büyük endüstriyel tesislerdeki kullanımın başlıca sebepler olduğu söylenebilir. [25]

Şu anda devam eden hidrojen uygulamalarının kimya, metalurji ve ulaşım sektörlerindedir. Dünya çapında hidrojen üretiminin yaklaşık yarısı amonyak üretimi için elde edilmekte, çeyreği rafinerilerde ve %10'u kadarı da metanol üretimi için elde edilmektedir. IEA istatistiklerine bakıldığında hidrojen talebi her geçen yıl artmaktadır. Bunun yanında elde edilen hidrojenin çok büyük bir kısmı halen fosil yakıt kaynakları tarafından karşılanmaktadır. Bu istatistikler yıllık 830 milyon ton CO₂ salınımından hidrojen sektörünün sorumlu olduğunu gösteriyor.

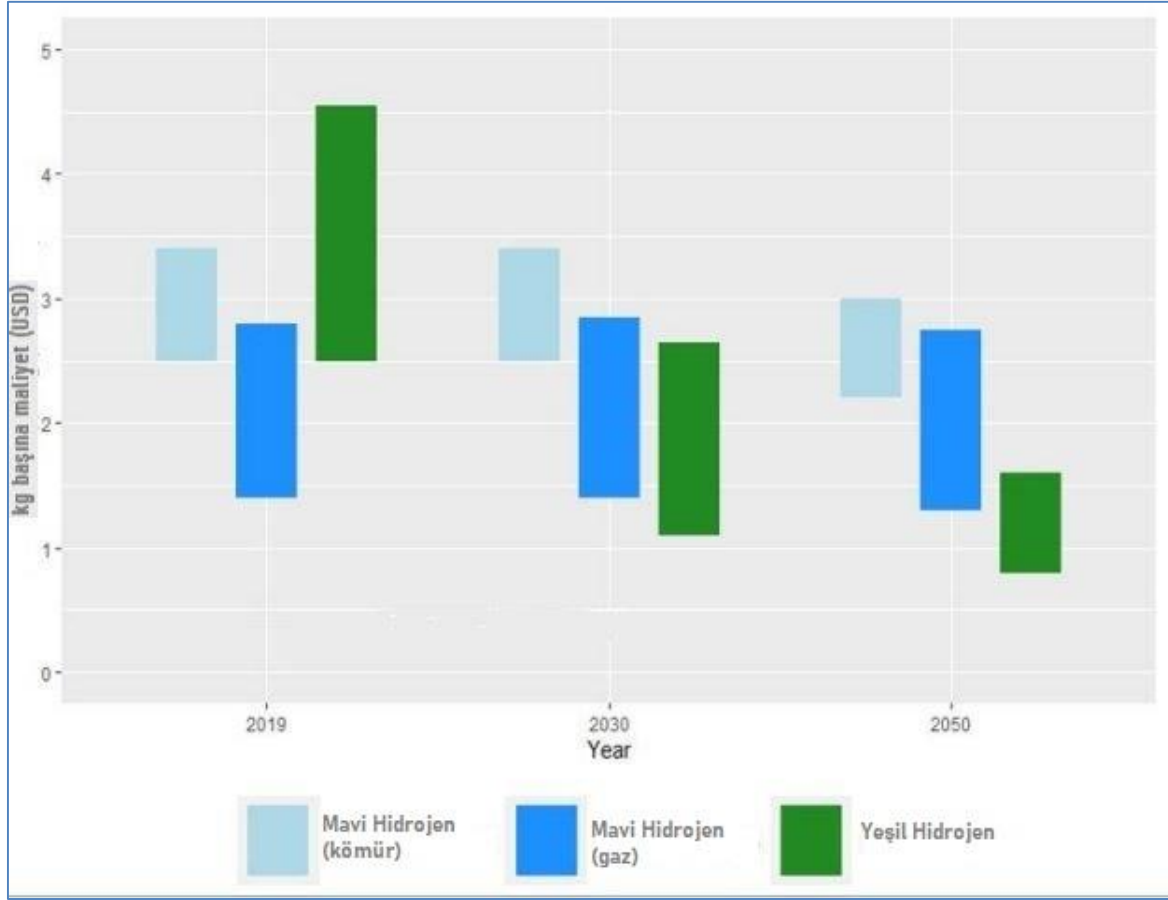
Bu bilgilerin ışığında temiz bir hidrojen sektörünün kurulmasındaki en büyük engel hidrojenin arzını artırmak değil, aynı zamanda karbon yoğun hidrojenden düşük karbon salımlı hidrojen üretimine geçebilmektir. [23]

Yeşil hidrojenin üretim maliyeti, karbon salınımı olmadan yapılmış düşük emisyonlu bir hidrojen üretim sisteminin gelişmesindeki en büyük engeldir. Günümüzde yeşil hidrojen üretim maliyetleri ekonomik olarak diğer rakiplerine nazaran rekabet edilemeyecek seviyede yüksektir. Yeşil hidrojenin bir kilogramının 2019 fiyatlarına göre üretim maliyeti 5 Amerikan doları iken, aynı miktarda mavi hidrojen üretimi 3,5 dolar, gri hidrojenin maliyeti ise 1.5 dolardır. [26]

Diğer yandan üretilmiş olan hidrojenin ulaşımı, güvenli şekilde depolanması ve tüketiciye ulaştırılması da rakiplerine göre oldukça zordur. Element olarak çok düşük yoğunluğa sahip olan hidrojen, bu sebeple fosil yakıtlara göre depolanması ve taşınması konusunda büyük dezavantaja sahiptir. Tüm bunlar üretim maliyetine ek başka maliyetler demektir ve tercih edilebilirlik yönünden çözülmesi gereken sorunlardır.

Ayrıca maliyetin artmasına katkıda bulunan diğer başka maliyet kalemi ise diğer enerji kaynaklarına karşı hidrojeni daha az rekabetçi hale getiren verimlilik faktörüdür. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) yayınına göre elektrik kullanılarak oluşturulmuş bir hidrojenin nakliyesinden ve depolanmasından sora bir yakıt piline girmesi ve bu pilden üretilen elektrik miktarı, en başta elektrolizöre verilen elektriğin %30'undan daha azdır. [27]

Bu sebeple hidrojen üretilip bundan elektrik sağlamak yerine hidrojenin direkt kullanılması ekonomik olarak çok daha uygun görülmektedir. Bu kayıp oranı lityum elektrik pillerinde %10-15 seviyelerindedir. [28]



Şekil 3. 3. Global olarak Hidrojen maliyeti ve maliyet tahminleri

Günümüzde yeşil hidrojen üretimi maliyeti oldukça fazladır. Buna karşın yakın gelecekte teknolojinin de gelişmesiyle beraber yeşil hidrojen üretim maliyetlerinin düşüşü öngörülmektedir. 2010-2019 arasında güneş fotovoltaiklerinin maliyetleri %82, yer odaklı güneş enerji santrallerinin maliyeti %47, onshore rüzgar enerji santralleri maliyeti %40, offshore rüzgar enerji santralleri maliyeti %29 oranında gerilemiştir. [29] Günümüzde elektrolizörlerin maliyetleri yaklaşık olarak %60 civarında düştü ve düşmesinin devam etmesi bekleniyor.

3.4. Türkiye'de ve Dünya'da Yeşil Hidrojen Çalışmaları

Dünyamız sera gazlarının çevresel etkilerini görüp anladıktan sonra kendimize koyduğumuz sıfır emisyon hedefi doğrultusunda bir iklim planı hazırlanmıştır. Bu plan doğrultusunda alternatif enerji kaynakları ve enerji iletilicileri üzerinde çalışmalar hem ülkemizde hem de Dünya'da hızla artmıştır.

Fosil yakıt kullanımından kaynaklanan sera gazı salınımları, iklim değışikliğı potansiyeliyle mücadele edebilmemiz için yenilenebilir enerji kaynakların kullanımı mutlak suretle artırılmalıdır. Bu bağlamda hidrojen, barındırdığı enerji miktarı ve sürdürülebilirlik açısından kritik bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen taşıdığı bu potansiyelle günümüzün ve geleceğimizin en temel yakıtı olabilecek özelliklere sahiptir. Tüm bu büyük potansiyel Dünya'nın farklı bölgelerinde farklı araştırmalara ve farklı sonuçlara sebep olmaktadır.

Doğal gaza belirli oranlarda hidrojen karıştırmak birçok ülkede an itibariyle hizmet eden şebekelerde aktif olarak devam eden ve emisyon salınımı azaltmak için uygulanan önemli yollardan biridir.

Evsel cihazlardaki yanma işlemi sonrasında oluşan CO₂ ve benzeri sera gazları, hidrojenin hacimce %20 kadarının doğal gaza karıştırılmasıyla büyük ölçüde azalma göstermiştir. Ama mevcut doğal gaz hatları borularının uyum sorunları sebebiyle hidrojenin doğal gaza karıştırılmasının belirli sınırları olmaktadır. Bu sınırlar yaklaşık olarak hacimce hidrojenin %20'sini kapladığı karışımlardır. [30]

Mevcut doğal gaz boru hatlarına hidrojen eklemenin güvenlik sorunlarının çözümleri için Dünya'nın birçok yerinde çalışmalar devam etmektedir. Dünya'nın birçok farklı yerinde yapılan birçok farklı araştırmada üretilen hidrojenin doğal gaza belirli oranlarda karıştırılması için hazırlanan projeler geliştirilmektedir. Bu çalışmalardan alınan sonuçların bir kısmı sadece kavram ortaya çıkarmış olsa da bazılarında ayrıntılı sonuçlar yayınlanmıştır.

Çizelge 3. 6. Planlanmış ve üzerinde çalışılan projeler [31]

Proje İsmi	Ülke	Başlama Tarihi	Elektrolizör Tipi	Güç Girdisi (kW)	Uygulama	Karışım Oranı
GRHYD	Fransa	2017	Alkali	100	Hatta enjeksiyon Ulaşım	%20'ye kadar
Hybridge	Almanya	2017	Alkali ve PEM	100.000	Metanlaşma Hatta enjeksiyon	Bilinmiyor
HyStock	Hollanda	2017	Bilinmiyor	1000	Hatta enjeksiyon	Bilinmiyor
Jupiter 1000	Fransa	2018	Alkali ve PEM	1000	Hatta enjeksiyon Metanlaşma	Bilinmiyor
Underground Sun Storage	AUS	2018	Alkali	600	Hatta enjeksiyon Depolama	%10'a kadar
Wind to Gas Südermarsch	Almanya	2018	PEM	2500	Hatta enjeksiyon Depolama	Bilinmiyor
Kidman Park	AUS	2018	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Hatta enjeksiyon Depolama	Bilinmiyor
Low-Carbon Energy Project	Kanada	2021	PEM	Bilinmiyor	Hatta enjeksiyon	Bilinmiyor
MéthyCentre	Fransa	2019	Bilinmiyor	250	Ulaşım Metanlaşma	-
H ₂ ORIZON	Almanya	2019	PEM	880	Ulaşım	-
H ₂ Wyhlen	Almanya	2019	Alkali	1000	Depolama	-
HyDeploy	UK	2019	PEM	500	Hatta enjeksiyon	%20'ye kadar
H2V Product	Fransa	2021	Alkali	100.000	Hatta enjeksiyon	Bilinmiyor
HyNet North West	UK	2023	-	Bilinmiyor	Hatta enjeksiyon	Bilinmiyor

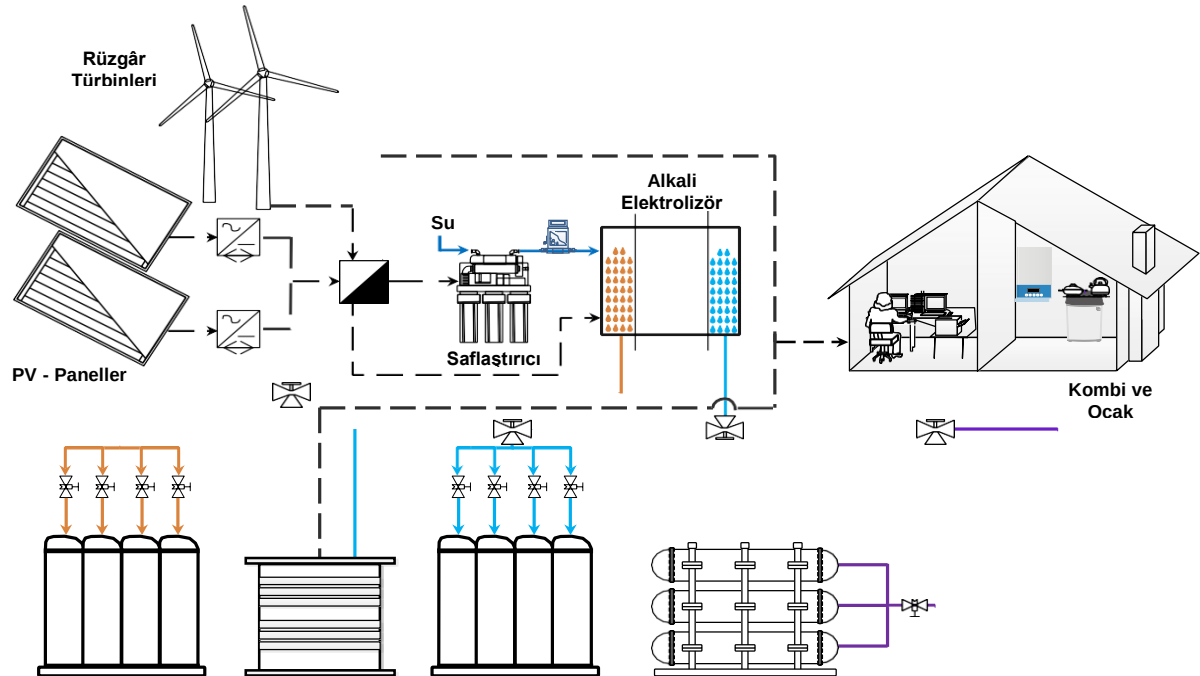
Çizelge 3.6. (devam) Planlanmış ve üzerinde çalışılan projeler

Proje İsmi	Ülke	Başlama Tarihi	Elektrolizör Tipi	Güç Girdisi (kW)	Uygulama	Karışım Oranı
Ameland	Hollanda	2008	PEM	8,3	Hatta enjeksiyon	%20'ye kadar
RH ₂ -WKA	Almanya	2009	Alkali	1000	Hatta enjeksiyon Güç üretimi	Bilinmiyor
Hybrid Power PlantPrenzlau	Almanya	2011	Alkali	600	Güç üretimi Depolama	-
H ₂ -Forschungszentrum Cottbus	Almanya	2012	PEM	145	Depolama	-
WindGas Falkenhagen	Almanya	2013	Alkali	2000	Hatta enjeksiyon Metanlaşma	Bilinmiyor
PtG Project in Rozenburg	Hollanda	2013	PEM	8,3	Metanlaşma	-
Thüga-Demonstrationsanlage	Almanya	2014	Bilinmiyor	300	Hatta enjeksiyon	Bilinmiyor
Delfzijl Energy Valley	Hollanda	2014	Bilinmiyor	12.000	Kimya endüstrisi	-
Wind2Hydrogen	Avusturya	2015	PEM	100	Hatta enjeksiyon Ulaşım	%1-10
Power-to-Gas (enerjidepolama amaçlı)	Kanada	2015	PEM	5000	Hatta enjeksiyon Depolama	Bilinmiyor
Energiepark Mainz	Almanya	2015	PEM	6000	Hatta enjeksiyon Ulaşım	%0-15
H2BER	Almanya	2015	Alkali	500	Hatta enjeksiyon Ulaşım	Bilinmiyor
MicrobEnergy	Almanya	2015	PEM	2500	Metanlaşma Ulaşım	-
RWE Ibbenbüren	Almanya	2015	PEM	150	Hatta enjeksiyon	Bilinmiyor
WindGas Hamburg	Almanya	2015	PEM	1500	Hatta enjeksiyon	Bilinmiyor
P2G Hassfurt	Almanya	2016	PEM	1250	Hatta enjeksiyon Depolama	Bilinmiyor

Doğal gazla hidrojen karıştırılması ile alakalı Konya’da, GAZBİR-GAZMER önderliğinde bir proje gerçekleştirilmektedir. Bu proje Türkiye’de ilk defa hidrojenin doğal gazla karıştırılmasıyla elde edilen karışımın evsel cihazlara verilmesi projesidir. Ayrıca rüzgar türbini ve güneş panellerinden elde edilen enerjinin sistemin tamamını karşılayabileceği bir laboratuvar oluşturulmuştur. Proje kapsamında elde edilmiş hidrojen-doğal gaz karışımı, yakma sistemlerince test edilmekte ve analizleri üzerinde çalışılmaktadır.

Çizelge 3. 7. Farklı hidrojen-doğal gaz karışımlarının termofiziksel özellikleri

H_2 (Mol Bazlı) (%)	H_2 (Kütle Bazlı) (%)	AID (kJ/kg)	AID (kcal/m ³)	WVI (kJ/m ³)	ρ (kg/m ³)
0	0	47.746	9.359	50.395	0,8201
5	0,6	48.181	9.026	49.717	0,7838
10	1,26	48.658	8.694	49.034	0,7476
15	1,99	49.184	8.361	48.346	0,7113
20	2,80	49.766	8.029	47.654	0,6750
25	3,70	50.415	7.696	46.960	0,6387



Şekil 3. 4. Laboratuvar Şeması

Diğer taraftan ülkemizde yapılan bir diğer çalışma ise Karadeniz’de bulunan, yaklaşık 4.5 milyar ton olduğu tahmin edilen H_2S ’den hidrojen üretim projesidir. Bu H_2S ’den yaklaşık 3,29 trilyon m^3 hidrojen elde edilebileceği tahmin edilmektedir.

3.5. Elektrolizör Çeşitleri

Elektrolizörler, suyun içeriğinde olan hidrojen ve oksijen moleküllerini elektrik enerjisi kullanarak ayrıştırabilen ve bu sayede hidrojen ve oksijen üretebilen makinelerdir. Elektrolizörden çıkmış bir hidrojen, elektrolizörün kullandığı enerji kaynağına bağlı olarak karbondan arındırılmış bir ekosistem için çok önemli bir temel taşıdır.

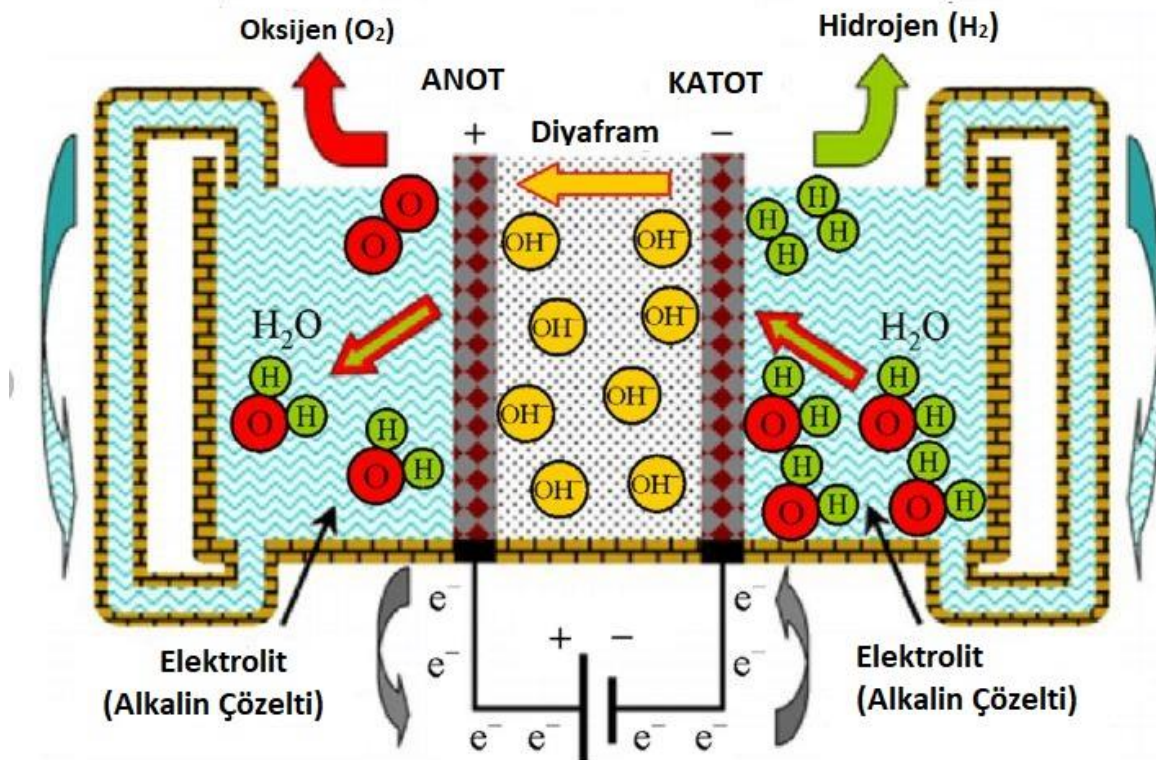
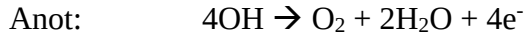
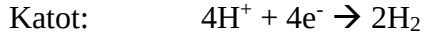
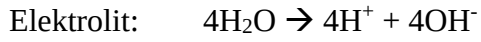
Elektrolizör ile hidrojen üretiminin en önemli noktası, elektrik enerjisi olarak kullanılan kaynakların kullanımları sonucunda emisyonların asgari şartlarda oluşması ve sıfır emisyon hedefine katkı sağlamasıdır. Bu bağlamda yeşil hidrojen üretimi ve hidrojen üretiminde kullanılan elektrolizörlerin verimliliği büyük önem taşımaktadır.

3.5.1. Alkalın elektrolizör

Yapısında kostik su çözelti ve %25-%30 oranında potasyum hidroksit (KOH) içeren elektroliz çeşididir. Katalizör görevi olarak sodyum klorür (NaCl), sodyum hidroksit (NaOH) kullanırlar. Bu sistemde sıvı elektrolit elektrotlar arasında iyonların geçişine izin verir ve kimyasal reaksiyonda tüketilmez. Ancak sistemdeki zamanla oluşan kayıplara bağlı olarak belirli aralıklarla sisteme ekleme yapılır.

Alkali elektrolizörler hidrojen üretim piyasadaki en yaygın kullanılan elektrolizör çeşididir. Proses sonrasında elde edilen hidrojenin saflık derecesi %99 civarındandır ve bu yüzden elde edilen hidrojene saflaştırmak için ekstra karmaşık bir uygulamaya gerek yoktur. Gerekli işlemlerin ardından elde edilen hidrojen yakıt pillerinde kullanılabilecek kaliteye ulaşmaktadır. Bu işlemde verim %75-80 arasındadır ve işlem için elektrot olarak kullanılan potasyum hidroksit oranı %25 ile %30 aralığındadır. Alkalın elektrolizler ayrıca düşük akım yoğunluklarında daha verimli bir çalışma göstermektedirler. Başlıca dezavantajı ise sıvı elektrolitin yüksek sıcaklıklarda yüksek miktarlarda korozyona uğraması sayılabilir. Bu yüzden kullanım zamanları oldukça kısadır ve bu sebeple sıklıkla yenilenir.

Alkali elektrolizörlerde gerçekleşen tepkimeler aşağıdaki gibidir;



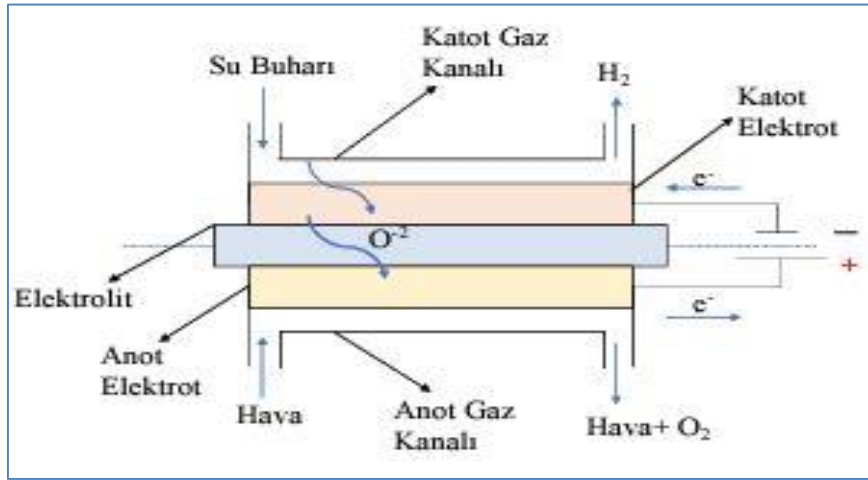
Şekil 3. 5. Bir alkalın elektroliz hücresinin çalışma prensibi

3.5.2. SOEC (Katı oksit elektroliz hücreli) elektrolizör

Katı oksit elektroliz hücreli elektrolizörler 500-850 °C gibi yüksek bir sıcaklık aralığında çalışırlar ve potansiyelleri çok büyüktür. Buhar elektrolizi veya yüksek sıcaklık elektrolizi olarak da isimlendirilirler. Hidrojen üretimi için oldukça verimli bir alternatiftir.

Bu yöntemde katı elektrolitler, oksit veya proton iletkenler kullanılırken sistem çok yüksek sıcaklıklarda çalışır. Büyük ölçüde daha verimli olan reaksiyon kinetiği ve elektrot reaksiyonlarıyla su elektrolizine göre oldukça avantajlıdır. Tüm bunlar sayesinde kayıpları sus elektrolizlerine göre oldukça küçüktür.

Yapı olarak yüksek sıcaklık yakıt hücrelerine benzer özellikler gösterirler. Katot kısmı genellikle Ni ve bir seramik oksit içeren tek sermetten oluşurken, elektrolit kısmı protonik iletken olarak SrCeO_3 ve anot kısmı ise çoğunlukla tek seramik oksitten oluşur.

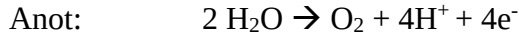
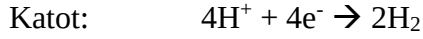


Şekil 3. 6. Katı oksit elektroliz hücresi çalışma prensibi

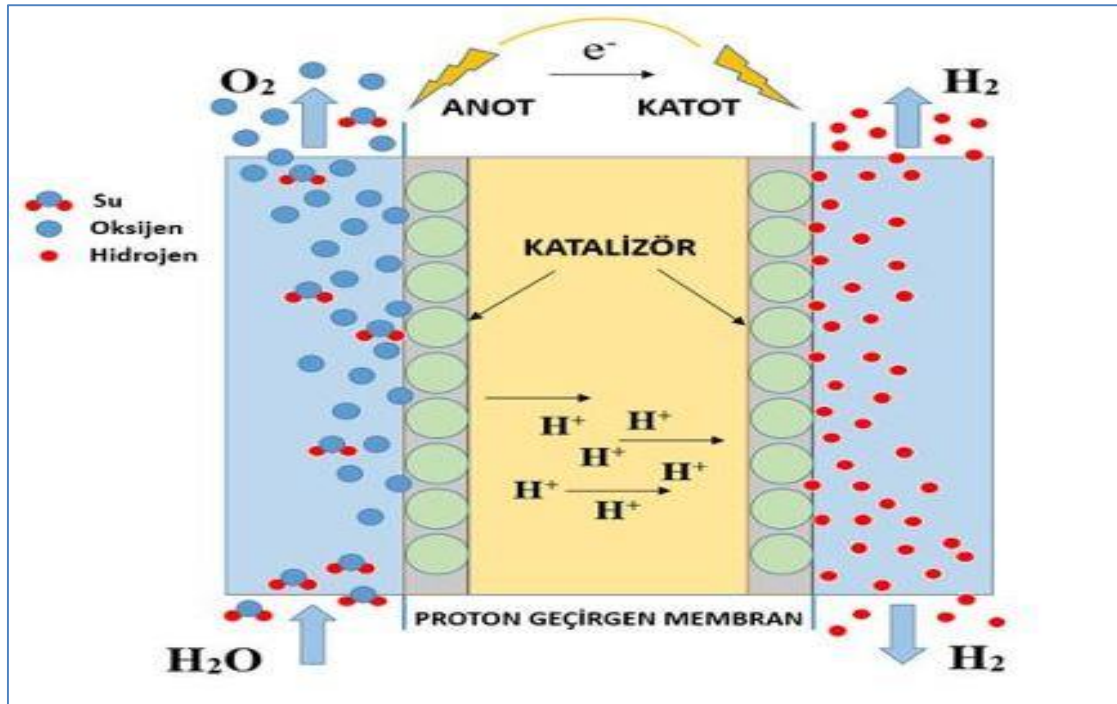
3.5.3. PEM (Proton değişim membran) elektrolizör

Sistem sadece protonların geçmesine izin veren bir polimer membran, oksijenin olduğu anot, hidrojenin olduğu katot katalizör tabakası ve elektriğin uygulandığı ve aynı zamanda sıvının ve gazların katalizör yüzeylerine iletilmesi ve uzaklaştırılması görevini yüklenen elektrot tabakalarından meydana gelmektedir. Anot girişinden PEM hücresine giren su, anot katalizör tabakasında meydana gelmiş hidrojen iyonu ve oksijen gazına ayrılmaktadır.

Oksijen gazı anot tarafından dışarıya atılırken hidrojen Nafion membranından geçerek katot kısmında elektron alır ve hidrojen gazına dönüşür. Bu süreçte meydana gelen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;



Anot bölgesinde membran yüzeyinde bulunan rutenyum, iridyum katalizör tabakasının etkisiyle su reaksiyonu sonucu oksijen elde edilir. Hidrojen ise elektron vererek katot bölgesine doğru gider. Bu geçiş süresince membranın kendi yapısı sebebiyle aynı zamanda su göçü de meydana gelir. Katot bölgesinde hücreye verilmiş olan elektrik sebebiyle hidrojen iyonları elektron alarak hidrojen gazını meydana getirir.

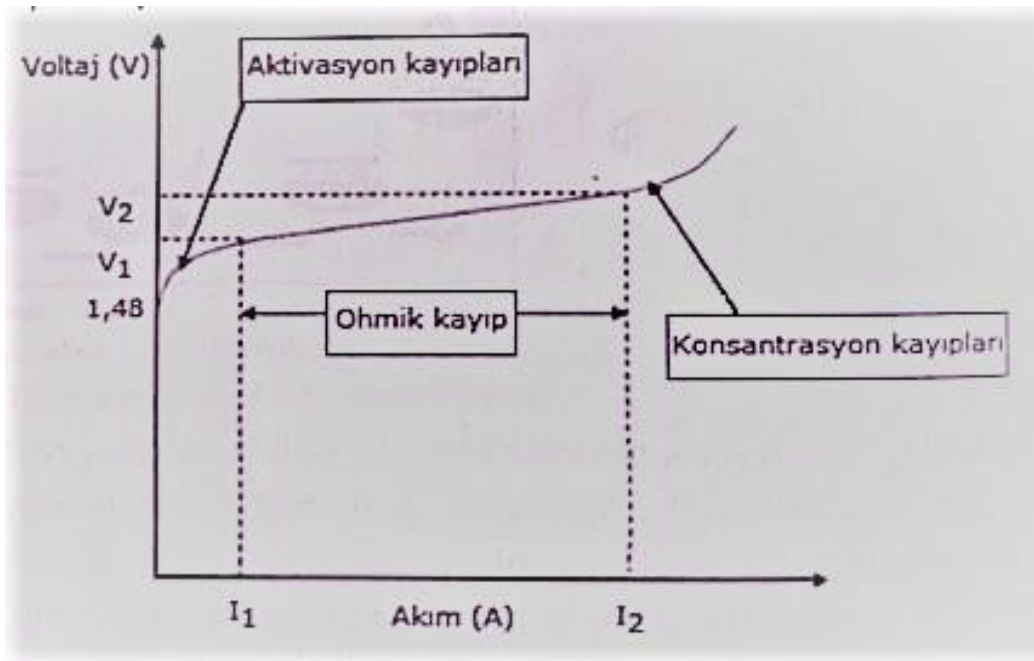


Şekil 3. 7. PEM elektrolizörünün çalışma prensibi [32]

Elektroliz için gerekli olan elektrik enerjisinin belli bir parçası hücre içerisinde gerçekleşen ohmik, konsantrasyon ve aktivasyon kayıpları yüzünden biçim değiştirerek ısı enerjisine

döner ve hücre içi sıcaklığı artırır. Ancak PEM hücresi içerisinde sürekli bir su sirkülasyonu olduğu için hücrenin soğumasını sağlar. Fakat tüm bunlar gerçekleşirken hücreye giren su debisi ve ısı geçiş koşulları hücre içerisinde belirli düzeyde sıcaklık artışına sebep olur. Bu sıcaklık artışı yapılan çalışmalarda performansa olumlu etki ettiğini göstermiştir. [32] Diğer yandan da sıcaklık arttıkça hücre içerisindeki metalik parçaların korozyon etkisi artmaktadır. Tüm bunlar yüzünden hücre sıcaklığının 40-60 °C seviyelerinde tutulması hücre için hem optimum performansı hem de optimum ömür için en uygundur.

Sıradan bir PEM hücreli elektrolizörde aşırı gerilim kayıplarının büyük bir kısmı oksijen gazının meydana geldiği anot tarafında yaşanmaktadır. Yüksek performanslı bir PEM elektrolizörün bu kayıplarını asgari seviyelerde tutacak katalizörlerin seçimleri, bu kayıpların önlenmesi için çok önemlidir.



Şekil 3. 8. PEM elektrolizörün polarizasyon eğrisi

Şekil 3.8'de bir PEM elektrolizörünün polarizasyon eğrişi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sisteme teorik voltaj (1,48 V) uygulandığında hiç akım çekilememektedir. Elektrolizörden akım çekilebilmesi (reaksiyon hızı) için çalışma voltajının teorik voltajdan daha fazla olması (voltaj kaybı) gerekmektedir.

Voltaj kaybı çekilen akıma bağlı olarak aktivasyon, ohmik ve konsantrasyon kayıplarından kaynaklanmaktadır. Bu kayıplar PEM elektrolizörde elektrot yüzeyinde gerçekleşen reaksiyon hızıyla alakalıdır. Elektroliz teorik voltajda gerçekleşmemekte, anot ve katot reaksiyonlarını gerçekleştirmek için sisteme teorik voltajın üzerinde bir voltaj uygulanması gerekmektedir. Uygulanan bu ekstra voltaj aktivasyon kaybı olarak adlandırılmaktadır.

Giriş gerilimi PEM hücresine uygulandığında voltaj düşüşü görülür. Bu düşüşler;

- Tersinir düşüş V_{ters}
- Aktivasyon kayıpları V_{act}
- Difüzyon kayıpları V_{dif}
- Ohmik kayıplar V_{ohm}

olarak karakterize edilir. Akımın lineer olmayan değişimlerinden bu kayıplar erkilenmemektedir.

$$U = V_{ters} + V_{act} + V_{dif} + V_{ohm} \quad (3.1)$$

Kararlı durum elektrik modelini oluşturabilmek için, her bir gerilim düşüşü tek tek incelenmelidir.

Tersinir gerilimde kimyasal redoks reaksiyonlarından meydana gelen gerilim düşüşü açık voltaj olarak adlandırılır. Akım çekilmiyorsa ($I=0$) tersinir gerilim, hücre potansiyelini gösterir. Tersinir gerilim V_{ters} Gibbs enerjisinden hesaplanır ve aşağıda verildiği gibi Nerst denklemiyle belirlenebilir:

$$V_{ters} = V_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \quad (3.2)$$

Burada $R=8,314$ j/molK evrensel gaz sabiti, $F=96487$ C/mol Faraday Sabiti, $V_0=1,23$ V tersinir gerilim, $a_{H_2O}=1$ (sıvı) su aktivitesi, P_{H_2} hidrojen kısmi basıncı ve P_{O_2} oksijen kısmi basıncıdır.

Aktivasyon gerilim kayıpları ise elektrokimyasal kinetik davranışlarıyla gösterilen kayıplardır. Proton transferi ve kimyasal reaksiyon hızından kaynaklanmaktadır. Aktivasyon gerilim kayıpları V_{act} , Butler-Vormer ve Tafel yasalarından belirlenebilir. Akımın fonksiyonu olarak V_{act} bir elektrolizör için aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$V_{akt} = \frac{RT}{anF} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (3.3)$$

Burada a transfer katsayısı ve I_0 değişim akımıdır.

Difüzyon gerilim kayıpları ise elektrotlara yakın akışkan (gaz ve su) konsantrasyonu ve difüzyon mevcut akım değerlerini etkiler. Elektrotların yakın difüzyon mevcut değerlerini etkilemektedir. Difüzyon davranışları kısmi basınç ve kimyasal reaksiyon hızlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim difüzyon kayıplarına V_{dif} neden olmaktadır.

$$V_{dif} = \frac{RT}{\beta nF} \ln \left(1 + \frac{I}{I_{lim}} \right) \quad (3.4)$$

Burada β ve I_{lim} sabit katsayı ve difüzyon akımının limitidir.

Ohmik gerilim kayıplarının temel sebebi ise seçici R_{mem} polimer membrandır. Direnç değeri genellikle Springer ve diğerleri tarafından önerilen amprik eşitliklerle verilir. Denklemden verildiği R_{mem} seçici membran alanının A_m (cm²) bir fonksiyonu, membran kalınlığı I_m (cm), hidrasyon hızı I_m (=7 kuru, =14 iyi hidrasyon, =22 ıslak) ve sıcaklık T ;

$$R_{mem} = \frac{I_m}{A_m \cdot (0,005139 \cdot \lambda_m + 0,00326) \cdot \exp \left(1267 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right)} \quad (3.5)$$

Ohmik kayıplar şöyle verilebilir;

$$V_{ohm} = R_{mem} I = \frac{I_m}{A_m (0,005139 \lambda_m + 0,00326) \exp \left(1267 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right)} I \quad (3.6)$$

Gerilim kayıpları yerlerine yazılarak elektriksel model aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$U = V_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) + \frac{RT}{\beta n F} \ln \left(I + \frac{I}{I_{lim}} \right) + R_{mem} I \quad (3.7)$$

Hidrojen akışı g/s olarak verilirse;

$$F_{H_2} = \frac{I}{2F} \quad (3.8)$$

Elektrolizör hücre sıcaklığı U v I arasındaki ilişkiden etkilenir. Sıcaklık davranışı ve termal model oluşturmak için, tüm ısı kaynaklı tanımlanır. 4 temel ısı gücü varsayılmıştır. Bunlar; kimyasal reaksiyon (entropi) kimyasal bileşen termodinamiği (gaz ve su), dış çevre sıcaklığı T_a ve akımdan kaynaklı Joule etkisidir.

Termal model oluşturmak için ısı enerjisi korunumu ilkesi kullanılmıştır. Kimyasal reaksiyon ısı enerjisinin hesaplanabilmesi için termonötral hücre voltajı $V_{th}=1,48$ V kullanılmıştır.

Bu gerilim sabit kalmakta veya sıcaklık etkisi ile çok az değişmektedir. Ayrıca Joule etkisi ihmal edilir ve T_a sıcaklığı sabit kabul edilir. Termal modelin sürekli dinamik denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$V_{th} = \frac{\Delta H}{2F} \quad (3.9)$$

$$C_p \frac{d(T - T_a)}{dt} = (U - V_{th})I - h(T - T_a) \quad (3.10)$$

Burada C_p (J/K), h (W/K), u ($U - V_{th}$), I ve h ($T - T_a$) sırasıyla elektrolizör ısı kapasitesi, elektrolizör toplam ısı girişi, kimyasal reaksiyon ile üretilen ısı transfer hızı (entropi enerjisinden), dış sıcaklık ve akış kaynaklı ısı transfer hızını göstermektedir.

Varsayımlarla u , $x=(T - T_a)$ ve $y=x$ dinamik termal model giriş, hal ve çıkış değerleridir. Sürekli durumda hal ve çıkış denklemleri birinci dereceden lineer dinamik modeli tarafından verilmektedir;

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\frac{h}{C_p}x + \frac{1}{C_p}u \\ y = x \end{cases} \quad (3.11)$$

Elektriksel ve dinamik ısı modeller PEM elektrolizörün modellenmesini sağlamaktadır.

4. SAYISAL MODELLEME

Günümüzde bilgisayar teknolojinin hayatımızın merkezine yerleşmesiyle birlikte herhangi bir ürün üretilme aşamasına gelmeden bilgisayar ortamında tasarlanıp, bunun için geliştirilmiş farklı yazılımlar kullanılarak tasarımı oluşturan bileşen ve parametrelerle test edilip optimum sonuçlara ulaşabilmek mümkündür.

Üretim ve hammadde maliyetlerinin yüksek olması, küresel rekabetin her alanda çok yüksek seviyelere çıkması modelleme ve simülasyon araştırmalarını ve yatırımlarını zorunlu kılmaktadır. Sanal ortamda gerekli ön analizleri yapılan bileşenler ARGE sürecince oluşacak hataları en aza indirgenmesine sebep olmakla birlikte, herhangi bir tasarım hatasından oluşacak üretim maliyetlerinin de önüne geçmektedir.

Bilgisayar destekli nümerik analizler günümüzde mühendisliğin her alanında uygulanmakta olup, gelişmiş teknolojileri ile deneysel sonuçlara çok yakın sonuçlar vermekte ve üretim sonrası geleceğe bakmamıza yardımcı olmaktadır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), yaygın kullanılan İngilizce ismi Computational Fluid Dynamics (CFD), mühendislik proseslerinde kullanılan çeşitli analiz programlarından biridir. HAD analizlerinde akışkanların davranışları incelenmekte olup, momentum, ısı geçişleri, kimyasal tepkimeler gibi birçok uygulama bu başlık altındadır. HAD uygulamalarını nümerik yaklaşımlarla bir düşünmek gerekir. İncelemesi yapılacak olan konunun yalnızca fiziksel özelliklerini değil aynı zamanda matematiksel modellerini ve nümerik yaklaşımlarını da bilmek gereklidir.

Bu çalışmada bir PEM elektrolizör hücresinin, bilgisayar ortamında modellenmiş üç boyutlu hali üzerinde belirli parametrelerle, COMSOL Multiphysics yazılımı ile, birim hidrojen üretim miktarları incelenmiş, bu üretim miktarının basınç, hız ve kütle ortalamalı hız verilerine göre kıyaslamaları yapılmıştır. Bu analiz boyunca fiziksel değişimler, kütle, momentum, enerji vs belirli denklemlerin çözümleri ile temsil edilmektedirler.

Bu problemin ana denklemlerinden bakılacak olursa;

4.1. Süreklilik Denklemi

Süreklilik denklemi koruma yasalarının daha özel biçimidir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (4.1)$$

ρ yoğunluğu, u hız vektörünü ve t ise zamanı ifade etmektedir.

4.2. Momentum Denklemi

Momentum korunum denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p - \nabla \cdot [(\rho C_d(1 - C_d))u_{\text{slip}} u_{\text{slip}}] + \nabla \cdot (\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) + \rho g + F_{\text{drag}} \quad (4.2)$$

Burada u , ρ , μ ve sırasıyla hız, yoğunluk ve g sırasıyla hız, yoğunluk, viskozite ve yerçekimi ivmesini temsil etmektedir.

4.3. Karışım Hızı Denklemi

Tepkime sonrası oluşan gazların karışım hızlarının denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$u = \frac{\phi_c \rho_c u_c + \phi_d \rho_d u_d}{\rho} \quad (4.3)$$

Burada ϕ hacim fraksiyonunu temsil eder. Ayrıca “c” indisi (continuous) sürekliliği belirtirken, “d” indisi (dispersed) ise dağınık-dağılmış hali temsil etmektedir.

4.4. Kütle Ortalamalı Hız Denklemi

Tepkime sonrası oluşan gazların ve parçalanmadan kalan sudan oluşan karışımın kütle ortalamalı hızlarının denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\vec{v}_m = \sum \alpha_k \rho_k \vec{v}_k / \rho_m \quad (4.4)$$

Burada ρ_m karışım yoğunluğunu ifade eder. Karışım yoğunluğunun matematiksel modeli ise aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\rho_m = \sum \alpha_k \rho_k \quad (4.5)$$

Buradaki α_k ise k fazının hacim oranını göstermektedir.

4.5. Karışımın Yoğunluk ve Viskozite Denklemi

$$\rho = \rho_d \phi_d + \rho_c \phi_c \quad (4.6)$$

$$\mu = \mu_d \phi_d + \mu_c \phi_c \quad (4.7)$$

Burada c indisi süreklilik, d indisi ise dağınlıklığı ifade eder. ρ , μ ve ϕ ise sırasıyla yoğunluk, viskozite ve hacim fraksiyonunu temsil etmektedir.

4.6. Dağınlık Faz Kütle Oranı Denklemi

$$C_d = \frac{\rho_d \phi_d}{\rho} \quad (4.8)$$

Burada ρ_d dağınlık fazın yoğunluğunu, ϕ_d ise dağınlık hacim fraksiyonunu temsil etmektedir.

4.7. Sürüklenme Kuvveti Denklemi

$$F_{\text{drag}} = -\frac{3}{4} \frac{C_{\text{drag}} \rho_c}{d_b} |u_d - u_c| (u_{dd} - u_c) \quad (4.9)$$

şeklinde ifade edilir. Burada C_{drag} ifadesi ise sürtünme katsayısıdır. Sürtünme katsayısı ise aşağıdaki formül ile bulunabilir;

$$C_{\text{drag}} = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & Re_p \leq 1000 \\ 0.44 & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (4.10)$$

Sürtünme katsayısı denkleminin içerisinde bulunan Re_p ise aşağıdaki denklem ile bulunabilir.

$$Re_p = \frac{d_b \rho_c}{\mu} |u_{\text{slip}}| \quad (4.11)$$

Eşitlikte yer alan u_{slip} ifadesi kayma hızı ifade etmektedir.

4.8. Dağınık Faz Hali İçin Taşıma Denklemi

$$\frac{\partial(\phi_d \rho_d)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_d \rho_d u_d) = -m_{dc} \quad (4.12)$$

Eşitlikte yer alan m_{dc} ifadesi fazlar arasındaki kütle aktarım oranını ifade etmektedir.

5. MATERYAL VE METOT

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği 4 ana aşamadan oluşur. Bunlar problemin tespiti, ön işlemler (geometri, mesh), çözüm (solution) ve son işlemler (post-processing)'dir.

Problem tespitinin isabetli olması HAD için oldukça önemlidir. Neyin araştırılmak istendiği, analizden neler beklendiği net bir şekilde belirlenmeli ve süreç boyunca çeşitli sebepler yüzünden modellemedeki sınırlamaların analize olan etkisi incelenirken, kontrollü bir şekilde hem modeller hem de beklentiler değiştirilmelidir. Problem tespit sürecinin sonunda yapılmış olan analizin üretim sürecini ve maliyetlerini doğrudan etkileyebileceği unutulmamalı, ilk adım olan bu aşamada hata yapılmamalıdır.

Ön işlemlerde ise oluşturulan geometri sadece ilgilenilen alan ile ilgili olmalıdır ve bu bölge dışında modelde olan kısımların çözüm sürecinde zaman kaybı olacağı unutulmamalıdır. Gereksiz kısımlarla beraber gereksiz bağlantıları, kısımlar ve boşluklar da geometri kısmında olmamalıdır. Diğer bir deyişle oluşturulan geometri oldukça sade olmak zorundadır. Çünkü bunlarla beraber çözümün süresi, mesh adedi çözüm kalitesini direkt olarak etkileyen unsurlardır.

Çözüm kısmında kullanılan paket programın nümerik olarak oluşturulmuş mesh ağına uygun şekilde yinelemeli çözüm yapıldığı kısımdır. Çözüm boyunca kullanıcı nümerik sonuçları takip eder, değerlendirir ve gerekli yerlerde prosese müdahale eder.

Son işlemler kısmında ise bitmiş nümerik hesaplamaların kontrol edilip, problem tespitine göre ilgilenilen alanların çıktısının alındığı bölümdür. Alınan çıktıların ne kadar beklentileri karşıladığı, gerçekçi olup olmadıkları sorgulanmalıdır. Tahmin edilemeyen sonuçlarda ise modelleme hatalarının sonuçlar üzerinde büyük etkisi olabileceği unutulmamalıdır.

5.1. PEM Elektrolizör Hücresi Geometrisinin Oluşturulması

Bu çalışmada COMSOL Multiphysics paket programı kullanılarak bir PEM elektrolizör hücresi modeli meydana getirilmiştir. Model oluşturulurken COMSOL resmi sitesinde bulunan geometri oluşturma rehber dokümanından faydalanılmıştır. Model sihirbazı açılıp, daha önce hazırlanmış olan parametreler kısmı model sihirbazına txt uzantılı olarak içine aktarıldıktan sonra çalışma düzlemi oluşturulmuştur. Oluşturulan çalışma düzleminde geometride yer alan geometrik şekiller tanımlanarak boyutlandırılmıştır. Daha sonra sırasıyla giriş manifoldu, çıkış manifoldu, kanallar, kanallar altında kalan elektrot yüzeyleri, sıvı su girişi ağzı, gaz çıkışı ağzı, elektrot kanallarının dış sınırları, giriş manifoldunun dış sınırları, elektroliz kanallarının giriş ve çıkışları, manifoldların dış sınırları, giriş ve çıkış ağzlarının dış sınırları tanımlanmıştır.

Çizelge 5. 1. Model Parametreleri

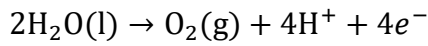
Elektrot Kanal Sayısı	23
Elektrot Kanal Uzunluğu	$118 \cdot h_a$
Giriş ve Çıkış Ağzı Açıları	22.5[deg]
Kanal Yüksekliği	0.889[mm]
Giriş ve Çıkış Ağzı Kanal Uzunluğu	2[cm]
Giriş Ağzı Radyüsü	$1.27[\text{cm}]/2$
Kanal Genişliği	2.07[mm]
Giriş Ağzı Su Akış Debisi	260[ml/min]
Elektrot Kanal Sayısı(full cell)	23
Giriş Su akış Oranı Formülü	$\text{Flow_rate_full_cell} \cdot N_{\text{ch}}/N_{\text{ch_full_cell}}$
Net Hidrojen Üretimi	0.625[mg/s]
Hidrojen Gazı Baloncukları Ortalama Çapı	50[μm]
Hidrojen Gazı Yoğunluğu	$2.016[\text{g/mol}] \cdot 1[\text{atm}]/R_{\text{const}}/25[\text{degC}]$
Başlatma ve Bitiş İçin Zaman Parametresi	0-10[s]

23 kanallı PEM elektrolizör hücresinin parametreleri Çizelge 5.1.'de verilmiştir. Bu çalışmada Çizelge 5.1.'de verilmiş parametrelere göre oluşturulmuş geometrinin yanı sıra 11 adet daha geometri oluşturulmuş ve hepsinin HAD analizi ayrı ayrı yapılmıştır.

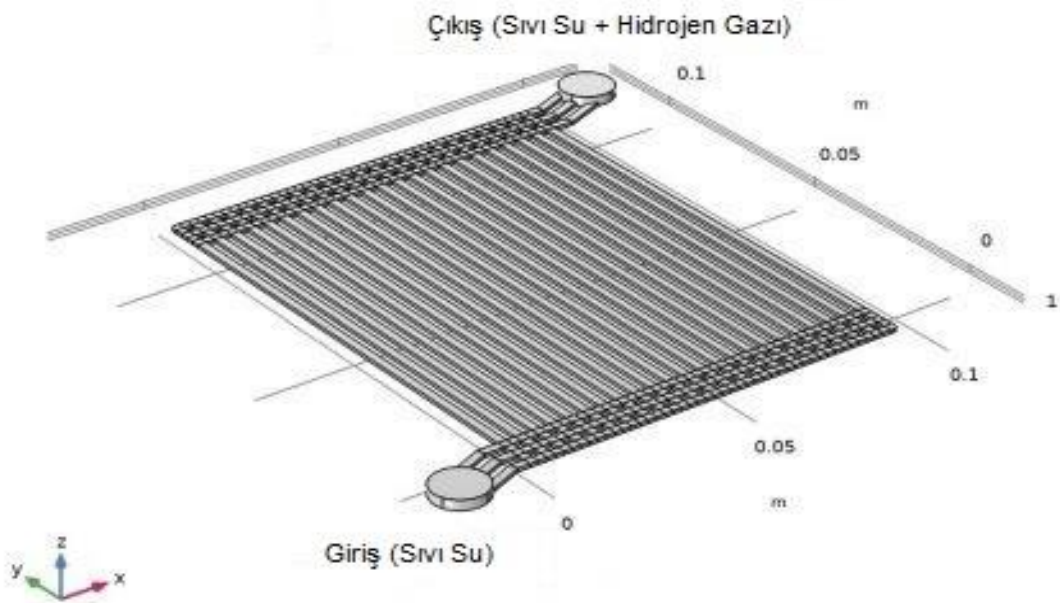
Kanal sayıları 23-10-5-3 ve kanal uzunlukları $118 \cdot h_a$, $(118 \cdot h_a)/2$ ve $(118 \cdot h_a)/3$ olacak şekilde toplam 12 geometri ve dolayısı ile 12 farklı akış analizi vardır. PEM elektroliz

hücresinin kanal sayıları ve kanal uzunlukları değiştirilerek, ayrı ayrı mesh Şekil 5. 1. örgüsü düzenlenip ayrı ayrı çözümleri yapılmıştır.

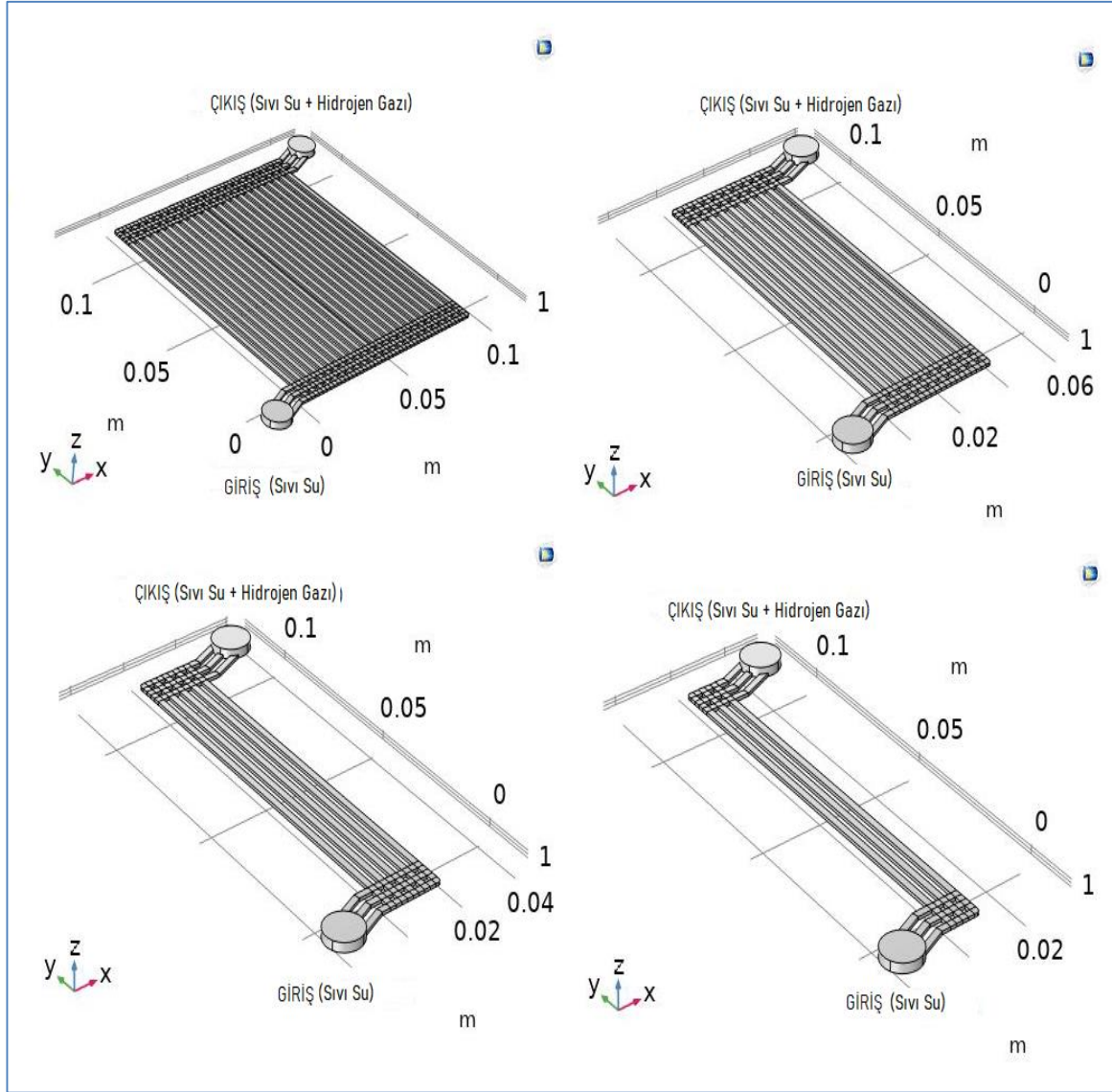
Model, sürekli fazı tanımlayan sıvı su ve dağınık fazı hidrojen gazı kabarcıkları olan karışım modeli, laminar akış arayüzü kullanılarak kurulur. Sıkıştırılamaz ve izotermal koşullar varsayılmıştır. Sıvı suyun giriş akış hızı 260 ml/dk'dır. Bu, bir giriş sınır koşulu olarak tanımlanır. Aşağıdaki tepkimeye göre elektrot yüzeyi/kanal sınırlarında sıvı su tüketilir ve hidrojen gazı üretilir.



Protonlar, iki elektrot bölmelerini bölen polimer membrandan elektrolizör hücresinin katot tarafına taşınır. Üretilen gazlara (oksijen ve hidrojen) ek olarak, elektrot yüzeyi/kanal sınırlarında proton taşınması nedeniyle net bir kütle çıkışı vardır. Kombine hidrojen gazı üretimi/toplam kütle çıkışı, toplam hidrojen üretiminin 0,625 mg/s olduğu varsayılarak bir giriş sınır koşulu düğümü kullanılarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.1. 23 Kanallı PEM elektrolizör hücresinin üç boyutlu genel görünümü

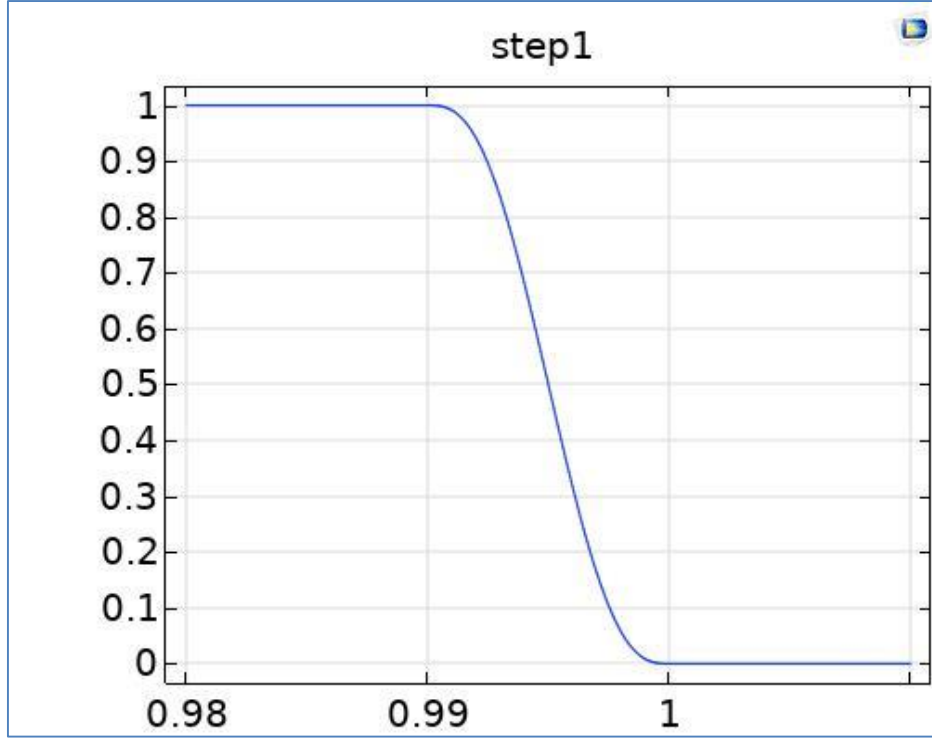


Şekil 5. 2. Sırasıyla 23-10-5-3 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin üç boyutlu genel görünüşleri

Model oluşturulurken geometri olabildiğince parçalara ayrılmış ve sınırlandırma yapılmasında iş yükü bu sebeple hafif olmuştur. Ayrılan geometri alanları: giriş manifoldu, çıkış manifoldu, elektrot yüzeyi, elektrot yüzeyi üzerindeki kanallar, giriş ağzı, çıkış ağzı. Daha sonra oluşturulmuş geometrinin sınır koşulları, başlangıç koşulları tanımlanmıştır.

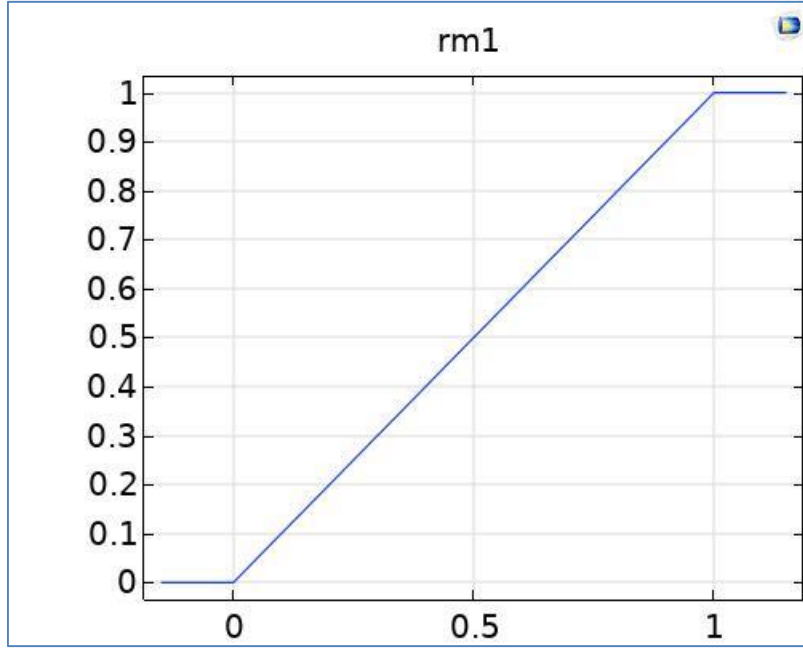
Giriş ağzından 0,625 mg/s debili su girişi olduğu varsayılarak, programa bir giriş sınır koşulu tanımlanmıştır. Çıkış ağzı tarafında ise akış hızı yerine bir basınç koşulu getirilmiştir. Diğer tüm sınırlar için sabit bir sınır (duvar-wall) koşulu tanımlanmıştır. Son olarak, hücrenin her yerinde -z yönünde bir yerçekimi vektörü tanımlanır.

Simülasyon 2 ayrı adımda analiz edilmiştir. İlk adım olarak hidrojen üretimi olmayan tek fazlı durgun akış sistemidir. Bu çözüm bittiğinde, daha sonra hidrojenin üretileceği iki fazlı akış için başlangıç koşullarını içerir. 10 saniye süren iki fazlı akış simülasyonu, tek fazlı akış tamamlandıktan sonra başlar.



Şekil 5. 3. Adım Fonksiyonu

Adım fonksiyonu, gaz hacmi oranı yaklaştığında oksijen akışını yerel olarak sıfıra ayarlamak için kullanılır. Akıda ayrı sıçramalardan kaçınmak için yumuşatma önemlidir. Büyük modellerde yumuşatma oranı 0.995 seçilmişken, kanal sayısı ve kanal boyları daha ufak olan küçük modellerde 0,95 kullanılmıştır.



Şekil 5. 4. Rampa Fonksiyonu

Rampa fonksiyonu, zamana bağlı çözücü başladığında hidrojen akışını sıfırdan yükseltmek için kullanılır. Bu hesaplama süresini kısaltır.

Geometri COMSOL Multiphysics yazılımının Fluid Flow ana modülü içerisindeki Multiphase Flow, Mixture Model, Mixture Model Laminar Flow modülünde oluşturulmuş ve çözdürülmüştür. Giren su debisine ve kanal özelliklerine göre akış laminardır.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (5.1)$$

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{1000 \times 1.3 \times (2 \times 0.889 \times E-3)}{E-3} = 2300$$

Burada ρ akışkanın yoğunluğu, u akışkanın hızı, μ ise akışkanın dinamik viskozite değeridir.

5.2. PEM Elektrolizör Hücresinin Ağ Yapısının (MESH) Oluşturulması

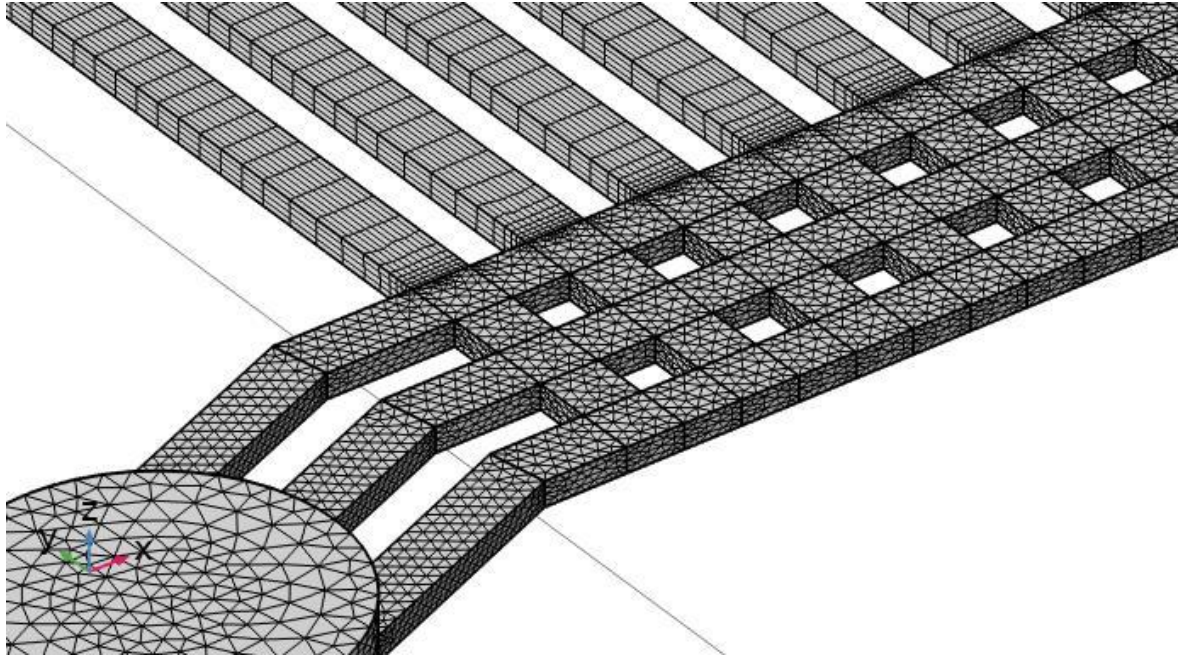
COMSOL Multiphysics de diğer sonlu elemanlar temelli programlar gibi oluşturulan modeli daha küçük parçalara ayırıp nümerik olarak hücre hücre ilerleyip çözüme ulaşır. Bu işleme ayrıştırma (discretization) denir. Bölünen her parça kendi içerisinde bir bütündür. Bu elemanlardan her birine mesh denir.

Doğru ve hassas bir çözüm yapabilmek için doğru mesh uygulaması çok önemlidir. Mesh türü ve sayısı, çözüm süresi ve doğruluğuna direkt olarak etki eder. Bu sebeplerden dolayı özellikle aranan sonuçların gözlemleneceği yerler ve değişimlerin fazla olduğu bölgelerde daha ince, daha küçük ve hassas meshler kullanılır. Kullanılan mesh türüne göre oluşturulan sayısal ağ modeli; keskinlik, ölçülerin oranı gibi parametreler kullanılarak mesh kalitesi hakkında bilgi sahibi olmak önemli bir noktadır.

Karışık geometrilere ve sınır tabakalarının çok olduğu modellerde daha özel tanımlamaların olduğu çalışmalarda mesh tipi de dikkate alınacak bir konudur. Kesin analize geçmeden hemen mesh ağından bağımsızlık elde edilmesi gerekir. Sayısal mesh miktarı ve kalitesine göre artık bir noktadan sonra alınan sonuçlar neredeyse değişmiyorsa, problem için yeterli düzeyde mesh ağı oluşturulmuş demektir. Gerektiğinden daha sık oluşturulan mesh ağları sadece probleminin çözümünün uzamasına neden olmaktadır.

HAD analizlerinde düzgün ve kaliteli mesh, çözüm sonuçları için çok önemlidir. Oluşturulmuş 12 modelde de iki farklı ağ tipi kullanılmaktadır. Manifold giriş ve çıkış kısımları üçgen meshlerden oluşturulmuştur. Elektroliz kanalları ince kare ağlardan oluşur. Şekil 5.3' de giriş, giriş manifoldu ve elektroliz kanallarının ağ örgüsü yapısı gösterilmiştir.

Bu çalışmada her bir modelde aynı mantıkla mesh ağları oluşturulmuş olup, oluşan mesh ağlarının istatistikleri Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'de verilmiştir. Çizelge 5.2'de 3 ve 5 kanallı elektrolizörlerin 3 ayrı kanal boyuna göre mesh istatistikleri, Çizelge 5.3'de ise 10 ve 23 kanallı elektrolizörlerin 3 ayrı kanal boyuna göre mesh istatistikleri verilmiştir.



Şekil 5. 5. Mesh Örgüsü

Çizelge 5. 2. 3 ve 5 kanallı PEM hücrelerinin farklı kanal uzunluklarına göre mesh istatistikleri

	3			5		
	L_ch	L_ch/2	L_ch/3	L_ch	L_ch/2	L_ch/3
Vertices	39605	31423	28680	57955	44242	39506
Tetrahedra	103384	104614	104795	133258	134864	134315
Pyramids	240	240	240	400	400	400
Hexahedra	13080	6960	4920	21800	11600	8200
Triangle	19122	19336	19430	25968	26204	26314
Quads	9396	5112	3684	15660	8520	6140
Edge Elements	3726	3138	2937	5574	4578	4241
Vertex Elements	214	214	214	310	310	310
Number of Elements	116704	11814	109995	155458	146864	142915
Min element Quality	0.1177	0.1122	0.1295	0.13	0.1228	0.1028
Average Element Quality	0.5743	0.5492	0.5404	0.5887	0.5571	0.5486
Element Volume Ratio	0.001449	0.001512	0.003122	0.001846	0.003117	0.001982

Çizelge 5. 3. 10 ve 23 kanallı PEM hücrelerinin farklı kanal uzunluklarına göre mesh istatistikleri

	10			23		
	L_ch	L_ch/2	L_ch/3	L_ch	L_ch/2	L_ch/3
Verticles	103661	75774	66460	222857	158005	136726
Tetrahedra	206759	207302	207642	400116	398055	399260
Pyramids	800	800	800	1840	1840	1840
Hexahedra	43600	23200	16400	100280	53360	37720
Triangle	43170	41468	43482	87862	87826	87834
Quads	31320	17040	12280	72036	39192	28244
Edge Elements	101194	8178	7495	22206	17514	15950
Vertex Elements	550	550	550	1174	1174	1174
Number of Elements	251159	231302	224842	502236	453255	438820
Min element Quality	0.0939	0.1308	0.1119	0.1288	0.1286	0.1099
Average Element Quality	0.6029	0.5697	0.555	0.6154	0.5783	0.5621
Element Volume Ratio	0.002518	0.001919	0.002925	0.001691	0.002025	0.001651

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada bir PEM elektrolizör hücresi farklı kanal sayılarında ve farklı kanal uzunluklarında toplam 12 model olarak oluşturulmuş ve tüm modellerde hız, basınç ve gaz hacim fraksiyonları incelenmiştir. Bunlarla birlikte her geometrinin aynı su girişi debi değerinde performansları incelenmiştir.

HAD analizleri ilk olarak 23 kanallı hücre ile başlamıştır. 23 kanallı PEM hücresinin ilk olarak tam kanal boyu olanı analiz edilmiştir. Ardından kanal boyu yarı ya düşürülerek başka bir model oluşturulmuş ve çözülmüştür. Son olarak kanal boyu üçte birine düşürülerek 23 kanallı olan son PEM hücresi oluşturulmuş ve çözülmüştür.

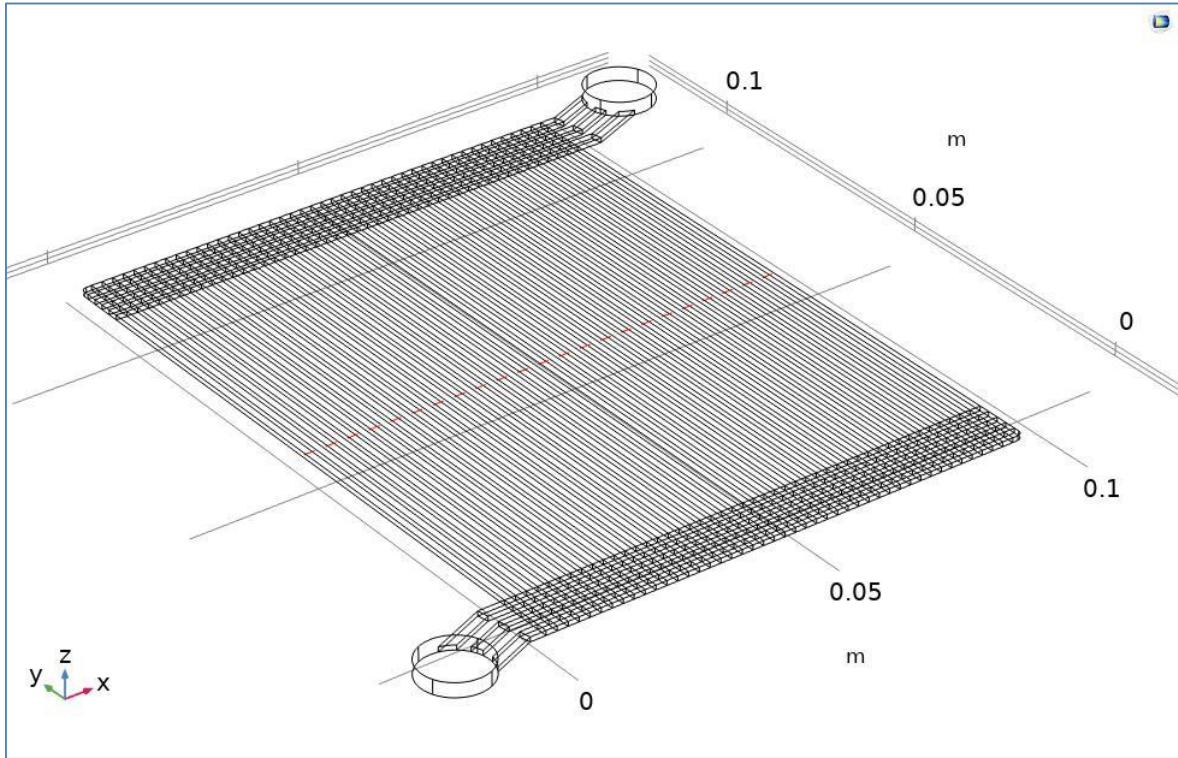
23 kanallı PEM hücre analizleri bittikten sonra 10 kanallı hücrenin çözümüne geçilmiştir. İlk olarak 10 kanallı ve tam kanal boyu uzunluğundaki hücre çözülmüştür. Ardından kanal boyu yarıya indirilmiş yeni geometri oluşturulup çözülmüştür. 10 kanallı hücrelerin sonuncusu olarak kanal boyu üçte birine indirilen model hazırlanıp çözülmüştür.

23 ve 10 kanallı modeller çözüldükten sonra nispeten çözülmesi daha süren 5 ve 3 kanallı modellerin oluşturulması ve çözümüne geçilmiştir. Önce 5 ve 3 kanallı modellerin tam boyutları modellenip çözülmüştür. Ardından kanal boyları yarıya ve üçte birine indirilip aynı anda, ayrı ayrı çözdürülmüştür. Modellerde kanal sayılarının 23 ve 10 kanallılara göre daha düşük olması sebebiyle aynı anda iki çözüm açılabilmiştir. Çizelge 3.1’de her bir modelin Intel i7 7. Nesil bir işlemcili bilgisayarda çözüm zamanları gösterilmiştir.

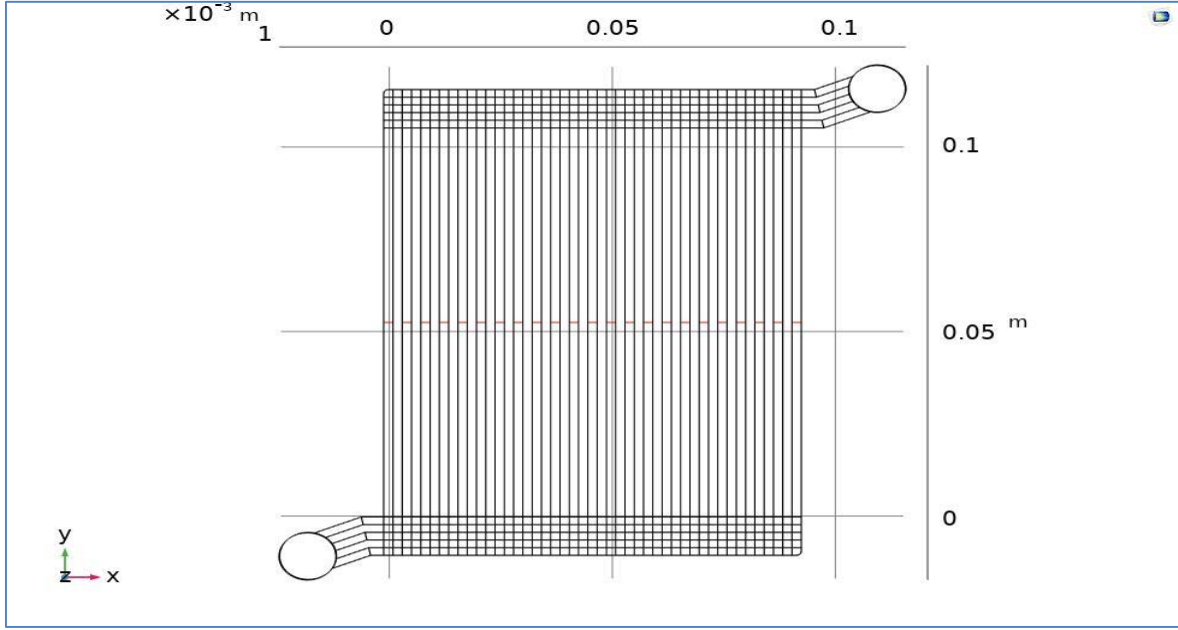
Çizelge 6. 1. Çözülen tüm modellerin çözüm süreleri

		Çözüm Tamamlanma Zamanı
3 Kanal	L_ch	2 saat 53 dakika 14 saniye
	L_ch/2	1 saat 9 dakika 33 saniye
	L_ch/3	41 dakika 6 saniye
5 Kanal	L_ch	3 saat 27 dakika 8 saniye
	L_ch/2	1 saat 10 dakika 27 saniye
	L_ch/3	46 dakika 42 saniye
10 Kanal	L_ch	8 saat 1 dakika 43 saniye
	L_ch/2	3 saat 56 dakika 46 saniye
	L_ch/3	3 saat 34 dakika 51 saniye
23 Kanal	L_ch	43 saat 23 dakika 8 saniye
	L_ch/2	22 saat 30 dakika 38 saniye
	L_ch/3	9 saat 57 dakika 33 saniye

Bu kısımda COMSOL yazılımında çözülen problemde çeşitli parametrelerde, çeşitli değerler okunmuştur. Bu değerlerin okunma yerlerine göre program içerisinde belirli datasetler oluşturulmuş ve bu datasetlerin tanımlanmış koordinatlarına göre değerler okunmuştur. Çalışma boyunca “Çözüm 1” ve “Çözüm Deposu 1” dışında Üç Boyutlu Kesim Çizgisi, Giriş Manifold ve Çıkış Manifold isimlerinde datasetler tanımlanmıştır.



Şekil 6. 1. Üç boyutlu kesim çizgisinin 3 boyutlu görüntüsü



Şekil 6. 2. Üç boyutlu kesim çizgisinin xy eksenini boyunca görüntüsü

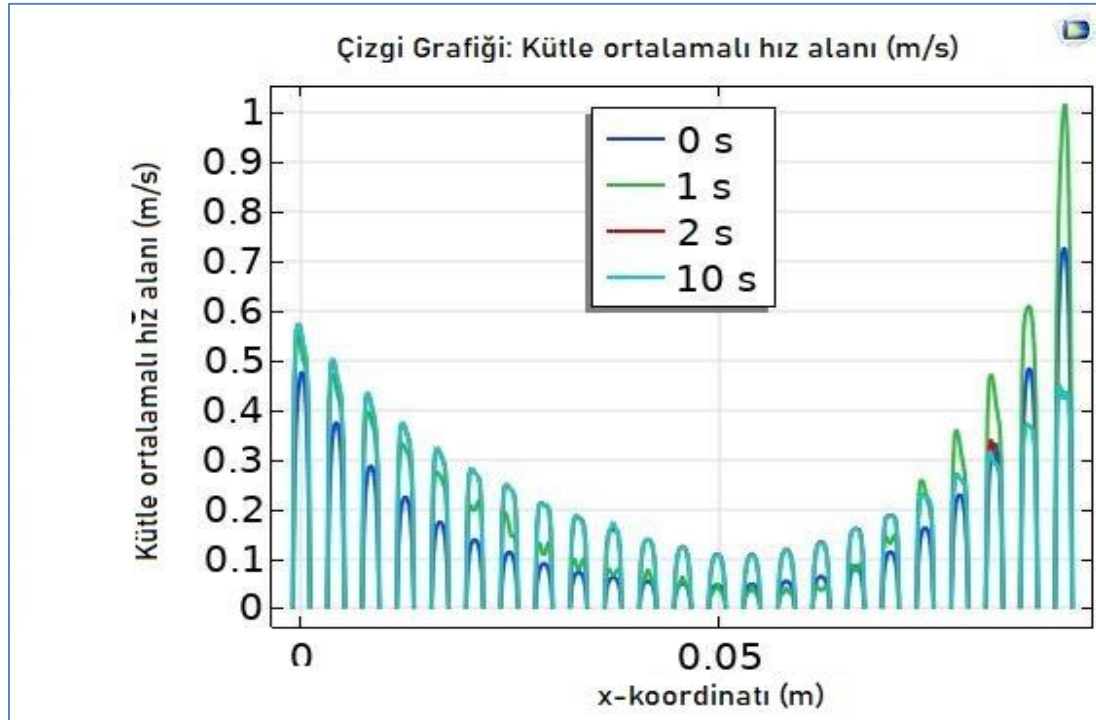
Üç boyutlu kesim çizgisinin geometri üzerindeki konumu Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de görülmektedir. Giriş Manifold Kesim Çizgisi ise giriş manifoldunun bittiği ve elektroliz kanallarının başladığı yerdedir. Aynı mantıkla Çıkış Manifold Kesim Çizgisi ise çıkış manifoldunun başladığı ve elektroliz kanallarının bittiği yerdedir.

6.1. 23 Kanallı PEM Elektrolizör Hücresinin Analizi

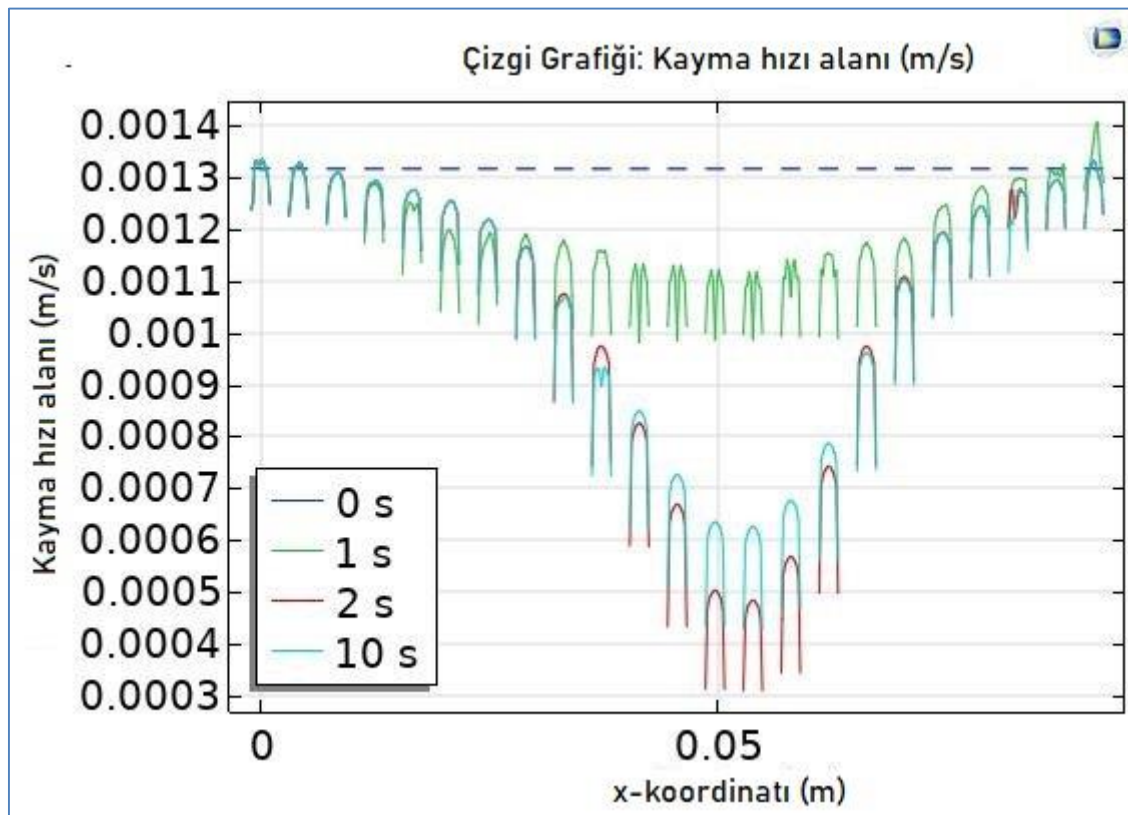
Bu bölümde 23 kanallı PEM elektrolizör hücresinin, kanal uzunlukları farklı olan 3 ayrı geometrisi aynı su girişi debisi ve aynı sıcaklıkta analiz edilmiş ve farklılıkları araştırılmıştır. Analiz edilen 23 Kanallı hücrelerin elde edilen çözüm sonucunda içerisinde oluşan hız vektörleri, gaz hacim fraksiyonu ve basınç dalgalanmaları araştırılmıştır.

6.1.1. 23 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin hız analizi

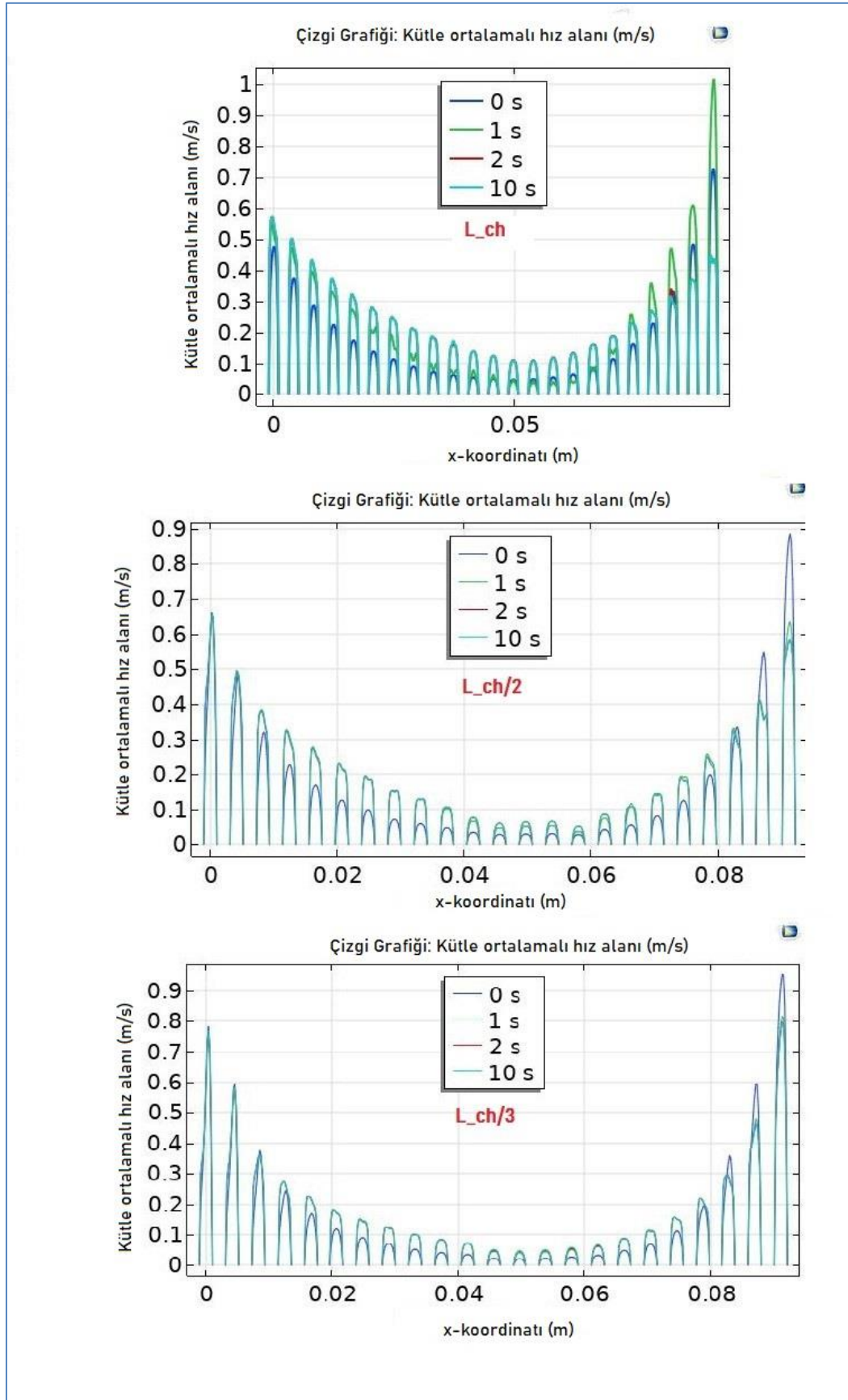
Bu başlık altında 23 kanallı PEM hücrelerinin kanal sayısı değişikçe bununla beraber değişen akış ve kayma hızları incelenmiştir. Şekil 6.3’de 23 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı değerleri gösterilmiştir.



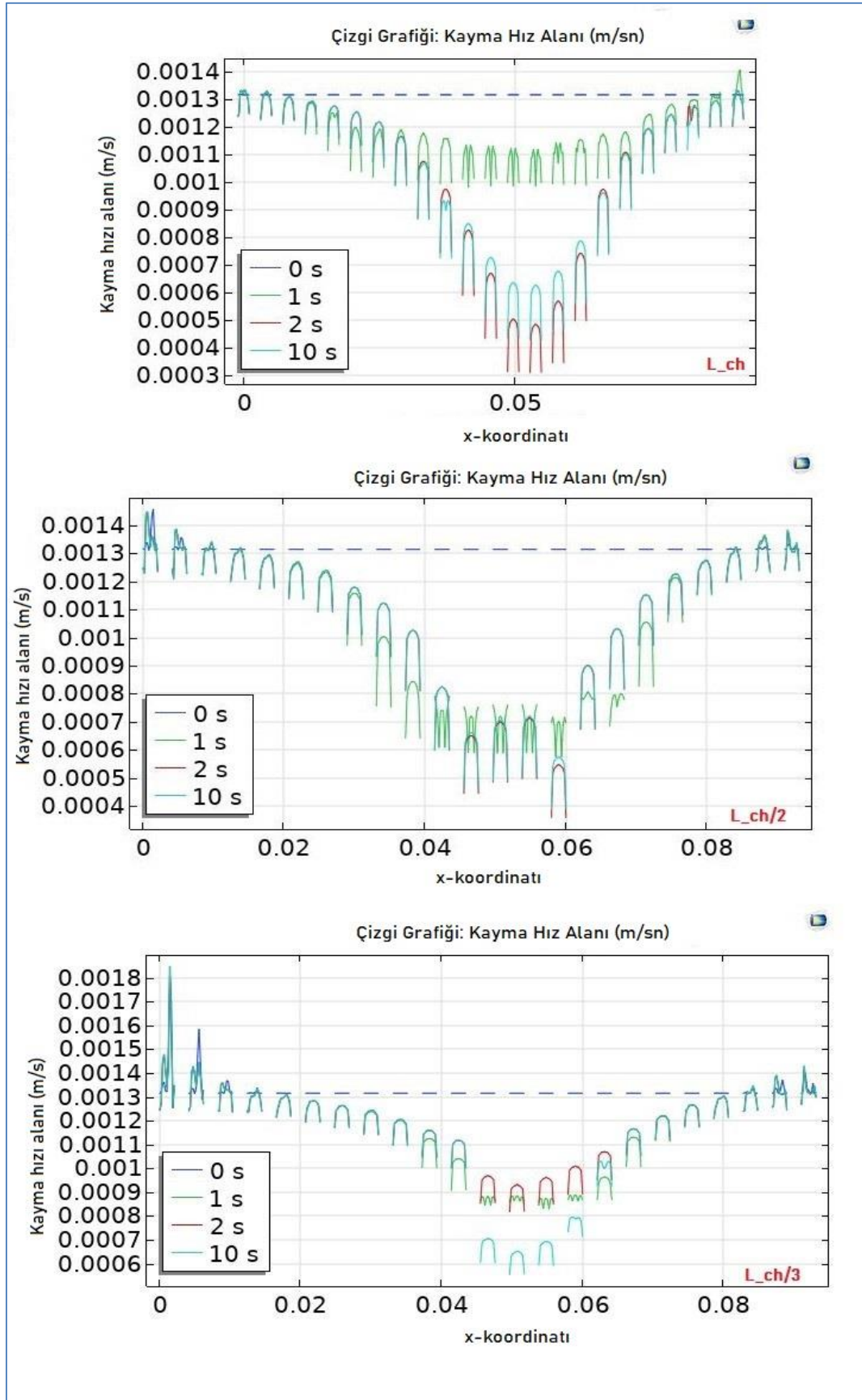
Şekil 6. 3. 23 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalama hız alanı



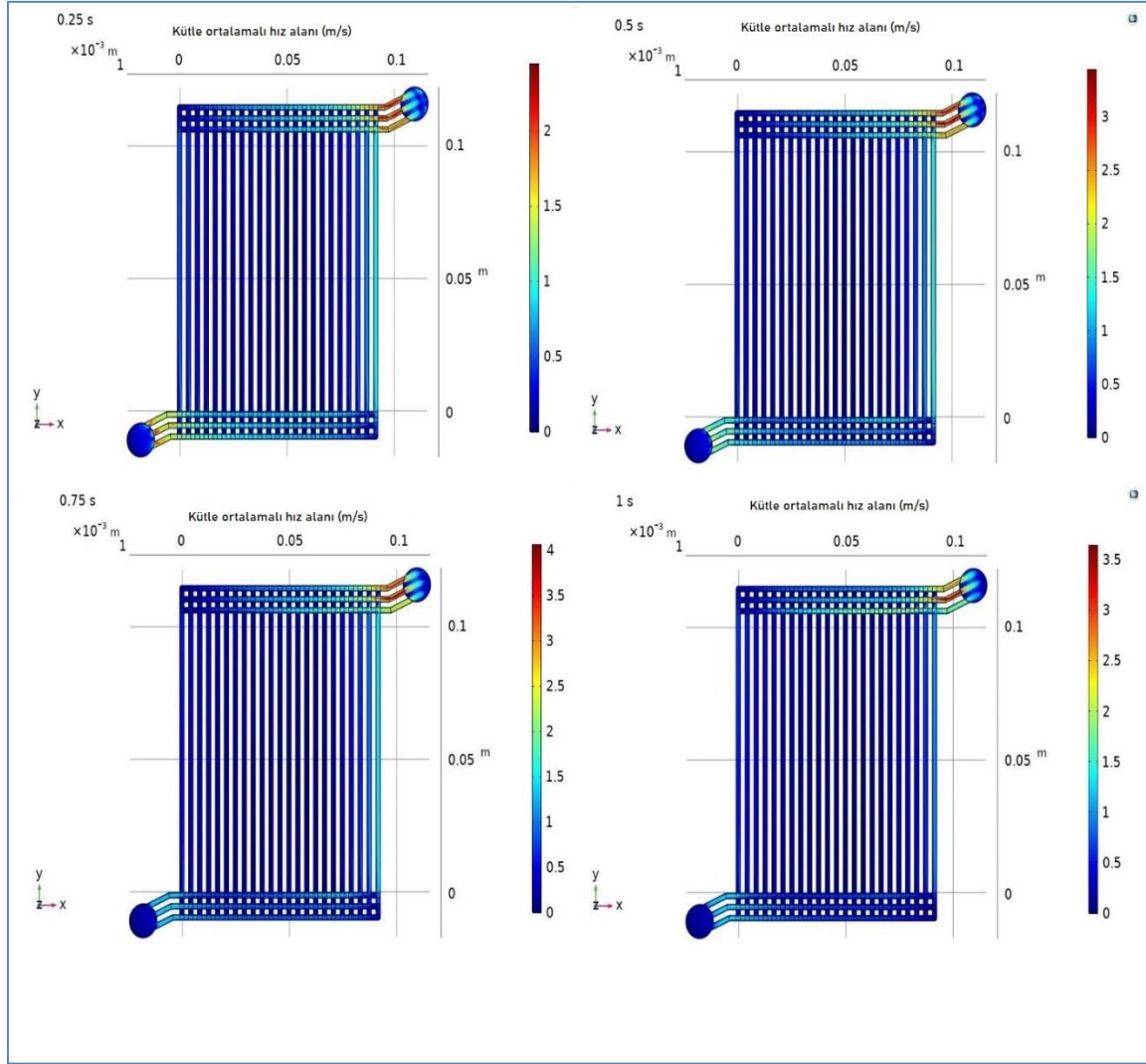
Şekil 6. 4. 23 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kayma alan hızı



Şekil 6. 5. 23 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boyu elektrolizör hücresi kütle ortalamalı alan hızları



Şekil 6. 6. 23 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boylu elektrolizör hücresi kayma alan hızları



Şekil 6. 7. 23 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları

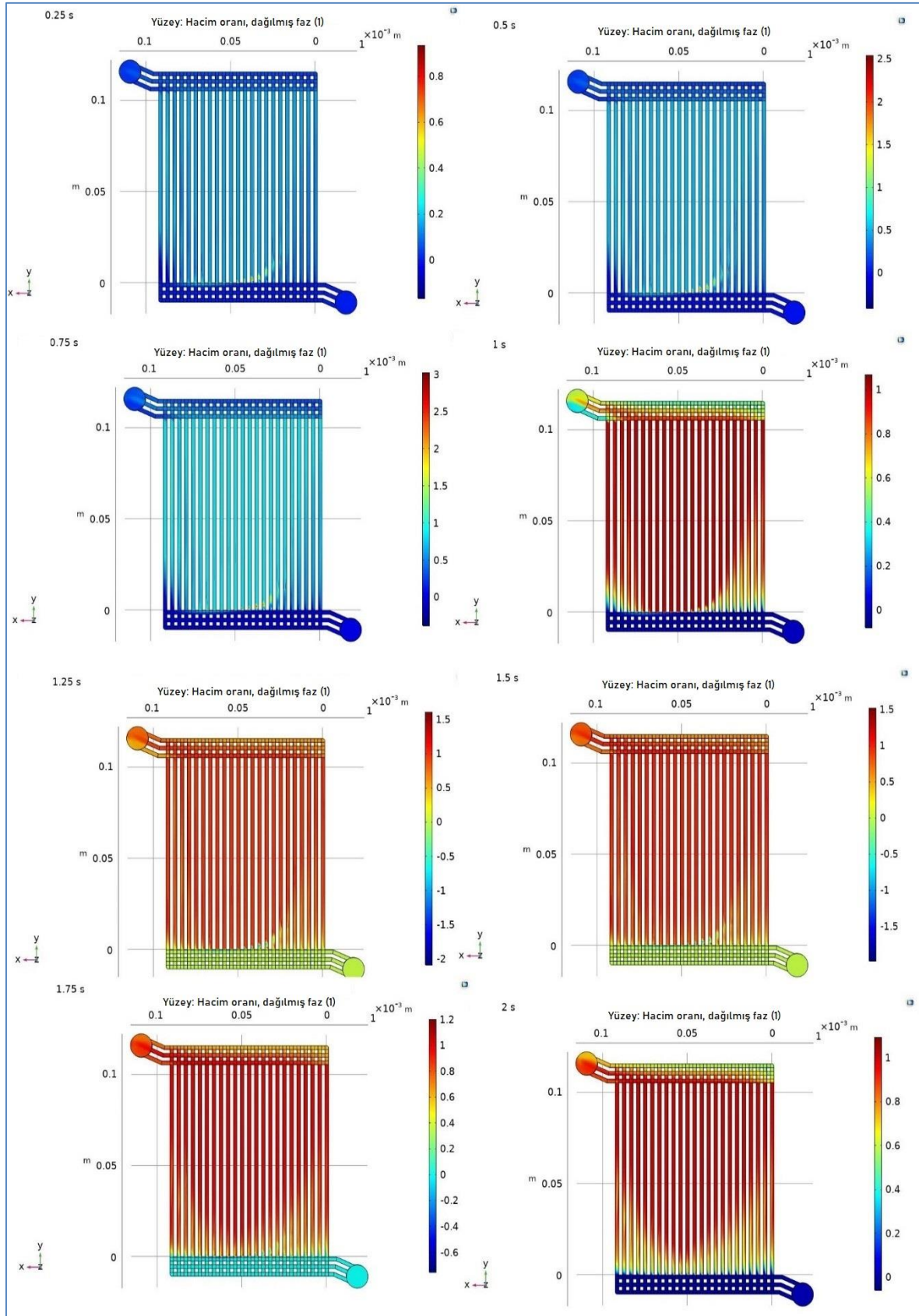
Şekil 6.5’de 23 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boylu elektrolizör hücresi kütle ortalamalı alan hızları verilmiştir. Elektroliz kanallarının boylarından bağımsız bir şekilde hücrenin orta kısımlarındaki kanallarında hızın daha düşük olduğu görülmektedir. 13-14 ve 15. kanallarda nispeten hız daha dengelidir. Bu kanallara kadar kanal içi hücre akışı git gide düşmekte ve 15. kanaldan sonra tekrar artmaktadır. Ayrıca Şekil 6.5’de tek tek kanallardaki akış dağılımının tekdüzeliği açık bir şekilde görülebilmektedir. $t:0$ anında akış dağılımı özellikle giriş kısmından giren su için homojen bir yapıda değildir. Ancak gaz üretiminin başladığı 1. ve 2.sn’de akış büyük bir ölçüde üniform hale gelmektedir ancak yine de saf suya göre daha az üniformdur. Ayrıca akış dağılımının 2 ile 10. saniyeleri arasında önemli ölçüde benzer olduğu görülmektedir. Bunun sebebi tam hidrojen üretimi ulaşıldıktan sonra sabit bir akış oluşmuştur.

Şekil 6.6’da 23 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boylu elektrolizör hücresi kayma alan hızları gösterilmiştir. Kayma hızı bir kapalı hacimde beraber akan iki farklı akışın ortalama hızları arasındaki farka denir. Kayma hızı aslında iki akışkan arasındaki yoğunluk farkına bağlıdır diyebiliriz. Kayma hızının hücrenin ortalarında yer alan elektroliz kanallarında 2.sn’de neredeyse sıfır olduğu görülmektedir. En yüksek kayma hızları 1. sn sonunda gazların ayrışmaya başlamasıyla beraber ortaya çıktığı söylenebilir.

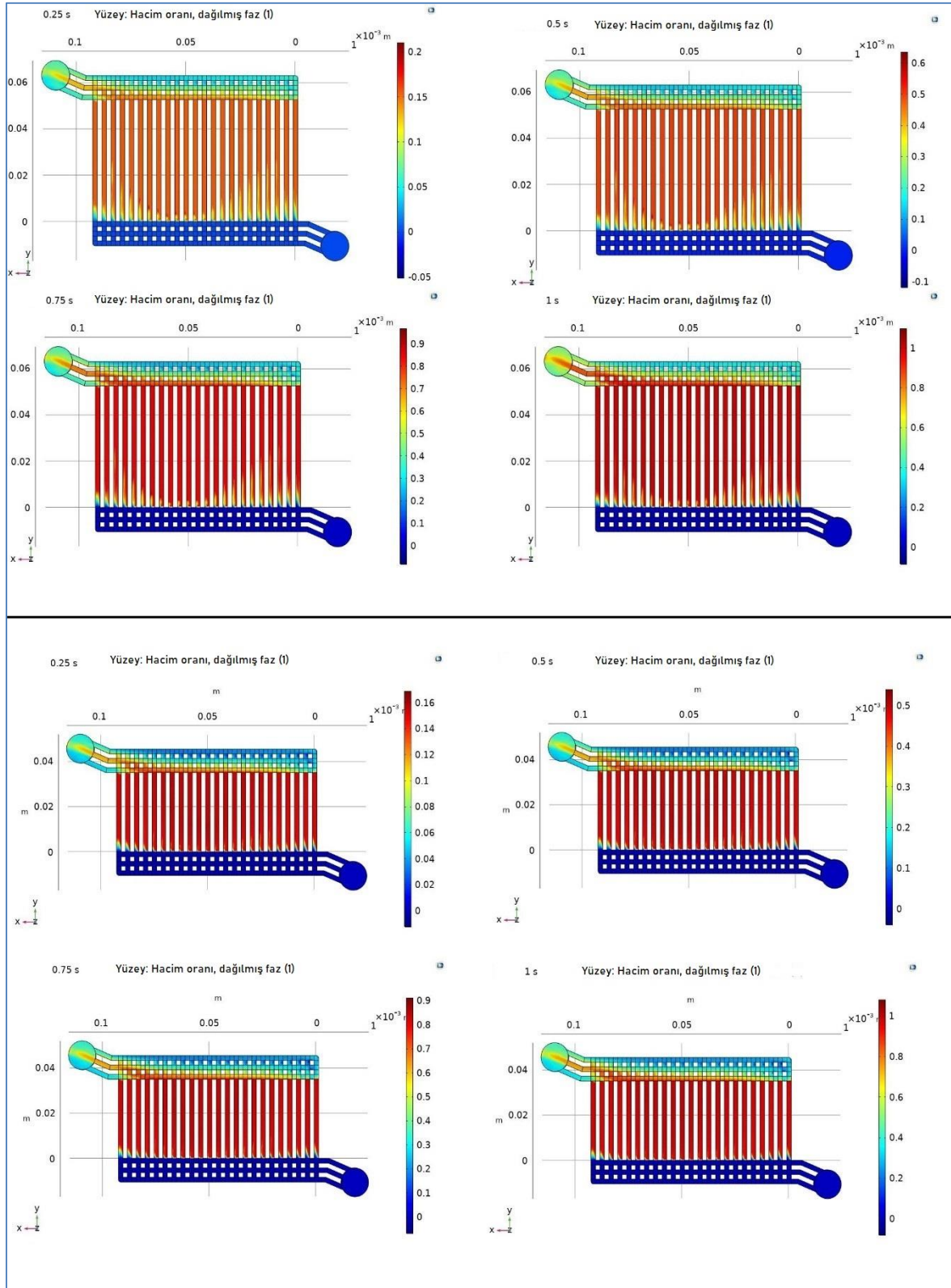
Şekil 6.7’de 23 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları verilmiştir. Girişte hız minimum seviyelerdedir. Akış hızı aynı şekilde manifold kısmında da çok azdır. Çünkü manifold kanal aralıkları o kadar küçüktür ki akışın oluşmasına bir olanak yoktur. Birden fazla elektroliz kanalına girecek olan su yavaşlar. Su elektroliz kanallarına girdikten sonra akış gelişmeye başlar. Burada oluşan gazlar ve su düz bir yolda ilerleyeceği için akış kanallarının sonunda tam gelişmiş olur ve bu bölgelerde kütle ortalama hızlar en büyük değerine ulaşır. Arıca iki faz arasındaki güçlü etkileşim yüzünden manifold kanallarında sürüklenme en büyük değerlerindedir. Çıkış ağzına gelmeden önce kütle ortalama hız maksimum değerine ulaşır.

6.1.2. 23 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin gaz hacim fraksiyonu analizi

Şekil 6.8 23 kanallı tam kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları verilmiştir. 0.25 sn. saniyede hücre içinde hidrojen gazı üretilmeye başlar ve dağılım oluşmaya başlar. Maksimum gaz konsantrasyonu bu anda çok local ve ufak alanlarda 0.8 civarındayken hücrenin genel konsantrasyonu 0.2 seviyelerindedir. Bu seviye hücre içindeki ilk gaz kabarcıklarını temsil etmektedir. 1. saniyede hidrojen hücre genelinde en yüksek konsantrasyonuna ulaşır ve hücre içerisinde düzgün bir dağılım gösterir. Gaz konsantrasyonu yüksek seviyelerden düşük olan çıkış manifoldu ve çıkış ağzına doğru ilerlemeye başlar. Bu anlarda gaz taşınması maksimum seviyelerdedir. Kanal boyu $L_{ch}/2$ ve $L_{ch}/3$ olan hücrelerde ise en yüksek gaz konsantrasyonları sırasıyla 0.85 ve 0.80. saniyelerde gerçekleşir. (Şekil 6.9)



Şekil 6. 8. 23 kanallı tam kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları



Şekil 6. 9. 23 kanallı $L_{ch}/2$ ve $L_{ch}/3$ kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları

6.1.3. 23 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin basınç analizi

Elektroliz hücrelerinde nasıl hız ve fraksiyonlarda düzgün bir dağılım isteniyorsa basınç konusunda da dalgalanma istenmez. Oluşan basınç dalgalanmaları hücrenin homojen bir performans göstermesinin önüne geçer. Bu çalışmada yapılan analizler sonucunda ilk 2 saniye içerisinde hücre içinde büyük bir basınç dalgalanması olduğu gözlemlenmiştir.

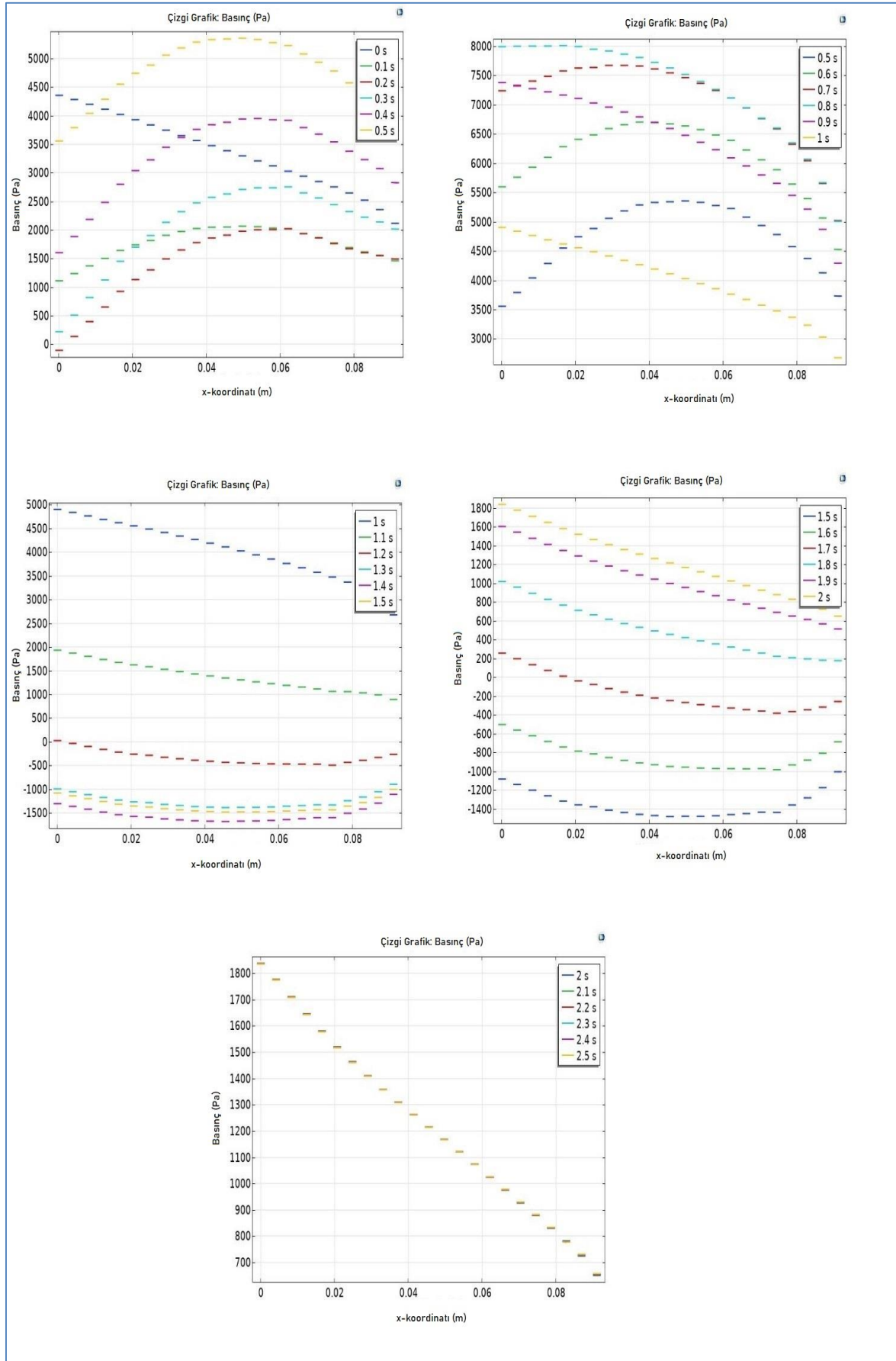
Şekil 6.10'da 23 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları 0.1 sn aralıklarla gösterilmiştir. İşlem başladığı an 0.2 saniye düşmüş ve neredeyse ilk elektroliz hücresinde sıfıra düşmüştür. Ardından 0.8. saniyeye kadar yükselmektedir. 0.8. saniye hücre içerisindeki tüm kanallarda basıncın en yüksek olduğu andır.

Ardından zirve yapmış basınç miktarı 1.4. saniyeye kadar hızlı bir şekilde düşmektedir. Öyle ki bazı kanallarda vakum alanlarının oluştuğu değerlerden görülebilmektedir. 1.2. saniyeden sonra tüm kanallarda negatif basınç söz konusudur.

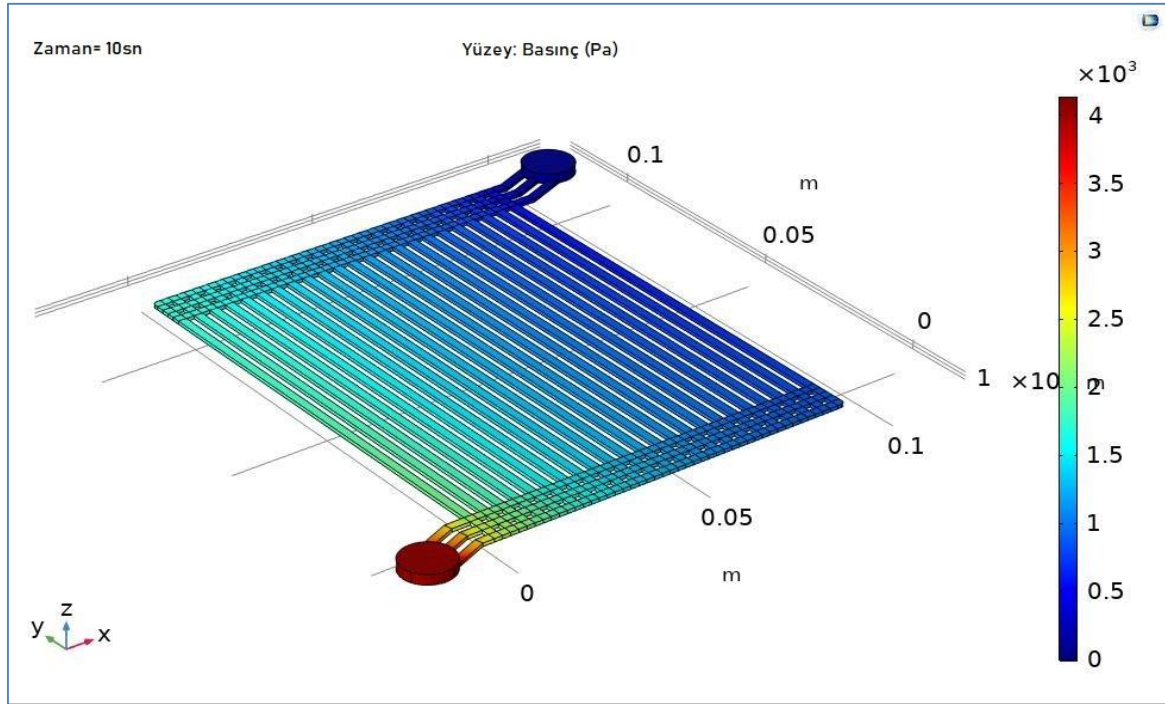
1.4. saniyede oluşan negatif basınçtan sonra, kanallardaki basınç değeri yeniden hızla yükselmeye başlamaktadır. 1.9-2 sn aralığında kanal içi basınç değerleri birbirlerine yaklaşmaya başlamışlardır.

Şekil 6.10'un son grafiğine bakıldığında ise 2-2.5 saniye aralığında hücredeki her bir elektroliz kanalının iç basınçlarının bu sürede dengeye ulaştığı görülmüştür. Bu süreden sonra simülasyon bitme süresi olan 10. Saniyenin sonuna kadar ise bu tarz bir basınç dalgalanmasına rastlanmamıştır.

İnlet'e yakın olan elektroliz kanallarından uzak olan elektroliz kanallarına doğru hücre içerisindeki basınç kademeli olarak düşmektedir. Şekil 6.10'da bu durum açıkça gözlemlenebilir. Manifoldlar içerisindeki basınç dağılımı ise yine 1.9. saniyeden sonra dengeye oturmaya başlamıştır.

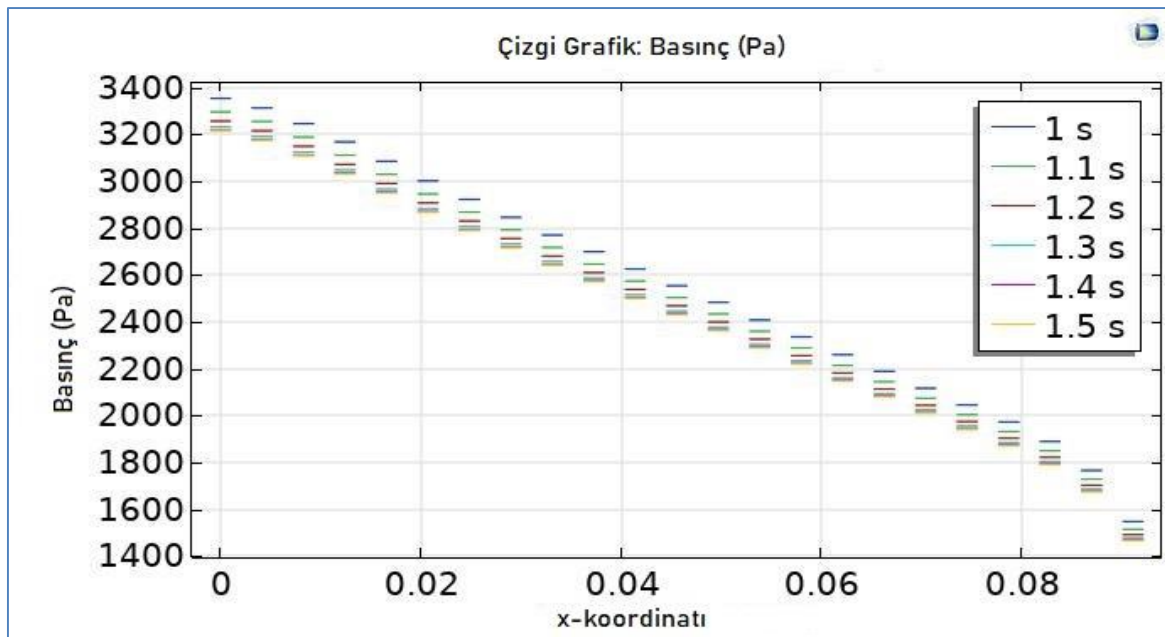


Şekil 6. 10. 23 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları



Şekil 6.11. Simülasyon sonunda hücrede oluşan basınç dağılımı

$L_{ch}/3$ kanal uzunluğuna sahip hücrede ise başlangıçtan 0.5. saniyeye kadar basınç düşmekte ve ardından 1. saniyeye kadar hızla yükselmektedir ve 1. saniyeden sonra basınç dengesine ulaşmaktadır. Şekil 6.12’de görülebileceği gibi ilk saniyenin sonunda hücrede basınç dağılımı dengeye ulaşmıştır.



Şekil 6. 12. $L_{ch}/3$ kanal uzunluğuna sahip hücrenin 1-1.5 sn arası basınç dağılımı

Çizelge 6. 2. Birim alanda üretilen hidrojen ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

	Birim Üretilen Hidrojen Miktarı ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)
L_ch	13xE-5
L_ch/2	25xE-5
L_ch/3	37.5xE-5

Çizelge 6. 3. Birim alanda tüketilen su ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

	Birim Tüketilen Su Miktarı ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)
L_ch	-0.0011
L_ch/2	-0.0023
L_ch/3	-0.0034

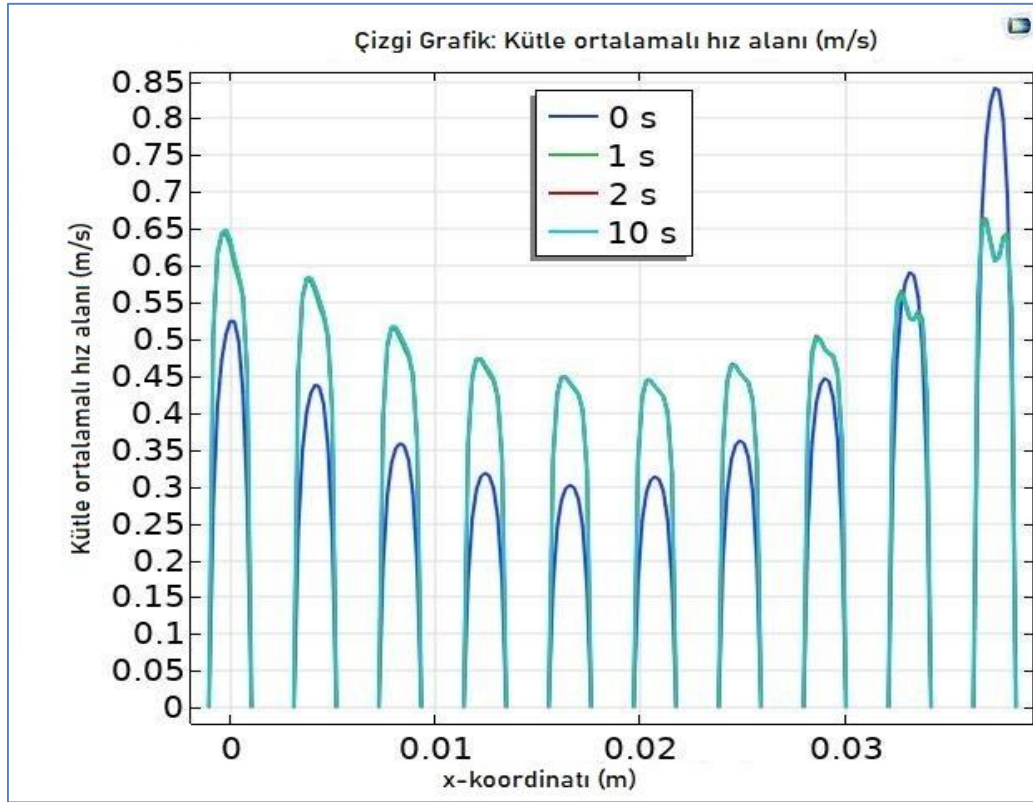
Sabit su debi girişinde kanal boylarına göre birim başı üretilen hidrojen miktarı Çizelge 6.2.'de verilmiştir. Aynı şekilde birim başına tüketilen su miktarı ise Çizelge 6.3'de gösterilmiştir.

6.2. 10 Kanallı PEM Elektrolizör Hücresinin Analizi

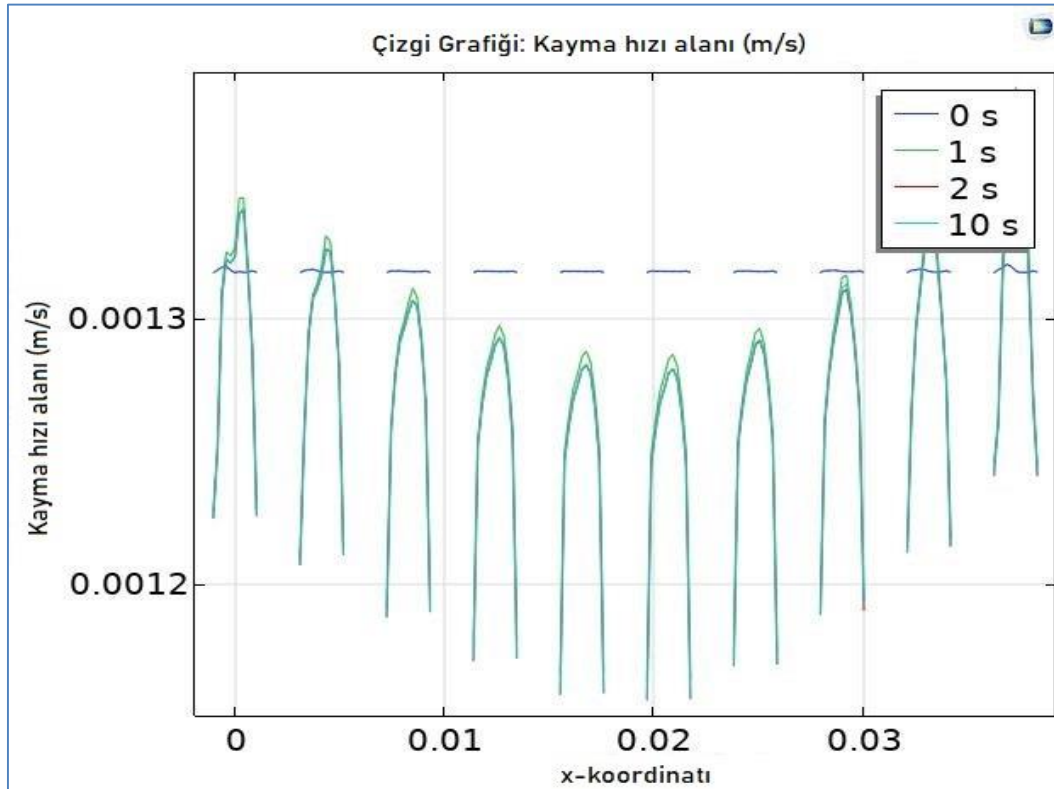
Bu bölümde 10 kanallı PEM elektrolizör hücresinin, kanal uzunlukları farklı olan 3 ayrı geometrisi aynı su girişi debisi ve aynı sıcaklıkta analiz edilmiş ve farklılıkları araştırılmıştır. Analiz edilen 10 kanallı hücrelerin elde edilen çözüm sonucunda içerisinde oluşan hız vektörleri, gaz hacim fraksiyonu ve basınç dalgalanmaları araştırılmıştır.

6.2.1. 10 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin hız analizi

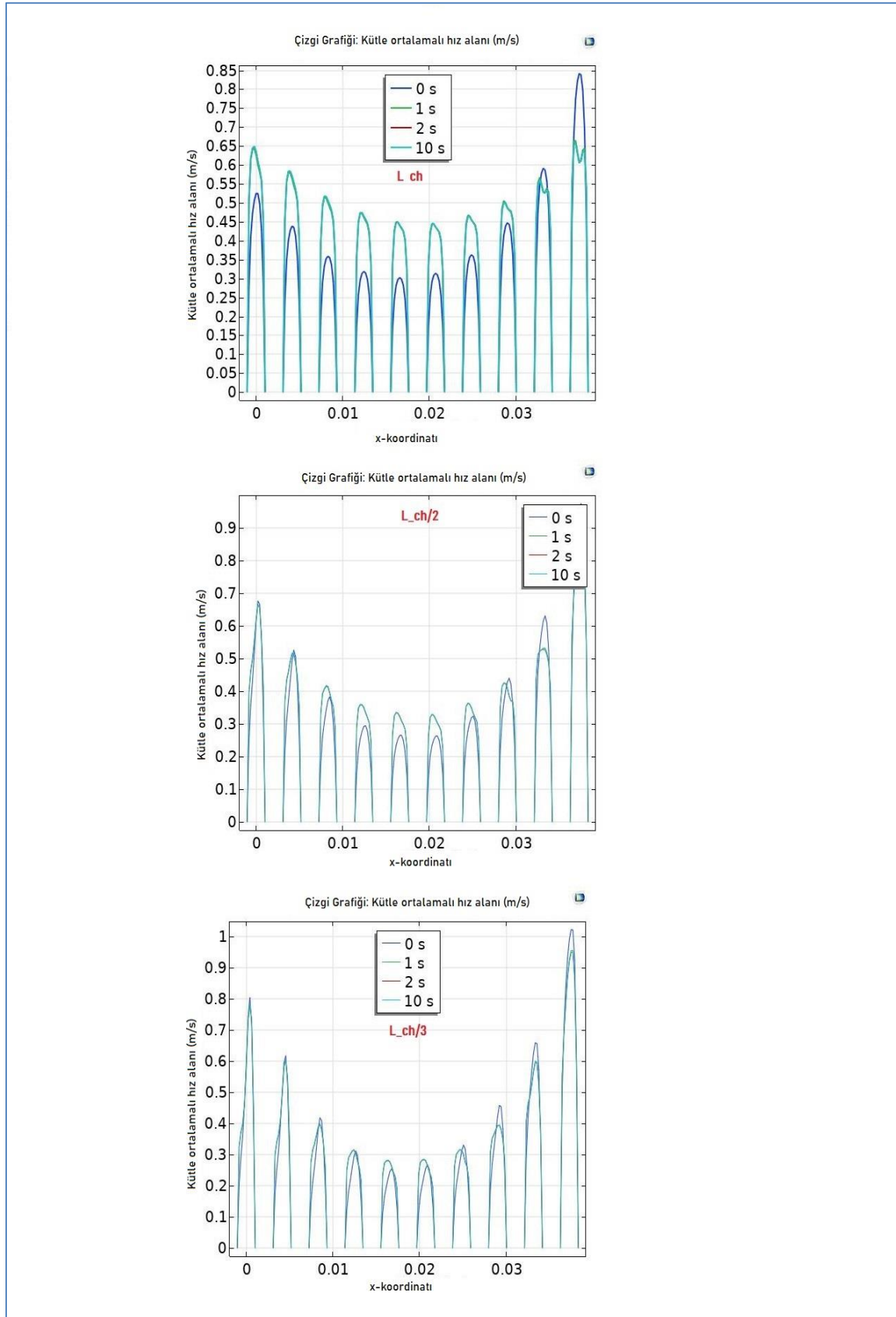
Bu başlık altında 10 kanallı PEM hücrelerinin kanal sayısı değiştikçe bununla beraber değişen akış ve kayma hızları incelenmiştir. Şekil 6.13'de 10 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı değerleri gösterilmiştir.



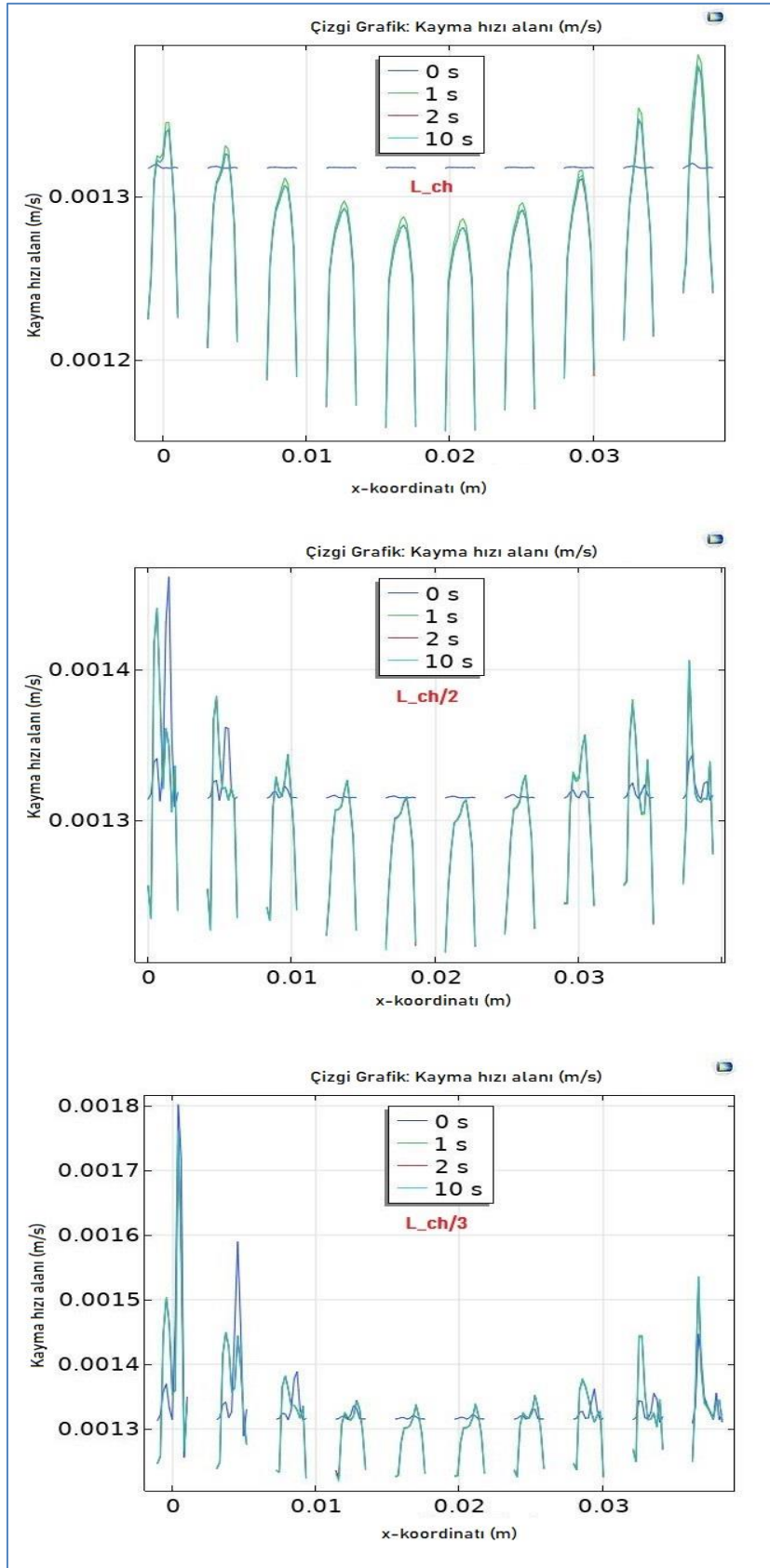
Şekil 6. 13. 10 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı



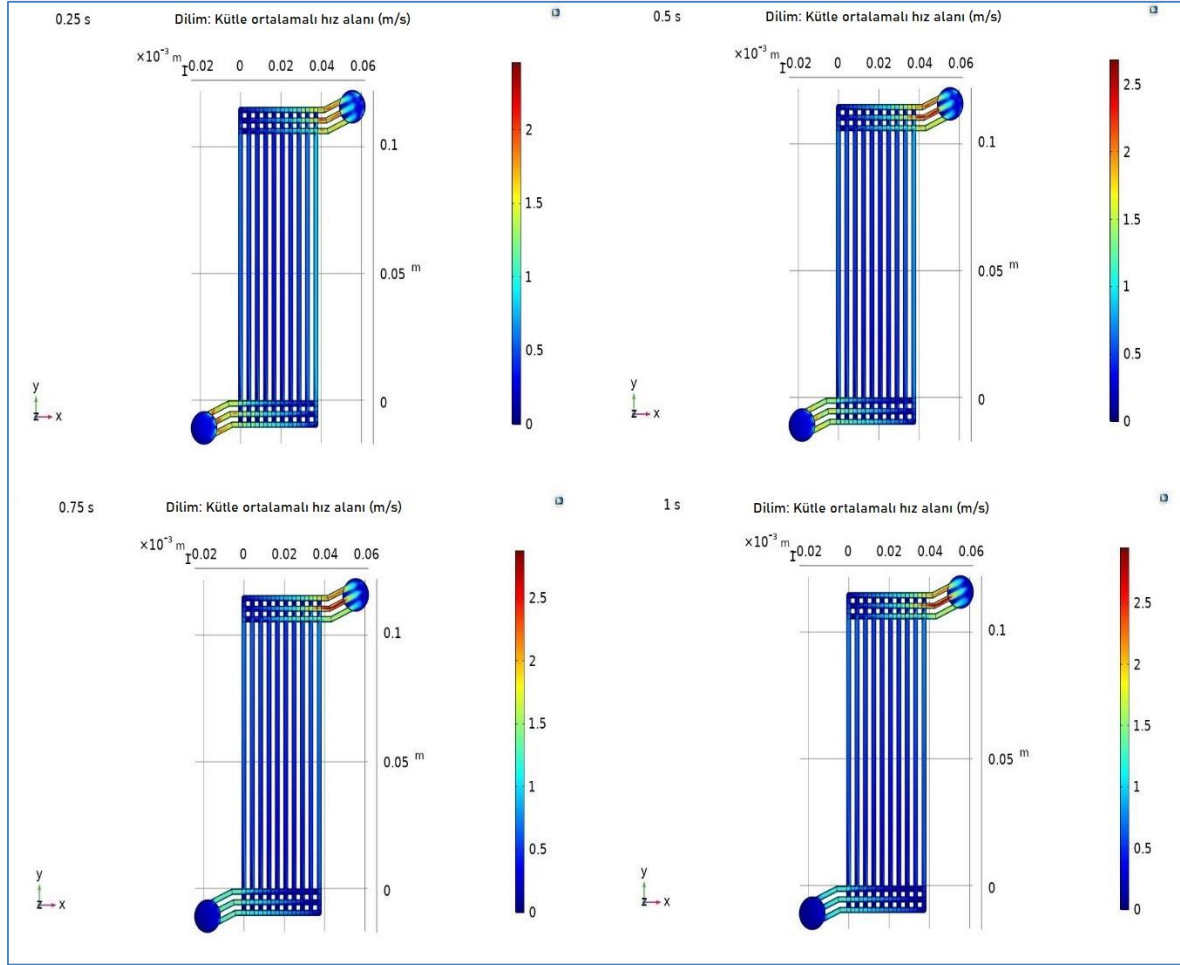
Şekil 6. 114. 10 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı



Şekil 6. 15. 10 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boyu elektrolizör hücresi kütle ortalamalı alan hızları



Şekil 6. 16. 10 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boylu elektrolizör hücresi kayma alan hızları



Şekil 6. 17. 10 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları

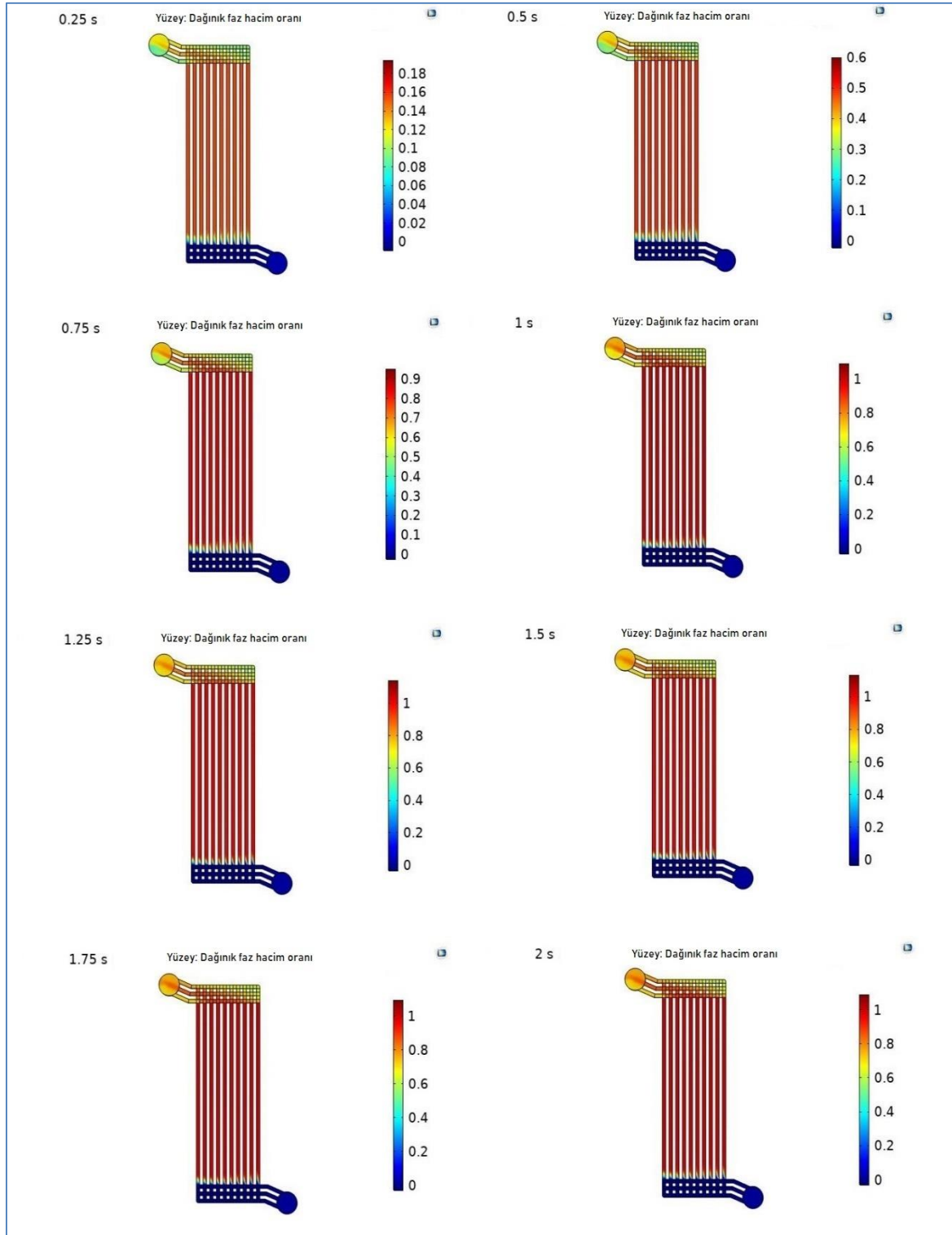
Şekil 6.15’de 10 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, L_{ch}_3 kanal boylu elektrolizör hücresi kütle ortalamalı alan hızları verilmiştir. Elektroliz kanallarının boylarından bağımsız bir şekilde, hücrenin orta kısımlarındaki hızın daha düşük olduğu görülmektedir. 4. ve 5. kanallarda nispeten hız daha dengelidir. Bu kanallara kadar kanal içi hücre akışı git gide düşmekte ve 5. kanaldan sonra tekrar artmaktadır. Ayrıca Şekil 6.15’de tek tek kanallardaki akış dağılımının tekdüzeliği açık bir şekilde görülebilmektedir. $t:0$ anında akış dağılımı özellikle giriş kısmından giren su için homojen bir yapıda değildir. Ancak gaz üretiminin başladığı 1-2. Saniye aralığında akış büyük bir ölçüde üniform hale gelmektedir. Ayrıca akış dağılımının 2 ile 10. saniyeleri arasında önemli ölçüde benzer olduğu görülmektedir. Bunun sebebi tam hidrojen üretimi ulaşıldıktan sonra sabit bir akış oluşmuştur. Ayrıca sabit debili sistemde kanal sayısı arttıkça kanal başı düşen sıvı su miktarının artması sebebiyle artan hızlar Şekil 6.15’de görülebilmektedir.

Şekil 6.16’de kayma hızları görülmektedir. Kayma hızlarının 1. saniyede maksimum hıza ulaştığı görülmektedir. Hücrenin ortalarında yer alan elektroliz kanallarında 2.saniyede en düşük seviyelere gelmiştir. En yüksek kayma hızları 1. sn sonunda gazların ayrışmaya başlamasıyla beraber ortaya çıktığı söylenebilir. Ayrıca L_{ch} elektroliz uzunluğuna sahip hücrelere göre $L_{ch}/2$ ve $L_{ch}/3$ uzunluklu kanallarda, özellikle giriş ağzına en yakın olan kanalda düzensiz ve ani kayma hızı artışları gözlenmektedir. L_{ch} uzunluğuna sahip kanalda ise sistem daha dengelidir.

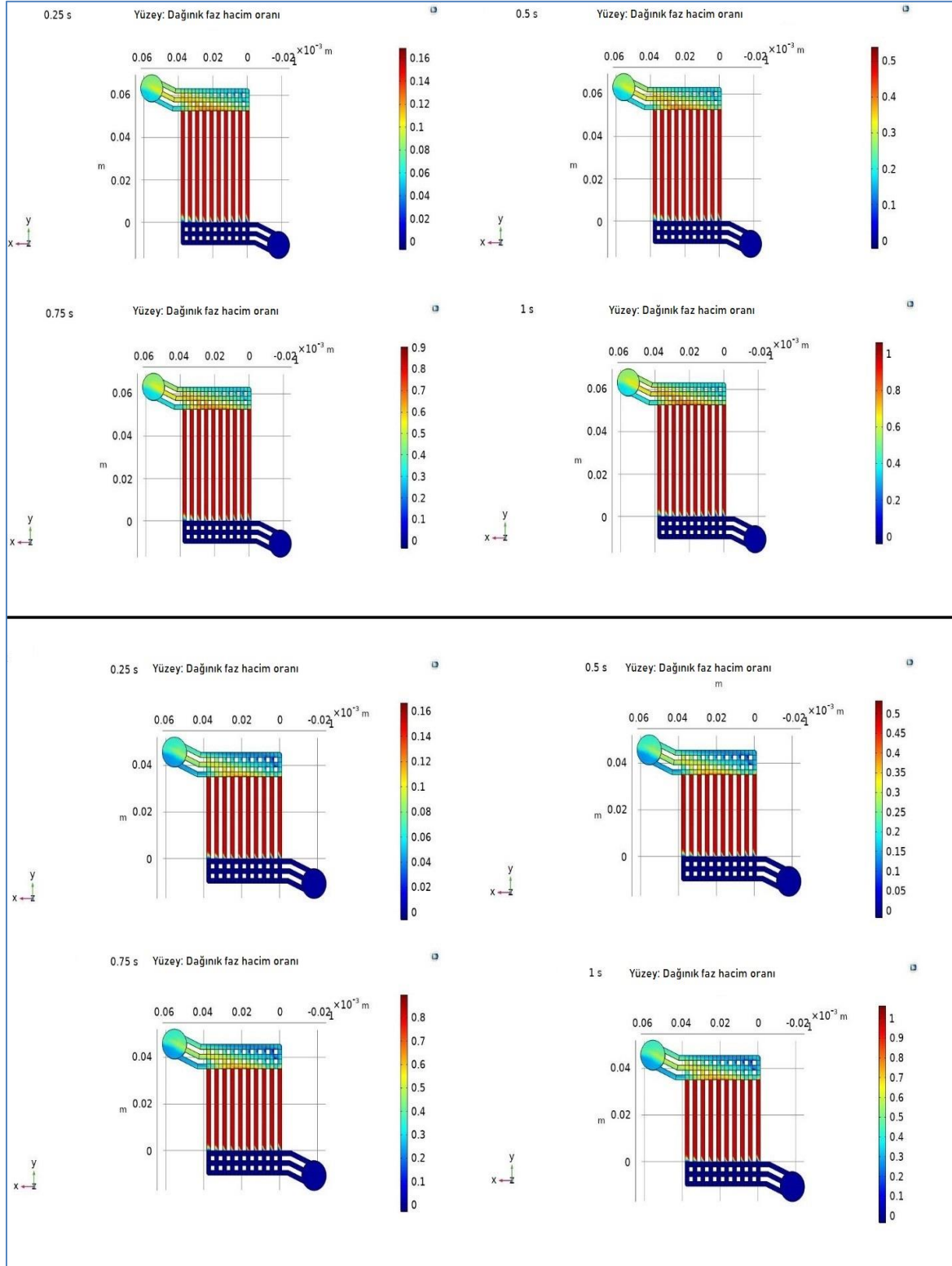
Şekil 6.17’de 10 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları verilmiştir. Girişte hız minimum seviyelerdedir. Akış hızı aynı şekilde manifold kısmında da çok azdır. Çünkü manifold kanal aralıkları o kadar küçüktür ki akışın oluşmasına bir olanak yoktur. Kanalların sonunda akış tam gelişmiştir. Ayrıca iki faz arasındaki güçlü etkileşim yüzünden manifold kanallarında sürüklenme en büyük değerlerindedir. Çıkış ağzına gelmeden önce kütle ortalamalı hız maksimum değerine ulaşır.

6.2.2. 10 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin gaz hacim fraksiyonu analizi

Şekil 6.18’de 10 kanallı tam kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları verilmiştir. 0.25 sn. saniyede hücre içinde hidrojen gazı üretilmeye başlar ve dağılım oluşmaya başlar. Maksimum gaz konsantrasyonu bu anda çok 0.18 seviyelerindedir. Bu seviye hücre içindeki ilk gaz kabarcıklarını temsil etmektedir. 1. saniyede hidrojen hücre genelinde en yüksek konsantrasyonuna ulaşır ve hücre içerisinde düzgün bir dağılım gösterir. Gaz konsantrasyonu yüksek seviyelerden düşük olan çıkış manifoldu ve çıkış ağzına doğru ilerlemeye başlar. Kanal boyu $L_{ch}/2$ ve $L_{ch}/3$ olan hücrelerde ise en yüksek gaz konsantrasyonları sırasıyla 0.9 ve 0.85 saniye civarında gerçekleşir. (Şekil 6.18)



Şekil 6. 18. 10 kanallı tam kanal boyu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları



Şekil 6. 19. 10 kanallı $L_{ch}/2$ ve $L_{ch}/3$ kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları

6.2.3. 10 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin basınç analizi

Elektroliz hücrelerinde nasıl hız ve fraksiyonlarda düzgün bir dağılım isteniyorsa basınç konusunda da dalgalanma istenmez. Oluşan basınç dalgalanmaları hücrenin homojen bir performans göstermesinin önüne geçer. Bu çalışmada yapılan analizler sonucunda ilk 2 saniye içerisinde hücre içinde büyük bir basınç dalgalanması olduğu gözlemlenmiştir.

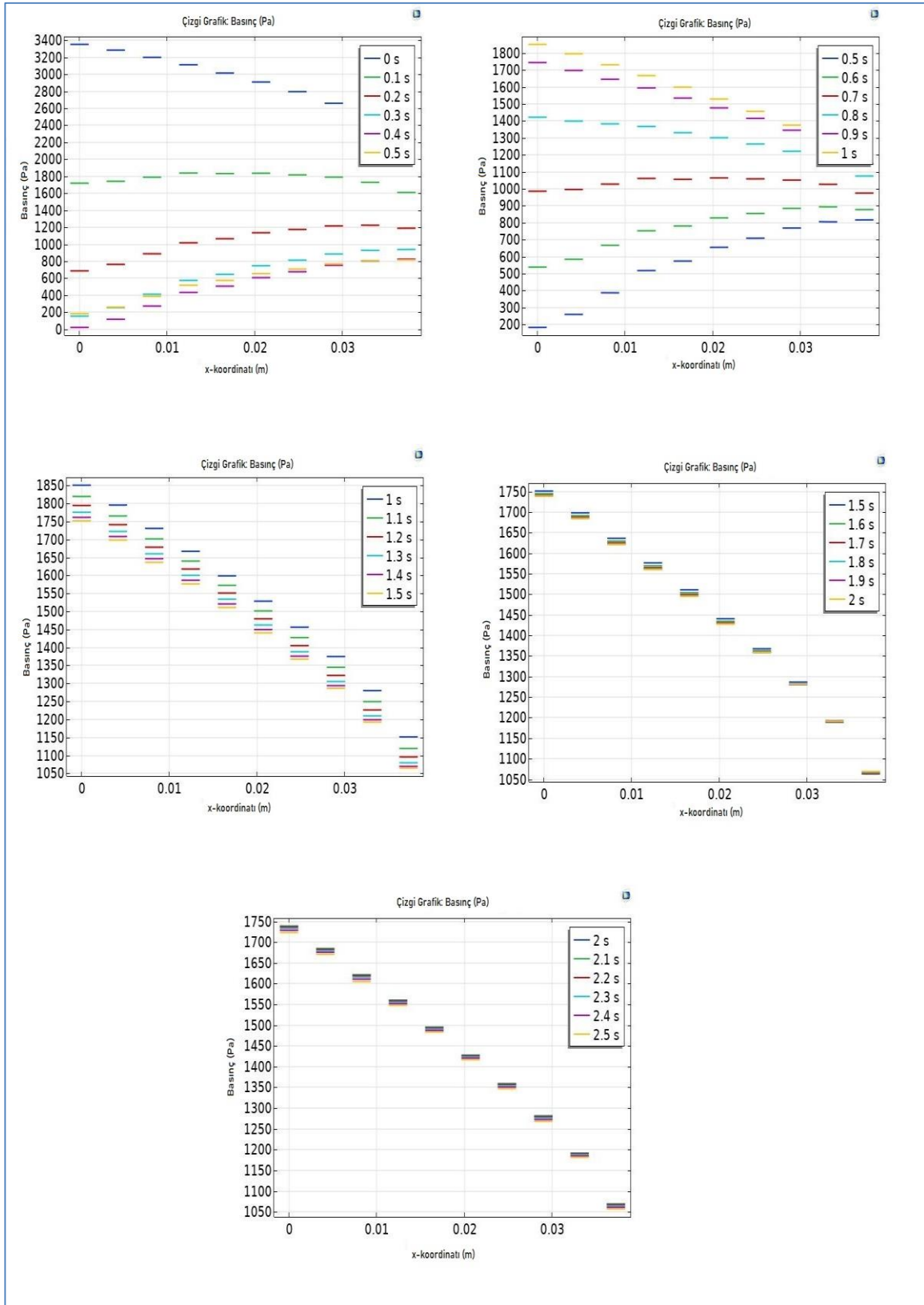
Şekil 6.20’de 10 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları 0.1 sn aralıklarla gösterilmiştir. İşlem başladığında basınç 0.4 saniye boyunca düşmüş ve neredeyse ilk elektroliz hücresinde sıfıra inmiştir. Ardından 1. saniyeye kadar hızla yükselmektedir. 1. saniye sonu hücre içerisindeki tüm kanallarda basıncın en yüksek olduğu andır.

Ardından zirve yapmış basınç miktarı 1.5. saniyeye kadar yavaş ve düzenli bir şekilde düşmektedir. Burada hücre içi kanallardaki basınçlar düzenli ve dengeli bir dağılım göstermeye başlamıştır.

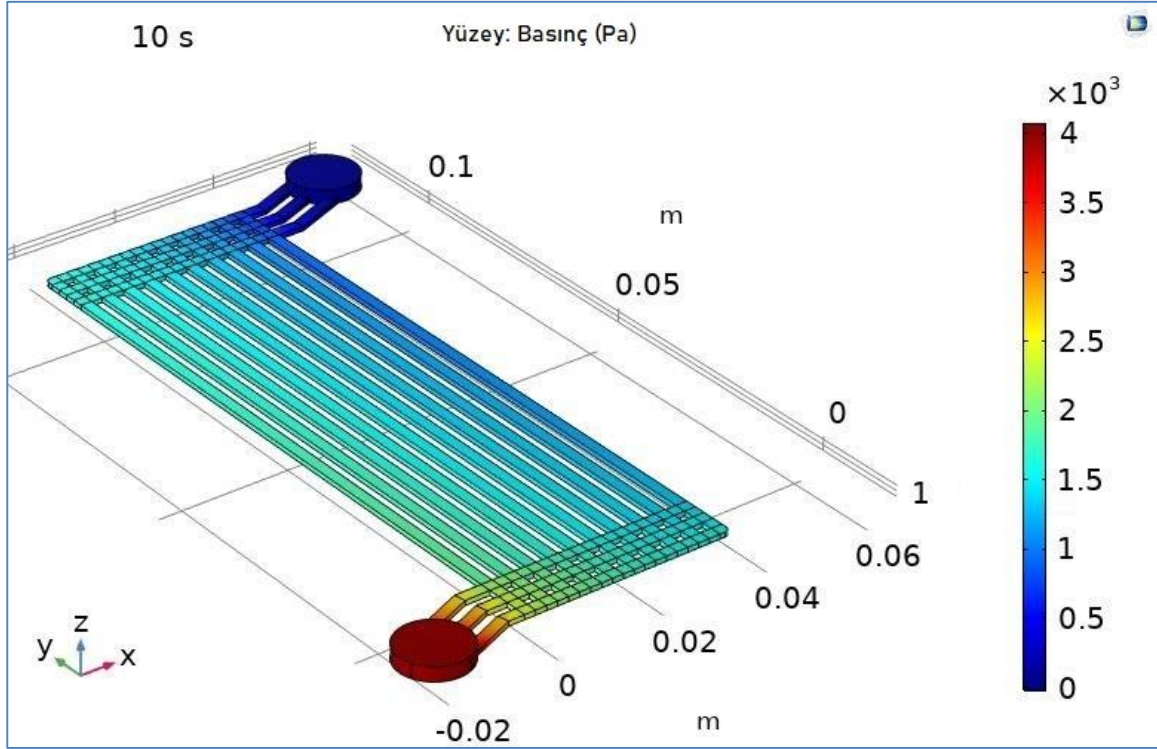
1.5. saniyede olan basınç 2. Saniyeye kadar çok küçük miktarlarda ve düzenli bir biçimde düşmeye devam etmiştir. 1.5-2 saniye aralığında kanal içi basınç değerleri birbirlerine oldukça yakındır ve kanal içi basınç dengesi oluşmuştur.

Şekil 6.20’un son grafiğine bakıldığında ise 2-2.5 saniye aralığında hücredeki her bir elektroliz kanalının iç basınçlarının bu sürede dengeye devam ettiği görülmektedir. Bu süreden sonra simülasyon bitme süresi olan 10. Saniyenin sonuna kadar ise bu tarz bir basınç dalgalanmasına rastlanmamıştır.

İnlet’e yakın olan elektroliz kanallarından uzak olan elektroliz kanallarına doğru hücre içerisindeki basınç kademeli olarak düşmektedir. Şekil 6.20’de bu durum açıkça gözlemlenebilir. Manifoldlar içerisindeki basınç dağılımı ise yine 1. saniyeden sonra dengeye oturmaya başlamıştır.

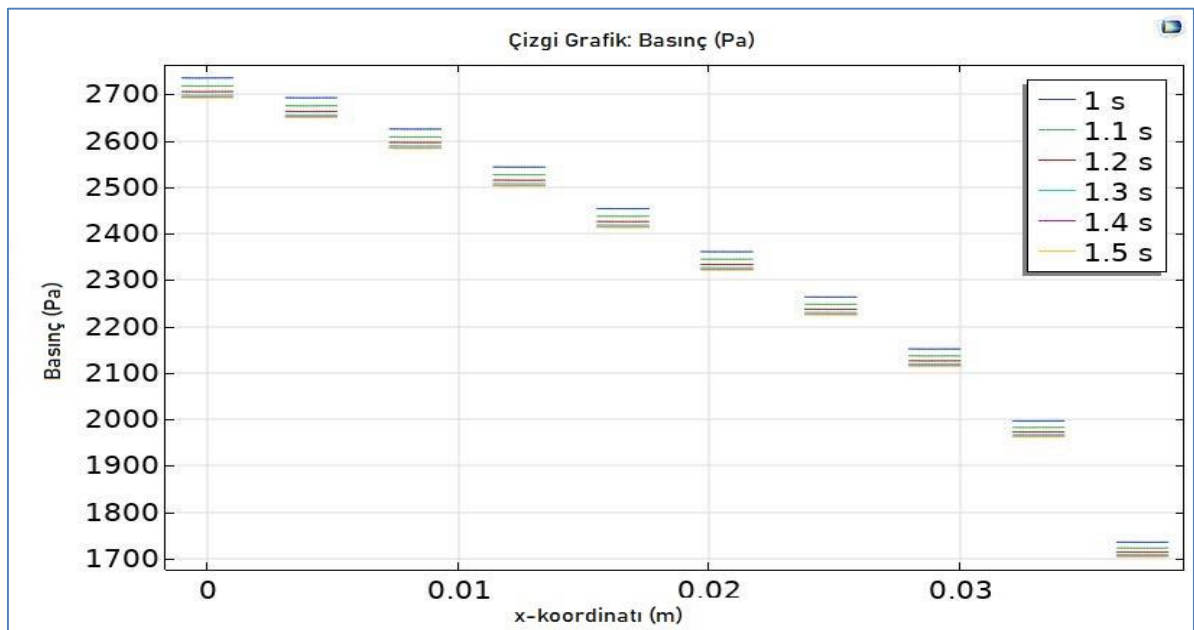


Şekil 6. 20. 10 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları



Şekil 6. 21. Simülasyon sonunda hücrede oluşan basınç dağılımı

L_{ch}/3 kanal uzunluğuna sahip hücrede ise başlangıçtan 0.4. saniyeye kadar basınç düşmekte ve ardından 1. saniyeye kadar yükselmektedir. Hücre 1. saniyeden sonra basınç dengesine ulaşmaktadır. Şekil 6.21’de görülebileceği gibi ilk saniyenin sonunda hücrede basınç dağılımı dengeye ulaşmıştır.



Şekil 6. 22. L_{ch}/3 kanal uzunluğuna sahip hücrenin 1-1.5 sn arası basınç dağılımı

Çizelge 6. 4. Birim alanda üretilen hidrojen ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

	Birim Üretilen Hidrojen Miktarı ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)
L_ch	29xE-5
L_ch/2	58xE-5
L_ch/3	91xE-5

Çizelge 6. 5. Birim alanda tüketilen su ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

	Birim Tüketilen Su Miktarı ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)
L_ch	-0.0026
L_ch/2	-0.0051
L_ch/3	-0.0075

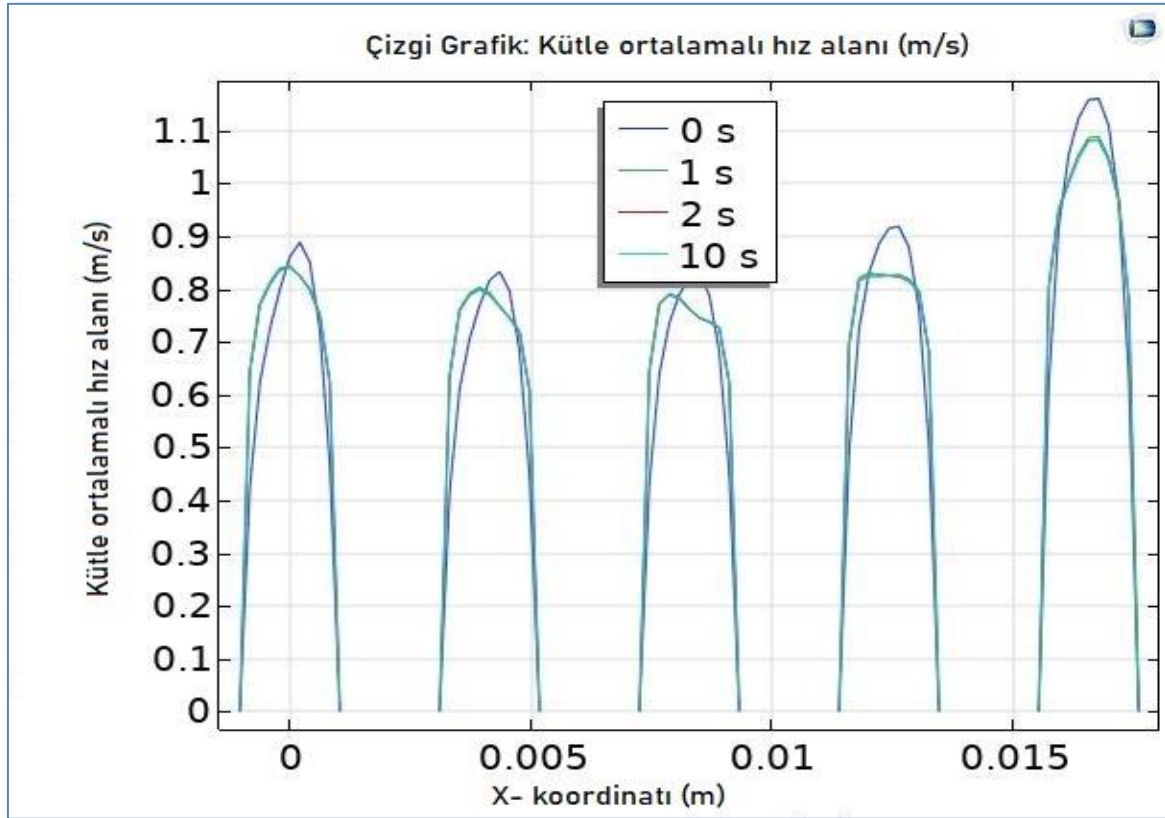
Sabit su debi girişinde kanal boylarına göre birim başı üretilen hidrojen miktarı Çizelge 6.4.'de verilmiştir. Aynı şekilde birim başına tüketilen su miktarı ise Çizelge 6.5.'de gösterilmiştir.

6.3. 5 Kanallı PEM Elektrolizör Hücresinin Analizi

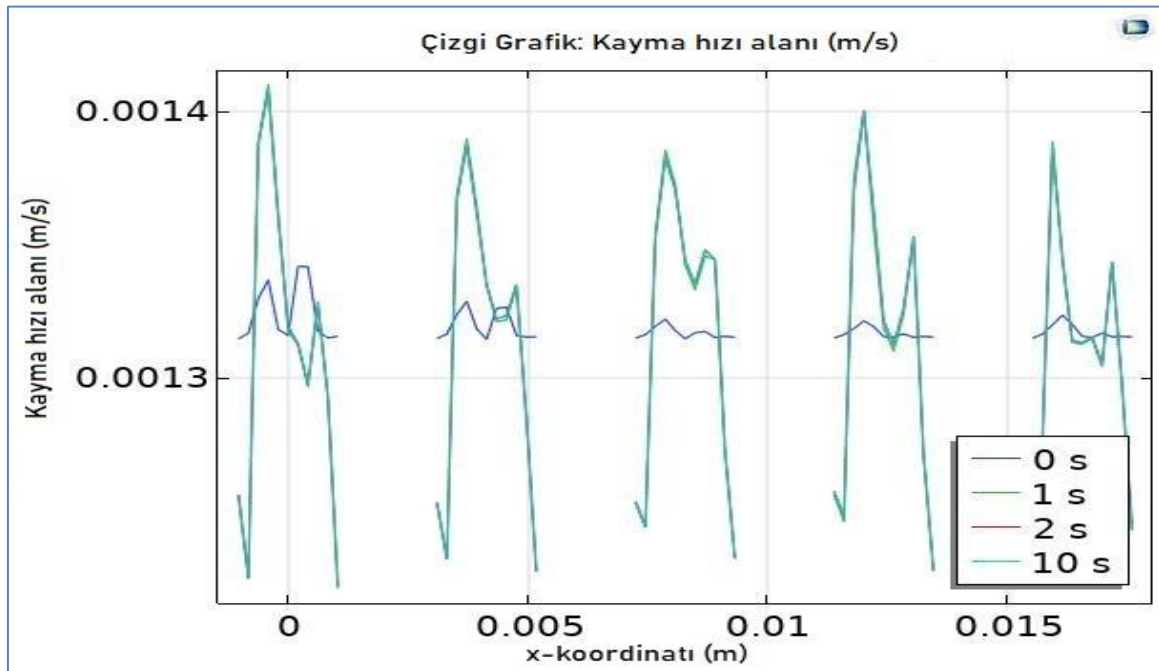
Bu bölümde 5 kanallı PEM elektrolizör hücresinin, kanal uzunlukları farklı olan 3 ayrı geometrisi aynı su girişi debisi ve aynı sıcaklıkta analiz edilmiş ve farklılıkları araştırılmıştır. Analiz edilen 5 kanallı hücrelerin elde edilen çözüm sonucunda içerisinde oluşan hız vektörleri, gaz hacim fraksiyonu ve basınç dalgalanmaları araştırılmıştır.

6.3.1. 5 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin hız analizi

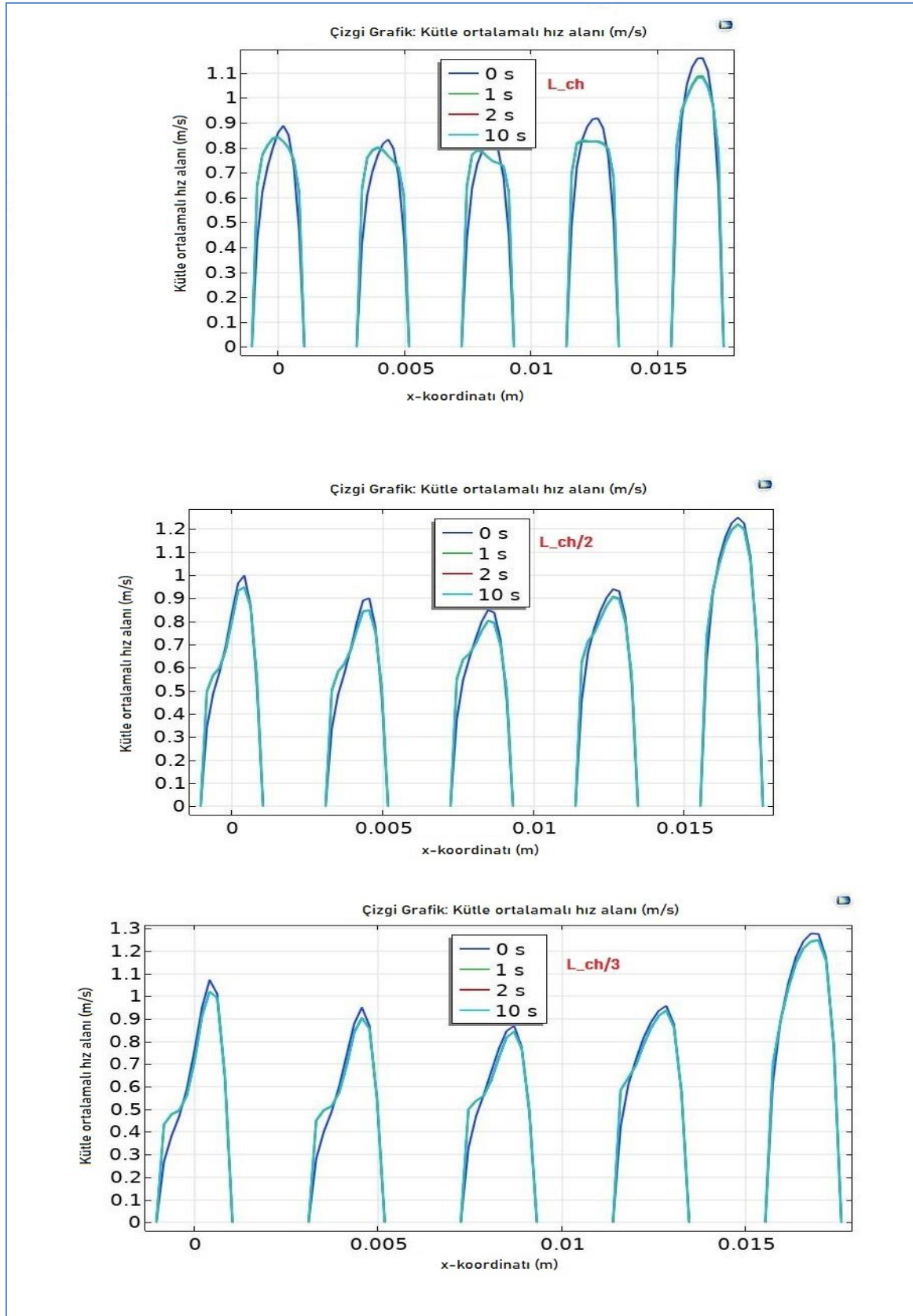
Bu başlık altında 5 kanallı PEM hücrelerinin kanal sayısı değiştikçe bununla beraber değişen akış ve kayma hızları incelenmiştir. Şekil 6.23'de 5 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı değerleri gösterilmiştir.



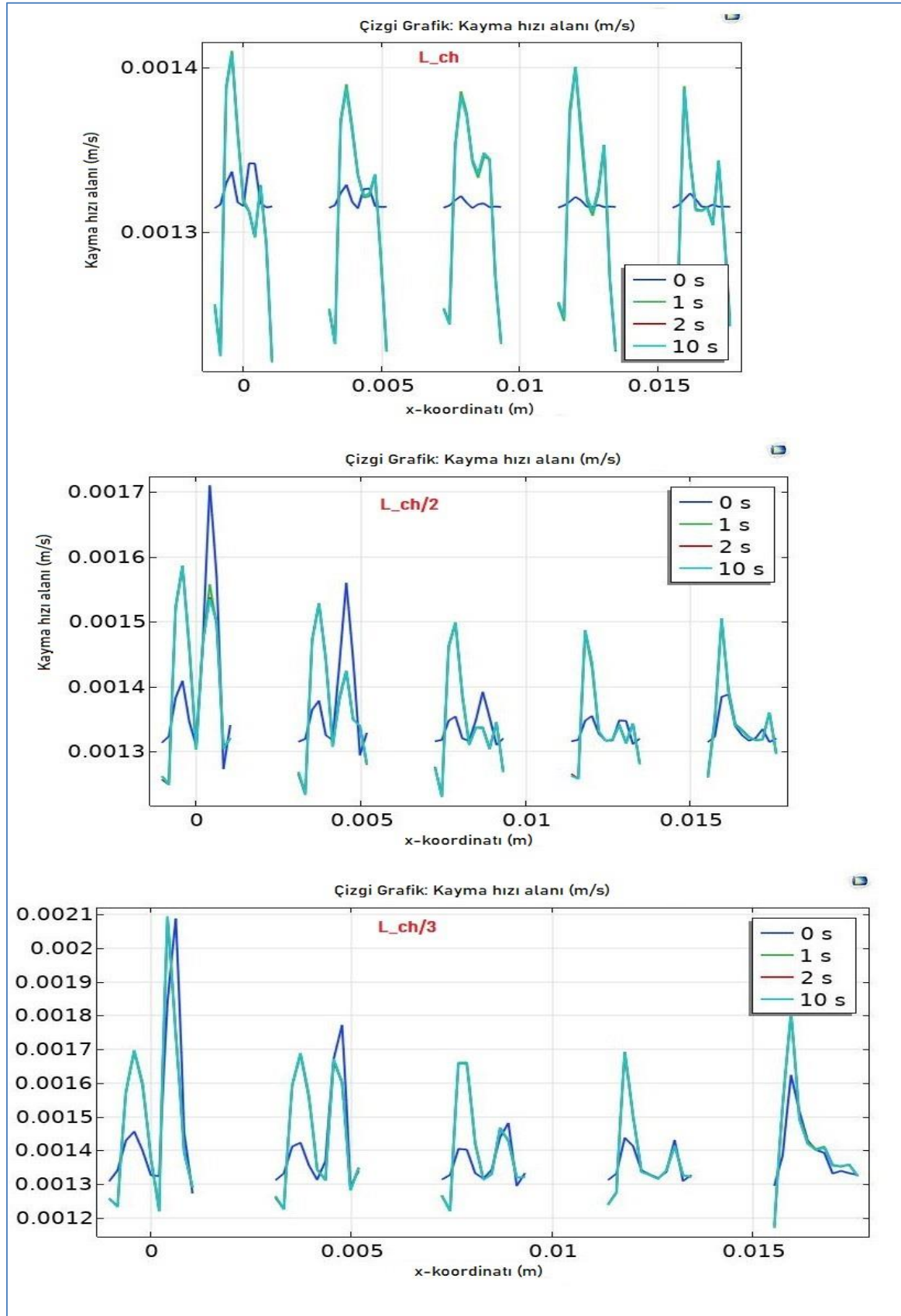
Şekil 6. 23. 5 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalama alan hızı



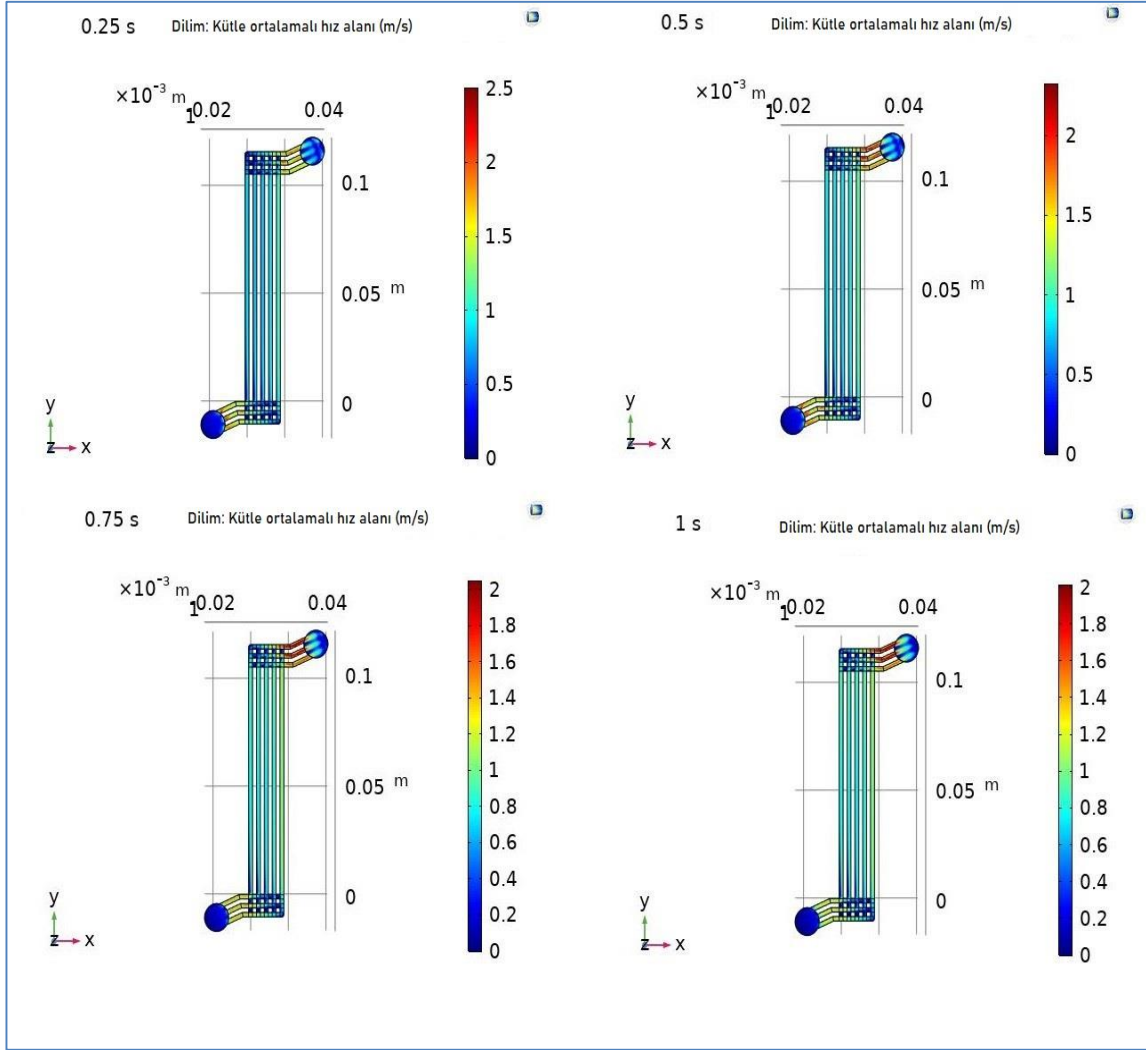
Şekil 6. 24. 5 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalama alan hızı



Şekil 6. 25. 5 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boylu elektrolizör hücresi kütle ortalamalı alan hızları



Şekil 6. 26. 5 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boyu elektrolizör hücresi kayma alan hızları



Şekil 6. 27. 5 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları

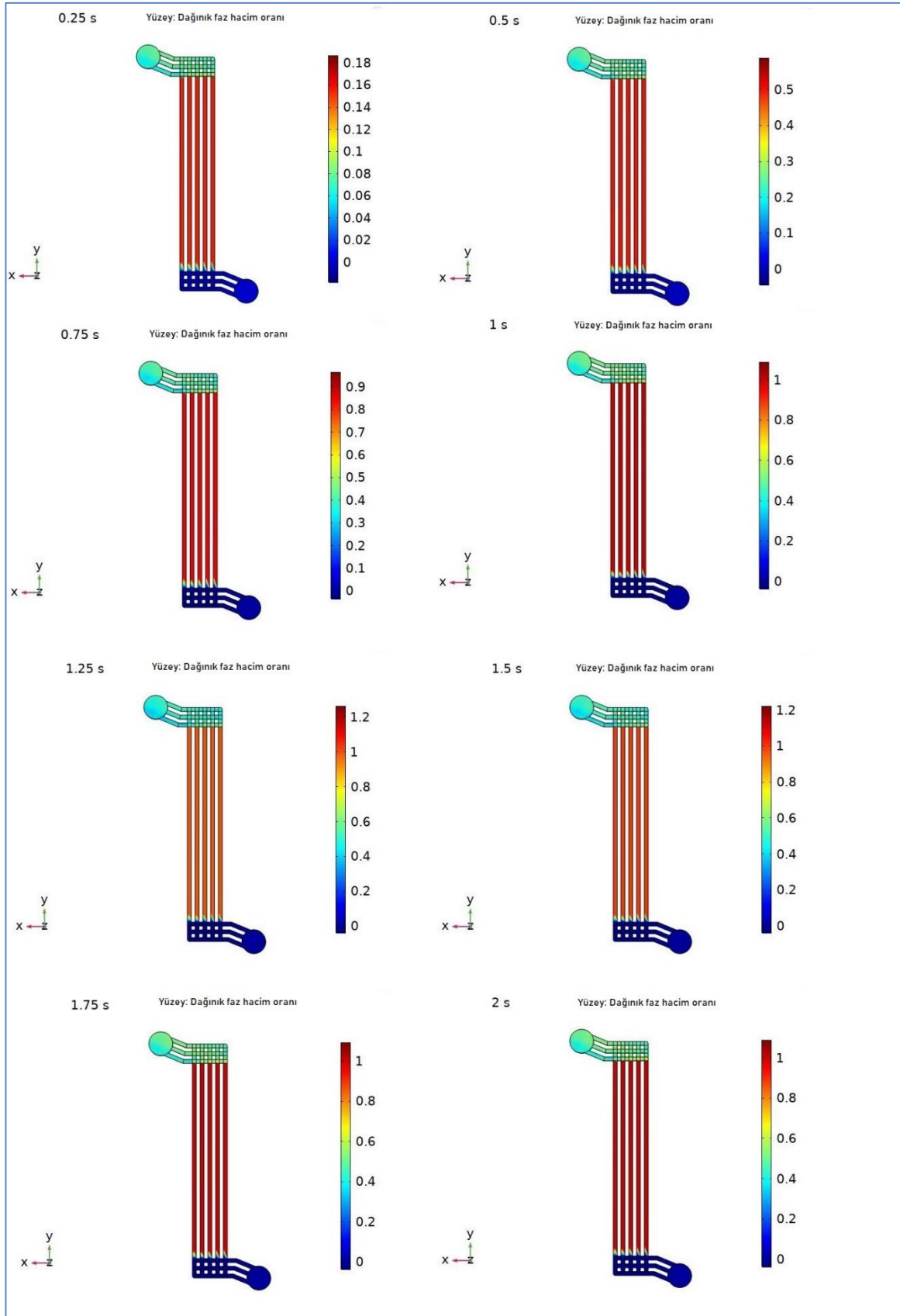
Şekil 6.25’de 5 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boylu elektrolizör hücresi kütle ortalamalı alan hızları verilmiştir. Elektroliz kanallarının boylarından bağımsız bir şekilde, hücrenin orta kısımlarındaki hız bir miktar daha düşüktür. Burada ise tüm kanallarda hız neredeyse aynı seviyelerdedir. 5. Kanalda hız diğerlerine göre nispeten biraz daha büyüktür. Ayrıca Şekil 6.24’de tek tek kanallardaki akış dağılımının tekdüzeliği açık bir şekilde görülebilmektedir. $t:0$ anında akış dağılımı özellikle giriş kısmından giren su için homojen bir yapıda değildir. Ancak gaz üretiminin başladığı 1-2. Saniye aralığında akış büyük bir ölçüde üniform hale gelmektedir. Ayrıca akış dağılımının 2 ile 10. saniyeleri arasında önemli ölçüde benzer olduğu görülmektedir. Bunun sebebi tam hidrojen üretimi ulaşıldıktan sonra sabit bir akış oluşmuştur. Ayrıca sabit debili sistemde kanal sayısı arttıkça kanal başı düşen sıvı su miktarının artması sebebiyle artan hızlar Şekil 6.24’de görülebilmektedir.

Şekil 6.26’de kayma hızları görülmektedir. Kayma hızlarının 1. saniyede maksimum hıza ulaştığı görülmektedir. Hücrenin en başında yer alan elektroliz kanalında 1.saniyede en yüksek seviyeye gelmiştir. En yüksek kayma hızları 1. sn sonunda gazların ayrılmaya başlamasıyla beraber ortaya çıktığı söylenebilir. $L_{ch}/2$ ve $L_{ch}/3$ kanal uzunluklu hücrelerde özellikle giriş ağzına en yakın olan ve en uzak olan kanallarda düzensiz ve ani kayma hızı artışları gözlenmektedir. L_{ch} uzunluğuna sahip kanalda ise sistem daha dengelidir.

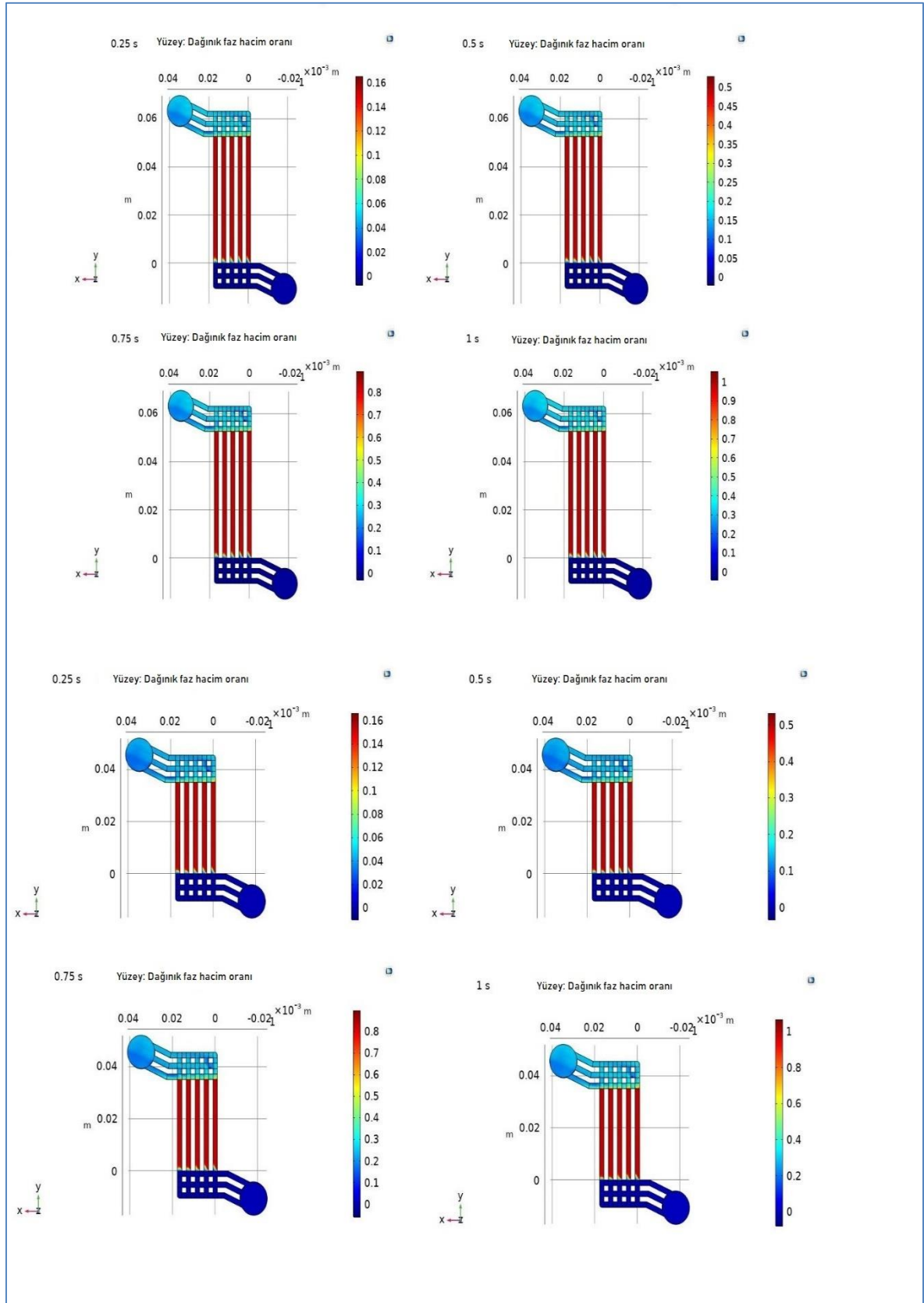
Şekil 6.27’de 5 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları verilmiştir. Girişte hız minimum seviyelerdedir. Akış hızı aynı şekilde manifold kısmında da çok azdır. Kanalların sonunda akış tam gelişmiştir. Ayrıca iki faz arasındaki güçlü etkileşim yüzünden manifold kanallarında sürüklenme en büyük değerlerindedir. Çıkış ağzına gelmeden önce kütle ortalamalı hız maksimum değerine ulaşır.

6.3.2. 5 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin gaz hacim fraksiyonu analizi

Şekil 6.28’de 5 kanallı tam kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları verilmiştir. 0.25 saniyede hücre içinde hidrojen gazı üretilmeye başlar ve dağılım oluşmaya başlar. Maksimum gaz konsantrasyonu bu anda 0.18 seviyelerindedir. Bu seviye hücre içindeki ilk gaz kabarcıklarını temsil etmektedir. 0.85. saniyede hidrojen hücre genelinde en yüksek konsantrasyonuna ulaşır ve hücre içerisinde düzgün bir dağılım gösterir. Gaz konsantrasyonu yüksek seviyelerden düşük olan çıkış manifoldu ve çıkış ağzına doğru ilerlemeye başlar. Kanal boyu $L_{ch}/2$ ve $L_{ch}/3$ olan hücrelerde ise en yüksek gaz konsantrasyonları sırasıyla 0.9 ve 0.85 saniye civarında gerçekleşir. (Şekil 6.28)



Şekil 6. 28. 5 kanallı tam kanal boy lu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları



Şekil 6. 29. 5 kanallı $L_{ch}/2$ ve $L_{ch}/3$ kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları

6.3.3. 5 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin basınç analizi

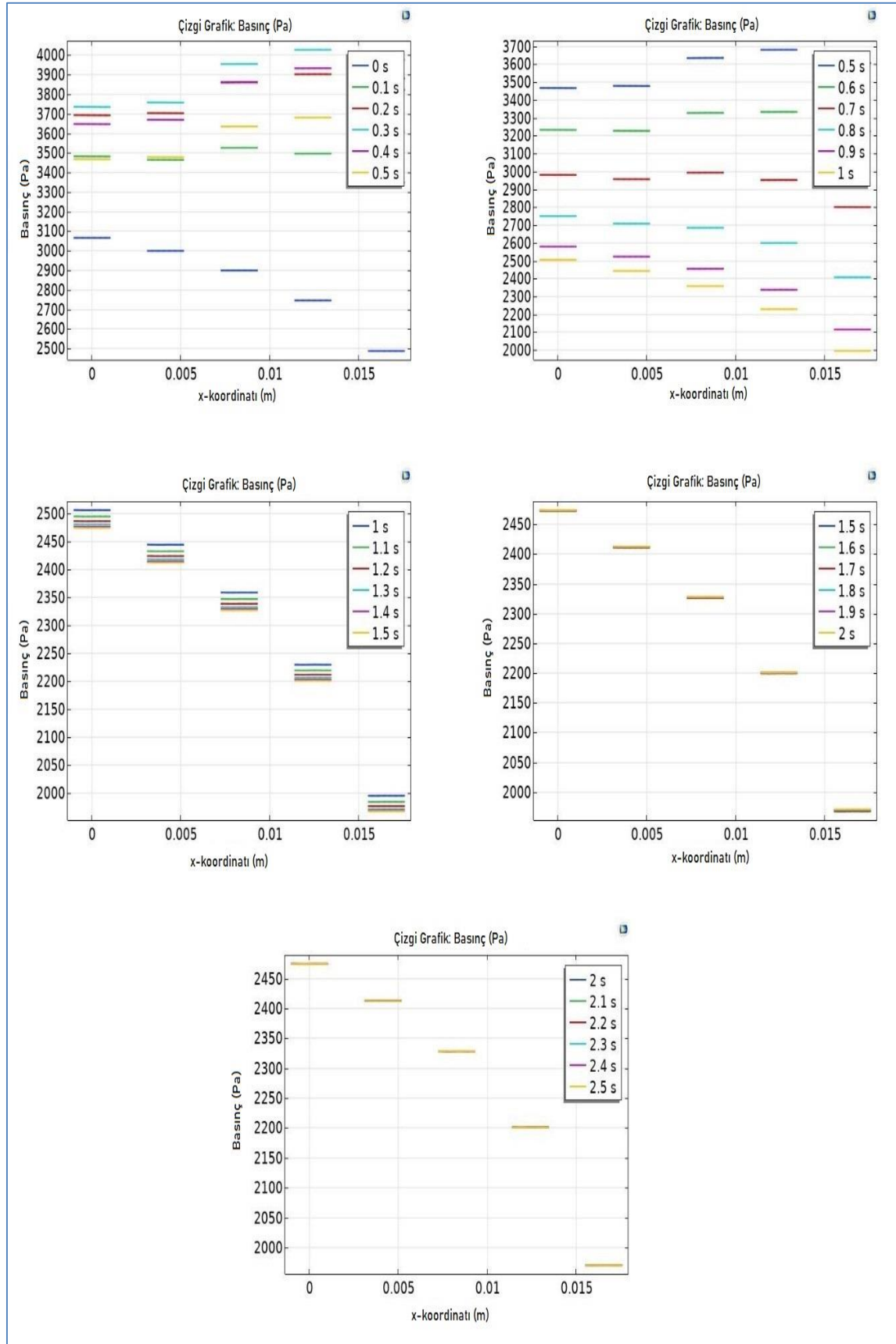
Oluşan basınç dalgalanmaları hücrenin homojen bir performans göstermesinin önüne geçer. Bu çalışmada yapılan analizler sonucunda ilk 2 saniye içerisinde hücre içinde büyük bir basınç dalgalanması olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.30'da 5 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları 0.1 sn aralıklarla gösterilmiştir. İşlem başladığı an 0.3 saniye kadar yükselmiştir. Ardından 1. saniyeye kadar düşmektedir. 0.3. saniye hücre içerisindeki tüm kanallarda basıncın en yüksek olduğu andır.

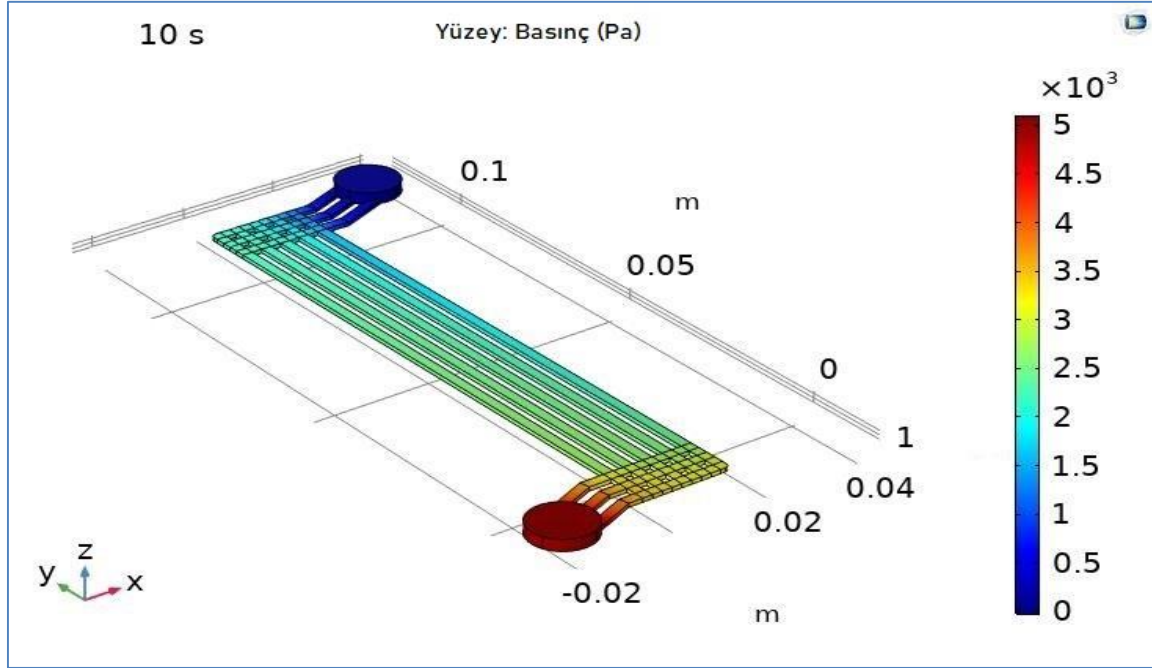
1. saniyeden sonra kanal içi basınç dengesi oluşmaya başlamıştır. 1. saniyeden 1.5. saniyeye kadar basınç küçük bir miktar da olsa düşmeye devam eder. Burada hücre içi basınç dengesinin oluşmaya başladığı ve olgunlaştığı söylenebilir.

Şekil 6.30'un son grafiğine bakıldığında ise 2-2.5 saniye aralığında hücredeki her bir elektroliz kanalının iç basınçlarının bu sürede dengeye ulaştığı görülmüştür. Öyle ki neredeyse tüm konturlar üst üste gelmiştir. Bu süreden sonra simülasyon bitme süresi olan 10. Saniyenin sonuna kadar ise bu tarz bir basınç dalgalanmasına rastlanmamıştır.

İnlet'e yakın olan elektroliz kanallarından uzak olan elektroliz kanallarına doğru hücre içerisindeki basınç kademeli olarak düşmektedir. Şekil 6.31'da bu durum açıkça gözlemlenebilir. Manifoldlar içerisindeki basınç dağılımı ise yine 1. saniyeden sonra dengeye oturmaya başlamıştır.

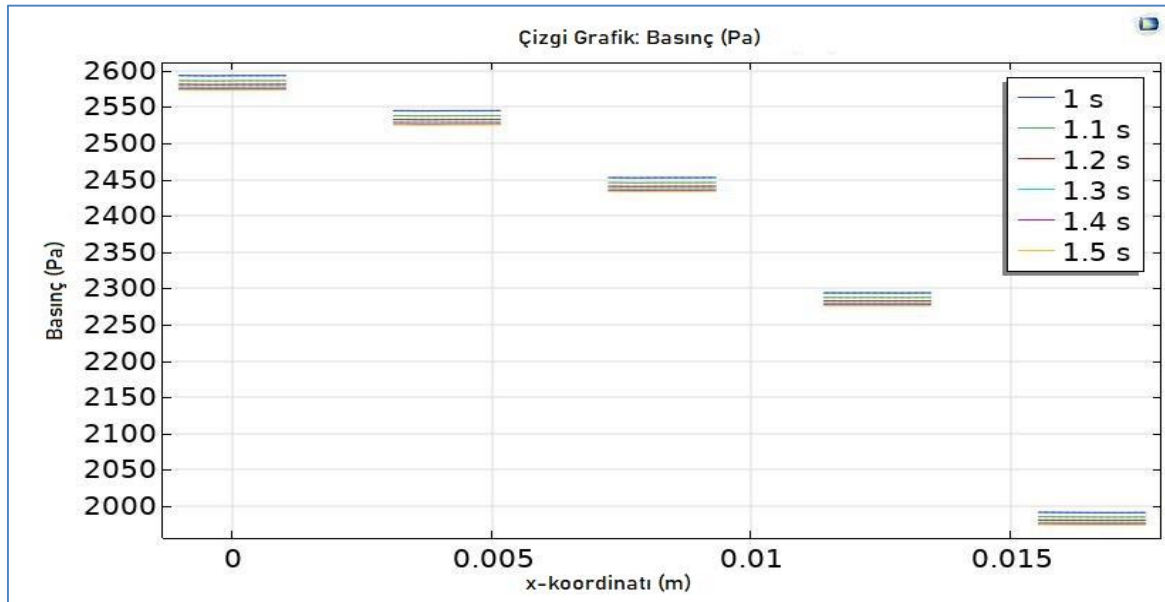


Şekil 6. 30. 5 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları



Şekil 6. 31. Simülasyon sonunda hücrede oluşan basınç dağılımı

$L_{ch}/3$ kanal uzunluğuna sahip hücrede ise başlangıçtan 0.4. saniyeye kadar basınç düşmekte ve ardından 1. saniyeye kadar hızla yükselmektedir. İlk basınç dengesi 4. Kanalda 1. saniyede sağlanmaktadır. 1. saniyeden sonra basınç dengesine ulaşmaktadır. Şekil 6.32’de görülebileceği gibi ilk saniyenin sonunda hücrede basınç dağılımı dengeye ulaşmıştır.



Şekil 6. 32. $L_{ch}/3$ kanal uzunluğuna sahip hücrenin 1-1.5 sn arası basınç dağılımı

Çizelge 6. 6. Birim alanda üretilen hidrojen ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

	Birim Üretilen Hidrojen Miktarı ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)
L_ch	58xE-5
L_ch/2	115xE-5
L_ch/3	175xE-5

Çizelge 6. 7. Birim alanda tüketilen su ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

	Birim Tüketilen Su Miktarı ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)
L_ch	-0.005
L_ch/2	-0.011
L_ch/3	-0.016

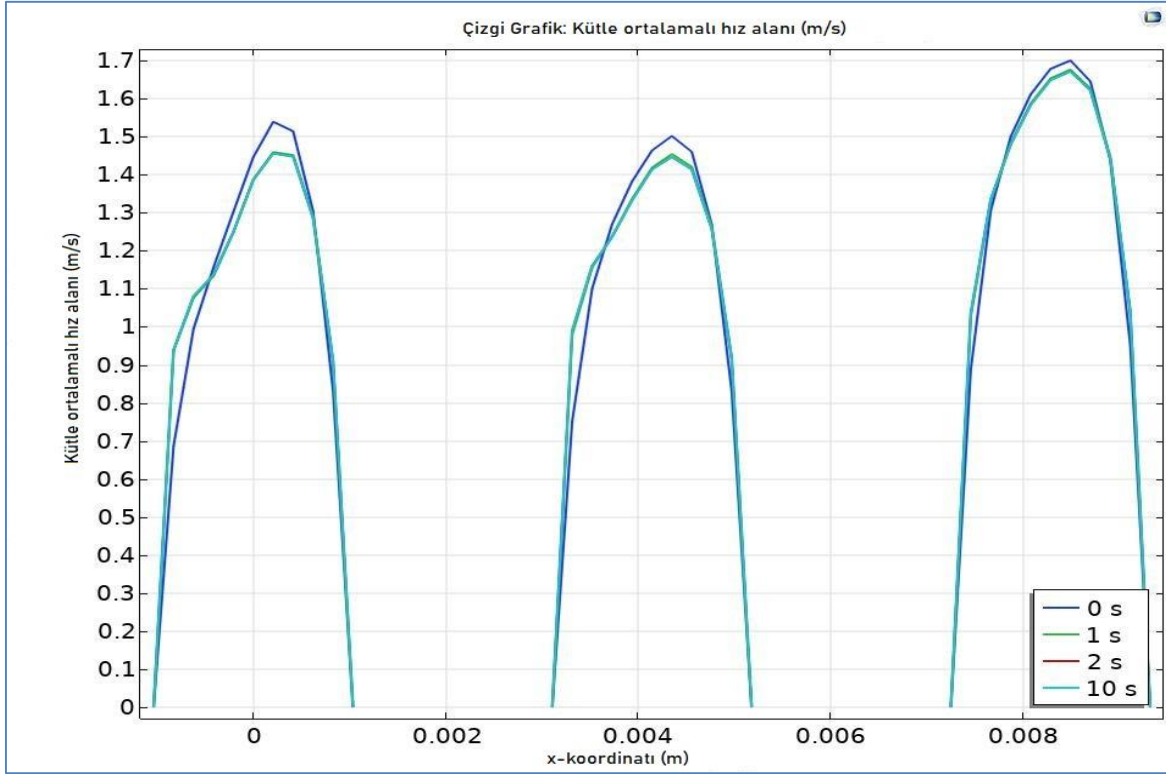
Sabit su debi girişinde kanal boylarına göre birim başı üretilen hidrojen miktarı Çizelge 6.6.'de verilmiştir. Aynı şekilde birim başına tüketilen su miktarı ise Çizelge 6.7.'de gösterilmiştir.

6.4. 3 Kanallı PEM Elektrolizör Hücresinin Analizi

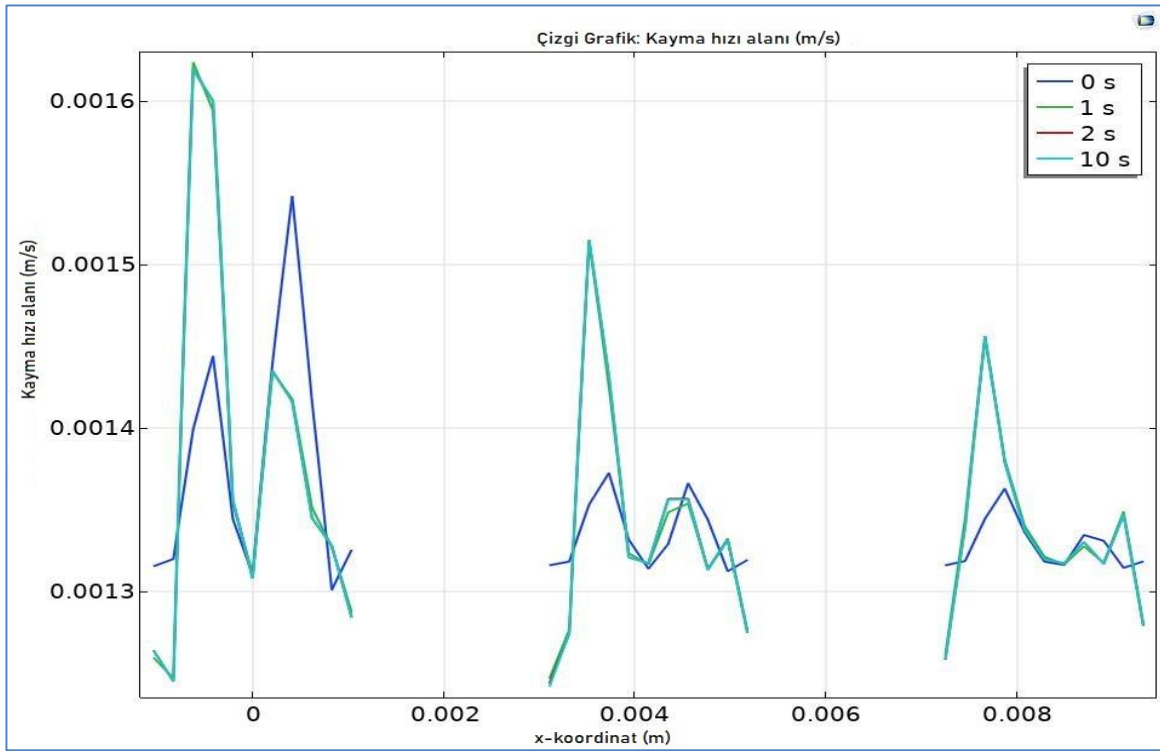
Bu bölümde 3 kanallı PEM elektrolizör hücresinin, kanal uzunlukları farklı olan 3 ayrı geometrisi aynı su girişi debisi ve aynı sıcaklıkta analiz edilmiş ve farklılıkları araştırılmıştır. Analiz edilen 3 kanallı hücrelerin elde edilen çözüm sonucunda içerisinde oluşan hız vektörleri, gaz hacim fraksiyonu ve basınç dalgalanmaları araştırılmıştır.

6.4.1. 3 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin hız analizi

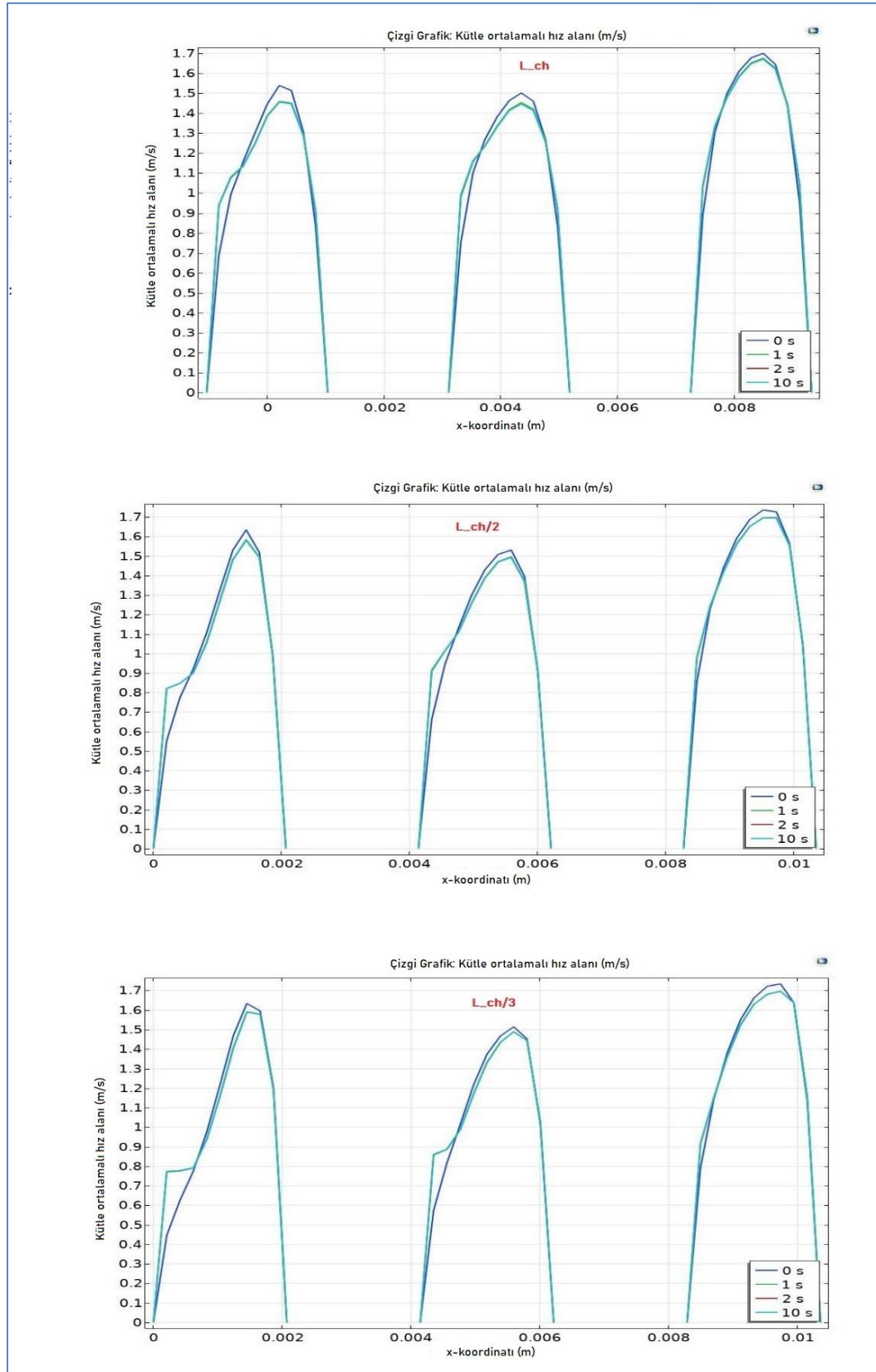
Bu başlık altında 3 kanallı PEM hücrelerinin kanal sayısı değiştikçe bununla beraber değişen akış ve kayma hızları incelenmiştir. Şekil 6.33'de 3 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı değerleri gösterilmiştir.



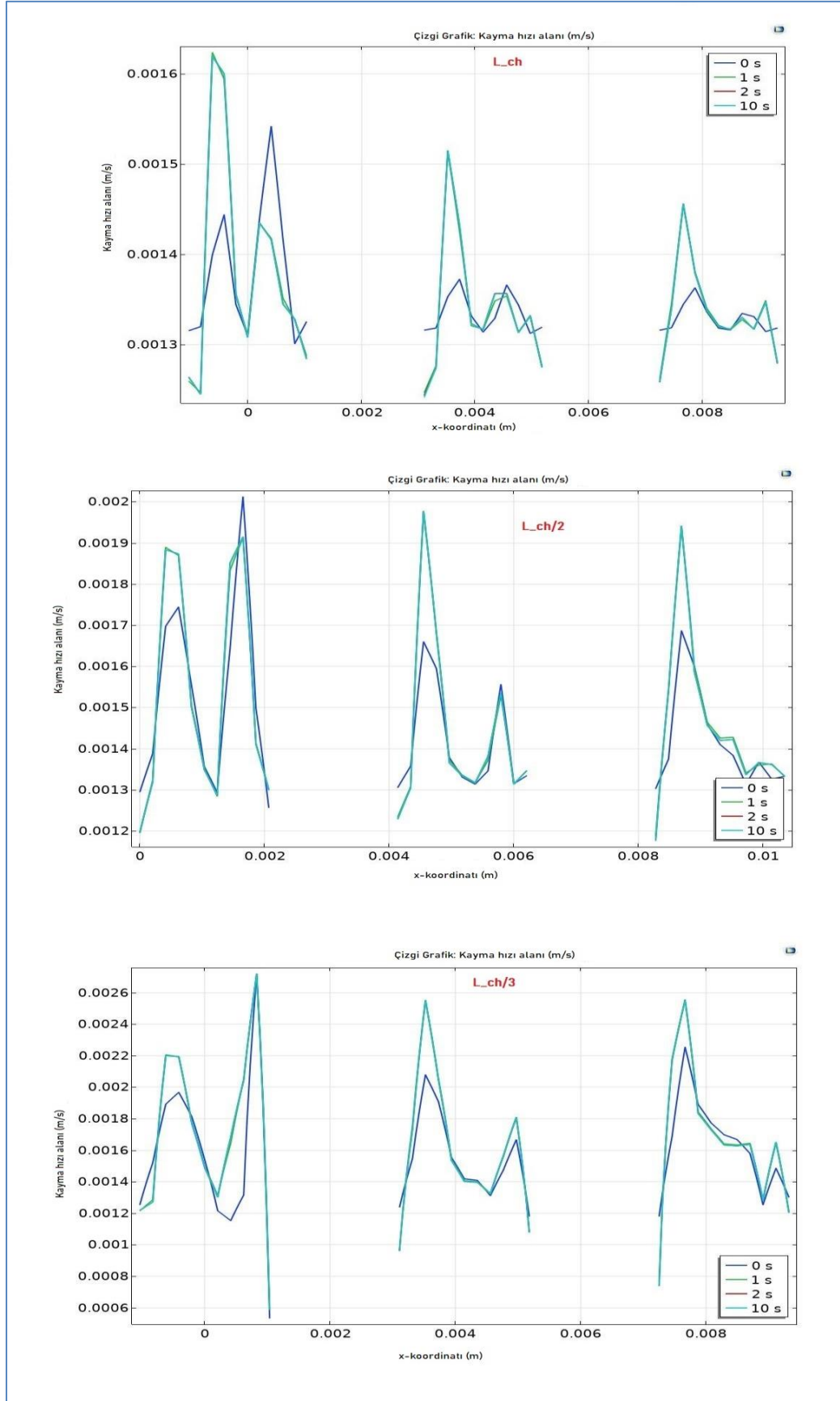
Şekil 6. 33. 3 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı



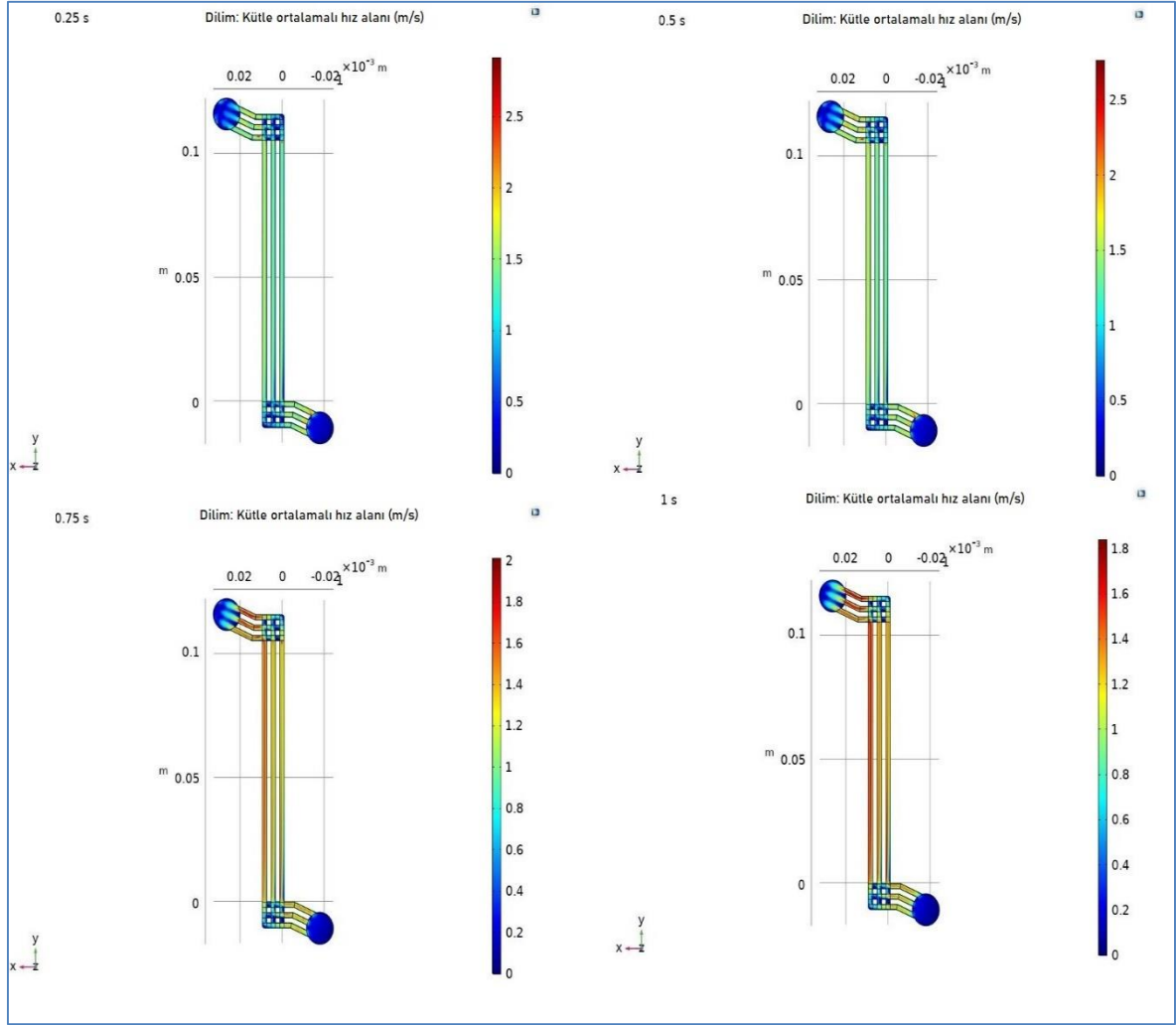
Şekil 6. 34. 3 kanallı tam boy kanal uzunluğundaki hücrenin kütle ortalamalı alan hızı



Şekil 6. 35. 3 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boylu elektrolizör hücresi kütle ortalama hız alanları



Şekil 6. 36. 3 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boyu elektrolizör hücresi kayma alan hızları



Şekil 6. 37. 3 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları

Şekil 6.35’de 3 kanallı L_{ch} , $L_{ch}/2$, $L_{ch}/3$ kanal boylu elektrolizör hücresi kütle ortalamalı alan hızları verilmiştir. Elektroliz kanallarının boylarından bağımsız bir şekilde, hücrenin orta kısımlarındaki hız daha çok kanallı hücrelerde düşüktü. Burada ise tüm kanallarda hız neredeyse aynı seviyelerde. 3. Kanalda hız diğerlerine göre nispeten çok az daha büyüktür. Ayrıca Şekil 6.34’de tek tek kanallardaki akış dağılımının tekdüzeliği açık bir şekilde görülebilmektedir. Ayrıca akış dağılımının 2 ile 10. saniyeleri arasında önemli ölçüde benzer olduğu görülmektedir. Bunun sebebi tam hidrojen üretimi ulaşıldıktan sonra sabit bir akış oluşmuştur. Ayrıca sabit debili sistemde kanal sayısı arttıkça kanal başı düşen sıvı su miktarının artması sebebiyle artan hızlar şekil 6.35’de görülebilmektedir.

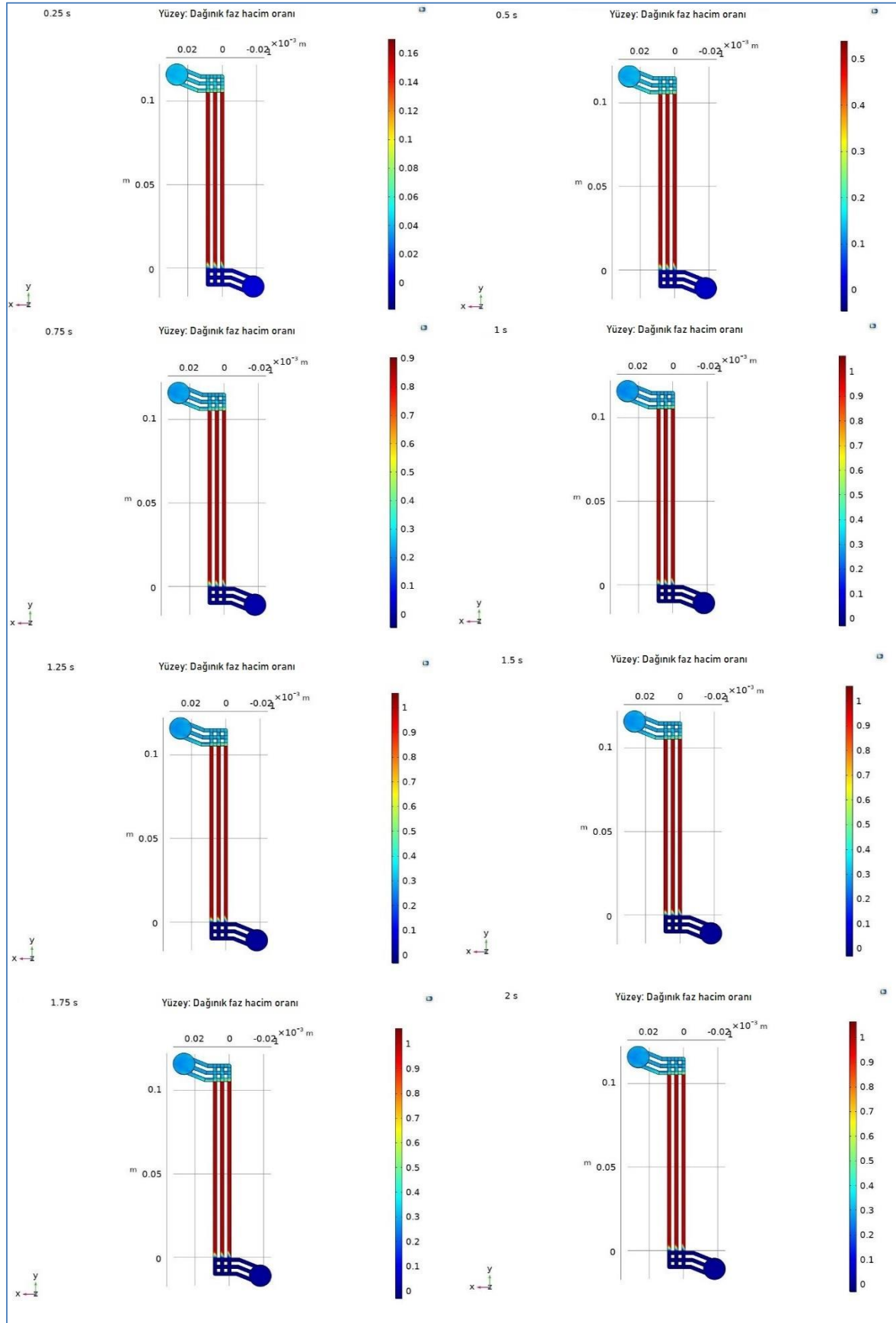
Şekil 6.36’de kayma hızları görülmektedir. Kayma hızlarının 1. saniyede maksimum hıza ulaştığı görülmektedir. Hücrenin en başında yer alan elektroliz kanalında 1.saniyede en yüksek seviyeye gelmiştir. En yüksek kayma hızları 1. sn sonunda gazların ayrışmaya

başlamasıyla beraber ortaya çıktığı söylenebilir. $L_{ch}/2$ ve $L_{ch}/3$ kanal uzunluklu hücrelerde özellikle giriş ağzına en yakın olan ve en uzak olan kanallarda düzensiz ve ani kayma hızı artışları gözlenmektedir.

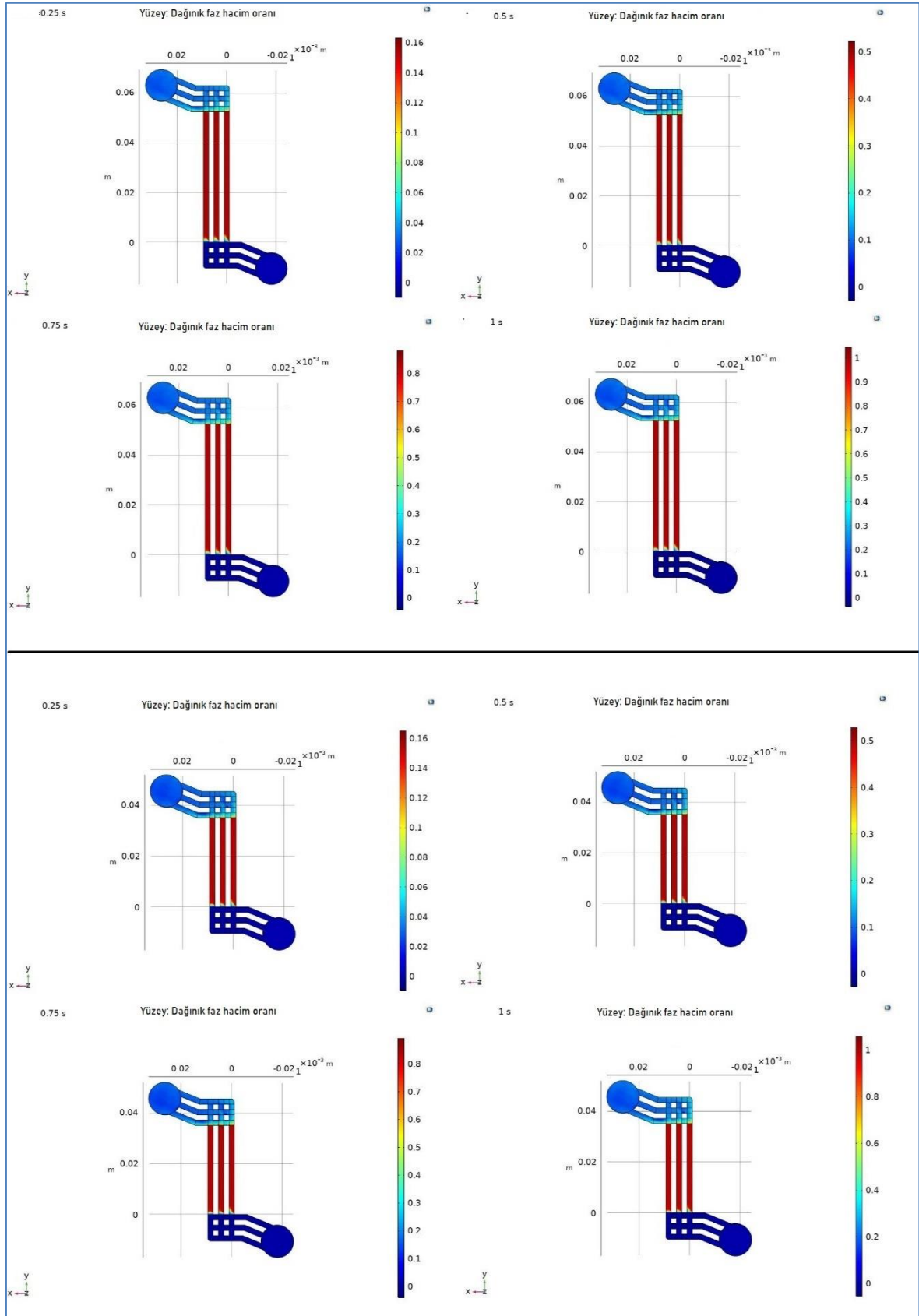
Şekil 6.37’de 3 kanallı tam kanal boylu hücrenin farklı zamanlarda hız konturları verilmiştir. Girişte hız minimum seviyelerdedir. Akış hızı aynı şekilde manifold kısmında da çok azdır. Çünkü manifold kanal aralıkları o kadar küçüktür ki akışın oluşmasına bir olanak yoktur. Kanalların sonunda akış tam gelişmiştir. Ayıca iki faz arasındaki güçlü etkileşim yüzünden manifold kanallarında sürüklenme en büyük değerlerindedir. Çıkış ağzına gelmeden önce kütle ortalamalı hız maksimum değerine ulaşır.

6.4.2. 3 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin gaz hacim fraksiyonu analizi

Şekil 6.38’de 3 kanallı tam kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları verilmiştir. 0.25 saniyede hücre içinde hidrojen gazı üretilmeye başlar ve dağılım oluşmaya başlar. Maksimum gaz konsantrasyonu bu anda 0.18 seviyelerindedir. Bu seviye hücre içindeki ilk gaz kabarcıklarını temsil etmektedir. 0.85. saniyede hidrojen hücre genelinde en yüksek konsantrasyonuna ulaşır ve hücre içerisinde düzgün bir dağılım gösterir. Gaz konsantrasyonu yüksek seviyelerden düşük olan çıkış manifoldu ve çıkış ağzına doğru ilerlemeye başlar. Kanal boyu $L_{ch}/2$ ve $L_{ch}/3$ olan hücrelerde ise en yüksek gaz konsantrasyonları sırasıyla 0.9 ve 0.85 saniye civarında gerçekleşir. (Şekil 6.39)



Şekil 6. 38. 3 kanallı tam kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları



Şekil 6. 39. 3 kanallı $L_{ch}/2$ ve $L_{ch}/3$ kanal boylu hücrenin arka (anot) tarafında oluşan gaz fraksiyonları

6.4.3. 3 kanallı PEM elektrolizör hücrelerinin basınç analizi

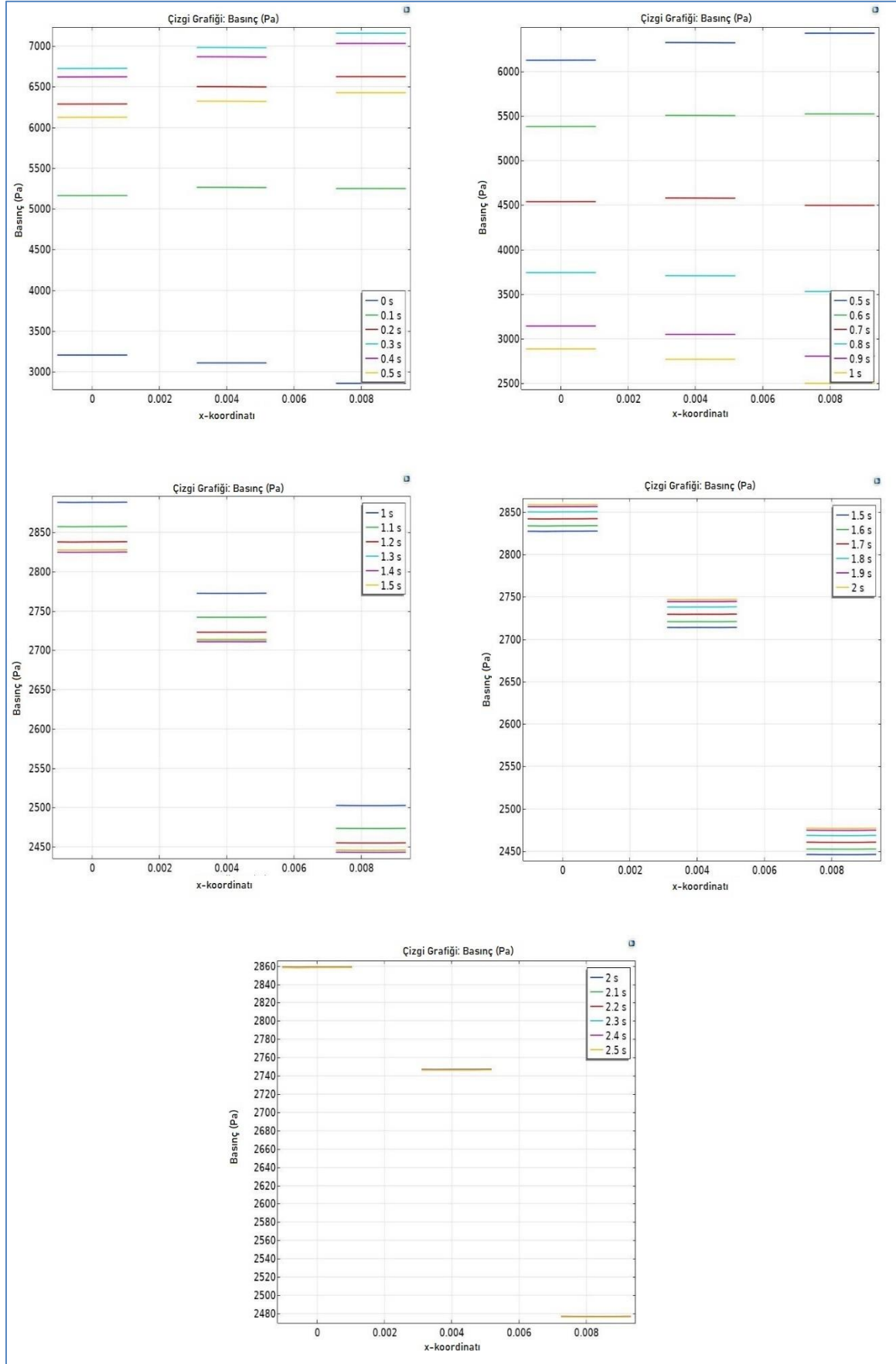
Bu çalışmada yapılan analizler sonucunda hücre içinde basınç dalgalanması olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.40'da 3 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları 0.1 sn aralıklarla gösterilmiştir. İşlem başladığı an 0.3 saniye boyunca basınç yükselmiştir. Ardından 1. saniyeye kadar hızla gerçekleşen bir basınç düşüşü yaşanmıştır. 0.3. saniye hücre içerisindeki tüm kanallarda basıncın en yüksek olduğu andır.

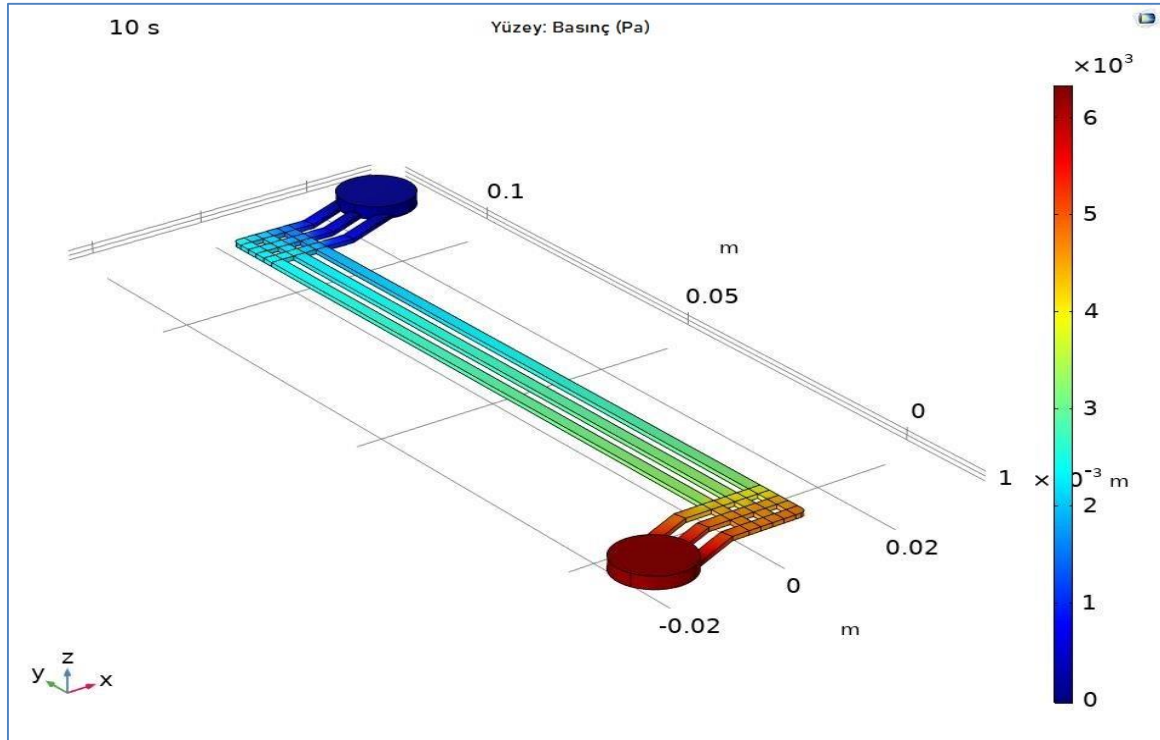
1.saniyeye kadar düşen basınç bu noktadan sonra 1.5. saniyeye kadar küçük de olsa düşmeye devam etmektedir. Bu süre boyunca kanal içi basınç dengesinin oluşmaya ve olgunlaşmaya başladığı söylenebilir.

Şekil 6.39'un son grafiğine bakıldığında ise 2-2.5 saniye aralığında hücredeki her bir elektroliz kanalının iç basınçlarının bu sürede dengeye ulaştığı görülmüştür. Bu süreden sonra simülasyon bitme süresi olan 10. Saniyenin sonuna kadar ise bu tarz bir basınç dalgalanmasına rastlanmamıştır.

Giriş'e yakın olan elektroliz kanallarından uzak olan elektroliz kanallarına doğru hücre içerisindeki basınç kademeli olarak düşmektedir. Şekil 6.41'da bu durum açıkça gözlemlenebilir. Manifoldlar içerisindeki basınç dağılımı ise yine 1. saniyeden sonra dengeye oturmaya başlamıştır.

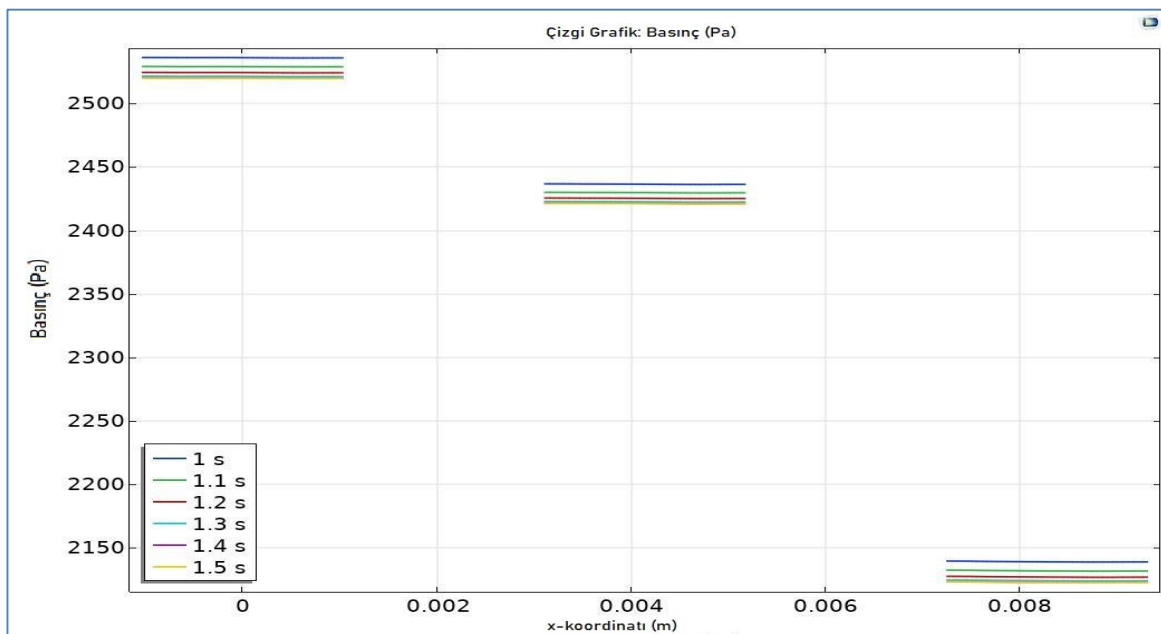


Şekil 6. 40. 5 kanallı tam boy uzunluğundaki hücrenin 0-2.5 sn arası kanal basınçları



Şekil 6. 41. Simülasyon sonunda hücrede oluşan basınç dağılımı

$L_{ch}/3$ kanal uzunluğuna sahip hücrede ise başlangıçtan 0.5. saniyeye kadar basınç düşmekte ve ardından 1. saniyeye kadar hızla yükselmektedir. İlk basınç dengesi 3. Kanalda 1. saniyede sağlanmaktadır. 1. saniyeden sonra basınç dengesine ulaşmaktadır. Şekil 6.42’de görülebileceği gibi ilk saniyenin sonunda hücrede basınç dağılımı dengeye ulaşmıştır.



Şekil 6. 42. $L_{ch}/3$ kanal uzunluğuna sahip hücrenin 1-1.5 sn arası basınç dağılımı

Çizelge 6. 8. Birim alanda üretilen hidrojen ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

	Birim Üretilen Hidrojen Miktarı ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)
L_ch	96xE-5
L_ch/2	190xE-5
L_ch/3	280xE-5

Çizelge 6. 9. Birim alanda tüketilen su ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

	Birim Tüketilen Su Miktarı ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)
L_ch	-0.0085
L_ch/2	-0.0170
L_ch/3	-0.0258

6.5. Tartışma

Tez için yapılan bu 12 analizde 3,5,10,23 kanallı, L_ch, L_ch/2, L_ch/3 kanal uzunluğuna sahip PEM hücresi için basınç, kütle ortalamalı hız ve gaz hacim fraksiyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır.

23 kanallı hücrede başlangıç anından itibaren ilk 2 saniye içerisinde büyük bir basınç dalgalanması olduğu gözlemlenmiştir. Önce azalıp ardından büyük bir hızla 0.8. saniyeye kadar 8000 Pa'a kadar artan basınç yine aniden 1.4. saniyeye kadar -1400 Pa'a kadar düşer. 1.3-1.5 saniye aralığında tüm kanallarda negatif basınç görülmüştür. 2. Saniyeden sonra ise hücrede basınç dengesi oluşmuştur.

10 kanallı hücredeki basınç dalgalanmasına bakılırsa başlangıçtan itibaren 0.4. saniyeye kadar düşen iç basınç 1. saniyeye kadar artmış ve 1. saniyeden sonra hücre içi basınç dengesinin sağlandığı görülmektedir. Yine 5 kanallı hücre incelendiğinde reaksiyon başlar başlamaz 23 kanallı ve 10 kanallı hücrelerdeki basınç düşüşünün aksine 0.3. saniyeye kadar basınç artmış, daha sonra 1. saniyeye kadar düşmüş ve 1. saniyeden itibaren hücre içi basınç dengesi oluşmuştur. Son olarak 3 kanallı hücre incelendiğinde 5 kanallı hücredeki gibi reaksiyon başlar başlamaz 0.3. saniyeye kadar basınç artmış, ardından 1. saniyeye kadar basınç düşmüş ve buradan itibaren denge sağlanmıştır. Buradan kanal sayısı azaldıkça, aynı debi girişli sistemlerde basınç dengesinin daha erken sağlandığını ve basınç aralıklarının

daha düzgün olduğu söylenebilir.

23 kanallı hücrenin kanal boyu üçte birine düşürüldüğünde ise 0.4. saniyeye kadar düşen basınç bu noktadan sonra artıyor. Minimum basıncı görme zamanı tam kanal boylu hücrede ise 0.2 saniye idi. 0.4. saniyeden 1. Saniyeye çıkan basınç burada maksimum değerine ulaşıyor. Bu tam kanal boylu hücrede ise 0.8. saniyede gerçekleşiyordu. 1 ile 1.5 saniye arası negatif basınca kadar ani düşüş yaşayan tam boylu hücreye göre boyu üçte birine düşürülmüş hücrede bu aralıkta basınç dengesinin neredeyse oluştuğu gözlenmektedir.

Simülasyon başlangıç anında ilk kanallardaki en büyük basınç 4500 Pa ile 23 hücreli hücreye aittir. Kanal sayısı düştükçe bu basınç 10 hücreli hücrede %25.56 azalarak 3350 Pa olmuştur. 5 kanallı hücrede ise %32.2 azalarak 3050 Pa olarak ölçülmüştür. 3 kanallı hücrede ise %30 azalarak 3150 Pa olarak ölçülmüştür.

23 kanallı hücrede başlangıç basıncı 4500 Pa iken, kanal boyları yarıya düşürüldüğünde basınç %4,48 azalarak 3200 Pa'a, kanal boyları üçte birine düşürüldüğünde ise basınç değeri yaklaşık %7,78 azalarak 4150 Pa'a inmiştir.

10 kanallı hücrede başlangıç basıncı 3350 Pa iken, kanal boyları yarıya düşürüldüğünde basınç %7.33 azalarak 4170 Pa'a, kanal boyları üçte birine düşürüldüğünde ise basınç değeri yaklaşık %7,46 azalarak 3100 Pa'a inmiştir.

5 kanallı hücrede başlangıç basıncı 3050 Pa iken, kanal boyları yarıya düşürüldüğünde basınç %8,85 azalarak 2780 Pa'a, kanal boyları üçte birine düşürüldüğünde ise basınç değeri yaklaşık %11,8 azalarak 2690 Pa'a inmiştir.

3 kanallı hücrede başlangıç basıncı 3150 Pa iken, kanal boyları yarıya düşürüldüğünde basınç %12,38 azalarak 2760 Pa'a, kanal boyları üçte birine düşürüldüğünde ise basınç değeri yaklaşık %17,46 azalarak 2600 Pa'a inmiştir. Bu bilgiler ışığında hücrede başlangıç basıncı düşürmek isteniyorsa kanal boyunu kısaltmak yardımcı olacaktır.

23 kanallı hücrede tepkime başladığı anda giriş ağzına en yakın elektroliz hücresinde kütle ortalamalı hız 0,48 m/sn iken, kanal boyu yarıya düşürüldüğünde hız 0,65 m/sn'ye yükselmiş, kanal boyu üçte birine düşürüldüğünde ise 0,78 m/sn'ye yükselmiştir. Kanal

boyu fark etmeksizin tüm hücrede hız vektörleri orta kısımda bulunan 10 ve 16. kanallarda oldukça düşüktür. Ayrıca hız vektörlerinin değerleri hücrenin giriş ağzı kısmından ortasına kadar (13. Kanal) düzenli bir şekilde düşmekte ve buradan sonra son kanala kadar düzenli şekilde artmaktadır.

10 kanallı hücrede tepkime başladığı anda giriş ağzına en yakın elektroliz hücresinde kütle ortalamalı hız 0,53 m/sn iken, kanal boyu yarıya düşürüldüğünde hız 0,68 m/sn'ye yükselmiş, kanal boyu üçte birine düşürüldüğünde ise 0,80 m/sn'ye yükselmiştir. Kanal boyu fark etmeksizin tüm hücrede hız vektörleri orta kısımda bulunan 5 ve 6. kanallarda en düşük seviyelerdedir. Ayrıca hız vektörlerinin değerleri hücrenin giriş ağzı kısmından ortasına kadar düzenli bir şekilde düşmekte ve buradan sonra son kanala kadar düzenli şekilde artmaktadır. Hücrede analiz boyunca görülen en yüksek hız tepkime başlangıcında hücre giriş ağzına en uzak olan elektroliz kanalında gerçekleşmiştir.

5 kanallı hücrede tepkime başladığı anda giriş ağzına en yakın elektroliz hücresinde kütle ortalamalı hız 0,89 m/sn iken, kanal boyu yarıya düşürüldüğünde hız 1 m/sn'ye yükselmiş, kanal boyu üçte birine düşürüldüğünde ise 1,1 m/sn'ye yükselmiştir. Kanal boyu fark etmeksizin tüm hücrede hız vektörleri orta kısımda bulunan 3. kanalda en düşük değere sahiptir. Ayrıca hız vektörlerinin değerleri hücrenin giriş ağzı kısmından ortasına kadar (3. Kanal) düzenli bir şekilde düşmekte ve buradan sonra son kanala kadar düzenli şekilde artmaktadır.

3 kanallı hücrede tepkime başladığı anda giriş ağzına en yakın elektroliz hücresinde kütle ortalamalı hız 1,53 m/sn iken, kanal boyu yarıya düşürüldüğünde hız 1,62 m/sn'ye yükselmiş, kanal boyu üçte birine düşürüldüğünde ise 1,65 m/sn'ye yükselmiştir. Kanal boyu fark etmeksizin tüm hücrede hız vektörleri birbirlerine çok yakın değerlere sahiptir.

23 kanallı hücrenin tam boy kanal uzunluğuna sahip modeline bakıldığında, birim hidrojen üretim miktarı $0,00013 \text{ kg/(m}^2\text{*s)}$ iken, kanal boyu yarıya indirildiğinde bu değer %92,31 artarak $0,00025 \text{ kg/(m}^2\text{*s)}$ 'ye, kanal boyu üçte birine indirildiğinde ise bu değer %188,46 artarak $0,000375 \text{ kg/(m}^2\text{*s)}$ 'e yükselmiştir.

10 kanallı hücrenin tam boy kanal uzunluğuna sahip modeline bakıldığında, birim hidrojen üretim miktarı $0,00029 \text{ kg/(m}^2\text{*s)}$ iken, kanal boyu yarıya indirildiğinde bu değer %132

artarak $0,00058 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 'ye, kanal boyu üçte birine indirildiğinde ise bu değer %264 artarak $0,000375 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 'e yükselmiştir.

5 kanallı hücrenin tam boy kanal uzunluğuna sahip modeline bakıldığında, birim hidrojen üretim miktarı $0,00055 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ iken, kanal boyu yarıya indirildiğinde bu değer %118 artarak $0,00120 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 'ye, kanal boyu üçte birine indirildiğinde ise bu değer %218,18 artarak $0,00175 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 'e yükselmiştir.

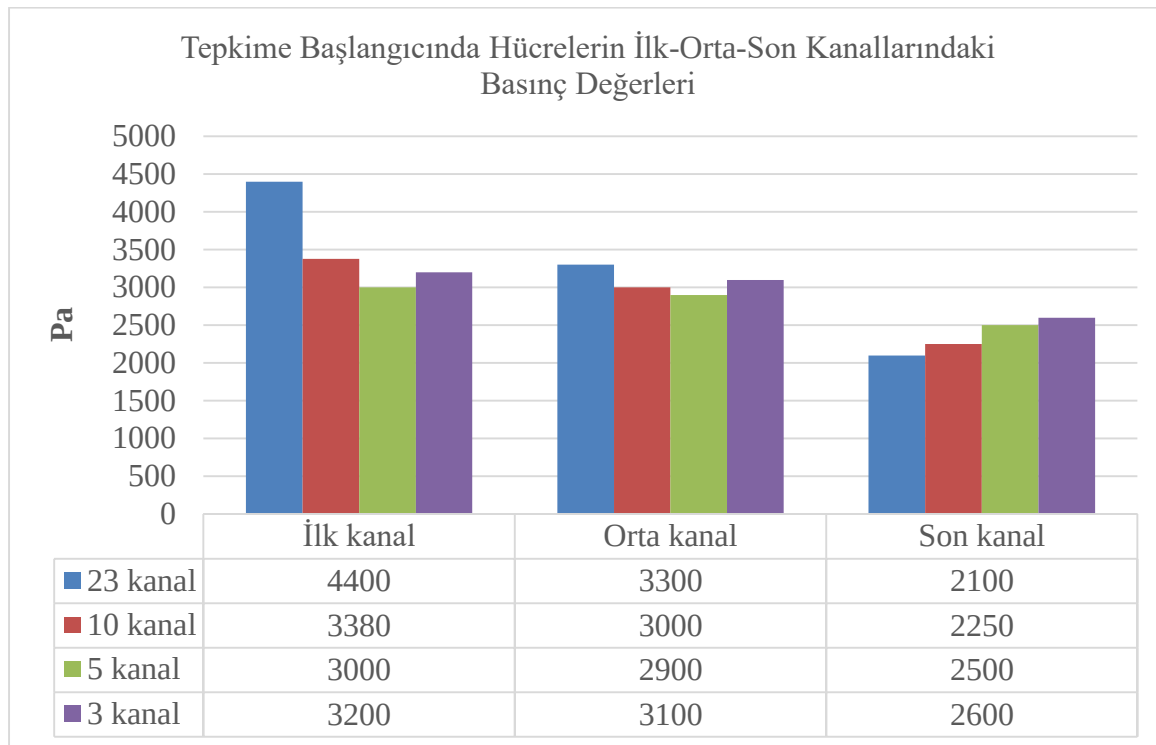
3 kanallı hücrenin tam boy kanal uzunluğuna sahip modeline bakıldığında, birim hidrojen üretim miktarı $0,00096 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ iken, kanal boyu yarıya indirildiğinde bu değer %97,92 artarak $0,00190 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 'ye, kanal boyu üçte birine indirildiğinde ise bu değer %191,67 artarak $0,00280 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 'e yükselmiştir.

Kayma hızları gösterilen şekiller incelendiğinde (Şekil 6.6, Şekil 6.15, Şekil 6.24, Şekil 6.34), aynı su debisi girişli hücrelerde kanal sayısı azaldıkça hücre içinde kayma hızlarını gösteren konturlar git gide birbirine yaklaşmaktadır ve daha dengeli bir hal almaktadır.

Hücrelerdeki hacim fraksiyonlarına bakıldığında ise kanal sayısı fark etmeksizin bütün hücre tiplerinde tam kanal boyunda hacim fraksiyonu en yüksek değerine 1. saniyede ulaşıyor. Yine kanal sayısından bağımsız bir şekilde kanal hücresi boyu düşürüldüğünde en yüksek fraksiyon değeri zamanı, tam elektroliz kanalı boyu hücrelere göre 0.15 saniye daha kısa sürede gerçekleşiyor.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir PEM elektrolizör hücresinin, 4 farklı kanal sayısında ve 3 farklı kanal boyunda olan toplam 12 adet PEM geometrisinin, COMSOL Multiphysics paket programı kullanılarak HAD (CFD) analizi yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarına göre hücrelerin gaz hacim fraksiyonları, hız kontürleri, hücre içi basınç dağılımları, birim hidrojen üretim değerleri yorumlanmıştır.

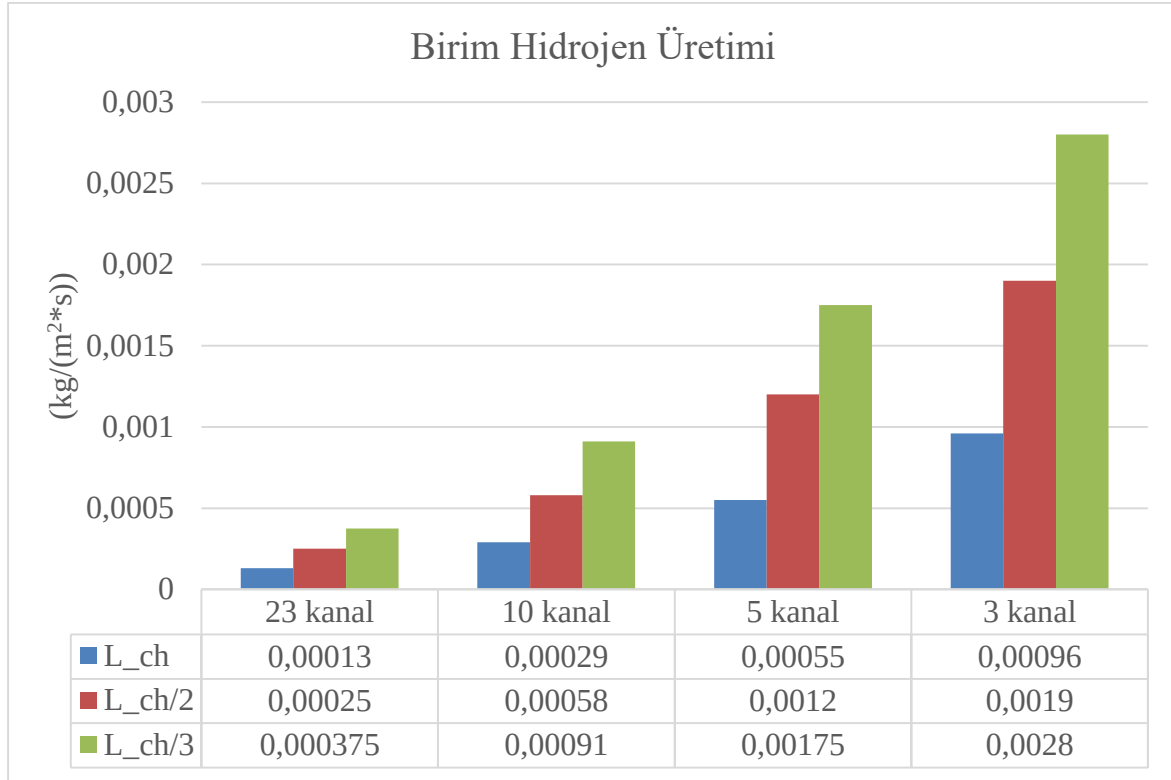


Şekil 7. 1. Tepkime Başlangıcında Hücrelerin İlk-Orta-Son Kanallarındaki Basınç Değerleri

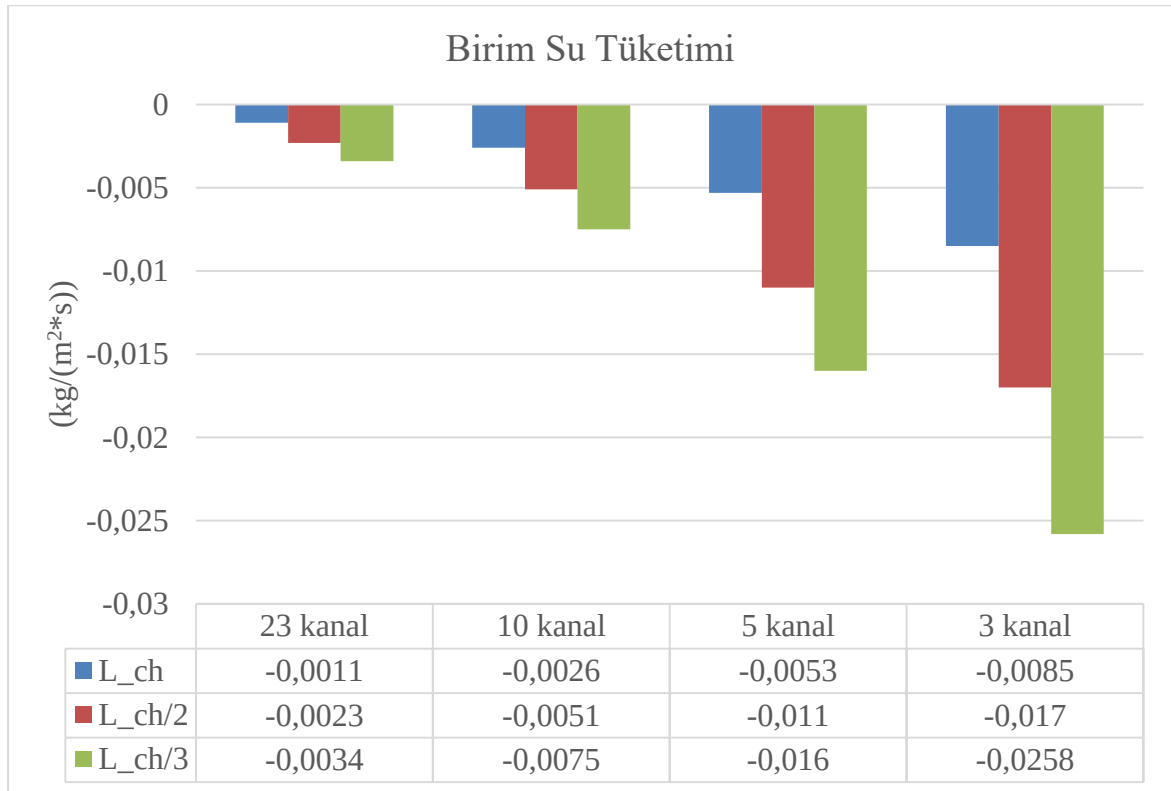
- Başlangıç basınç değeri 23 kanaldan 10 ve 5 kanallı hücreye kadar düzenli olarak düşmüştür ama 3 kanallı hücredeki başlangıç basıncı 5 kanallıya göre fazladır. Burada kanal sayısını düşürmek başlangıçtaki manifold basıncını azaltmaya yardımcı olduğu söylenebilir.
- Hücre içinde oluşan basınç dalgalanmalarının hücre sağlığı açısından minimum seviyelerde olması istenir. 23 kanallı hücrede 2. Saniyeye kadar büyük bir basınç dalgalanması görülmektedir. Hücre 2. Saniye sonrası kanal içi basınç dengesini sağlamıştır. 10, 5 ve 3 kanallı hücrelerde ise 1. Saniye sonunda elektroliz kanalları iç basıncının sağlandığını görülmektedir. Bu durumda kanal sayısının düşürülmesi kanal iç

basınç dengesinin daha kısa sürede oluşmasına yardımcı olduğu söylenebilir.

- Aynı debide gerçekleşen simülasyonlarda elektroliz kanal sayısı arttıkça kanal başına düşen sıvı su miktarı azalmaktadır. 23 kanallı hücrede birim elektroliz kanalı başına düşen sıvı su miktarı en az olduğundan burada gerçekleşen faz değişimi diğer kanal sayılı hücrelere göre daha hızlı olduğundan hücre içi negatif basınçlar ortaya çıkmaktadır. 23 kanallı hücredeki şiddetli basınç dalgalanması esnasında 1.3-1.5 saniye aralığında tüm elektroliz kanallarında negatif basınç görülmektedir. 10, 5 ve 3 kanala sahip hücrelerde ise hiçbir zaman elektroliz kanallarında negatif basınç görülmemektedir. Bu durumda hücrede oluşabilecek basınç dalgalarının şiddetini ve negatif basınç durumunun önüne geçilebilmesi için, kanal sayısının düşürülmesinin yardımcı olduğu gözlenmiştir.
- Kanal sayısı fark etmeksizin, simülasyon başladığı andan itibaren basınç giriş ağzına en yakın olan elektrolizör kanalından en uzak olan elektrolizör kanalına doğru lineer olarak düşer. 0.1. saniyeden sonra kanalların arasındaki basınç oranı lineer olmaktan çıkar. İlk elektroliz hücresinde basınç, kanal sayısı düştükçe azalır ancak 3 kanallı hücrenin ilk elektroliz kanalındaki basınç 5 kanallı hücrenin ilk kanalından daha fazladır. Kanal sayısı azaltılması manifoldun giriş basıncının düşürülmesine, çıkış basıncının ise artmasına neden olur.



Şekil 7. 2. Hücrelerin kanal sayıları ve kanal uzunluklarına göre birim hidrojen üretim değerleri



Şekil 7. 3. Hücrelerin kanal sayıları ve kanal uzunluklarına göre birim su tüketim değerleri

- Aynı kanal sayısına sahip hücrenin elektroliz kanal uzunluklarının artırılması birim hidrojen üretim miktarının azalmasına ve daha az birim su tüketimine sebep olmaktadır.
- Aynı kanal uzunluğuna sahip hücrelerin elektroliz kanal sayısı artırılması birim hidrojen üretim miktarının azalmasına ve daha az birim su tüketimine sebep olmaktadır.
- Elektroliz kanal uzunluklarının azaltılması hücrenin giriş ve çıkış noktaları arasındaki mesafeyi azaltır ve bununla beraber sıvı haldeki suyun hidrojen gazına dönüştürülmesi hızı artar ve kanalların içerisinde daha fazla gaz kabarcığının üretilmesine neden olur.

Her geçen gün daha fazla hükümet, daha fazla kuruluş karbondan arınma strateji ve planlarına destek olduğunda hidrojenin önemi daha da fazla artacaktır. Bu yönden hidrojenin baştan sona kadar düşük karbonlu yani yeşil hidrojen olarak üretilmesi gerekmektedir. Bütün yönetmelikler ve eksikliklere ek olarak yeşil hidrojenin önündeki en büyük engel hala üretim maliyetlerinin diğer rakiplerine göre oldukça yüksek olmasıdır. Rekabetçi bir yeşil hidrojen imalatı için düşük elektrik maliyetinin yanı sıra elektrolizör tasarım maliyetlerinde de tasarruf yapılması gerekmektedir.

Bu noktada elektrolizör tasarımı, boyutu üretim ve geliştirme maliyetleri üzerinde çok önemli bir konudur. Optimum sistem tasarımı, verimlilik ve esneklik gibi yönlerden genel performansı iyileştirerek yeşil hidrojen maliyetini düşürüp ve temiz enerjiye geçiş için oldukça önemlidir. Elektrolizör hücrelerinin tasarımıyla ilgili yapılacak çalışmalar tüm bu mali zorluklar karşısında, yeşil hidrojen üretiminde olan engelleri zamanla kaldıracaktır.

Bu tez çalışmasında 206 ml/dk sabit bir sıvı su girişi ve 0.625 mg/sn hidrojen üretimi olan bir PEM hücresinin, kanal boyu ve kanal sayısı değiştirilerek HAD (CFD) analizi yapılmıştır. Yeşil hidrojen üretiminde en önemli faktörlerden biri olan birim hidrojen üretim maliyetini, çeşitli tasarım parametreleri aracılığı ile inceleyip bu parametrelerinin üretim üzerine etkileri konusunda literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Oak Ridge National Laboratory, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Scripps Institute of Oceanography CO₂ program, and the U.S. Energy Information Administration, Web: <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/home.html> Erişim Tarihi: 15.10.2022
2. Crippa, M., Guizzardi, D., Banja, M., Solazzo, E., Muntean, M., Schaaf, E., Pagani, F., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Grassi, G., Rossi, S., Jacome Felix Oom, D., Branco, A., San-Miguel-Ayanz, J. and Vignati, E., CO₂ emissions of all world countries- 2022 Report, *Publications Office of the European Union*, Luxembourg, 35-60.
3. İnternet: TÜİK, “Sera Gazı Emisyon İstatistikleri (2022, Mart). Haber Bülteni, Sayı:45862, Web: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2020-45862>. Erişim Tarihi: 05.12.2022
4. Jianhu Nie, Yitung Chen (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.
5. Yang Jia, Ming Zeng, Pouya Barnoon, and Davood Toghraie. (2021). CFD simulation of time-dependent oxygen production in a manifold electrolyzer using a two-phase model, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 126(9), 105446.
6. Yifan Xu, Guobin Zhang, Lizhen Wu, Zhiming Bao, Bingfeng Zu, and Kui Jiao. (2021). A 3-D multiphase model of proton exchange membrane electrolyzer based on open-source CFD, *Digital Chemical Engineering*, 1, 100004.
7. Alhassan Salami Tijani, Danial Barr, and A.H. Abdol Rahim. (2015). Computational Modelling of the Flow Field of An Electrolyzer System using CFD, *Energy Procedia*, 79, 195-203.
8. L. Vázquez, A. Alvarez-Gallegos, F.Z. Sierra, C. Ponce de León, and F.C. Walsh. (2010) Simulation of velocity profiles in a laboratory electrolyser using computational fluid dynamics, *Electrochimica Acta*, 55(10), 3437-3445.
9. Mukesh Upadhyay, Ayeon Kim, SalaiSargunan S. Paramanantham, Heehyang Kim, Dongjun Lim, Sunyoung Lee, Sangbong Moon, and Hankwon Lim. (2022). Three-dimensional CFD simulation of proton exchange membrane water electrolyser: Performance assessment under different condition, *Applied Energy*, 306(PartA), 118016.
10. F. Aubras, J. Deseure, J.-J.A. Kadjo, I. Dedigama, J. Majasan, B. Grondin-Perez, J.-P. Chabriat, and D.J.L. Brett. (2017). Two-dimensional model of low-pressure PEM electrolyser: Two-phase flow regime, electrochemical modelling and experimental validation, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42(42), 26203-26216.

11. Ahmed Khouya. (2021). Hydrogen production costs of a polymer electrolyte membrane electrolysis powered by a renewable hybrid system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27),14005-14023
12. F.N. Khatib, Tabbi Wilberforce, James Thompson, and A.G. Olabi. (2021). Experimental and analytical study of open pore cellular foam material on the performance of proton exchange membrane electrolyzers, *International Journal of Thermofluids*, 9, 100068.
13. Mukesh Upadhyay, Sunggeun Lee, Seokjoo Jung, Yunki Choi, Sangbong Moon, and Hankwon Lim. (2020). Systematic assessment of the anode flow field hydrodynamics in a new circular PEM water electrolyser, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(41), 20765-20775.
14. Ambrož Kregar, Gregor Tavčar, Andraž Kravos, and Tomaž Kutrašnik. (2019). Predictive virtual modelling framework for performance and platinum degradation modelling of high temperature PEM fuel cells, *Energy Procedia*, 158, 1817-1822.
15. Alhassan Salami Tijani, Danial Barr, and A.H. Abdol Rahim. (2015). Computational Modelling of the Flow Field of An Electrolyzer System using CFD, *Energy Procedia*, 79,195-203.
16. S. Toghyani, E. Afshari, E. Baniasadi, S.A. Atyabi, and G.F. Naterer. (2018). Thermal and Electrochemical Performance Assessment of a High Temperature PEM Electrolyzer, *Energy*, 15.
17. F. Hashemi, S. Rowshanzamir, and M. Rezakazemi. (2012). CFD simulation of PEM fuel cell performance: Effect of straight and serpentine flow fields, *Mathematical and Computer Modelling*, 55(3–4), 1540-1557.
18. İnternet: International Renewable Energy Agency. (December, 2021). Hydrogen. Web: [https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen#:~:text=Global%20production%20stands%20at%20around,\(not%20an%20energy%20source\)](https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen#:~:text=Global%20production%20stands%20at%20around,(not%20an%20energy%20source)). Erişim Tarihi: 12.11.2022
19. Dincer, I. and Zamfirescu, C. (2016). Sustainable hydrogen production (First edition). Boston: *Elsevier*, 145-170.
20. Dincer I, Eroğlu I, Öztürk M, (2021), Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası, İstanbul, 13-14.
21. Qualifying Explanatory Statement for PAS 2060, (2021) Declaration of Achievement to Carbon Neutrality, 12-19.
22. İnternet: World Economic Forum. (December, 2021). What is green hydrogen and why do we need it? An expert explains. Web: <https://www.weforum.org/agenda/2021/12/what-is-green-hydrogen-expert-explains-benefits/>. Erişim Tarihi: 03.11.2022

23. R. Scita, P. Raimondi, M. Noussan, (2020). “Green Hydrogen: the Holy Grail of Decarbonisation? An analysis of the technical and geopolitical implications of the future hydrogen economy”, *Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM)*
24. International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022), Green hydrogen for industry: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 60-80.
25. International Energy Agency (IEA) (2021), Key World Energy Statistics (KWES), Glasgow, 159-185.
26. Bloomberg New Energy Finance (BNEF) (2020), Hydrogen Economy Outlook, 23.
27. International Energy Agency (IEA), (2019), The Future of Hydrogen: seizing today’s opportunities, Paris, 33.
28. International Energy Agency (IEA), (2019), “The Future of Hydrogen: seizing today’s opportunities”, Paris, 154.
29. International Renewable Energy Agency (IRENA) (2020), “Renewable Power Generation Costs in 2019”, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 145.
30. Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., and Kolb, T. (2016). Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*, 85.
31. Dincer I, Javani N, Sorgulu F, and Ozturk M. (2021), Türkiye’de Yeşil Hidrojen Üretilip Doğal Gazla Karıştırılması Çalışmaları, İstanbul, 16.
32. Genç, Ö. , Kallioğlu, M. A. (2018). "Proton Elektrolit Membranlı (PEM) Elektrolizörün Sayısal İncelenmesi Ve Deneysel Doğrulanması" . *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (2018): 370-380



Gazili olmak ayrıcalıktır